

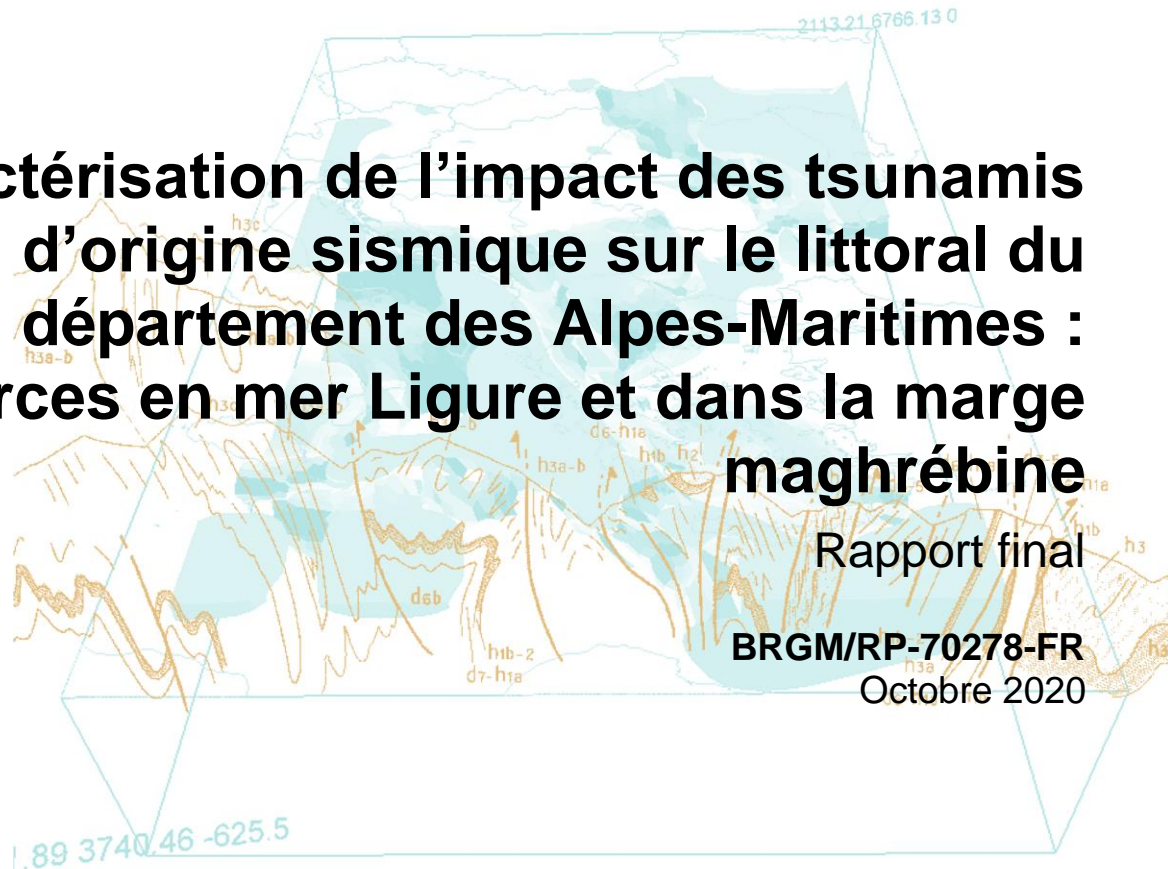


Caractérisation de l'impact des tsunamis d'origine sismique sur le littoral du département des Alpes-Maritimes : sources en mer Ligure et dans la marge maghrébine

Rapport final

BRGM/RP-70278-FR

Octobre 2020



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Caractérisation de l'impact des tsunamis d'origine sismique sur le littoral du département des Alpes-Maritimes : sources en mer Ligure et dans la marge maghrébine

Rapport final

BRGM/RP-70278-FR

Octobre 2020

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM AP19MSL005

A.G. Filippini R. Pedreros, A. Lemoine, A. Stepanian, C. Barbier

Avec la collaboration de
L. Arpaia, F. Boulhaya

Vérificateur :

Nom : Monique Terrier

Fonction : Expert Risques naturels

Date : 4 novembre 2020

Signature :

Approbateur :

Nom : Alexander Norie

Fonction directeur régional PACA

Date : 23 novembre 2020

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Tsunami, PACA, Sources sismiques, Modélisation, Mer Ligure, Marge maghrébine, Distribution stochastique du glissement, Inondation, Exposition du bâti.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Filippini A.G., Pedreros R., Lemoine A., Stepanian A., Barbier C. (2020) – Caractérisation de l'impact des tsunamis d'origine sismique sur le littoral du département des Alpes-Maritimes : sources en mer Ligure et dans la marge maghrébine. Rapport Final. BRGM/RP-70278-FR, 184 p., 37 fig., 2 ann.

Synthèse

Suite aux précédents travaux sur les tsunamis réalisés par le BRGM en Méditerranée (Terrier *et al.* 2007, Le Roy *et al.* 2015, Rohmer *et al.* 2018), la DDTM-06 a sollicité le BRGM pour une nouvelle étude concernant les Alpes-Maritimes, sur un linéaire côtier allant de Mandelieu-la-Napoule à Menton. Il s'agit d'identifier l'impact des tsunamis sur le littoral et les habitations pour 2 sources tsunamigènes d'origine sismique en considérant des hypothèses majorantes (mer Ligure et marge maghrébine) en faisant appel à la modélisation numérique.

Au total 110 scénarios de tsunamis (70 pour la marge maghrébine et 40 pour la mer Ligure) ont été établis en faisant varier notamment la position de l'épicentre, l'orientation des failles (azimut) et la distribution du glissement cosismique au niveau des failles (10 réalisations pour chaque géométrie de rupture retenue). De plus, concernant la mer Ligure, 3 magnitudes de séismes ont été examinées compte tenu des derniers travaux sur cette zone.

La modélisation numérique de ces 110 scénarios a permis de déterminer les niveaux d'eau maximaux à proximité du rivage et les temps d'arrivée sur l'ensemble du littoral des Alpes-Maritimes (résolution spatiale de 100 m) :

- les niveaux atteignent facilement la cote +3 m NGF/IGN69, et localement plus (> +5 m NGF/IGN69) sur certaines localités comme à Cannes et à Menton par exemple ;
- les temps d'arrivée sont assez homogènes spatialement. Ils s'échelonnent de 1h07min à 1h12min pour les sources de la marge maghrébine. Ils sont de 2 min à 7 min pour la mer Ligure ce qui empêche, dans ce cas, toute prévision et alerte des tsunamis.

L'exploitation de ces simulations a permis également de dégager les scénarios les plus impactants par type de source. Ceux-ci nous montrent que :

- ce n'est pas forcément la 1^{ère} vague la plus haute et qu'il n'y a pas de retrait systématique de la mer avant la première vague. Cela implique qu'il n'y a pas d'alerte « naturelle » de l'arrivée du tsunami pour les personnes présentes sur le littoral ;
- la mer peut rester agitée longtemps après l'arrivée de la première vague : d'une à plusieurs heures en fonction de la portion du littoral et du type de source considérée ;
- à proximité des rivages, les vitesses des courants engendrés par les tsunamis peuvent atteindre des valeurs extrêmes entre 1 m/s et 3 m/s pour les sources de type mer Ligure et entre 3 m/s et 5 m/s pour celle liée à la marge maghrébine.

Par la suite, les zones inondées (extension et hauteurs d'eau maximales à terre) ont été calculées en croisant les niveaux d'eau maximaux proches du rivage simulés (tous scénarios confondus) et le modèle topographique ILitto3D-1m, tout en vérifiant l'existence d'une connexion directe ou indirecte (via des buses, écluses, ...) de ces zones avec la mer ou les embouchures. Il est à noter que cette méthode de calcul est également majorante (mise à disposition de grands volumes d'eau, pas de prise en compte du frottement des écoulements à terre, ...). La cartographie des zones inondées résultante indique que :

- les aéroports de Cannes-Mandelieu et de Nice Côte d'Azur seraient exposés à des submersions plus ou moins importantes ;
- plusieurs fronts de mer seraient concernés avec des hauteurs d'eau dépassant 2 m et pénétrant dans les terres sur plusieurs centaines de mètres comme à Cannes, Golfe-Juan,

Antibes et Menton, par exemple. Bon nombre de ports à proximité de ces localités seraient exposés au débordement des eaux.

Enfin, l'exposition du bâti aux submersions engendrées par les tsunamis est déterminée suivant une matrice faisant intervenir différentes gammes de hauteur d'eau à terre pondérées par la distance du bâti au trait de côte pour qualifier l'exposition de faible, modérée, forte et très forte.

Cette étude montre que potentiellement 6 351 constructions côtières seraient exposées à une submersion liée à des tsunamis d'origine sismique. Parmi celles-ci, environ 56 % auraient une exposition forte à très forte et 44 % une exposition faible à modérée. À noter que plus de 33 % (2 111) de ce bâti a une exposition très forte.

Les scénarios considérés dans cette étude ont été construits à partir des connaissances actuelles de la sismicité, du régime tectonique et des morphologies des régions d'intérêt, telles qu'en attestent des publications scientifiques. Or le niveau de compréhension des potentiels sismogènes et tsunamigènes des marges Nord Ligure et Nord Maghrébine reste partiel. À ce jour, il n'y a pas d'estimation consensuelle de périodes de retour des événements maximisant considérés dans cette étude. Certains scénarios proposés sont étayés par l'occurrence d'événements historiques, alors que des événements extrêmes, proposés dans la littérature scientifique, sont envisagés à partir de la dimension d'un ensemble de structures supposées actives. De tels événements extrêmes, bien que vraisemblables, demeurent rares.

Les séismes peuvent également générer des glissements de terrain sous-marins qui à leur tour peuvent engendrer des tsunamis. Ces effets cascades ne sont pas considérés dans cette étude.

Cette étude a permis de déterminer les scénarios d'origine sismique les plus impactants (sources de la marge maghrébine et de mer Ligure) et d'établir une première cartographie des zones inondées et de l'exposition du bâti en suivant une approche majorante. Des études futures pourraient être conduites visant à :

- quantifier de façon plus réaliste la phase d'inondation (extension, hauteur d'eau) et l'exposition du bâti en faisant appel à la modélisation numérique de la submersion : en effet un modèle unique de tsunami exploitant un maillage non structuré (taille du maillage variable dans l'espace) pourrait être mis en place afin de simuler aussi bien la propagation (taille de maille kilométrique à la centaine de mètres) que la submersion (taille de maille de la dizaine de mètres) sur les secteurs à enjeux ;
- caractériser, grâce à ce type de modèle numérique de tsunami non structuré, les impacts induits (inondation, exposition du bâti) par d'autres scénarios moins pénalisants mais pouvant avoir un temps de récurrence moins important ou dont la vraisemblance serait plus consensuelle (par exemple scénarios de magnitude 6.5 en mer Ligure).

Sommaire

1. Introduction	13
2. Génération de la perturbation de la surface libre de l'eau	15
2.1. RUPTURE DE FAILLE STOCHASTIQUE (ALÉATOIRE).....	15
2.2. DISLOCATION D'OKADA.....	16
3. Propagation et paramètres de modélisation	17
3.1. MODÈLE HYDRODYNAMIQUE.....	17
3.2. BATHYMÉTRIE	17
3.3. AUTRES HYPOTHÈSES ET PARAMÈTRES DE MODÉLISATION.....	18
4. Scénarios simulés.....	19
4.1. MARGE NORD MAGHRÉBINE	20
4.2. MARGE DE LA MER LIGURE	24
5. Résultats des modélisations numériques	31
5.1. RÉSULTATS POUR L'ENSEMBLE DES SIMULATIONS	31
5.2. RÉSULTATS POUR LES SCÉNARIOS LES PLUS IMPACTANTS.....	36
5.2.1. Scénario mag210.....	36
5.2.2. Scénario lig303.....	41
6. Détermination des zones potentiellement inondables : extension et hauteurs d'eau maximales	45
6.1. MÉTHODE DE CALCUL	45
6.2. RÉSULTATS DE L'INONDATION.....	51
7. Exposition potentielle du bâti aux tsunamis	57
8. Conclusions et perspectives	65
9. Bibliographie	67

Liste des figures

Figure 1 : Représentation des grilles de calcul utilisées et leur emboîtement : (a) domaine avec résolution à 500 m; (b) grille avec résolution à 100 m ; (c) grille avec résolution à 100 m, emboîtée avec la grille (a). Les valeurs de la bathymétrie (en m) sont représentées avec l'échelle de couleur indiquée dans la légende.	18
Figure 2 : Sismicité de la Méditerranée occidentale (magnitude supérieure à 4 : catalogue 1964-2017 de l'International Seismological Centre, ISC http://www.isc.ac.uk en jaune). Failles actives telles qu'identifiées par Terrier (2007) et par l'European Database of Seismogenic Faults (FSBG model, Basili <i>et al.</i> , 2013) respectivement en bleu et orange. Bathymétrie et topographie : Gebco_2014 (Weatherall <i>et al.</i> , 2015).....	19
Figure 3 : Séismes historiques tsunamigéniques répertoriés (d'après Gailler <i>et al.</i> , 2013).....	19
Figure 4 : Carte des zones sources sismiques proposées pour la Méditerranée occidentale et les régions côtières (d'après (Terrier, 2007, fig. 41, p.75)) : La marge nord de la mer Ligure (n° 4, en vert) et marge nord-maghrébine (n° 32, en jaune) sont considérées comme potentiellement les plus impactantes pour la zone d'intérêt de la présente étude.	20
Figure 5 : Carte des scénarios des sources sismiques pour la marge maghrébine dans le contexte des failles régionales (modifié d'après Schindelé, <i>et al.</i> , 2015, fig. 6, p. 830). 9 géométries ont été sélectionnées pour cette étude (indiquées par les numéros en figure). Les étoiles représentent les épicentres des événements testés ; les barres colorées (jaune/orange) représentent les bords supérieurs (up-dip) des séismes.....	21
Figure 6 : Réalisation des glissements aléatoires pour un séisme de magnitude 7.8 dans la marge nord maghrébine. Longueur et largeur de la faille : respectivement 200 km et 31 km.....	23
Figure 7 : Larroque <i>et al.</i> (2012), Figure 1. En blanc, sismicité instrumentale entre 1980 et 2010 (Bureau Central Sismologique Français). Les carrés représentent différentes hypothèses précédentes pour l'épicentre du séisme d'Imperia de 1887. L'étoile bleue, la position du séisme du 20 juillet 1564 (I VIII MCS), l'étoile brune l'épicentre du séisme du 19 juillet 1963 (M _L 6.0).....	24
Figure 8 : Larroque <i>et al.</i> (2012), Figure 13. Représentation schématique du séisme d'Impéria en 1887. Carte et projection verticale au niveau de la section marquée par un segment noir sur la carte.	25
Figure 9 : Carte des scénarios des sources sismiques pour la marge de la mer Ligure dans le contexte des failles répertoriées (d'après (Boschetti, <i>et al.</i> 2020, fig. 2, p. 3)). 4 géométries ont été sélectionnées pour cette étude (indiquées par les numéros en figure). Les étoiles représentent les épicentres des événements ; les barres colorées (jaune/orange) représentent le bord supérieur (up-dip) des séismes.	26
Figure 10 : Larroque <i>et al.</i> (2011), Figure 14. Bathymétrie et représentation du système de faille ligurien. La faille Marcel est au sud ouest du système.	26
Figure 11 : Réalisations des glissements aléatoires pour un séisme de magnitude 6.9 dans la mer Ligure (valables pour la géométrie lig1xx et lig2xx, voir Tableau 3).....	27
Figure 12 : Réalisation des glissements aléatoires pour un séisme de magnitude 7.5 dans la mer Ligure (géométrie lig3xx, voir Tableau 3). Longueur et largeur de la faille : respectivement 80 km et 27 km ; épicentre : 7.815° lon (X), 43.64° lat (Y), azimut : 250°N	28
Figure 13 : Réalisation des glissements aléatoires pour un séisme de magnitude 6.5 dans la mer Ligure (géométrie lig4xx, voir Tableau 3). Longueur et largeur de la faille : respectivement 15 km et 12 km ; épicentre : 7.48° lon (X), 43.53° lat (Y), azimut : 243°N	28
Figure 14 : Exemple de compilation des caractéristiques et des résultats du scénario « mag106 ».	32
Figure 15 : Carte des niveaux maximaux du plan d'eau (valeurs en m/IGN69) pour l'ensemble des scénarios simulés (résolution à 100 m).	33

Figure 16 : Carte des scénarios les plus impactants. Les scénarios identifiés, ici par leur numéro, sont décrits dans le Tableau 2 et le Tableau 4. Les couleurs froides représentent les scénarios de la marge nord de la mer Ligure (ligxxx) et les couleurs chaudes sont utilisées pour représenter les scénarios de la marge nord-maghrébine (magxxx).	34
Figure 17 : Caractéristiques générales de la rupture et cartes des niveaux d'eau maximaux simulés pour le scénario mag210.	36
Figure 18 : Instantanés de la propagation du tsunami et impact sur le littoral des Alpes Maritimes pour le scénario mag210. Les différentes couleurs indiquent l'élévation du plan d'eau. Les vecteurs correspondent à la vitesse et la direction des courants.	38
Figure 19 : Séries temporelles des hauteurs d'eau pour le scénario mag210 correspondant aux stations virtuelles distribuées le long du littoral des Alpes-Maritimes.	39
Figure 20 : Carte des vitesses maximales simulées pour le scénario mag210.	40
Figure 21 : Caractéristiques générales de la rupture et cartes des niveaux d'eau maximaux simulés pour le scénario lig303.	41
Figure 22 : Instantanés de la propagation du tsunami et impact sur le littoral des Alpes Maritimes pour le scénario lig303. Les différentes couleurs indiquent l'élévation du plan d'eau. Les vecteurs correspondent à la vitesse et la direction des courants.	42
Figure 23 : Séries temporelles des hauteurs d'eau pour le scénario lig303 correspondant aux stations virtuelles distribuées le long du littoral des Alpes-Maritimes.	43
Figure 24 : Carte des vitesses maximales simulées pour le scénario lig303.	44
Figure 25 : Génération des semis de points des niveaux d'eau maximaux suivant les étapes 1 à 3 de détermination des « zones basses ». Exemple sur le linéaire côtier allant de Mandelieu-Napoule à Cannes.	46
Figure 26 : Détermination des « zones basses » : MNH1m Brut : contenant l'extension et les hauteurs d'eau maximales. Exemple sur le linéaire côtier allant de Mandelieu-Napoule à Cannes.	47
Figure 27 : Identification des zones basses non connectées à la mer ou aux fleuves et des connexions hydrauliques. Exemple sur le linéaire côtier allant de Mandelieu-Napoule à Cannes.	49
Figure 28 : Détermination des zones potentiellement inondables (MNH1m final) . Exemple sur le linéaire côtier allant de Mandelieu-Napoule à Cannes.	50
Figure 29 : Inondation potentielle induite par les tsunamis sur le linéaire côtier allant de Mandelieu-la-Napoule à Cannes. Fond Cartographique Open Street Map.	52
Figure 30 : Inondation potentielle induite par les tsunamis sur le linéaire côtier allant de Golfe-Juan à Antibes. Fond Cartographique Open Street Map.	53
Figure 31 : Inondation potentielle induite par les tsunamis sur le linéaire côtier allant du nord d'Antibes à l'aéroport de Nice. Fond Cartographique Open Street Map.	54
Figure 32 : Inondation potentielle induite par les tsunamis sur le linéaire côtier allant du Cap-Martin au nord de Menton. Fond Cartographique Open Street Map.	55
Figure 33 : Extrait de la table attributaire de la nouvelle couche shape du bâti exposé aux tsunamis.	58
Figure 34 : Exposition potentielle du bâti aux tsunamis sur le linéaire côtier allant de Mandelieu-la-Napoule à Cannes. Zoom : centre-ville de Cannes. Fond Cartographique Open Street Map.	60
Figure 35 : Exposition potentielle du bâti aux tsunamis sur le linéaire côtier allant de Golfe-Juan à Antibes. Zoom gauche : centre-ville de Golfe-Juan. Zoom droite : centre-ville d'Antibes. Fond Cartographique Open Street Map.	61
Figure 36 : Exposition potentielle du bâti aux tsunamis sur le linéaire côtier allant du nord d'Antibes à l'aéroport de Nice. Fond Cartographique Open Street Map.	62
Figure 37 : Exposition potentielle du bâti aux tsunamis sur le linéaire côtier allant Cap-Martin au nord de Menton. Fond Cartographique Open Street Map.	63

Liste des annexes

Annexe 1 Scénarios marge nord maghrébine	71
Annexe 2 Scénarios marge de la mer Ligure	142

1. Introduction

Suite aux précédents travaux sur les tsunamis réalisés par le BRGM en Méditerranée (Terrier *et al.* 2007, Le Roy *et al.* 2015, Rohmer *et al.* 2018), la DDTM-06 a sollicité le BRGM pour une nouvelle étude concernant les Alpes-Maritimes, correspondant à un linéaire côtier allant de Mandelieu-la-Napoule à Menton. Il s'agit d'identifier l'impact des tsunamis sur le littoral et les habitations pour 2 sources tsunamigènes d'origine sismique majorantes (mer Ligure et marge maghrébine) en faisant appel à la modélisation numérique.

Cette étude s'organise de la manière suivante :

- le chapitre 2 décrit la méthode de génération des tsunamis d'origine sismique en faisant appel notamment à la prise en compte d'une distribution aléatoire du glissement ;
- le chapitre 3 concerne la description et la mise en place de la modélisation numérique de la propagation des tsunamis ;
- le chapitre 4 présente les 110 scénarios retenus pour les simulations des tsunamis pour les sources de la marge maghrébine (70 scénarios) et de mer Ligure (40 scénarios) ;
- le chapitre 5 est consacré à la présentation générale des résultats des modélisations en termes des niveaux d'eau maximaux à proximité du rivage et des temps d'arrivée pour l'ensemble des simulations et de façon plus détaillée pour les scénarios les plus impactant concernant les 2 sources étudiées ;
- le chapitre 6 décrit la méthode de calcul ainsi que les résultats obtenus pour la submersion marine (extension et hauteurs d'eau maximales à terre) ;
- le chapitre 7 est dédié à la détermination de l'exposition du bâti aux tsunamis d'origine sismiques étudiés ;
- le chapitre 8, enfin, présente les principales conclusions de l'étude ainsi qu'une mise en perspectives des travaux futurs.

2. Génération de la perturbation de la surface libre de l'eau

Les caractéristiques d'un tsunami sont liées au processus qui l'a généré. Si la source est d'origine sismique, ce sont la position par rapport à la zone cible, la profondeur et les caractéristiques de rupture du séisme qui influencent le plus la génération du tsunami (déformation de la surface de l'eau). La rupture de la faille est un phénomène complexe, qui de plus dépend des conditions de contrainte de pré-rupture, de la configuration géométrique et de la propriété de frottement de la faille, de tels paramètres restent encore très mal connus (Mai et Beroza, 2002). Étant donné ces sources d'incertitudes, des travaux liés à l'aléa tsunami sont communément réalisés sous différentes hypothèses de simplification du problème (e.g. Grilli *et al.*, 2016 ; Le Roy *et al.*, 2017 ; Allgeyer *et al.*, 2017).

2.1. RUPTURE DE FAILLE STOCHASTIQUE (ALÉATOIRE)

Dans cette étude, la rupture est modélisée par une distribution de déplacement co-sismique le long d'une surface rectangulaire, décrite par un nombre limité de paramètres :

- position de l'hypocentre (latitude et longitude) ;
- profondeur de l'hypocentre ;
- orientation du glissement (azimut et pendage de la faille, et angle de glissement (« rake ») ;
- le glissement (« slip ») : valeur du déplacement le long du plan de faille ;
- longueur et largeur de la surface de faille.

Dans la plupart des études tsunamis (dont celles déjà réalisées sur cette zone), il est d'usage d'utiliser pour le glissement de la faille une valeur unique du déplacement (en général la valeur moyenne) appliquée de façon homogène à l'ensemble du plan de faille. Or des études plus récentes (Goda *et al.*, 2014 par exemple) ont montré, notamment pour les tsunamis en champ proche, que la distribution du glissement hétérogène de la faille a un impact significatif sur la propagation des vagues près du littoral et, finalement, sur la hauteur des vagues ou l'extension de la zone inondée dans les villes côtières. C'est pourquoi dans cette étude nous avons mis en place un calcul de la distribution du glissement hétérogène aléatoire.

Les champs de glissement aléatoires ont émergé dans le passé comme un outil puissant pour paramétrer la complexité de la cinématique de rupture des failles (e.g. Pardo et Chica-Olmo, 1993 ; Goda *et al.*, 2014 ; Gonzalez *et al.*, 2016 ; LeVeque *et al.*, 2016 ; ...). En suivant l'approche de Mai et Beroza (2002), le champ de glissement sur la faille est supposé être un champ aléatoire, dont la valeur moyenne, correspondant à la valeur attendue : i) est calculée à partir de la magnitude et ii) est donc homogène sur la faille. Le champ aléatoire appliqué dans la présente étude est décomposé en utilisant l'expansion de Karhunen-Loeve, récemment appliquée aux ruptures de faille par (LeVeque *et al.*, 2016).

Le processus physique de génération d'un tremblement de terre est encadré : il existe un glissement maximum admissible, qui peut être lié à la magnitude à travers des relations d'échelle basées sur une connaissance empirique des événements passés (e.g. Goda *et al.*, 2016). Pour cette raison, nous modélisons les glissements aléatoires par une distribution log-normale conjointe (Gonzalez *et al.*, 2016) et non pas gaussienne. Enfin, afin que les tremblements de terre synthétiques soient physiquement cohérents, les champs de glissement sont effilés, de sorte qu'ils diminuent progressivement jusqu'à zéro au bord inférieur (*down-dip*) du plan de faille.

À la fin, pour chaque géométrie de rupture retenue, 10 réalisations de glissements aléatoires sont effectuées (voir par exemple la Figure 6 concernant la marge maghrébine) :

- 1 réalisation correspondant à la méthode traditionnelle (cas de référence) : glissement moyen appliqué de façon homogène sur le plan de faille ;
- 9 réalisations aléatoires : bien qu'il existe un nombre quasi infini de réalisations possibles, un algorithme d'optimisation a été appliqué de manière à obtenir 9 réalisations très différentes couvrant une large gamme des possibles.

2.2. DISLOCATION D'OKADA

La dislocation élastique en profondeur, calculée avec la méthode décrite ci-dessus, est utilisée directement pour le calcul de la déformation du plan d'eau et des caractéristiques du tsunami à travers la méthode d'Okada (1985). Cette méthode est largement documentée et utilisée en littérature aussi bien pour la reproduction d'évènements complexes (comme celui de Tohoku de 2011 (Satake *et al.*, 2013)) que pour la modélisation de l'inondation et l'étude des aléas (e.g. Wei *et al.*, 2014; Grilli *et al.*, 2016 ; Le Roy *et al.*, 2017 ; Allgeyer *et al.*, 2017).

3. Propagation et paramètres de modélisation

3.1. MODÈLE HYDRODYNAMIQUE

Le modèle hydrodynamique utilisé pour la propagation des tsunamis est FUNWAVE-TVD (Shi *et al.*, 2012). C'est un modèle opérationnel d'ordre élevé qui emploie des équations intégrées sur la profondeur du type Boussinesq sur des maillages structurés. Ces équations sont bien adaptées à la description de la propagation des ondes longues et de leur transformation par effet des phénomènes dispersifs, qui dérivent des interactions avec le fond marin. D'autre part, l'ordre élevé du schéma numérique garanti la préservation de la précision dans la représentation des effets non-hydrostatiques près de la côte. FUNWAVE-TVD a été largement utilisé par le passé pour la simulation de l'impact des vagues de type tsunami sur la côte. De nombreux travaux publiés en littérature en sont témoins : comme ceux déjà réalisés au BRGM (Le Roy *et al.*, 2017); (Rohmer *et al.*, 2018); (Abadie *et al.*, 2019)) ; (Kazolea *et al.* 2019) ainsi que dans la communauté internationale (Tapin *et al.*, 2014) ; (Kirby, 2016) ; (Grilli, 2017).

Le modèle reçoit en entrée, sur un maillage régulier de la taille du domaine de calcul, la déformation initiale du plan d'eau (calculée avec la méthode d'Okada) pour être propagée sur toute la durée de la simulation.

Une fois la simulation terminée, des informations sur les hauteurs d'eau et les courants engendrés par les tsunamis sur toute la durée de la simulation sont récupérées.

L'exploitation de ces résultats permet alors d'établir les niveaux d'eau et les courants maximaux à la côte, ainsi que les temps d'arrivée des tsunamis.

3.2. BATHYMÉTRIE

Pour les simulations des scénarios concernant la marge maghrébine, une grille de calcul a été construite avec une emprise spatiale couvrant l'ensemble du bassin méditerranéen occidental, Figure 1(a). Un pas de maille de 500 m a été choisi pour cette première grille afin de limiter le coût de calcul pour la simulation de chaque scénario. Pour obtenir des résultats plus précis sur le littoral du département des Alpes Maritimes, une grille emboîtée est utilisée, avec un pas de maille à 100 m (Figure 1(c)).

Pour réaliser les simulations des sources localisées dans la mer Ligure, compte tenu de leur proximité à la côte, nous avons utilisé directement une grille avec le pas de maille de 100m. L'emprise de cette troisième grille de calcul est illustrée en Figure 1(b).

Pour réaliser les modèles susmentionnés, les données bathymétriques suivantes ont été utilisées : EMODNET (<http://www.emodnet-bathymetry.eu/>, mailles de 500m), MNT HOMONIM SHOM (<https://data.shom.fr/>, mailles de 100m, profondeurs exprimées par rapport au Niveau Moyen de la marée).

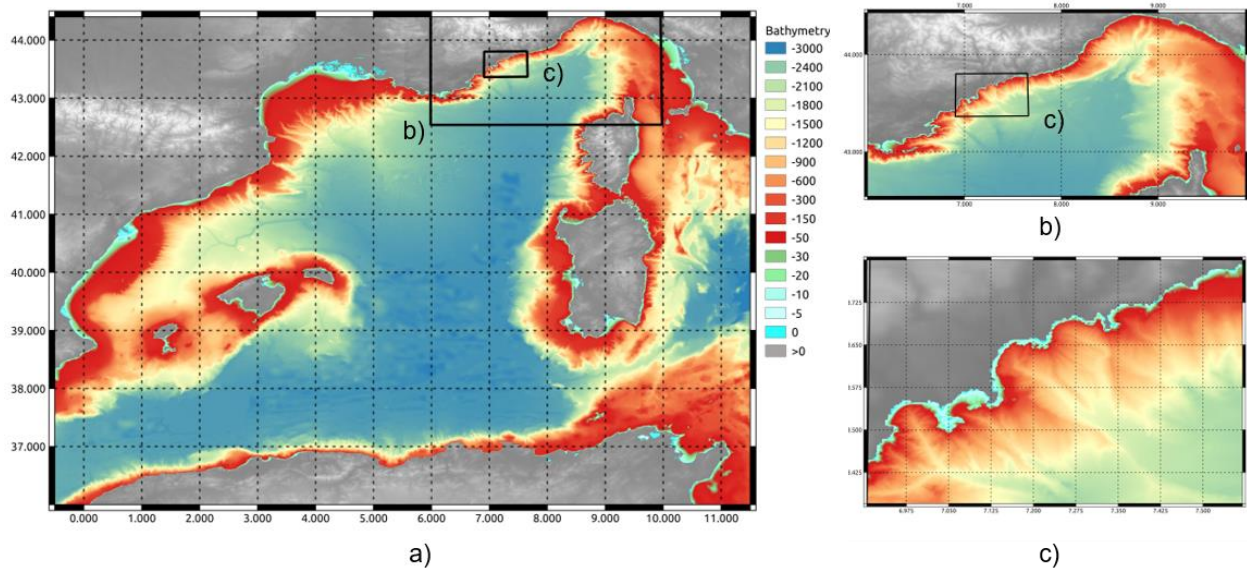


Figure 1 : Représentation des grilles de calcul utilisées et leur emboîtement :
 (a) domaine avec résolution à 500 m ; (b) grille avec résolution à 100 m ; (c) grille avec résolution à 100 m, emboîtée avec la grille (a). Les valeurs de la bathymétrie (en m) sont représentées avec l'échelle de couleur indiquée dans la légende.

3.3. AUTRES HYPOTHÈSES ET PARAMÈTRES DE MODÉLISATION

Compte tenu des résolutions relativement grossières des grilles de calcul, un coefficient de frottement au fond homogène (Manning de 0.02 en $m^{-1/3} s^1$) a été utilisé pour l'ensemble des simulations.

Des conditions absorbantes (« couches éponges ») ont été imposées sur les bords des modèles à 500 m et 100 m (grilles (a) et (b) respectivement) pour simuler la sortie libre (sans réflexions) des vagues du domaine de calcul.

Étant donné le faible marnage des marées en Méditerranée, les simulations ont été conduites dans des conditions d'un niveau moyen de la marée au port de Nice (c'est-à-dire 12,6 cm au-dessus du 0 IGN1950 d'après le RAM 2017).

4. Scénarios simulés

La Méditerranée occidentale se trouve dans un contexte géodynamique actif (Figure 2). Cette région est caractérisée par des processus de déformation et par une sismicité fréquente, liés à la collision des plaques Afrique Eurasie. La sismicité se distribue en particulier suivant une bande relativement large, alignée avec la côte du Maghreb. D'autres zones sismiquement actives peuvent être identifiées sur la Figure 2, comme le sud de la péninsule ibérique. Une sismicité plus diffuse est observée en mer. Des séismes historiques ont été associés à des tsunamis en Méditerranée occidentale, en particulier sur le long de la côte nord de l'Afrique, en mer Ligure ou au voisinage de la Sicile (Figure 3).

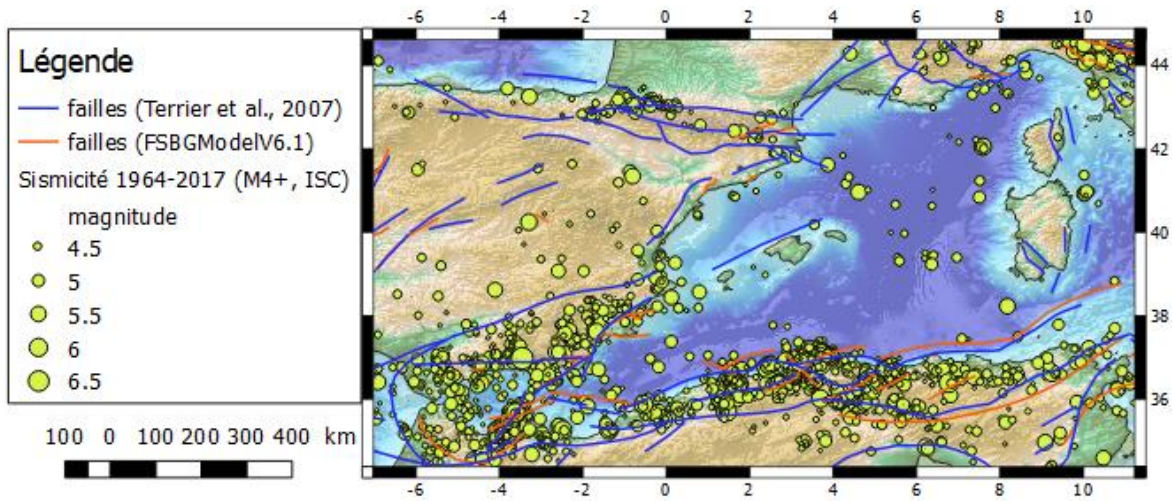


Figure 2 : Sismicité de la Méditerranée occidentale (magnitude supérieure à 4 : catalogue 1964-2017 de l'International Seismological Centre, ISC <http://www.isc.ac.uk> en jaune). Failles actives telles qu'identifiées par Terrier (2007) et par l'European Database of Seismogenic Faults (FSBG model, Basili et al., 2013) respectivement en bleu et orange. Bathymétrie et topographie : Gebco_2014 (Weatherall et al., 2015).

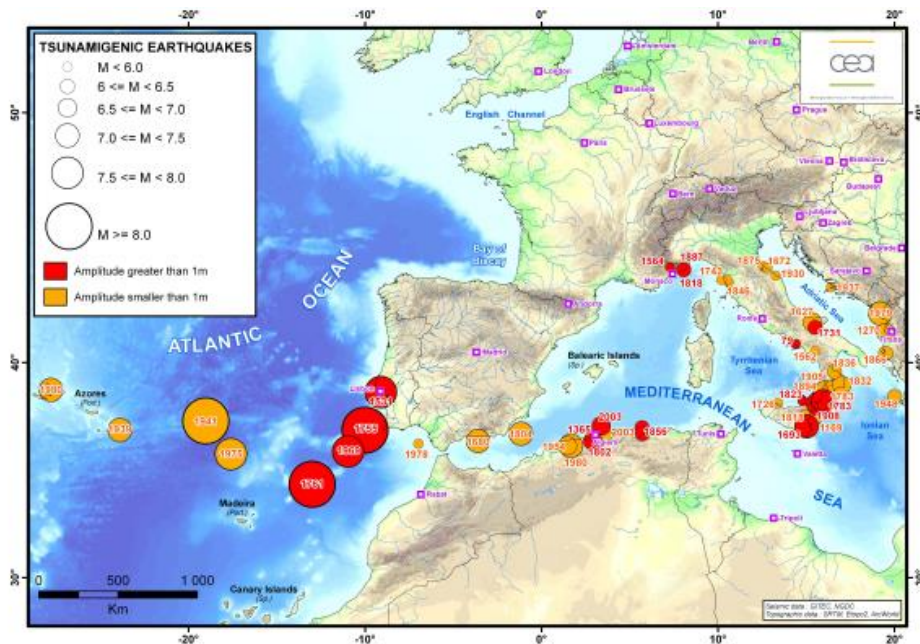


Figure 3 : Séismes historiques tsunamigéniques répertoriés (d'après Gailler et al., 2013).

Un zonage sismo-tectonique sur le secteur de la Méditerranée occidentale (Figure 4) a été effectué par le passé (Terrier, 2007), préalable à l'identification de sources tsunamigènes. Sur la Figure 4 sont mises en évidence avec les couleurs verte et jaune les zones correspondant respectivement à la marge nord de la mer Ligure et à la marge nord-maghrébine, objets de cette étude. Le choix de ces deux sources potentiellement les plus impactantes pour la zone d'intérêt de cette étude est étayé par l'étude de Sorensen *et al.* (2012) : Ces travaux portaient sur une analyse probabiliste de l'aléa tsunami en Méditerranée. Ils ont mis en évidence le fait que les plus fortes contributions à l'aléa tsunami à Nice seraient des zones sources situées sur la côte du Maghreb ou en mer Ligure.

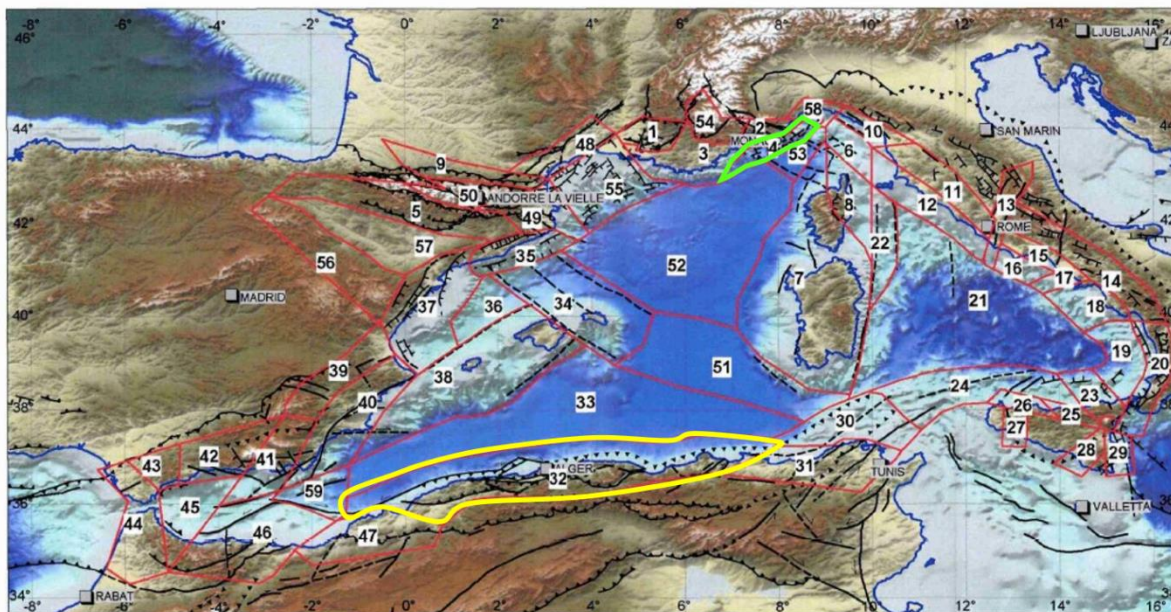


Figure 4 : Carte des zones sources sismiques proposées pour la Méditerranée occidentale et les régions côtières (d'après (Terrier, 2007, fig. 41, p.75)) : La marge nord de la mer Ligure (n° 4, en vert) et marge nord-maghrébine (n° 32, en jaune) sont considérées comme potentiellement les plus impactantes pour la zone d'intérêt de la présente étude.

4.1. MARGE NORD MAGHRÉBINE

Les mesures GPS suggèrent que la convergence oblique d'environ 5 mm par an entre l'Afrique et l'Europe est accommodée au nord de l'Afrique (Serpelloni *et al.*, 2007), où se concentre une activité sismique relativement diffuse. La marge nord maghrébine, associée à la côte méditerranéenne du Maghreb est une zone de déformation compressive caractérisée par un complexe système de failles (offshore et onshore, Figure 2). C'est une marge active qui héberge plusieurs séismes passés majeurs, comme celui d'El Hasnam en 1980 (Ms7.3), celui de Boumerdès en 2003 (Mw6.9) ou ceux de Djidjelli en 1856 (e.g. Yielding *et al.*, 1981 ; Deverchère *et al.*, 2005 ; Harbi *et al.*, 2010, Figure 3). Ces événements ont été associés à des tsunamis modérés (e.g. Roger *et al.*, 2011 ; Sahal *et al.*, 2009).

De grands systèmes de failles actives inverses à pendage sud ont été identifiées grâce à des campagnes en mer au pied de la marge du Maghreb (e.g. Deverchère *et al.*, 2005 ; Kherroubi *et al.*, 2009 ; Yelles *et al.*, 2009). De telles failles auraient été en particulier responsables du séisme de Boumerdès en 2003 et pourraient générer des séismes de magnitude ~7.5 et être potentiellement tsunamigènes (Kherroubi *et al.*, 2009). Ces chevauchements à pendage sud et vergence nord, localisés le long de la marge nord-maghrébine, correspondraient aux failles les plus actives de cette partie de limite de plaque (Déverchère *et al.*, 2005).

Les derniers grands séismes qui ont frappé cette région sont, en procédant d'ouest en est (voir Figure 3) : El Asnam (1980, Mw7.1), Boumerdès (2003, Mw6.9) et Djidjelli (1856, Mw~6.5). Le tremblement de terre de Boumerdès (2003) est l'événement clef qui a récemment contribué à la prise de conscience du risque lié à des tsunamis induits par les séismes dans la région. Cependant, un séisme du type des séismes de Djidjelli (1856), situé plus à l'est le long de la côte algérienne, pourrait être le plus impactant pour le littoral du département des Alpes-Maritimes (e.g. Schindelé *et al.*, 2015). Pour cette raison, dans la recherche des scénarios probables les plus impactants (hypothèse du « worst credible case »), nous avons situé les épicentres des événements sismiques testés en proximité de ce site (

Figure 5). La magnitude maximale attendue est estimée à 7,8 (en cohérence avec Terrier *et al.* (2007)). Elle correspond à la magnitude du plus grand séisme de la période instrumentale (Boumerdès en 2003, à laquelle on a ajouté 0,5 ; et semble dans l'ordre de grandeur du potentiel de certains systèmes de failles (M~7.5 d'après Kherroubi *et al.*, 2009). Hamdache (1998) associe des temps de récurrence à différents secteurs de la marge algérienne. La zone la plus active, dans la région d'El Asnam y est associée à une période de retour d'environ 1 700 ans pour des séismes de magnitude 8.0 ; 700 ans pour des séismes de magnitude 7.8 ; 300 ans pour des séismes de magnitude 7.5. Elle devient supérieure à 1 000 ans dans d'autres zones de la marge pour des séismes de magnitude 7.5. Grâce à des analyses d'indices de turbidité prélevés au large d'Alger, Babonneau *et al.* (2017) observent 36 événements associés à des séismes majeurs sur 9 000 ans, soit un temps de récurrence moyen d'environ 250 ans. Cette estimation est en cohérence avec les séismes historiques majeurs répertoriés dans la région d'Alger en 2003, 1716 et -1365.

Cette magnitude maximale est maintenue constante pour toutes les géométries considérées ainsi que la longueur et la largeur de la faille (respectivement 200 km et 31 km, en conformité avec les lois d'échelles telles que celles de Wells and Coppersmith (1994), la profondeur de son bord supérieur (*up-dip*) (égal à 1km) et la valeur du glissement moyenne (4,3 m).

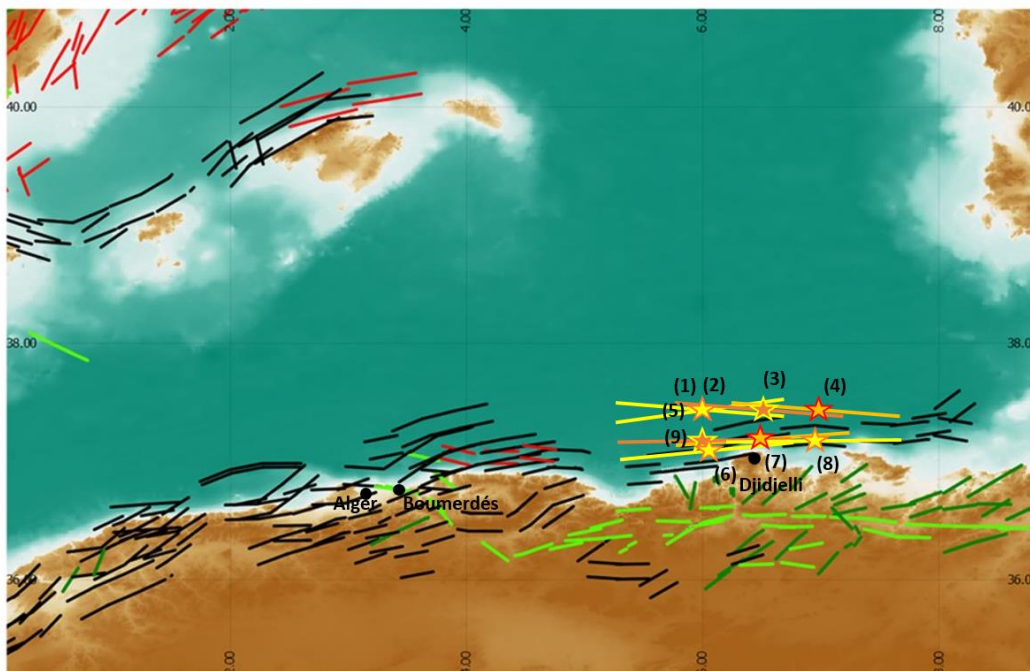


Figure 5 : Carte des scénarios des sources sismiques pour la marge maghrébine dans le contexte des failles régionales (modifié d'après Schindelé, et al., 2015, fig. 6, p. 830). 9 géométries ont été sélectionnées pour cette étude (indiquées par les numéros en figure).

Les étoiles représentent les épicentres des évènements testés ; les barres colorées (jaune/orange) représentent les bords supérieurs (up-dip) des séismes.

Le Tableau 1, ci-dessous, résume les caractéristiques géométriques des 9 géométries de rupture considérées pour la marge maghrébine. L'épicentre de 4 des événements proposés (mag6xx, mag7xx, mag8xx et mag9xx) est localisé très près du littoral. En fait, en confrontant la sismicité avec la position des failles et en considérant que les failles de la région sont inverses à pendage vers le sud, on se rend compte que les séismes sont essentiellement au sud des traces de failles en surface sous la mer. Cette position serait donc cohérente avec la géométrie des structures et la distribution de la sismicité, et serait également en ligne avec la position du séisme de Boumerdès (2003) par rapport à la côte, dans un contexte relativement voisin. Les valeurs de l'azimut et du pendage des failles ont été choisies par analogie avec les données disponibles en littérature (e.g. mécanisme des séismes historiques d'El Hasnam ou de Boumerdès, (Deverchère *et al.*, 2005), (Sorensen *et al.*, 2012), (Gailler *et al.*, 2013), (Schindelé *et al.*, 2015), ...).

Nom	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Longueur (km)	Largeur (km)	Azimut (°N)	Pendage (°)	Rake (°)	Z (km)	Mw	Slip moyen (m)
mag1xx	6	37.4	200	31	85	45	90	12	7.8	~4.3
mag2xx	6	37.4	200	31	95	45	90	12	7.8	~4.3
mag3xx	6.5	37.4	200	31	95	45	90	12	7.8	~4.3
mag4xx	7	37.4	200	31	95	45	90	12	7.8	~4.3
mag5xx	6	37.4	200	31	95	55	90	9.9	7.8	~4.3
mag6xx	6.099	37.013	200	31	86	45	90	12	7.8	~4.3
mag7xx	6.468	37.17	200	31	87	45	90	12	7.8	~4.3
mag8xx	6.984	37.16	200	31	90	45	90	12	7.8	~4.3
mag9xx	6	37.26	200	31	85	45	90	12	7.8	~4.3

Tableau 1 : Résumé des caractéristiques géométriques des 9 événements testés pour la marge maghrébine (Z est utilisé pour indiquer la profondeur focale, Mw pour indiquer la magnitude).

Les 9 géométries utilisées pour la marge maghrébine diffèrent seulement pour la position de l'épicentre et pour l'orientation spatiale du plan de faille. Toutes les caractéristiques, qui peuvent influencer le calcul de la distribution stochastique du glissement (magnitude, valeur du glissement moyen, rigidité du matériel, longueur de corrélation, etc.) sont maintenues constantes. Pour cette raison les distributions des glissements aléatoires utilisées sont les mêmes pour les 9 géométries. Elles sont représentées Figure 6.

Au total 70 scénarios ont été simulés pour la marge maghrébine. Ils sont présentés Tableau 2 : chaque scénario (mag101, par exemple) correspond à la combinaison d'une géométrie de rupture (mag1xx, par exemple) et d'une distribution du glissement aléatoire (magx01, par exemple). On remarque que la distribution de référence (glissement moyen) a bien été prise en compte pour les 9 géométries. Ce n'est pas le cas pour certaines distributions (magx02, magx03, etc.) qui n'ont été considérées que pour les géométries les plus tsunamigènes. Cette intervention à dire-d'expert a permis de limiter le nombre de scénarios à simuler : 70 au lieu des 90 théoriques.

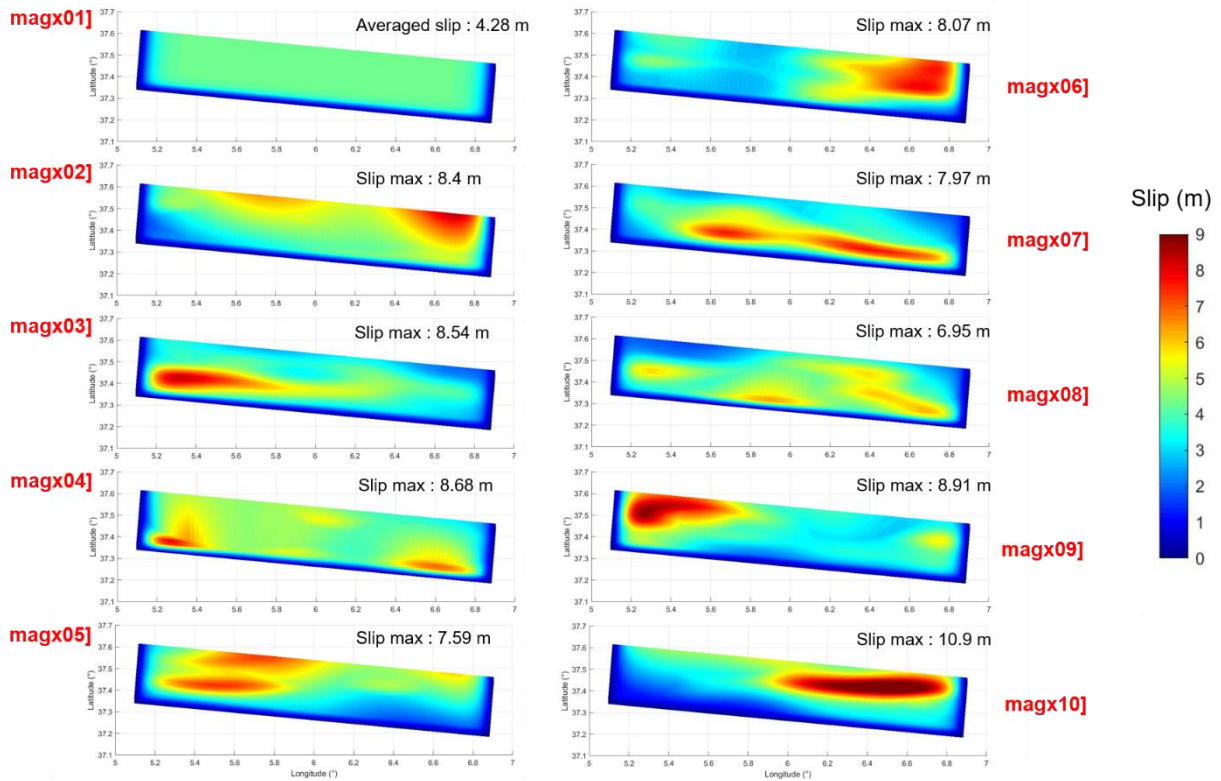


Figure 6 : Réalisation des glissements aléatoires pour un séisme de magnitude 7.8 dans la marge nord maghrébine. Longueurs et largeurs de la faille : respectivement 200 km et 31 km.

Géométrie	mag1xx	mag2xx	mag3xx	mag4xx	mag5xx	mag6xx	mag7xx	mag8xx	mag9xx
Scenario	mag101	mag201	mag301	mag401	mag501	mag601	mag701	mag801	mag901
	mag102	mag202	mag302	mag402	mag502				
		mag203	mag303	mag403	mag503				
	mag104	mag204	mag304	mag404	mag504				
		mag205	mag305	mag405	mag505	mag605	mag705	mag805	mag905
	mag106	mag206	mag306	mag406	mag506	mag606	mag706	mag806	mag906
		mag207	mag307	mag407	mag507	mag607	mag707	mag807	mag907
	mag108	mag208	mag308	mag408	mag508				
	mag109	mag209	mag309	mag409	mag509	mag609	mag709	mag809	mag909
		mag210	mag310	mag410	mag510	mag610	mag710	mag810	mag910

Tableau 2 : Liste des scénarios réalisés pour la marge nord maghrébine.

4.2. MARGE DE LA MER LIGURE

La marge de la mer Ligure, jonction entre les Alpes et la mer Ligure est l'une des régions sismiquement actives de la Méditerranée occidentale. Comme la sismicité de la région s'étend jusqu'en mer, la marge Ligure est considérée comme un domaine potentiellement tsunamigène. Bien qu'il soit caractérisé par une sismicité faible à modérée, des événements de fort impact ont été répertoriés par le passé, parmi lesquels, dans les Alpes Maritimes, 5 séismes associés à des intensités macrosismiques supérieures à VIII (équivalent à des dégâts massifs) en 1494, 1564, 1618, 1644 et 1887 (Sisfrance, www.sisfrance.net, Figure 7). En particulier, le séisme d'Imperia de 1887, dont la source a été localisée en mer a généré un tsunami (e.g. Ferrari, 1991 ; Eva & Rabinovitch, 1997 ; Larroque *et al.*, 2012). Les conséquences du séisme et du tsunami ont été documentés, cela a permis de caractériser cet événement qui constitue un événement historique de référence pour le secteur, tant pour la caractérisation de l'aléa sismique que tsunami (e.g. Courboux *et al.*, 2007 ; Salichon *et al.*, 2010 ; Larroque *et al.*, 2012 ; Ioualalen *et al.*, 2014 ; ; Nemati *et al.*, 2019). Larroque *et al.* (2012) supposent que ce séisme (magnitude M_w 6,8-6,9) est dû au « Ligurian thrust » (chevauchement ligurien), potentiellement connecté au « Ligurian Fault system » (système de faille ligurien) à plus faible profondeur (Figure 8). Ces hypothèses permettent de justifier les observations macrosismiques ainsi que les données associées au tsunami historique (Ioualalen *et al.*, 2014 ; Rohmer *et al.*, 2018). Certains auteurs ont associé le séisme d'Impéria de 1887 à une magnitude plus modérée, comme par exemple Eva and Rabinovitch (1997) qui proposaient une magnitude de 6,2 à 6,5.

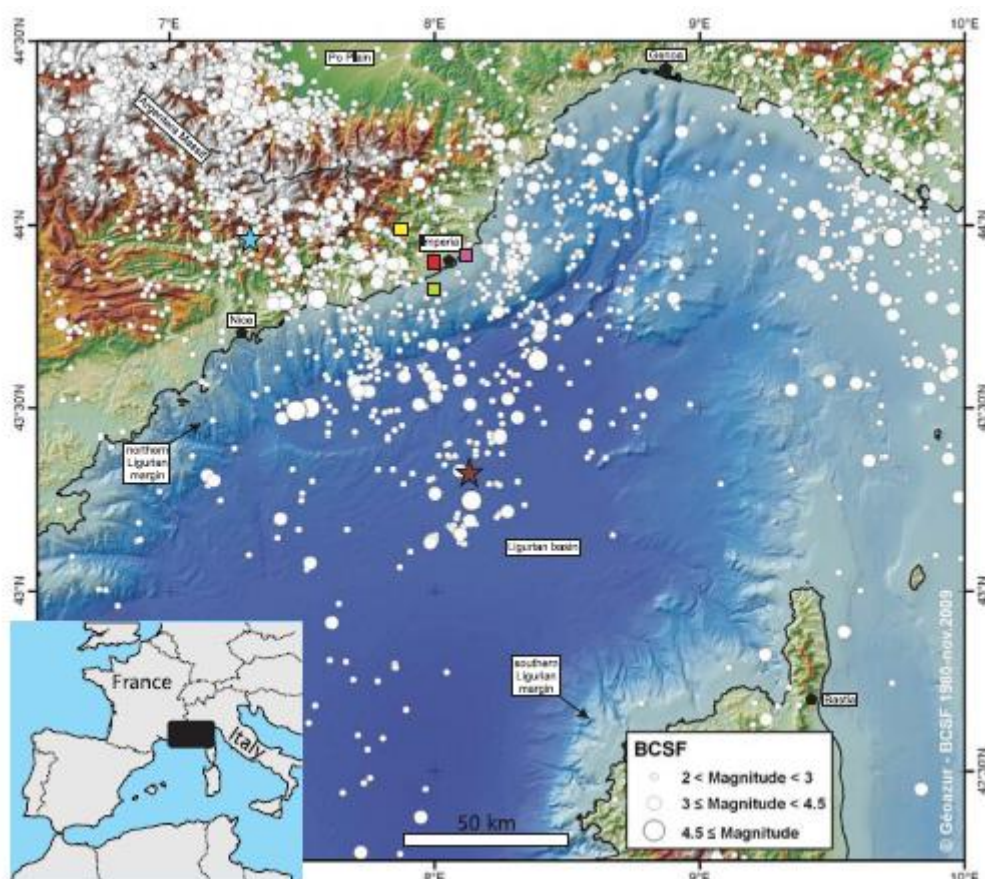


Figure 7 : Larroque *et al.* (2012), Figure 1. En blanc, sismicité instrumentale entre 1980 et 2010 (Bureau Central Sismologique Français). Les carrés représentent différentes hypothèses précédentes pour l'épicentre du séisme d'Imperia de 1887. L'étoile bleue, la position du séisme du 20 juillet 1564 (I VIII MCS), l'étoile brune l'épicentre du séisme du 19 juillet 1963 (M_L 6.0).

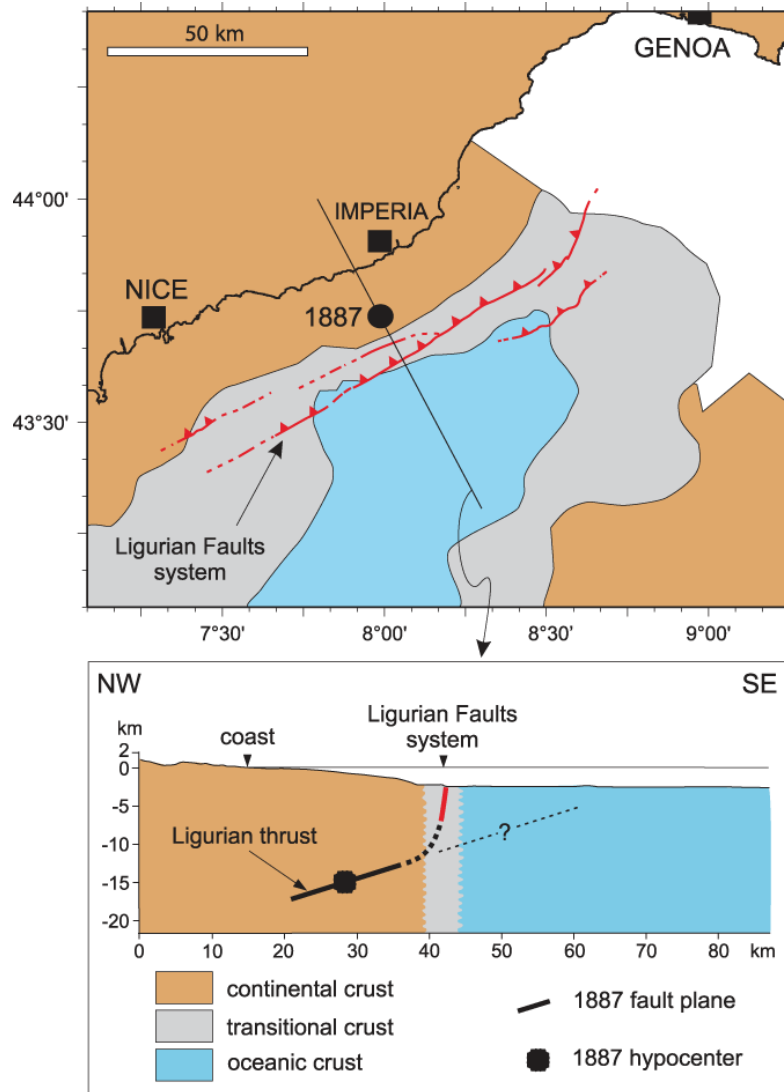


Figure 8 : Larroque et al. (2012), Figure 13. Représentation schématique du séisme d'Impéria en 1887. Carte et projection verticale au niveau de la section marquée par un segment noir sur la carte.

Les catalogues de sismicité, de paléosismicité ou de tsunami restent incomplets, la connaissance des structures actives également, particulièrement en mer, et il n'y a pas d'estimation consensuelle de temps de récurrence pour les événements majorant associés aux systèmes de faille du nord de la mer Ligure. Cependant, Tinti *et al.* (2004) liste dix tsunamis dans la zone « Ligure-Côte d'Azur » entre 1564 et 1979, dont 8 sont associés à des séismes. Cette région est la plus représentée dans le catalogue italien de tsunamis avec la « Campania ».

Des scénarios de tsunami plutôt maximisant mais basés sur des études et observations des structures actives de la région, en particulier le chevauchement ligurien (« Ligurian thrust ») et le système de failles ligurien (« Ligurian Fault System », Figure 8) ont récemment fait l'objet de travaux (e.g. (Ioualalen *et al.*, 2014), (Nemati *et al.*, 2019), (Boschetti *et al.*, 2020)). Le séisme de 1887 n'aurait rompu que les 40 km les plus à l'est sur les 80 km du système de faille de Ligure. Des hypothèses majorantes ont été proposées qui considèrent la rupture de l'ensemble de ce système ou de différentes parties. Dans cette étude nous nous sommes donc référés à ces travaux et nous avons choisi 4 géométries différentes. Celles-ci sont représentées en Figure 9, en rapport avec le système de failles du nord de la mer Ligure. Les paramètres géométriques qui les définissent sont indiqués dans le Tableau 3.

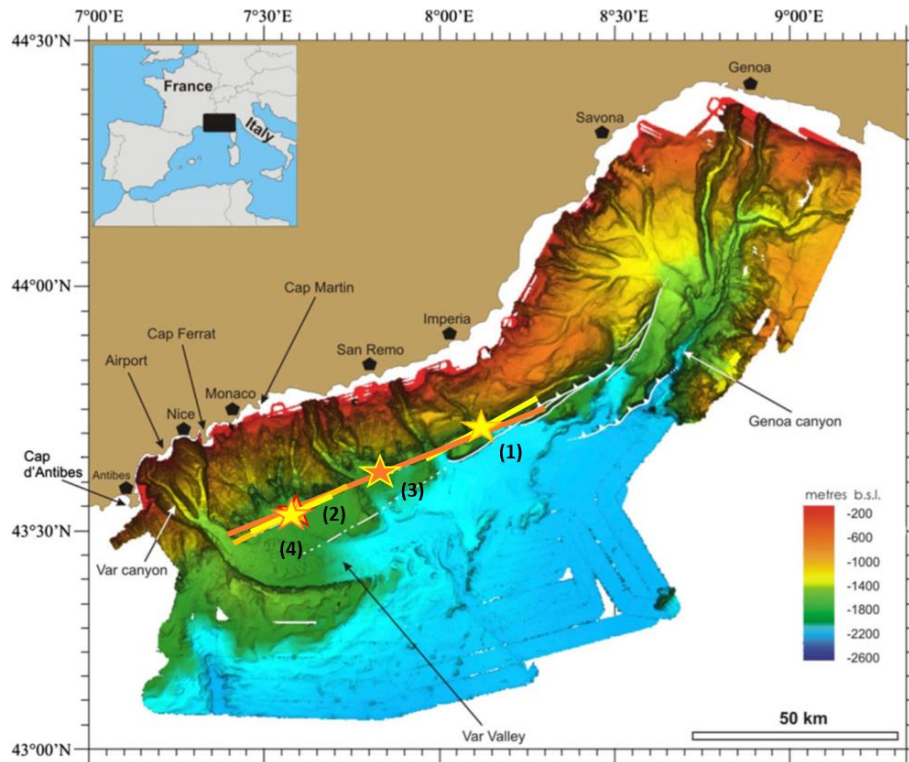


Figure 9 : Carte des scénarios des sources sismiques pour la marge de la mer Ligure dans le contexte des failles répertoriées (d'après (Boschetti, et al. 2020, fig. 2, p. 3)). 4 géométries ont été sélectionnées pour cette étude (indiquées par les numéros en figure). Les étoiles représentent les épicentres des événements ; les barres colorées (jaune/orange) représentent le bord supérieur (up-dip) des séismes.

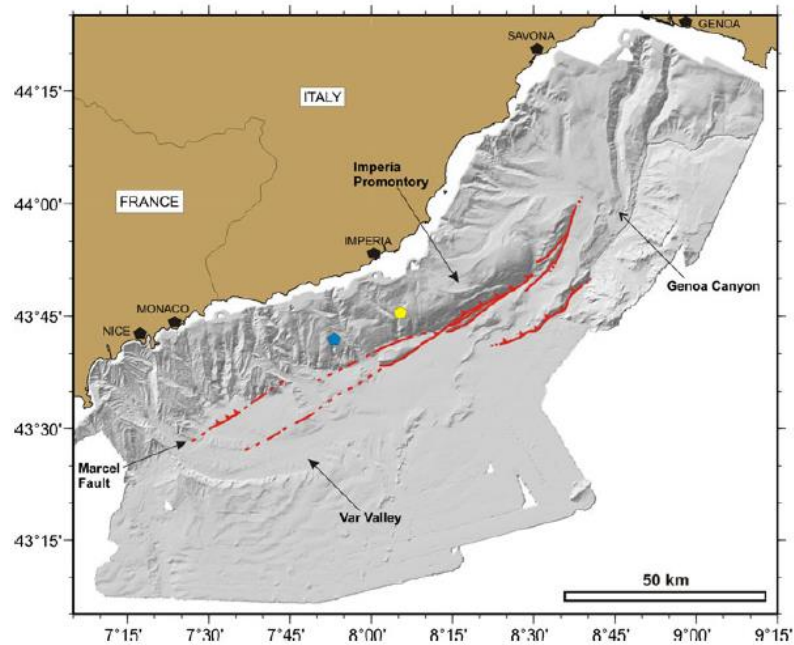


Figure 10 : Larroque et al. (2011), Figure 14. Bathymétrie et représentation du système de faille ligurien. La faille Marcel est au sud ouest du système.

Nom	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Longueur (km)	Largeur (km)	Azimut (°N)	Pendage (°)	Rake (°)	Z (km)	Mw	Slip moyen (m)
lig1xx	8.08	43.7	35	17	235	16	90	15	6.9	~1.5
lig2xx	7.55	43.58	35	17	235	16	90	15	6.9	~1.5
lig3xx	7.815	43.64	80	27	250	16	90	15	7.5	~3.3
lig4xx	7.48	43.53	15	12	243	41	74	11	6.5	~0.8

Tableau 3 : Résumé des caractéristiques géométriques des 4 événements testés pour la marge de la mer Ligure (Z est utilisé pour indiquer la profondeur focale, Mw pour indiquer la magnitude équivalente).

Les géométries de rupture retenues :

- lig1xx reproduit le séisme historique de 1887, à l'est du système de faille du nord de la mer Ligure (plutôt maximisé en termes de glissement) ;
- lig2xx correspond à une translation de l'épicentre du premier scénario vers le sud-ouest (le long de la faille documentée), pour être positionné face à Nice et en augmenter l'impact sur le littoral du département des Alpes-Maritimes ;
- lig3xx est un scénario extrême (Ioualalen *et al.*, 2014 ; (Nemati *et al.*, 2019), (Boschetti *et al.*, 2020)) pour lequel l'ensemble du « Ligurian fault system » romprait ;
- lig4xx, enfin, diffère des trois précédents, trouve sa justification dans l'essai de tremblements de terre de 2001 (Courboulex *et al.*, 2007) et il s'inspire du travail (Salichon *et al.*, 2010). Il correspondrait à la rupture de la faille Marcel avec un séisme de magnitude 6,5.

Les premières deux géométries (lig1xx et lig2xx) diffèrent entre elles par la translation de l'épicentre du séisme vers le sud-ouest le long de la faille (la magnitude par exemple est la même). C'est pourquoi, une seule série de 10 distributions des glissements peut être utilisée pour ces deux géométries (voir Figure 11).

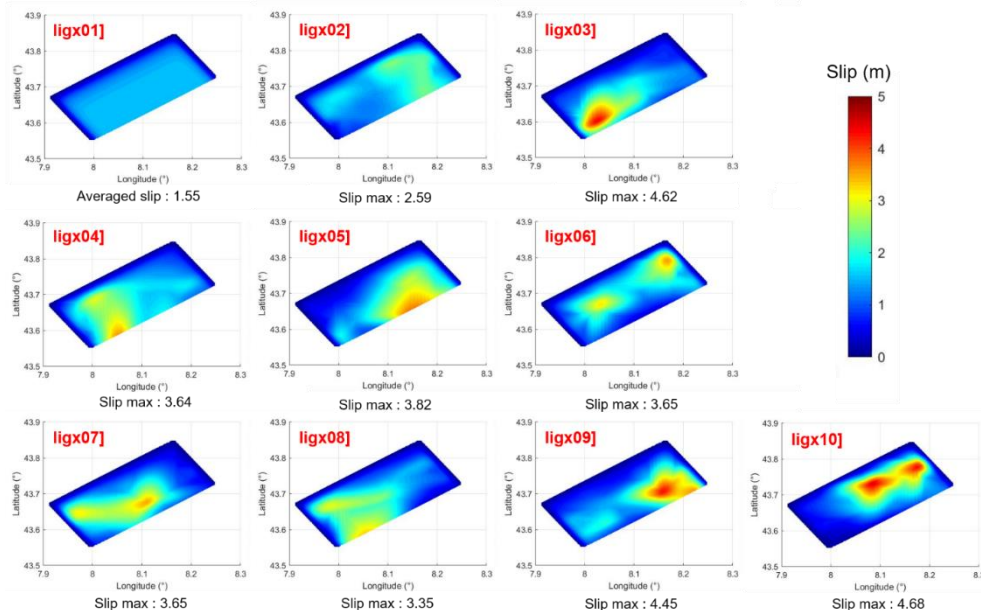


Figure 11 : Réalisations des glissements aléatoires pour un séisme de magnitude 6.9 dans la mer Ligure (valables pour la géométrie lig1xx et lig2xx, voir Tableau 3).

Comme les caractéristiques des géométries lig3xx et lig4xx sont très différentes entre elles et par rapport aux deux premières, des distributions aléatoires des glissements spécifiques à ces deux cas ont été utilisées. Celles-ci sont montrées dans la Figure 12 et la Figure 13, respectivement pour les géométries lig3xx et lig4xx.

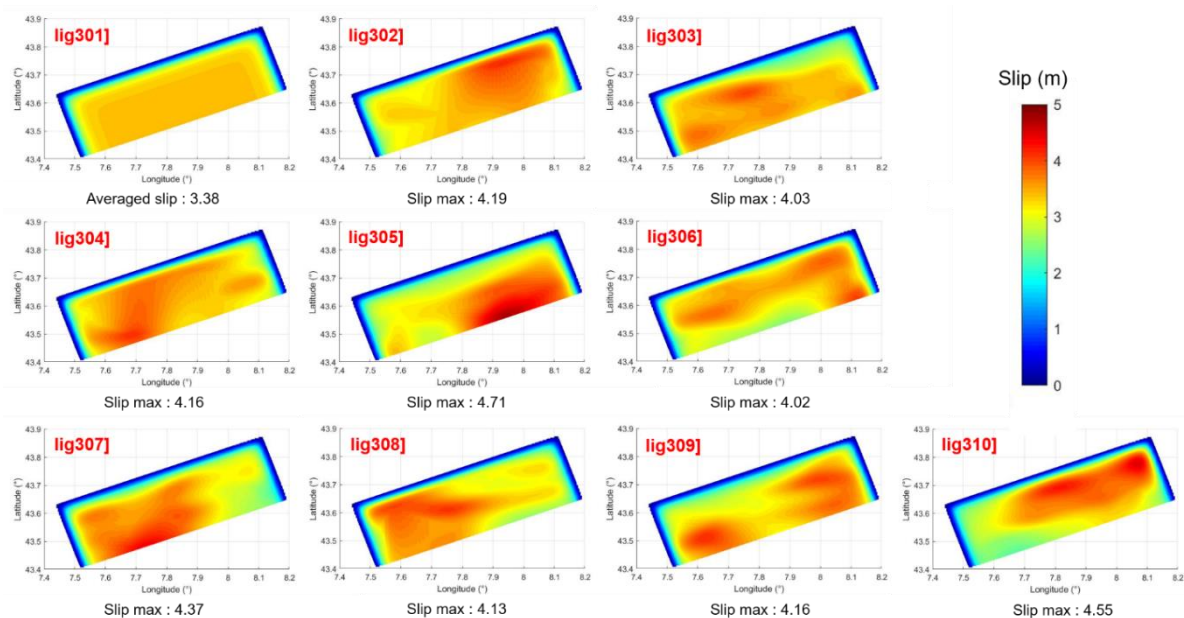


Figure 12 : Réalisation des glissements aléatoires pour un séisme de magnitude 7.5 dans la mer Ligure (géométrie lig3xx, voir Tableau 3). Longueur et largeur de la faille : respectivement 80 km et 27 km ; épicentre : 7.815° lon (X), 43.64° lat (Y), azimuth : 250°N .

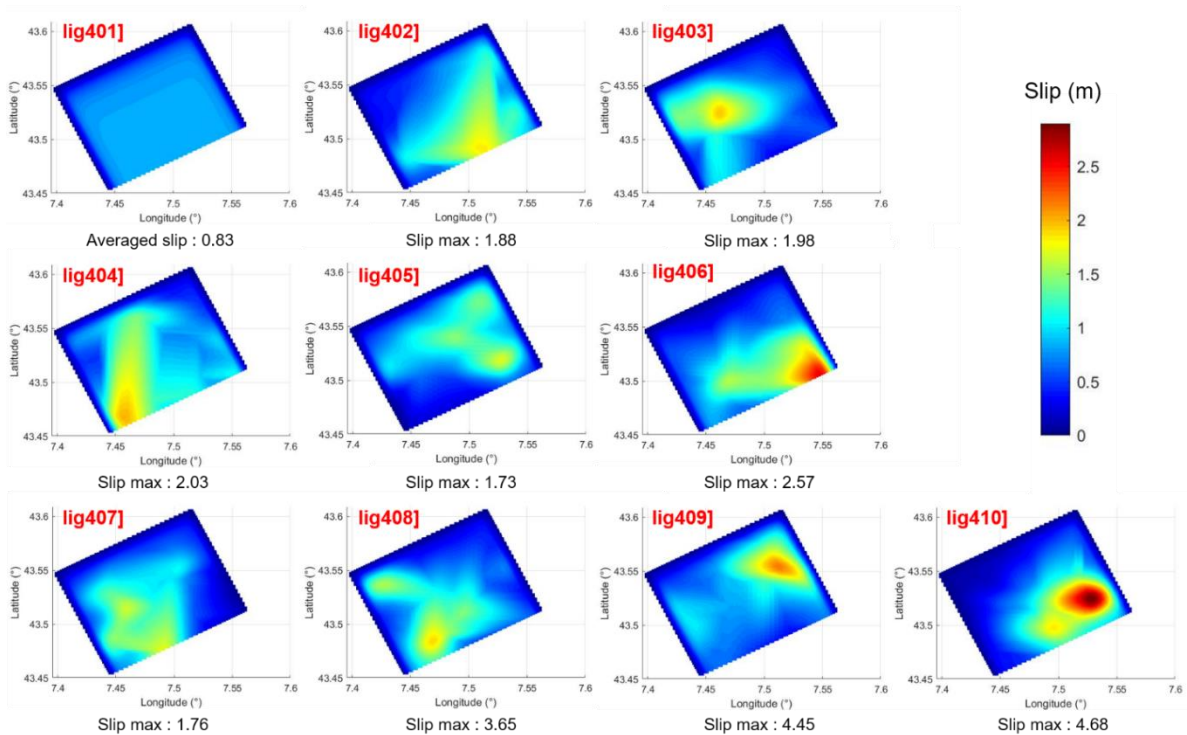


Figure 13 : Réalisation des glissements aléatoires pour un séisme de magnitude 6.5 dans la mer Ligure (géométrie lig4xx, voir Tableau 3). Longueur et largeur de la faille : respectivement 15 km et 12 km ; épicentre : 7.48° lon (X), 43.53° lat (Y), azimuth : 243°N .

Pour chacune de ces 4 géométries, 10 scénarios de champs de glissements ont été générés de façon stochastique.

Au total, 40 scénarios ont été simulés pour les sources de la mer Ligure correspondant à la combinaison des 4 géométries de rupture et des 10 distributions des glissements aléatoires (voir *Tableau 4*).

Géométrie	lig1xx	lig2xx	lig3xx	lig4xx
Scenario	lig101	lig201	lig301	lig401
	lig102	lig202	lig302	lig402
	lig103	lig203	lig303	lig403
	lig104	lig204	lig304	lig404
	lig105	lig205	lig305	lig405
	lig106	lig206	lig306	lig406
	lig107	lig207	lig307	lig407
	lig108	lig208	lig308	lig408
	lig109	lig209	lig309	lig409
	lig110	lig210	lig310	lig410

Tableau 4 : Liste des scénarios réalisés pour la marge nord de la mer Ligure.

5. Résultats des modélisations numériques

Les caractéristiques (géométrie, distribution du glissement) ainsi que les résultats des modélisations numériques de chacun des 110 scénarios traités ont été compilés sur des planches présentes en annexes 1 et 2 de ce rapport pour une consultation détaillée de chacun des résultats. Chaque planche se présente de la façon suivante (voir à titre d'exemple la Figure 14) :

- le numéro du scénario ;
- les caractéristiques géométriques de la rupture de la faille ;
- la distribution stochastique du glissement (slip) dans le plan de la faille et la valeur maximale du glissement ;
- les cartes d'élévation maximale du plan d'eau atteinte en tout point de la grille de calcul pendant la durée de la simulation : sur l'ensemble du domaine de calcul (à gauche) et centrée sur la zone d'étude (à droite) ;
- les séries temporelles de hauteur d'eau au niveau de 21 stations virtuelles placées le long de la côte méditerranéenne française dont 13 situées le long du littoral du département des Alpes Maritimes (leur position est indiquée sur la carte d'élévation maximale du plan d'eau centrée sur la zone d'étude).

5.1. RÉSULTATS POUR L'ENSEMBLE DES SIMULATIONS

Dans un premier temps l'ensemble des résultats des 110 simulations a été traité de façon à identifier pour chaque point de la grille de calcul à la résolution de 100 m :

- **la valeur maximale du niveau du plan d'eau tout scénario confondu** : sur la Figure 15 on peut constater qu'au large de la zone d'étude, et en dehors de la zone de génération des tsunamis, les niveaux d'eau varient entre 0,1 et 0,5 m. Puis ces niveaux s'amplifient au fur et à mesure que l'on se rapproche de la côte en passant à des valeurs de 1 m, puis 3 m voire plus (supérieures à 5 m) sur certaines localités comme à Cannes et à Menton par exemple ;
- **le scénario correspondant à cette valeur maximale du niveau du plan d'eau** : la Figure 16 indique que, proche du rivage, ce sont les scénarios de la marge maghrébine qui sont les plus impactant en termes de niveau d'eau sauf sur le linéaire côtier au nord de Monaco où les scénarios de la marge nord de la mer Ligure peuvent être les plus intenses. Dans le détail, ce sont les scénarios dont la géométrie se caractérise par un azimuth de 95° (mag2xx, par exemple) et par une magnitude de 7.5 (lig3xx) qui sont les plus impactant pour les sources de la marge maghrébine et de la mer Ligure respectivement.

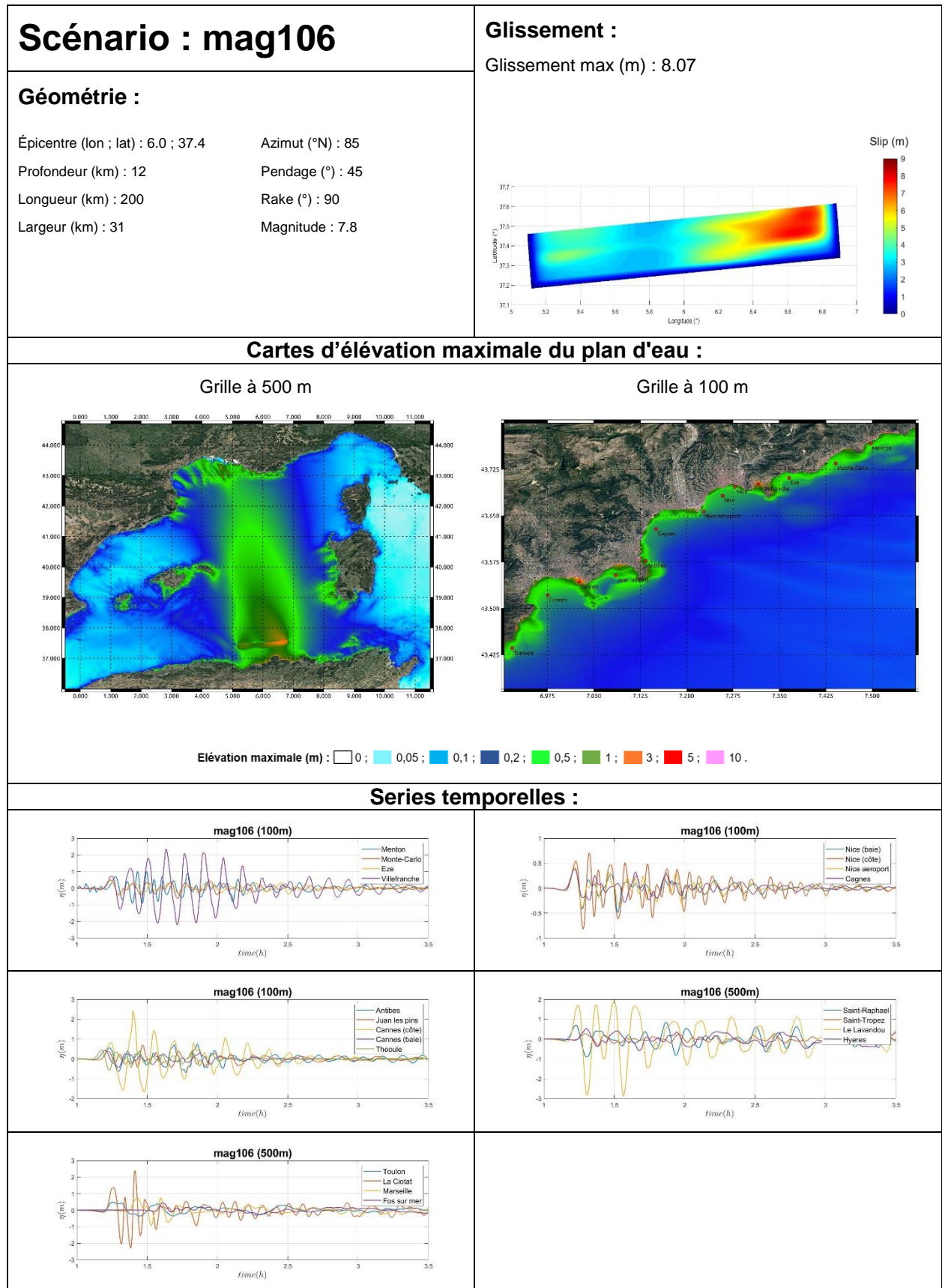


Figure 14 : Exemple de compilation des caractéristiques et des résultats du scénario « mag106 ».

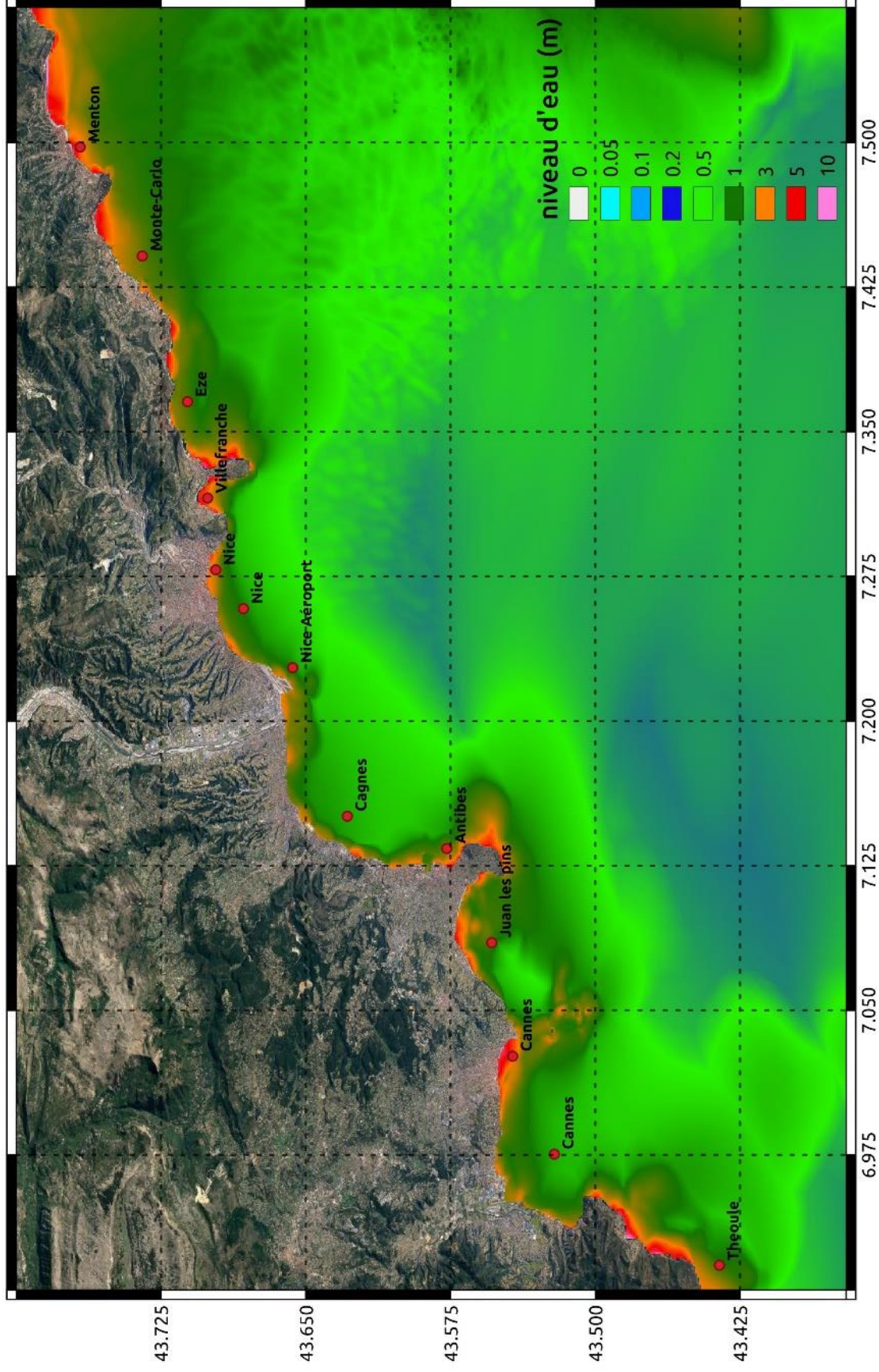


Figure 15 : Carte des niveaux maximaux du plan d'eau (valeurs en m/IGN69) pour l'ensemble des scénarios simulés (résolution à 100 m).

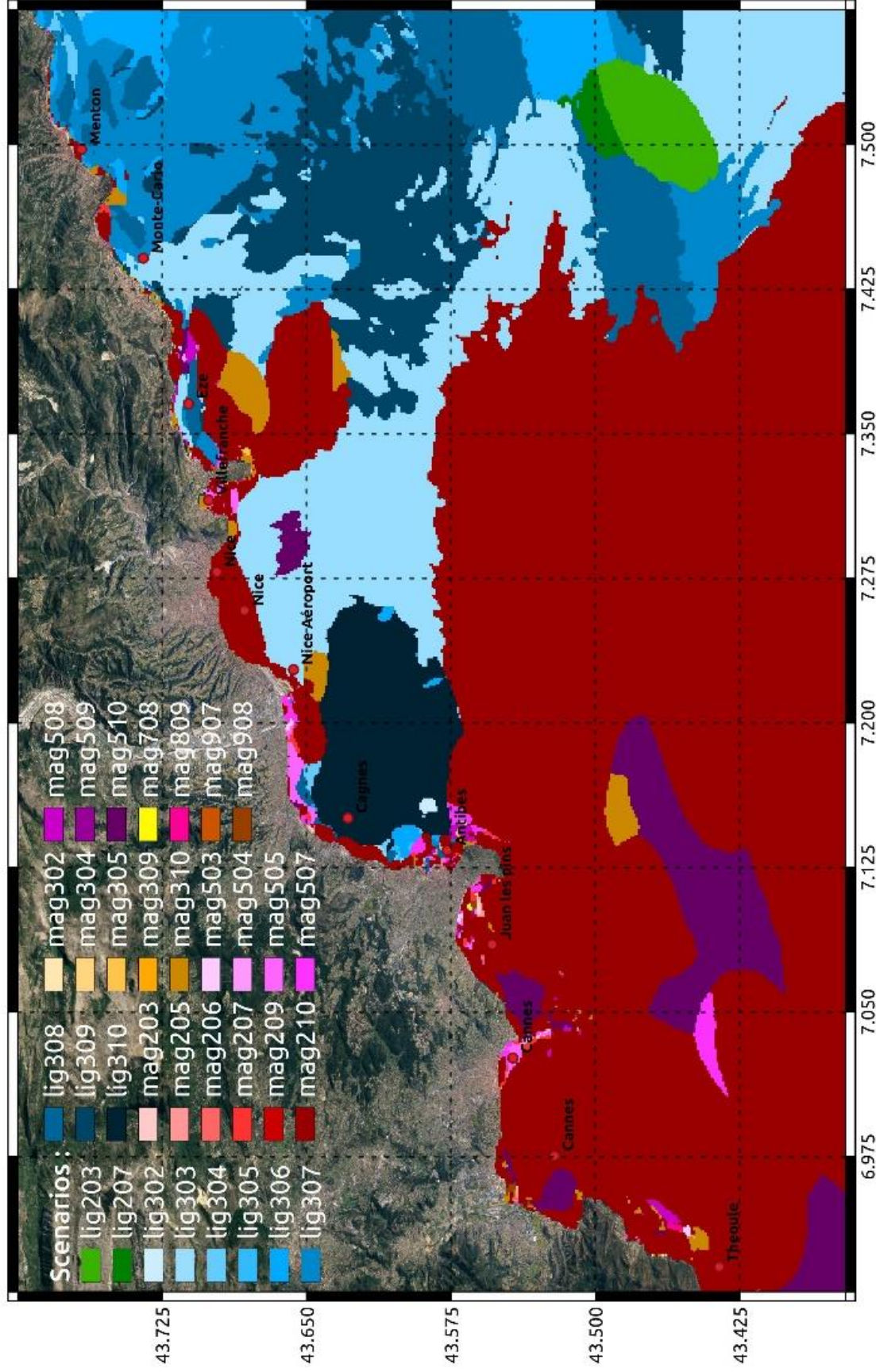


Figure 16 : Carte des scénarios les plus impactants. Les scénarios identifiés, ici par leur numéro, sont décrits dans le Tableau 2 et le Tableau 4. Les couleurs froides représentent les scénarios de la marge nord de la mer Ligure (ligxxx) et les couleurs chaudes sont utilisées pour représenter les scénarios de la marge nord-maghrébine (magxxx).

L'analyse des séries temporelles de hauteur d'eau des 110 simulations correspondant aux stations distribuées le long du littoral du département des Alpes Maritimes indique que les temps d'arrivée des tsunamis :

- varient peu (de quelques minutes) pour un site donné à l'intérieur d'une même famille de scénarios (marge maghrébine ou mer Ligure) ;
- sont assez homogènes spatialement (voir Tableau 5). Ces temps d'arrivée s'échelonnent de 1h07min à 1h12min pour les sources de la marge maghrébine. Ils sont de 2 min à 7 min pour la mer Ligure ce qui empêche, dans ce cas, toute prévision et alerte des tsunamis.

Secteur	Marge nord Maghrébine	Marge nord mer Ligure
Menton	1h12min	5min
Monte-Carlo	1h10min	4min
Èze	1h10min	3min
Villefranche	1h10min	5min
Nice (rivage)	1h10min	3min
Nice (baie)	1h09min	3min
Nice aéroport	1h09min	2min
Cagnes	1h09min	3min
Antibes	1h10min	5min
Juan-les-Pins	1h10min	6min
Cannes (rivage)	1h10min	7min
Cannes (baie)	1h08min	4min
Théoule-sur-Mer	1h07min	4min

Tableau 5 : Temps d'arrivée des tsunamis (arrondis à la minute près).

5.2. RÉSULTATS POUR LES SCÉNARIOS LES PLUS IMPACTANTS

Enfin, nous nous focalisons sur les scénarios mag210 et lig303, qui sont parmi les plus impactants des scénarios simulés (voir Figure 16), afin d'extraire des informations détaillées sur la génération et la propagation des tsunamis induits.

5.2.1. Scénario mag210

La Figure 17 montre que la distribution du glissement (valeurs supérieures à 7 m concentrées à l'est et dans la partie supérieure du plan de faille) associée à un azimuth de 95° de la faille concourent à une propagation préférentielle du tsunami en direction du littoral des Alpes-Maritimes (voir carte des niveaux d'eau à la résolution de 500 m). C'est pourquoi les élévations maximales du plan d'eau proche du rivage (carte à la résolution de 100 m) de ce scénario se rapprochent des valeurs maximales tous scénarios confondus de la Figure 15.

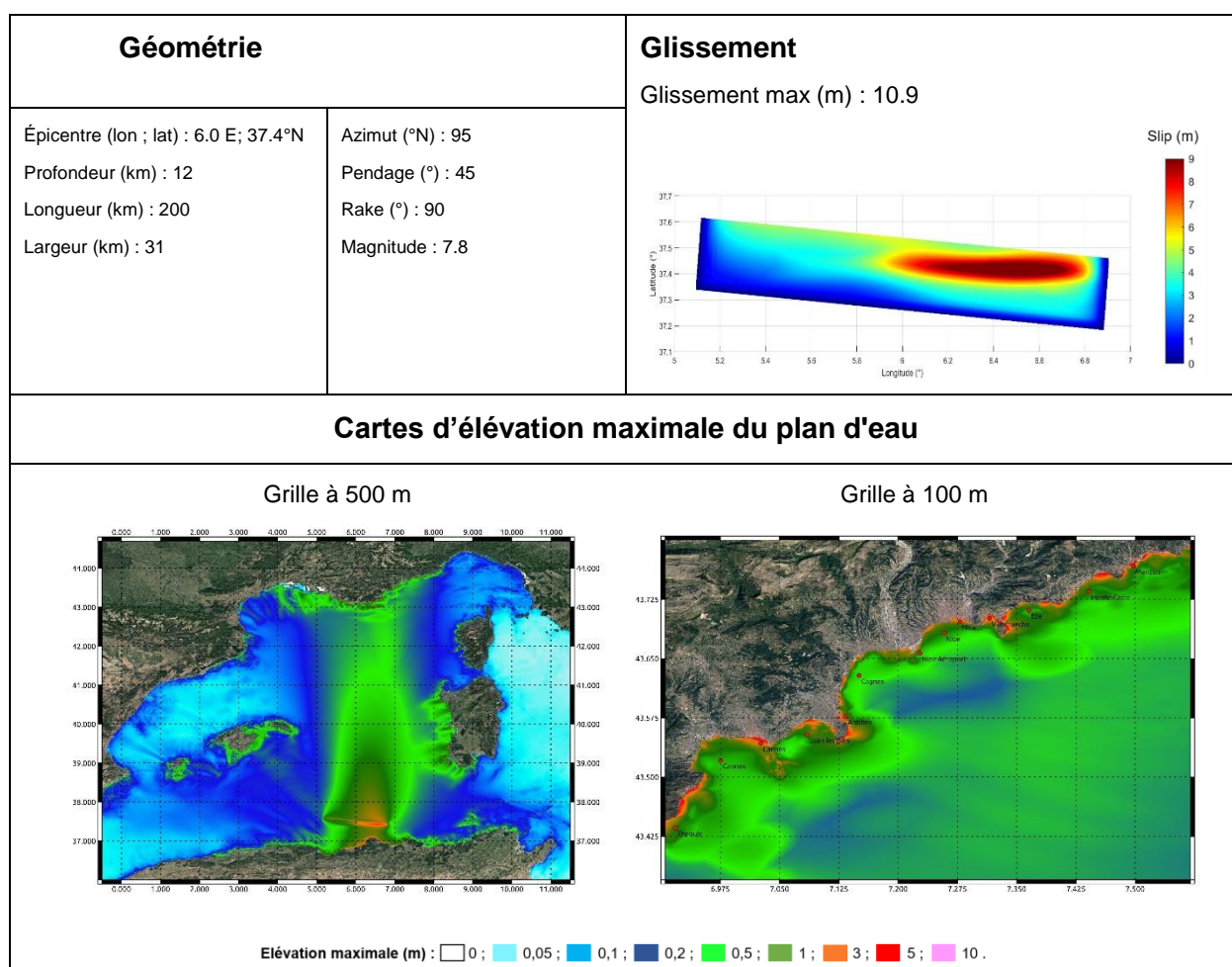


Figure 17 : Caractéristiques générales de la rupture et cartes des niveaux d'eau maximaux simulés pour le scénario mag210.

La Figure 18, rassemblant plusieurs instantanées de la simulation de la propagation du tsunami, indique que la première vague du tsunami atteindrait le secteur de Théoule-sur-Mer aux environs de 1h10min. Quelques minutes après (aux environs de 1h12min), c'est la quasi-totalité du littoral des Alpes-Maritimes qui est impactée par cette première vague. Par la suite on observe, proche du rivage, des vagues « piégées » résultant des interactions complexes entre les trains d'ondes incidents venant du large et les ondes qui se réfléchissent sur la côte (flèches dirigées vers le large).

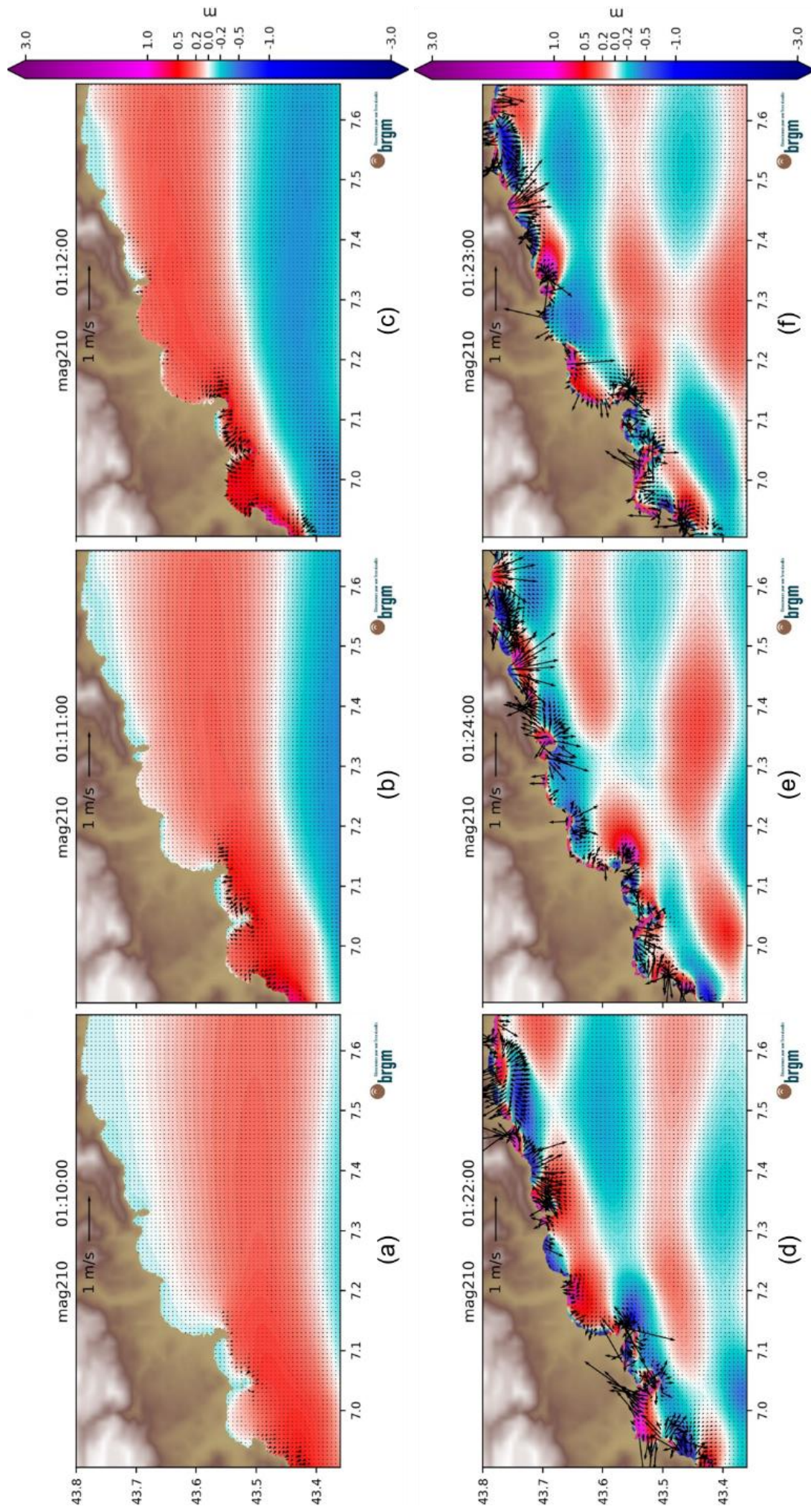


Figure 18 : Instantanés de la propagation du tsunami et impact sur le littoral des Alpes Maritimes pour le scénario mag210. Les différentes couleurs indiquent l'élévation du plan d'eau. Les vecteurs correspondent à la vitesse et la direction des courants.

Les séries temporelles correspondant aux stations virtuelles Figure 19 montrent :

- qu'il n'y a pas de retrait de la mer avant l'arrivée de la première vague : c'est à dire qu'il n'y a pas d'alerte « naturelle » de l'arrivée du tsunami pour les personnes présentes sur la côte ;
- que ce n'est pas la première vague la plus haute : en fonction du secteur considéré cela peut être la 2^e (Nice ou Cannes « côte », par exemple), la 3^e (Menton par exemple), la 4^e (Monte-Carlo ou Villefranche par exemple) voire la 5^e vague (Antibes par exemple). La vague la plus haute pour un secteur donné résulte des interactions entre les ondes incidentes/réfléchies décrites ci-dessous qui agissent différemment en fonction de la morphologie locale (présence de baies, cap, îles, par exemple) ;
- que la mer reste très agitée sur une durée de ~2h50min entre Villefranche et Menton et de ~1h20 sur le reste du littoral. Les hauteurs maximales crête-à-croix des vagues avoisinent les 7 m, 5.5 m et 6 m respectivement à Menton et sur les côtes de Nice et Cannes.

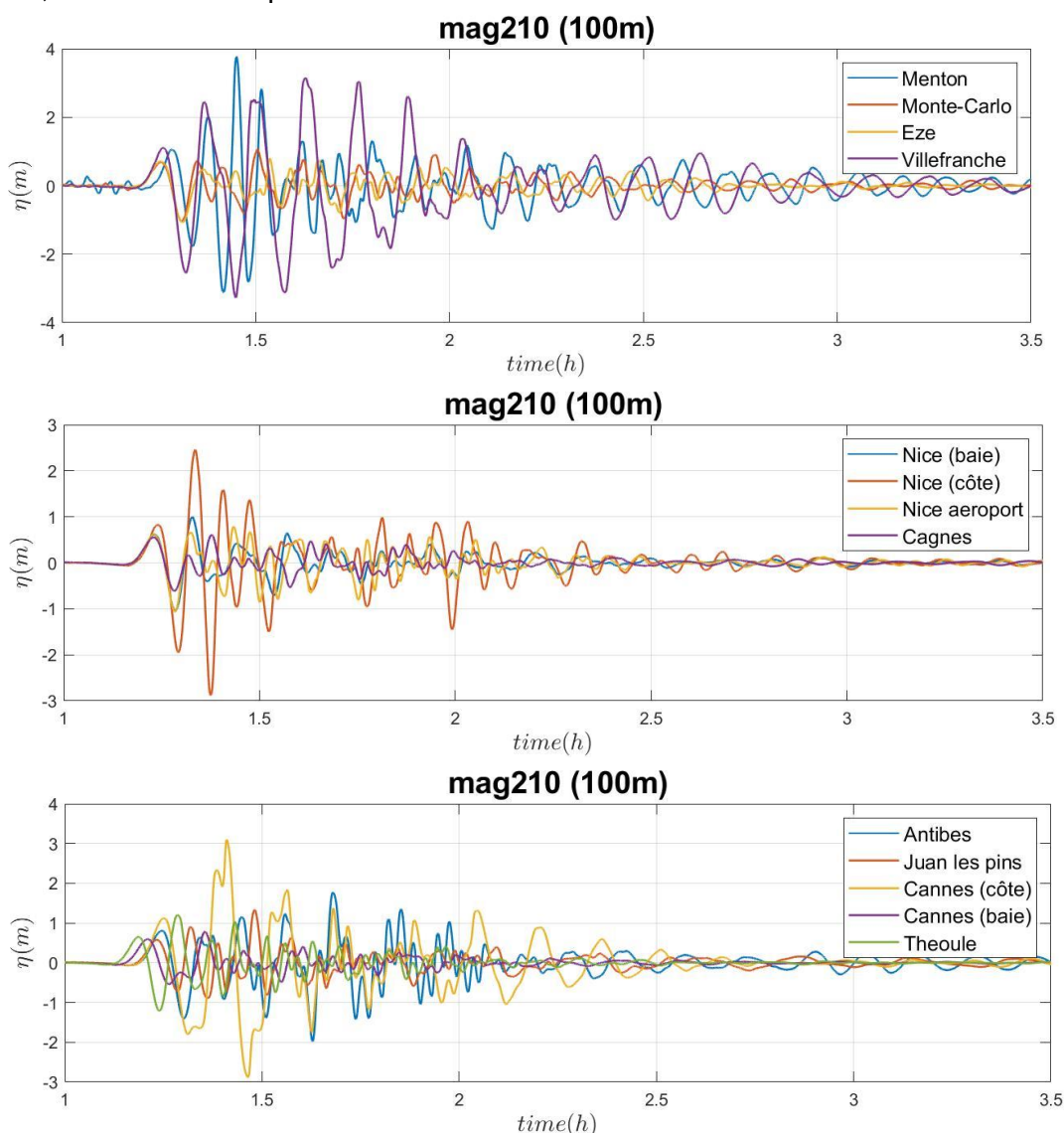


Figure 19 : Séries temporelles des hauteurs d'eau pour le scénario mag210 correspondant aux stations virtuelles distribuées le long du littoral des Alpes-Maritimes.

Enfin, la Figure 20 indique que les vitesses maximales des courants engendrés par ce scénario sont faibles au large (de l'ordre de $0,05 \text{ ms}^{-1}$) pour devenir intenses à proximité du rivage avec des valeurs de 3 ms^{-1} dépassant sur certaines portions du littoral les 5 ms^{-1} .

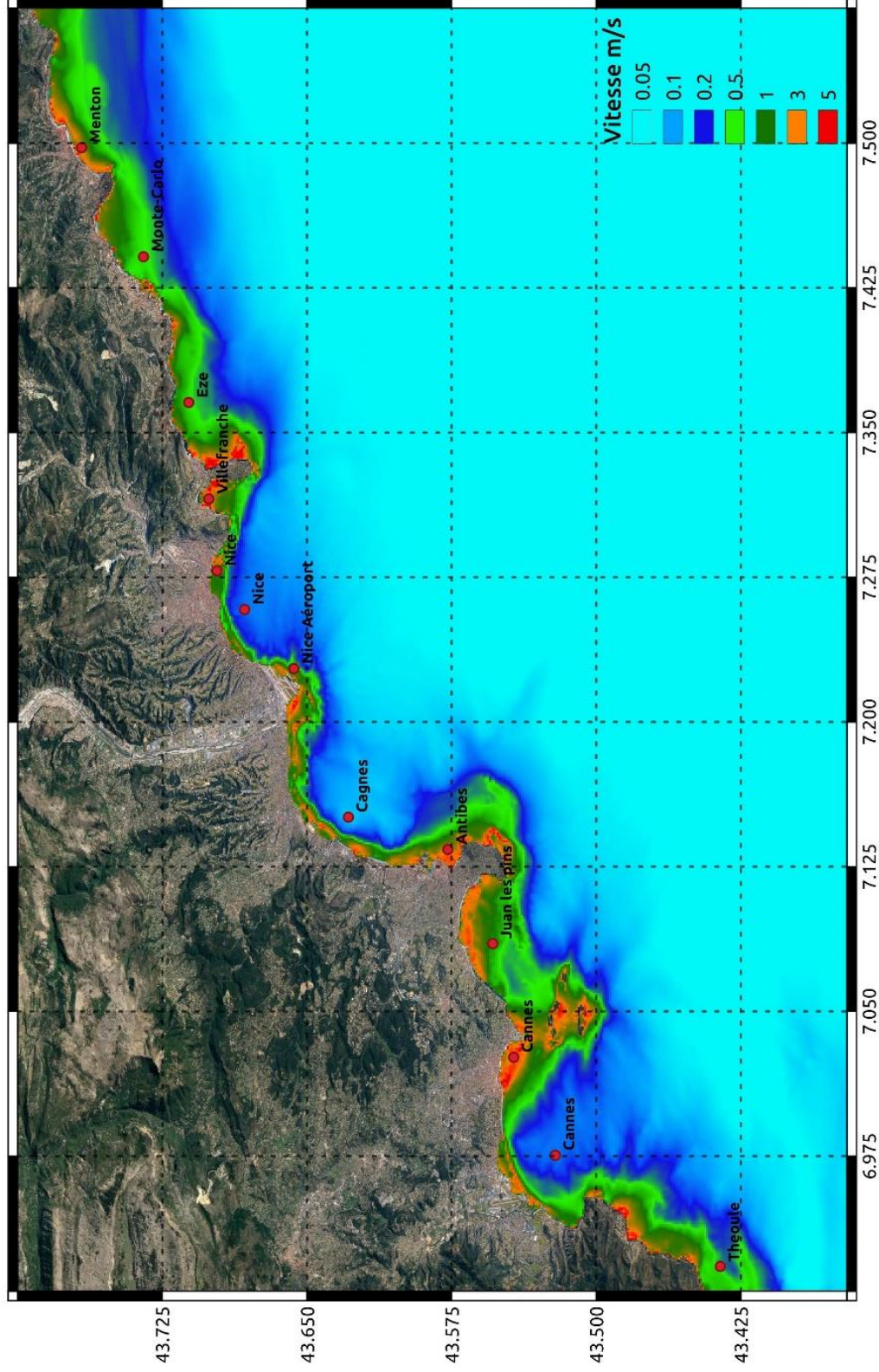


Figure 20 : Carte des vitesses maximales simulées pour le scénario mag210.

5.2.2. Scénario lig303

La géométrie de la faille (positionnée au large du littoral situé entre Nice et Imperia en Italie, son orientation quasi parallèle à cette portion du littoral) ainsi qu'une distribution des valeurs maximales du glissement à l'ouest du plan de faille génèrent des élévations maximales du plan d'eau sur le linéaire côtier compris entre Nice et Menton (Figure 21).

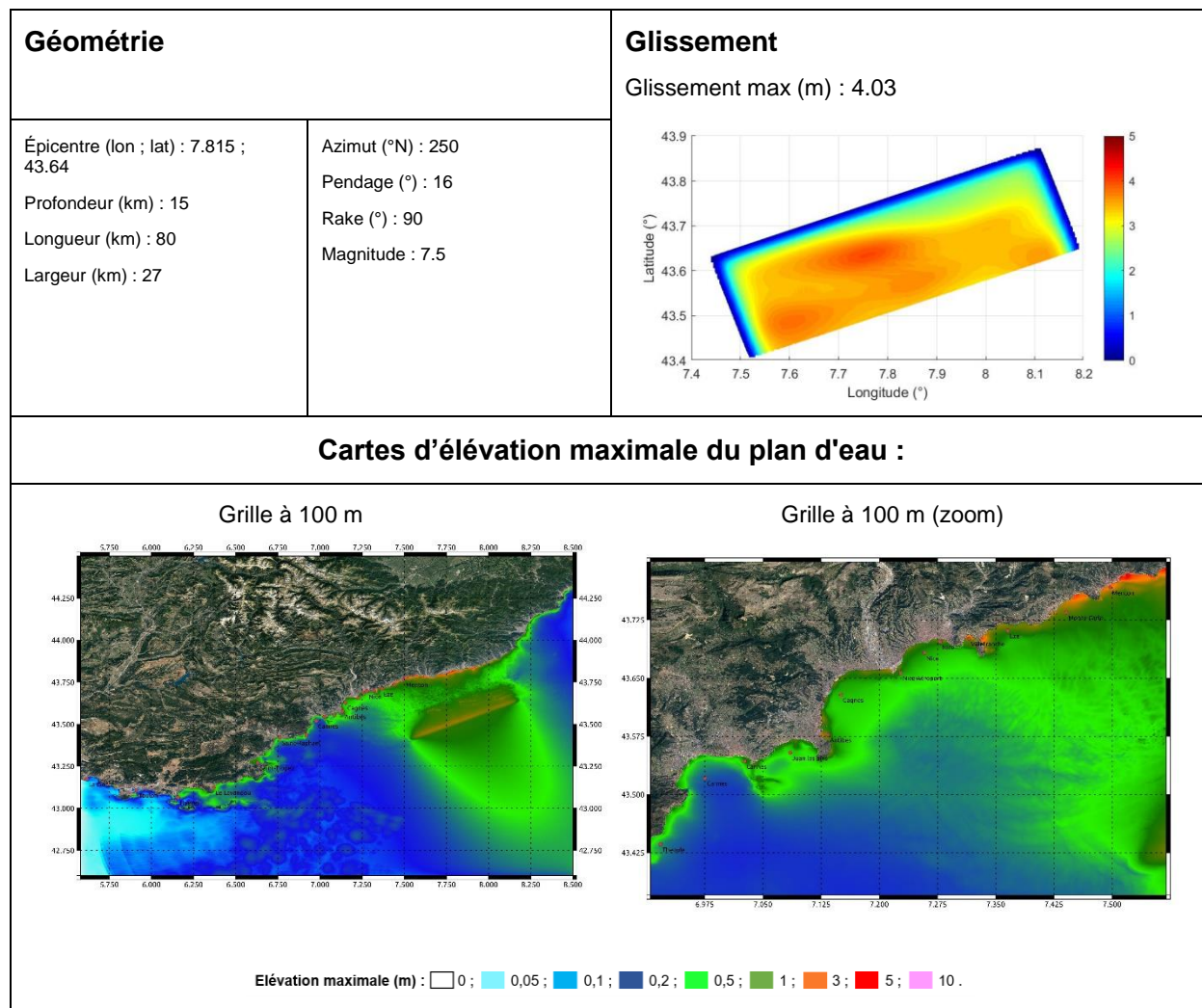


Figure 21 : Caractéristiques générales de la rupture et cartes des niveaux d'eau maximaux simulés pour le scénario lig303.

Des instantanées de la simulation de la propagation du tsunami (Figure 22) indiquent que la première vague du tsunami atteint le nord-est du littoral en 3 min. Au bout de 7 min, c'est tout le littoral des Alpes-Maritimes qui est impacté par cette première vague. Cette première vague est suivie de plusieurs trains d'ondes provenant de la zone de génération ainsi que des vagues qui se sont réfléchies sur le littoral (propagation vers l'ouest) donnant naissance là encore à des ondes piégées.

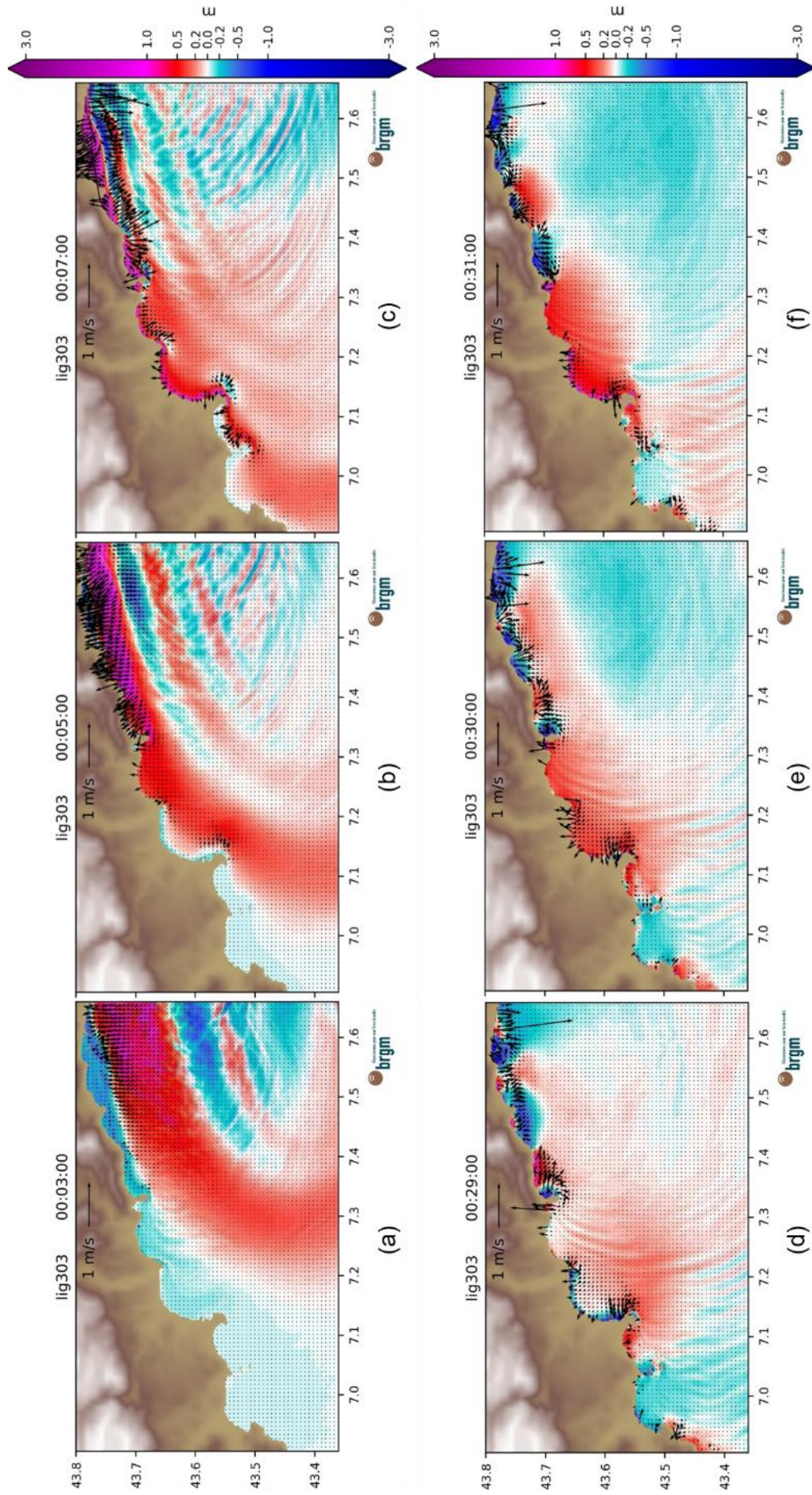


Figure 22 : Instantanés de la propagation du tsunami et impact sur le littoral des Alpes Maritimes pour le scénario lig303. Les différentes couleurs indiquent l'élevation du plan d'eau. Les vecteurs correspondent à la vitesse et la direction des courants.

Les séries temporelles présentées Figure 23 indiquent :

- l'existence d'un retrait de la mer d'une hauteur inférieure à 0.10 m sur quelques-unes des stations. La faible valeur de ce retrait et le fait qu'il ne soit pas systématique sur l'ensemble du littoral indiquent qu'il ne faut pas compter sur une alerte « naturelle » pour ce type de source tsunamigène ;
- que c'est la 1^{ère} vague la plus haute sauf pour Villefranche où c'est la 6^e et Cagnes et Antibes où c'est la 4^e ;
- que la mer reste très agitée avec des hauteurs crête-à-croix des vagues supérieures à 2 m une heure après le séisme. Les hauteurs crête-à-croix des vagues les plus importantes atteignent ~5 m à Menton et ~3m sur la côte de Nice et à Antibes.

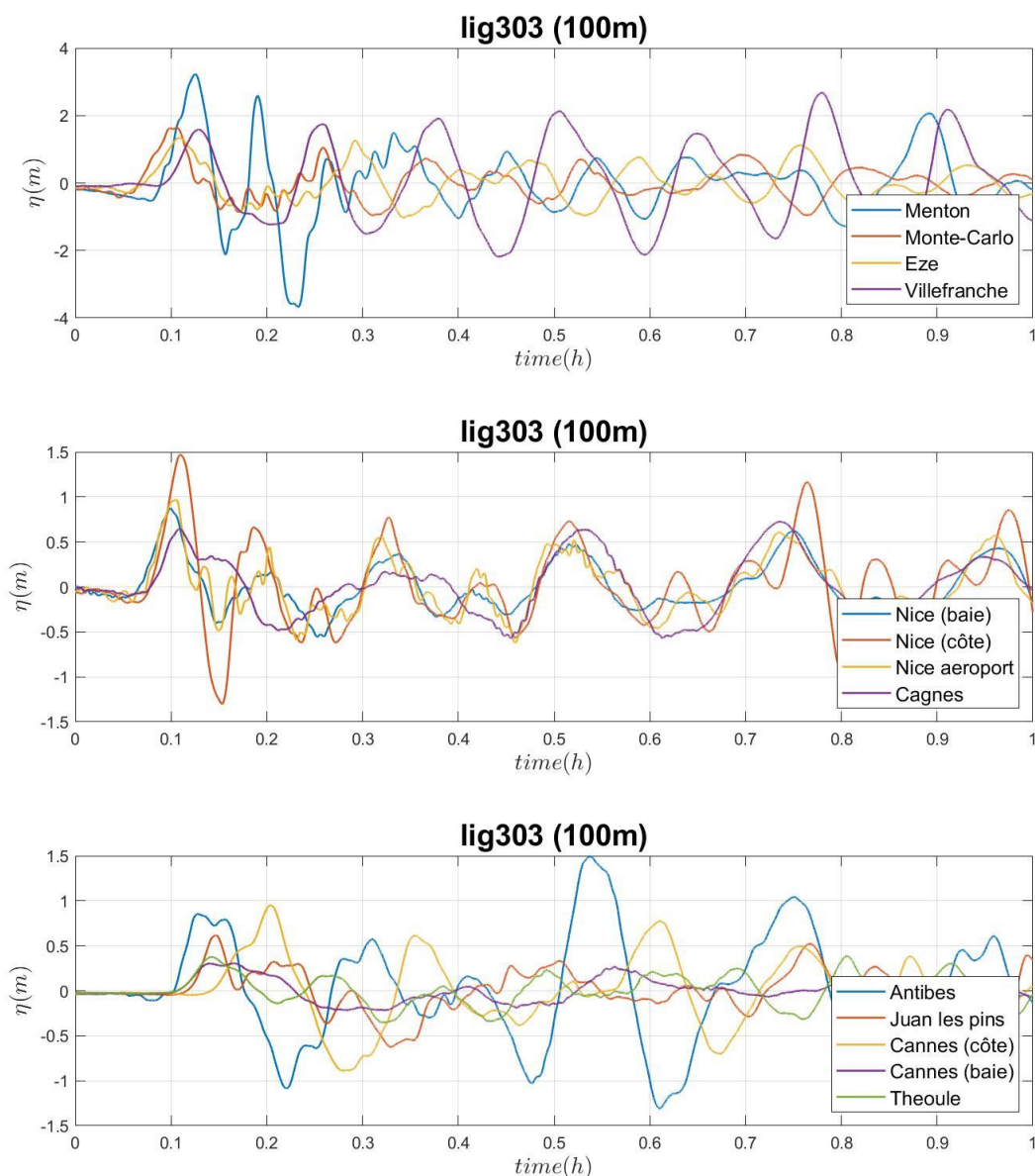


Figure 23 : Séries temporelles des hauteurs d'eau pour le scénario lig303 correspondant aux stations virtuelles distribuées le long du littoral des Alpes-Maritimes.

Les vitesses maximales des courants engendrés par ce scénario atteignent 1 ms^{-1} sur la quasi-totalité du littoral pour dépasser les 3 ms^{-1} sur certains secteurs comme à proximité de Villefranche et de Menton.

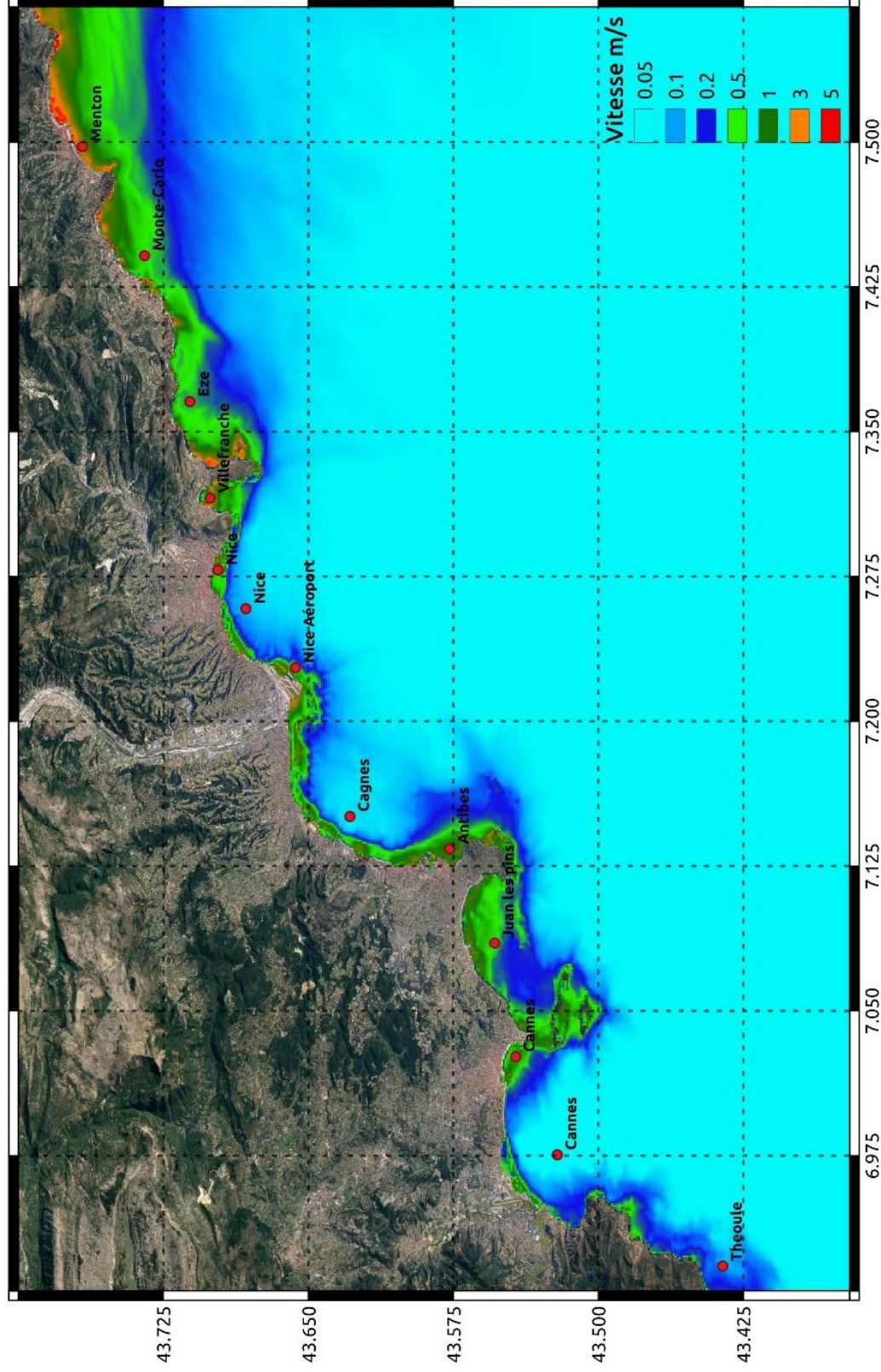


Figure 24 : Carte des vitesses maximales simulées pour le scénario lig303.

6. Détermination des zones potentiellement inondables : extension et hauteurs d'eau maximales

Ci-après nous décrivons la méthode de calcul des zones potentiellement inondables ainsi que les principaux secteurs du linéaire côtier du département des Alpes-Maritimes affectés par la submersion.

6.1. MÉTHODE DE CALCUL

La méthode de calcul se déroule en 2 phases principales. La première, entièrement automatique, permettant de définir les « zones basses ». La deuxième, conduisant aux zones potentiellement inondables elles-mêmes suite à une intervention manuelle.

La détermination des « zones basses » est effectuée selon les 6 étapes décrites ci-dessous :

- 1- extraction des niveaux d'eau maximaux résultants de l'ensemble des scénarios simulés (voir Figure 15) à proximité du rivage (aux environs des 5 m de profondeur par rapport à l'IGN1950) sur des points espacés tous les 200 m ;
- 2- tracé des profils passant par chacun de ces points suivant la perpendiculaire au trait de côte Histolitt. À terre ces profils sont prolongés jusqu'à une altitude de ~12m ;
- 3- génération d'un semis de points : attribution à chaque profil de la valeur maximale du niveau d'eau puis discrétisation du profil suivant des points espacés tous les 10m (voir Figure 25) ;
- 4- génération d'un Modèle Numérique de Niveau à 1 m de résolution (MNN1m) grâce à une interpolation linéaire du semis de point suivant les mêmes caractéristiques que le maillage du MNT1m du Litto3D ;
- 5- détermination du Modèle Numérique de Hauteur d'eau brut à 1m (MNH1m Brut) grâce à la soustraction suivante : $MNN1m - MNT1m$
- 6- détermination de l'extension de l'inondation à terre en masquant les valeurs négatives du MNH1m (attribution d'une valeur égale à zéro), voir Figure 26.

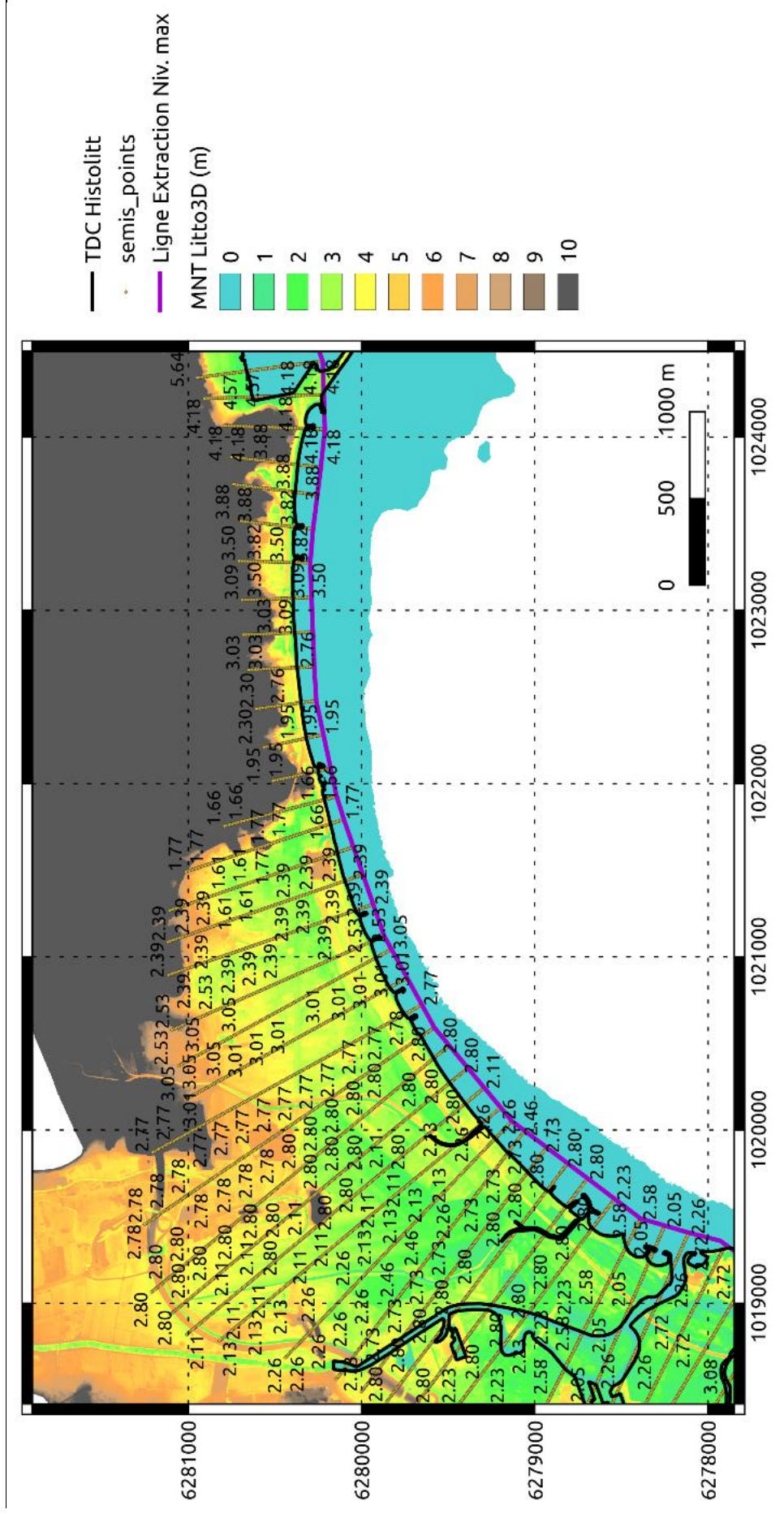


Figure 25 : Génération des semis de points des niveaux d'eau maximaux suivant les étapes 1 à 3 de détermination des « zones basses ». Exemple sur le linéaire côtier allant de Mandelieu-Napoule à Cannes.

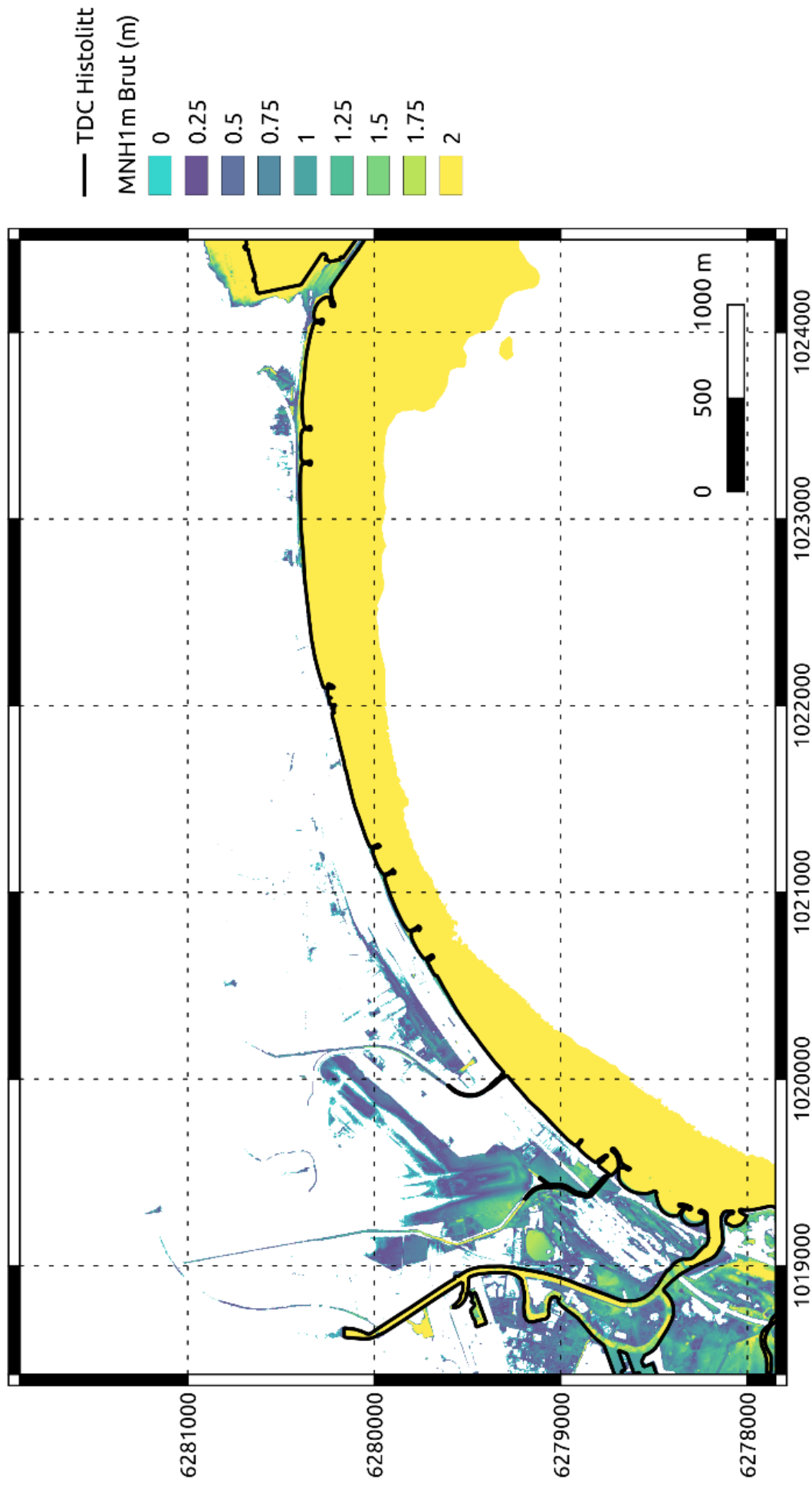


Figure 26 : Détermination des « zones basses » : MNH1m Brut : contenant l'extension et les hauteurs d'eau maximales.
Exemple sur le linéaire côtier allant de Mandelieu-Napoule à Cannes.

Les « zones basses » correspondent aux secteurs se situant en dessous des niveaux d'eau maximaux calculés à proximité du rivage. Elles ne correspondent pas forcément aux zones potentiellement inondables car il reste à vérifier qu'il existe une connexion directe ou indirecte (via des buses, écluses, ...) de ces zones avec la mer ou les embouchures.

Une détection manuelle de ces zones basses ainsi que des connexions hydrauliques a donc été effectuée sur l'ensemble du linéaire côtier traité. Les polygones en pourpre et les segments en rouge de la Figure 27 illustrent respectivement les zones basses non connectées et les connexions hydrauliques (voir notamment le zoom) sur la côte allant de Mandelieu-Napoule à Cannes.

La Figure 28 correspondant aux zones potentiellement inondables, MNH1m final sur le linéaire côtier de Mandelieu-Napoule à Cannes, est obtenue après suppression des zones identifiées par les polygones (zones basses isolées), la prise en compte des connexions hydrauliques et le masquage du domaine maritime grâce au trait de côte Histollit.

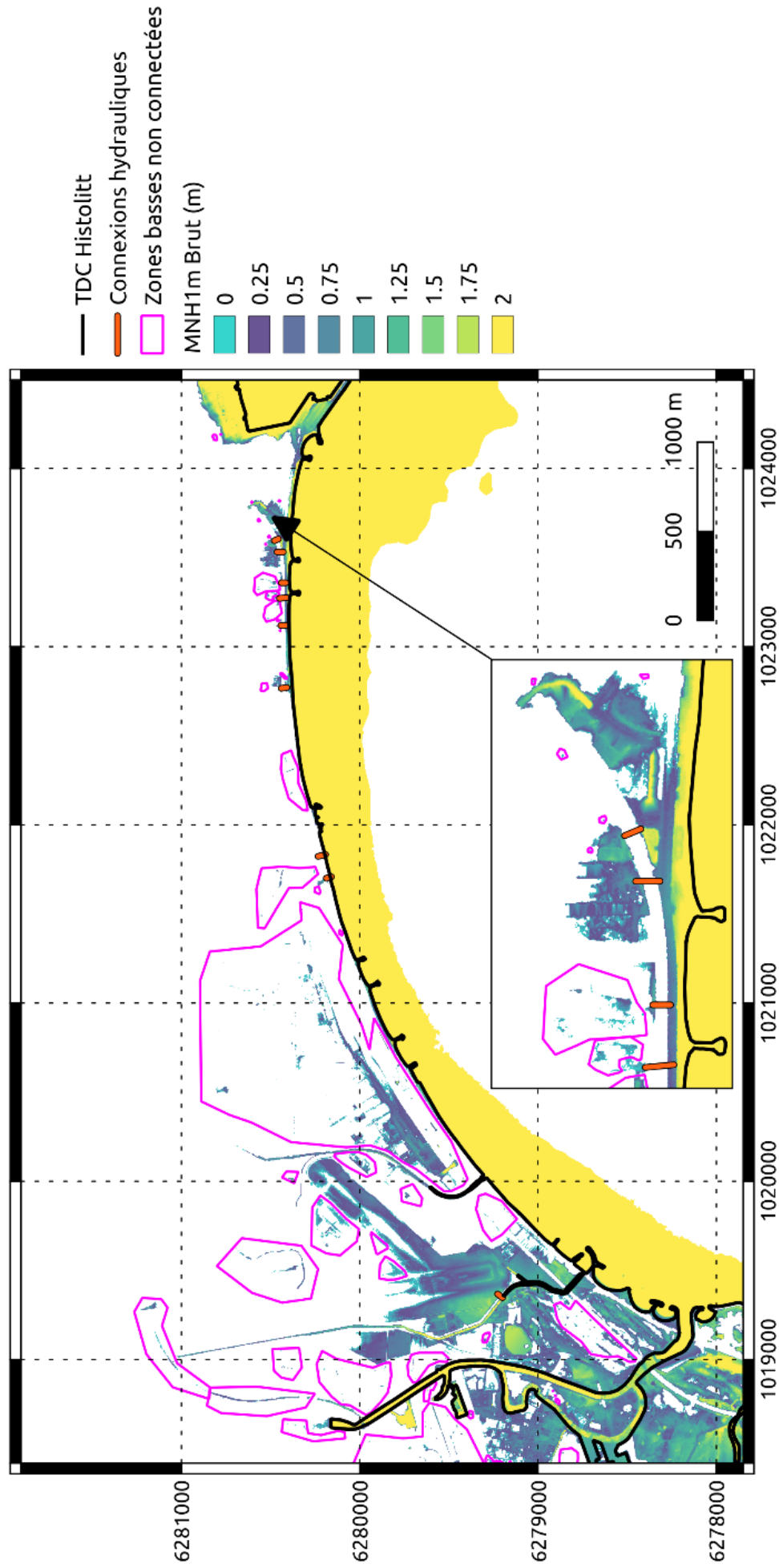


Figure 27 : Identification des zones basses non connectées à la mer ou aux fleuves et des connexions hydrauliques. Exemple sur le linéaire côtier allant de Mandelieu-Napoule à Cannes.

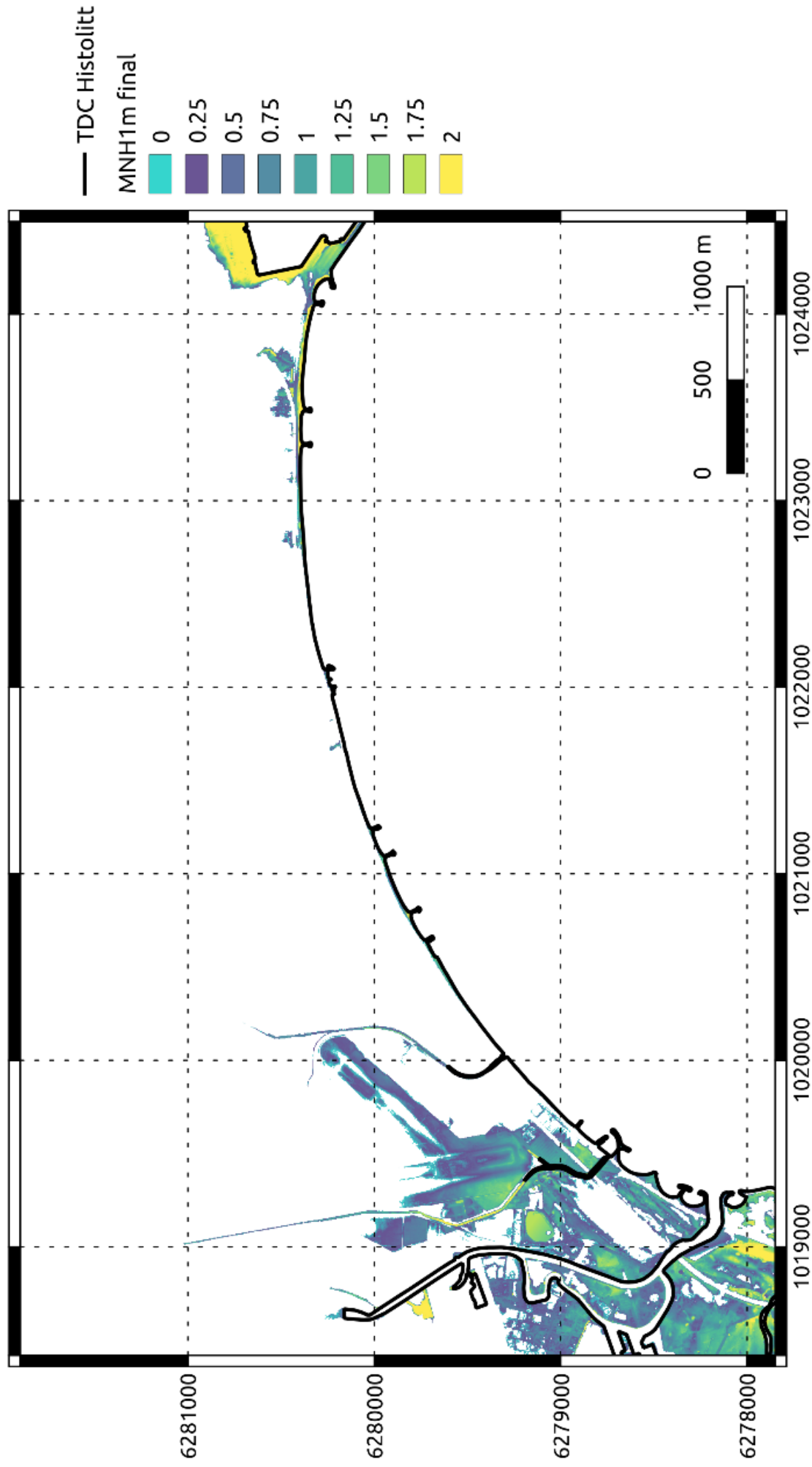


Figure 28 : Détermination des zones potentiellement inondables (MNH1m final) .
Exemple sur le linéaire côtier allant de Mandelieu-Napoule à Cannes.

Il est important de noter que le résultat obtenu avec cette méthode correspond à **l'extension potentielle maximale de l'inondation** attendue pour des tsunamis d'origine sismique (sources majorantes en mer Ligure et dans la marge maghrébine vraisemblablement associées à de longues périodes de retour) suite aux différentes hypothèses retenues :

- prise en compte des valeurs maximales de niveaux d'eau à la côte tout scénario confondu sans tenir compte de leur probabilité d'occurrence ;
- l'extrapolation des niveaux d'eau maximaux au rivage sur le MNT Litto3D1m implique la mise à disposition d'un volume d'eau suffisamment important pour atteindre ces niveaux à terre, or l'action des tsunamis à la côte est limitée à quelques heures au plus limitant les volumes d'eau entrant ;
- il n'y a pas de prise en compte du frottement des écoulements à terre qui peut fortement les ralentir en fonction de l'occupation des sols ;
- une zone basse est considérée comme potentiellement inondable même si elle n'est connectée que par 1 pixel (ici 1m) aux écoulements marins ou remontant les fleuves ;
- les éventuels systèmes de sécurité des connexions hydrauliques (comme des clapets anti-retour par exemple) sont considérés comme inopérants. De plus, les volumes d'eau transitant par les connexions sont considérés comme suffisants pour remplir les zones basses côté terre.

6.2. RÉSULTATS DE L'INONDATION

Le MNH1m final contenant l'extension et les hauteurs d'eau maximales de la submersion à terre sur l'ensemble du linéaire côtier du département des Alpes-Maritimes est fourni avec cette étude au format numérique, fichier GeoTiff « Hauteur_Eau_Tsu_06.tif » exprimé en coordonnées Lambert93.

Ci-dessous nous présentons uniquement les principales portions du littoral affectées par la submersion :

- linéaire côtier allant de Mandelieu-la-Napoule à Cannes (Figure 29) :
 - o sur le secteur de Mandelieu-la-Napoule les hauteurs d'eau les plus importantes (proches de 2 m) se situent à proximité du port de plaisance de Mandelieu et du quartier du port de Riou. Les eaux pourraient emprunter les embouchures du Riou de l'Argentière et de la Siagne ainsi que le Port Abri du Béal pour pénétrer jusqu'à environ 1km à l'intérieur des terres affectant entre autres l'Aéroport de Cannes-Mandelieu,
 - o par la suite, la submersion est très limitée entre ce secteur et Cannes ne dépassant pas le Boulevard du Midi sauf là où il y a des connexions hydrauliques (par exemple des passages souterrains). Dans ces endroits les eaux pourraient pénétrer au-delà de la voie ferrée,
 - o le front de mer de Cannes (Vieux-Port, plage de la Croisette, Port Canto) est très exposé à la submersion avec des hauteurs d'eau pouvant dépasser 2,5 m et s'étendant jusqu'à 500 m du rivage ;

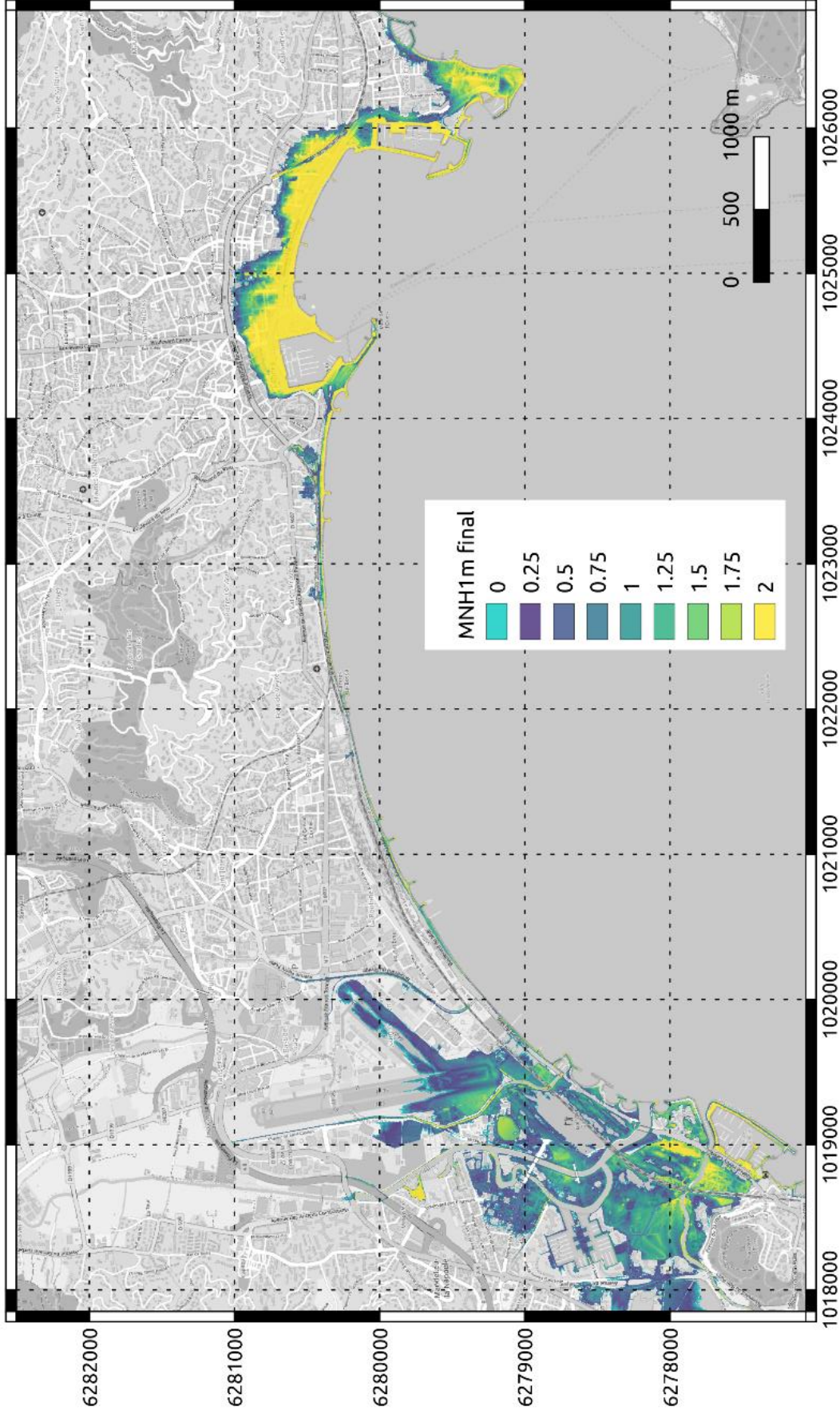


Figure 29 : Inondation potentielle induite par les tsunamis sur le linéaire côtier allant de Mandelieu-la-Napoule à Cannes. Fond Cartographique Open Street Map.

- linéaire côtier allant de Golfe-Juan à Antibes (Figure 30) :
 - o sur Golfe-Juan, l'inondation est très importante dépassant souvent les 2 m de hauteur d'eau, pénétrant sur plusieurs centaines de mètres à l'intérieur des terres et affectant une portion du littoral longue de plusieurs kilomètres,
 - o à Juan-les-Pins, l'inondation est très limitée sauf à proximité du port où la hauteur d'eau dépasse 2 m sur une extension de 80 à 90 m,
 - o Sur Antibes, ce sont les secteurs de la Plage de la Salis et de Port-Vauban qui présentent les submersions les plus importantes avec des incursions à terre dépassant les 200 m ;

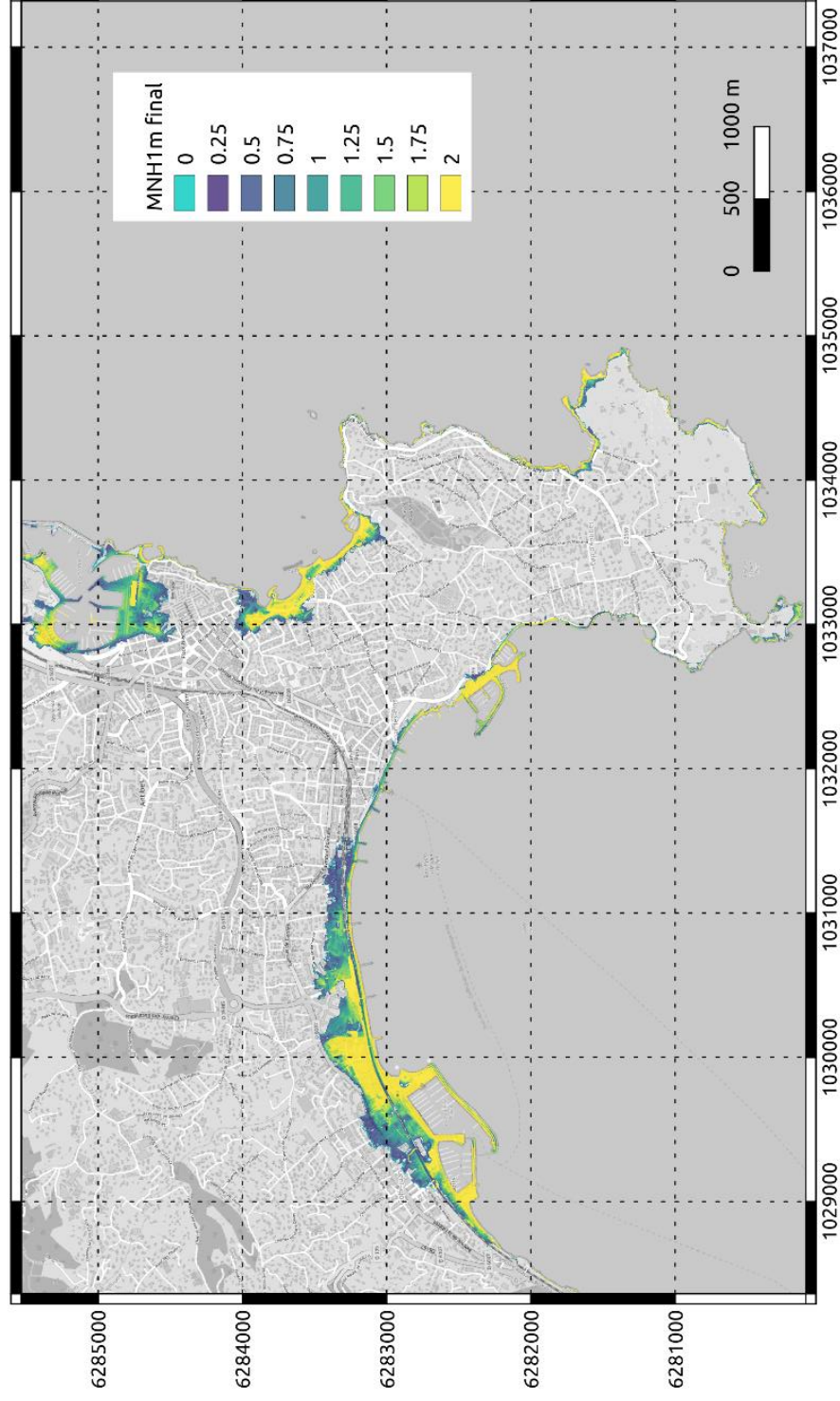


Figure 30 : Inondation potentielle induite par les tsunamis sur le linéaire côtier allant de Golfe-Juan à Antibes. Fond Cartographique Open Street Map.

- linéaire côtier allant du nord d'Antibes à l'aéroport de Nice (Figure 31) : ce sont les portions les plus basses du littoral qui sont exposées à la submersion tsunami à savoir le Parc Départemental de Vaugrenier, le sud de l'Hippodrome de la Côte d'Azur (pénétration des eaux par l'embouchure du Loup) ainsi qu'une partie des pistes de l'aéroport de Nice ;

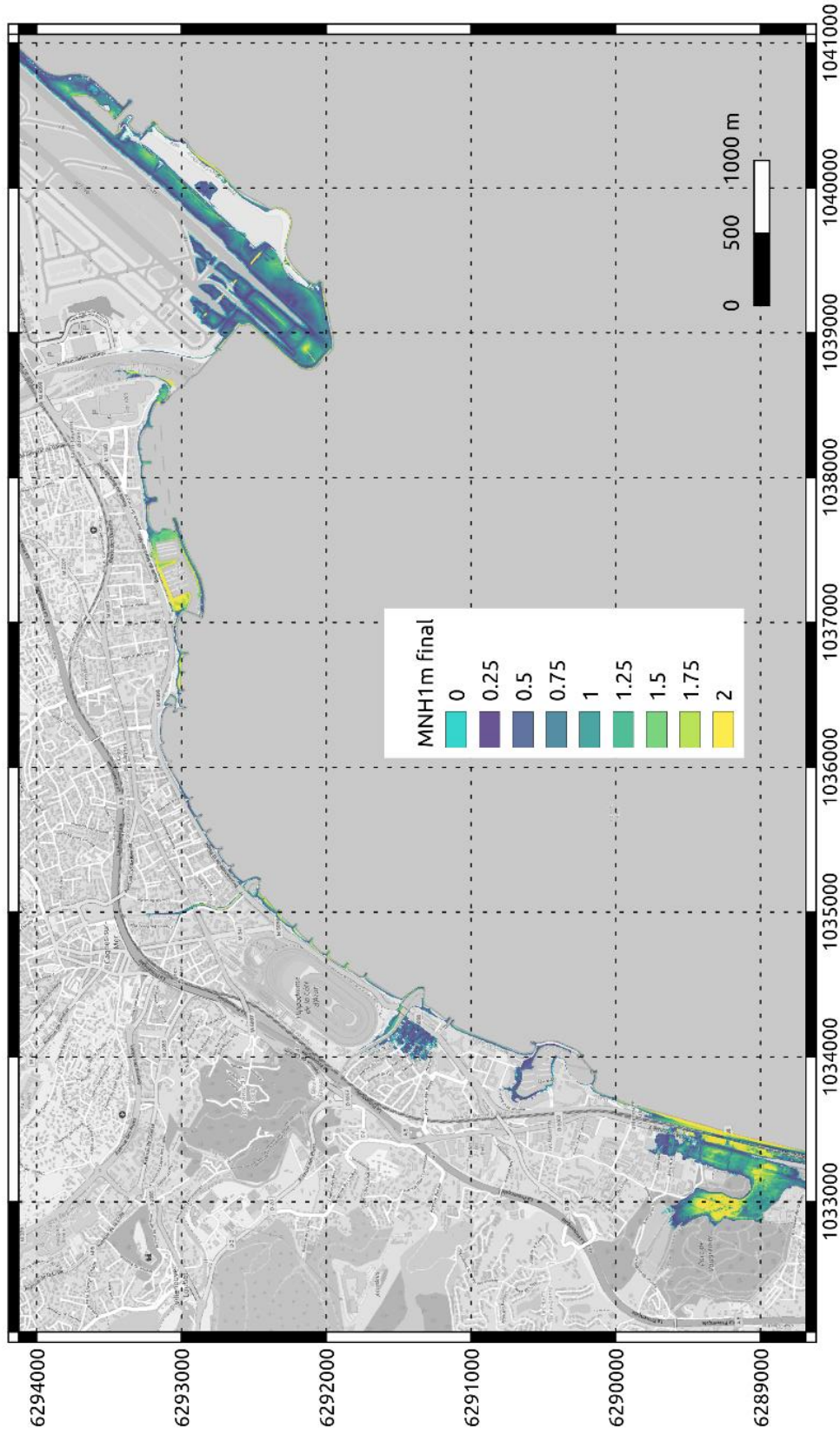


Figure 31 : Inondation potentielle induite par les tsunamis sur le linéaire côtier allant du nord d'Antibes à l'aéroport de Nice. Fond Cartographique Open Street Map.

- linéaire côtier allant du Cap-Martin au nord de Menton (Figure 32) : une grande partie de de cette portion littorale est soumise à l'inondation potentielle d'origine tsunami. Les secteurs les plus affectés en termes de hauteur d'eau (> 2m) et d'incursion des eaux sur plusieurs centaines de mètres du rivage sont le nord du Cap-Martin, Menton et les ports de plaisance situés à proximité de la frontière italienne.

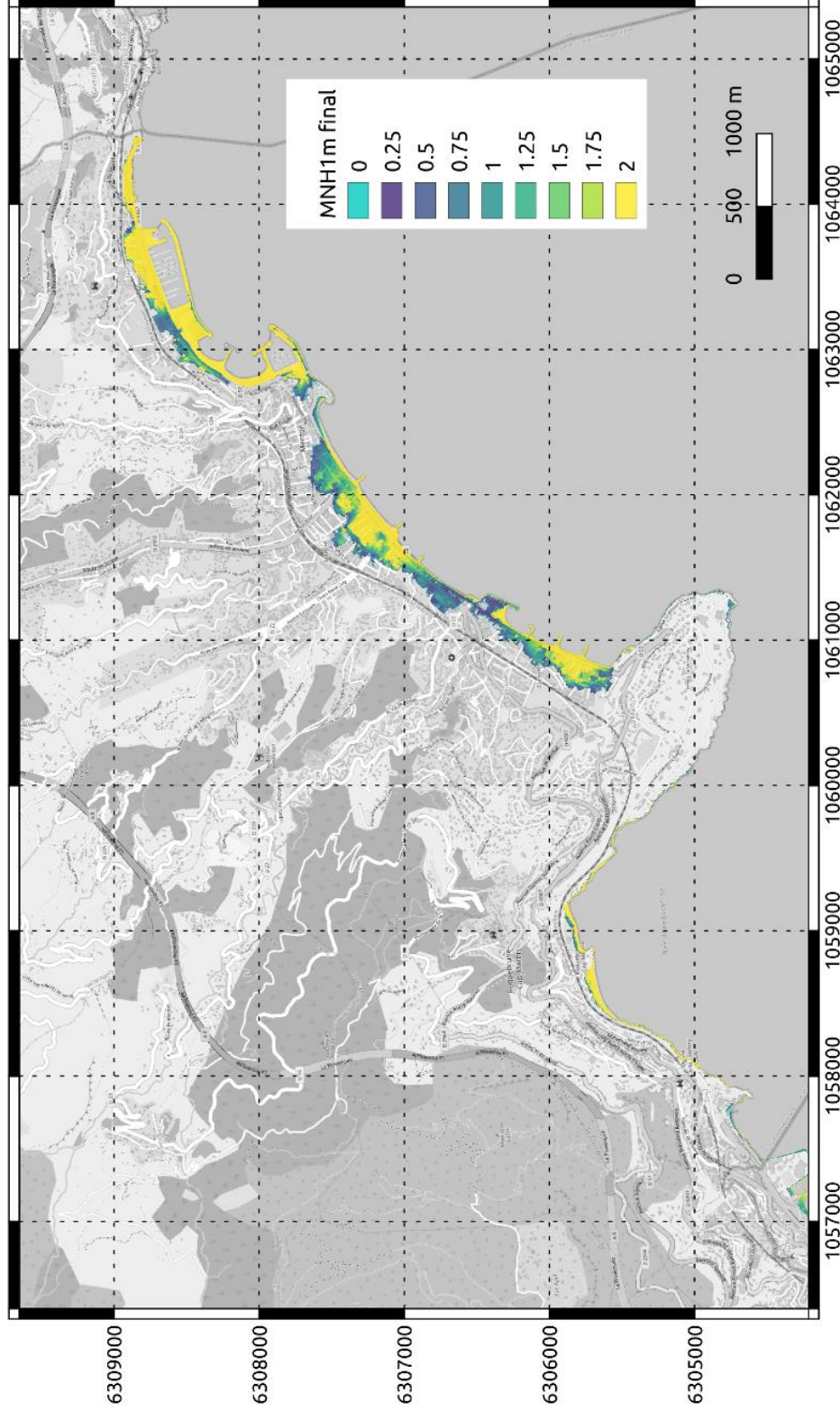


Figure 32 : Inondation potentielle induite par les tsunamis sur le linéaire côtier allant du Cap-Martin au nord de Menton. Fond Cartographique Open Street Map.

7. Exposition potentielle du bâti aux tsunamis

L'exposition du bâti aux submersions engendrées par les tsunamis est déterminée suivant une matrice de qualification inspirée des Plans de Prévention des Risques Littoraux (MEDDE 2014). Cette matrice fait intervenir différentes gammes de hauteur d'eau à terre (H, les mêmes que pour l'aléa submersion marine) qui sont pondérées par la distance du bâti au trait de côte pour qualifier l'exposition de faible, modérée, forte et très forte (Tableau 6).

Cette pondération par rapport à une distance inférieure ou supérieure à 25 m au trait de côte permet de distinguer les constructions situées en première ligne du bord de mer ou des embouchures soumises à des écoulements rapides, des constructions situées plus en arrière soumises à des écoulements plus lents.

		Distance au trait de côte	
		> 25 m	<= 25m
Hauteur d'eau - H (m)	H<0.5m	Faible	Forte
	0.5m<=H<1	Modérée	Forte
	1m<=H<1.5	Forte	Très Forte
	H>=1.5m	Très Forte	

Tableau 6 : Matrice de qualification de l'exposition des bâtiments aux tsunamis.

Dans un premier temps les différentes couches « bâti » de la BD-Topo de l'IGN (BATI_INDIFFERENCIE, BATI_REMARQUABLE et BATI_INDUSTRIEL) sont concaténées en une seule couche Shape en éliminant tous les objets dans l'altitude est supérieure à 12 m. Cela représente en tout 40 008 constructions pour l'ensemble du département des Alpes-Maritimes.

Par la suite une nouvelle couche est créée grâce à l'intersection de l'empreinte au sol du bâti avec le MNH1m-final. L'utilisation de l'empreinte au sol et non pas le centroïde du bâti permet d'identifier également les objets partiellement en eau. Pour cette nouvelle couche du bâti, ne contenant que les objets exposés à l'inondation, de nouveaux champs sont créés contenant (voir Figure 33) :

- la surface du bâti inondé (« Surf_Inond » en m²) ;
- les hauteurs d'eau minimales, moyennes et maximales en m notées respectivement « H_eaumin », « H_eaumoy » et « H_eaumax » dans la table attributaire ;
- la distance la plus faible entre le centroïde de chacun des bâtiments et le trait de côte Histolitt (« Dist_TDC » en m) ;
- l'application de la matrice d'exposition des bâtiments à la submersion (« Exposit » dans la table attributaire. Pour cela on utilise la hauteur d'eau moyenne.

layer	ELEV	Surface	Surf_Inond	H_eaumin	H_eamax	H_eaumoy	Dist_TDC	Exposit
L CONSTRUCTION_LEGERE1	1,9500000...	12,930000...	8,0000000...	0,0081972...	0,8862429...	0,4085824...	85,188086...	Faible
L CONSTRUCTION_LEGERE1	1,6400000...	45,893000...	44,000000...	0,1012532...	0,5293788...	0,2713407...	25,456697...	Faible
L CONSTRUCTION_LEGERE1	1,7300000...	23,399999...	21,000000...	0,0603098...	0,3627644...	0,2186503...	29,599999...	Faible
L CONSTRUCTION_LEGERE1	1,4000000...	30,446999...	33,000000...	0,2801792...	0,6607603...	0,4916446...	25,728108...	Faible
L BATI_INDIFFERENCIE1	3,8300000...	8,5200000...	2,0000000...	0,0080170...	0,0685687...	0,0382929...	119,97266...	Faible
L BATI_INDIFFERENCIE1	3,4200000...	40,859999...	40,000000...	0,0607960...	1,1310771...	0,4536857...	76,692055...	Faible
L CONSTRUCTION_LEGERE1	1,4000000...	25,466999...	19,000000...	0,0614053...	0,3043855...	0,2182693...	26,161134...	Faible
L CONSTRUCTION_LEGERE1	1,7300000...	39,896999...	39,000000...	0,1112598...	0,3924924...	0,2345679...	25,076682...	Faible
L BATI_INDUSTRIEL	4,0900000...	551,29300...	48,000000...	0,0069345...	0,2593638...	0,1372468...	63,968557...	Faible
L BATI_INDIFFERENCIE1	3,7100000...	11,923000...	0,0185487...	0,0485866...	0,0485866...	0,0485866...	280,75516...	Faible
L BATI_INDUSTRIEL	3,7900000...	90,366000...	87,000000...	0,0040908...	0,3155757...	0,1272369...	243,21335...	Faible
L BATI_INDUSTRIEL	3,4100000...	715,99800...	645,00000...	0,0017012...	1,0709105...	0,4527645...	209,58121...	Faible
L BATI_INDIFFERENCIE1	3,7100000...	52,902999...	53,000000...	0,0084650...	1,4960196...	0,4836442...	61,968536...	Faible
L CONSTRUCTION_LEGERE1	4,0300000...	5,3870000...	6,0000000...	0,1138991...	0,2030094...	0,1719625...	251,74781...	Faible
L BATI_INDIFFERENCIE1	4,2200000...	368,70999...	283,00000...	0,0013978...	0,7357055...	0,2381850...	250,64489...	Faible
L CONSTRUCTION_LEGERE1	3,9600000...	16,548999...	15,000000...	0,0256915...	0,3129451...	0,1601787...	263,48202...	Faible
L BATI_INDIFFERENCIE1	3,3200000...	202,96199...	170,00000...	0,0006455...	0,4436477...	0,1726509...	67,836438...	Faible

Figure 33 : Extrait de la table attributaire de la nouvelle couche shape du bâti exposé aux tsunamis.

Sur les 40 008 constructions initiales (situées à une altitude < 12m IGN50), cette étude montre que potentiellement ~16 % (6 351) d'entre elles seraient exposées à une submersion liée à des tsunamis d'origine sismique (pour des sources majorantes en mer Ligure et dans la marge maghrébine vraisemblablement associées à de longues périodes de retour). Parmi celles-ci (voir Tableau 7), environ 56 % auraient une exposition forte à très forte et 44 % une exposition faible à modérée. À noter que plus de 33 % (2 111) de ce bâti a une exposition très forte.

Exposition	Nbre Bâti	Pourcentage (%)
Très Forte	2111	33.24
Forte	1447	22.78
Modérée	994	15.65
Faible	1799	28.33
Total	6351	

Tableau 7 : Exposition potentielle du bâti aux tsunamis pour le département des Alpes-Maritimes.

La couche « Bati_expo_submersion.shp », dont la table attributaire est décrite Figure 33, est fournie avec cette étude au format numérique. Elle contient le détail de l'exposition potentielle du bâti aux tsunamis (dont le type de construction par exemple) de l'ensemble du linéaire côtier du département des Alpes-Maritimes.

Sur les figures ci-dessous sont représentés les secteurs dont le bâti est le plus exposé aux tsunamis :

- la Figure 34 montre que sur le secteur de Mandelieu-la-Napoule la grande majorité du bâti présente une exposition faible dont l'Aéroport de Cannes-Mandelieu. Par contre le centre-ville de Cannes présente majoritairement une exposition du bâti de forte à très forte. Cela peut concerner plusieurs pâtés de maisons ;
- sur la Figure 35, la même remarque est valable pour les centres-villes de Golfe-Juan et d'Antibes : exposition du bâti majoritairement de forte à très forte sur plusieurs pâtés de maisons ;
- Figure 36 : on constate sur ce linéaire côtier un nombre limité de bâti exposé aux tsunamis. L'exposition est principalement faible à l'exception de quelques constructions situées en bordure d'eau qui peuvent avoir une exposition forte comme l'Aéroport de Nice Côte d'Azur ;
- sur la portion du littoral représentée Figure 37, le bâti est également exposé sur plusieurs pâtés de maisons. Le type d'exposition est plus panaché avec l'alternance de secteurs présentant principalement une exposition forte à très forte et des secteurs où l'exposition est principalement faible à modérée.

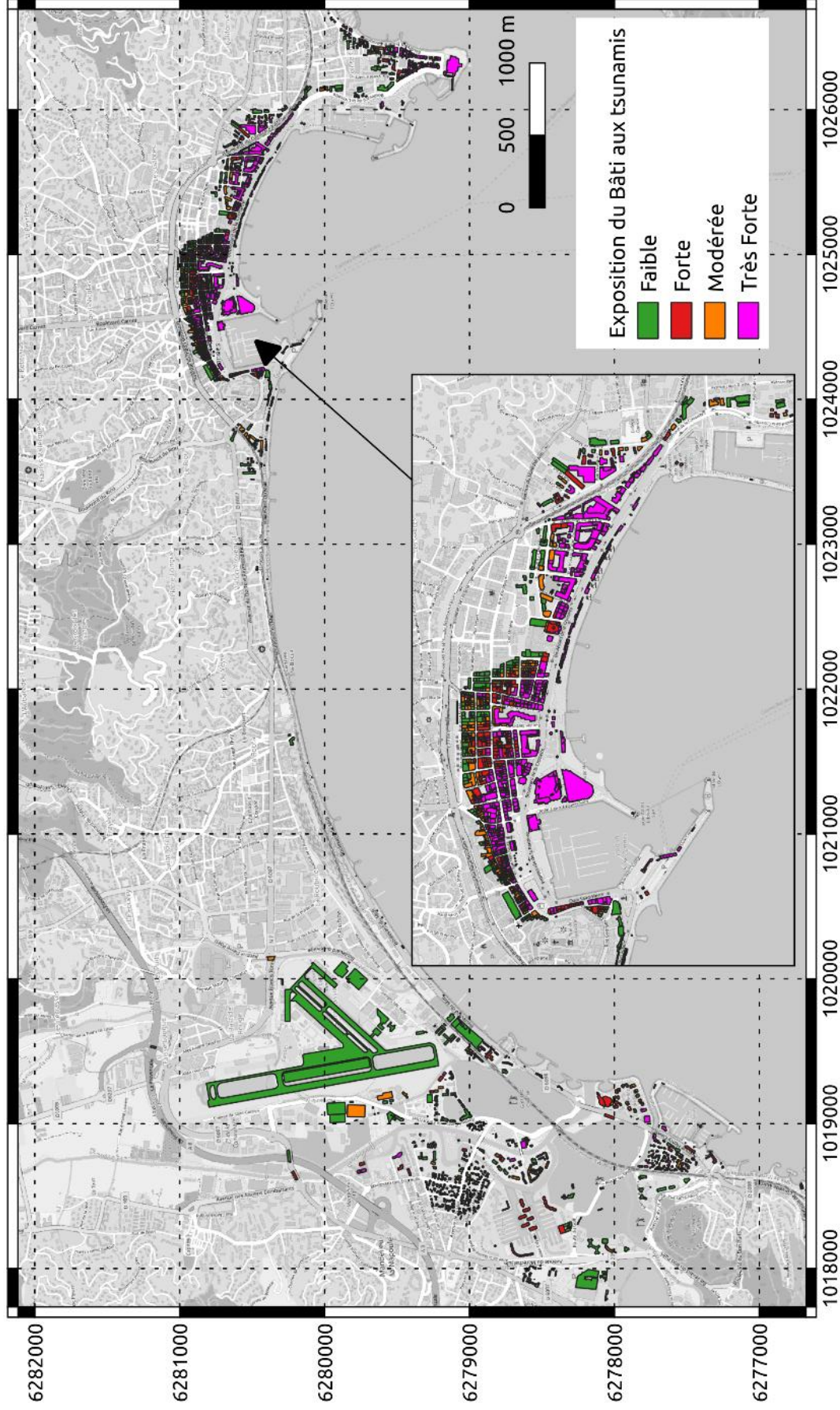


Figure 34 : Exposition potentielle du bâti aux tsunamis sur le linéaire côtier allant de Mandelieu-la-Napoule à Cannes.
Zoom : centre-ville de Cannes. Fond Cartographique Open Street Map.

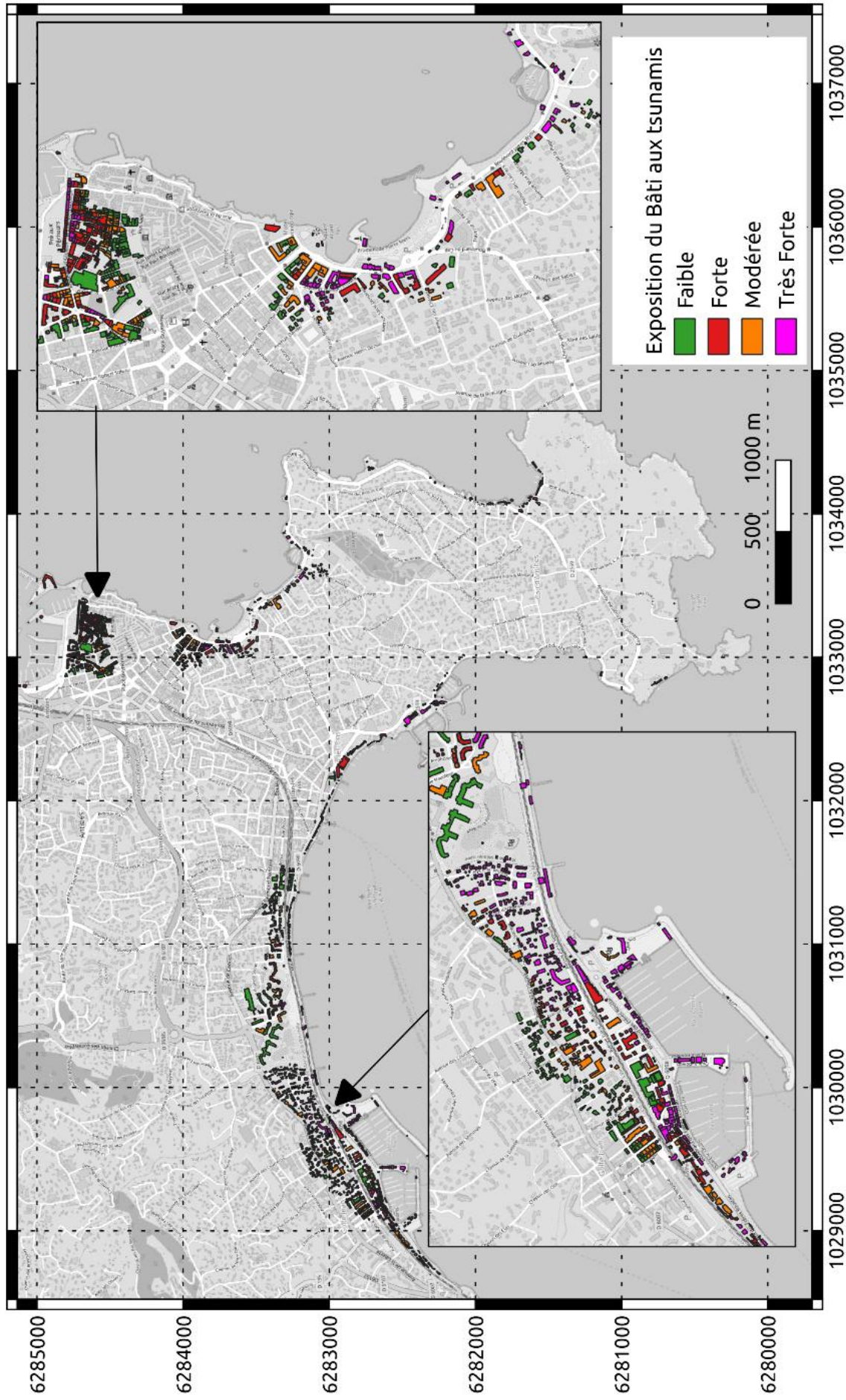


Figure 35 : Exposition potentielle du bâti aux tsunamis sur le linéaire côtier allant de Golfe-Juan à Antibes. Zoom gauche : centre-ville de Golfe-Juan. Zoom droite : centre-ville d'Antibes. Fond Cartographique Open Street Map.

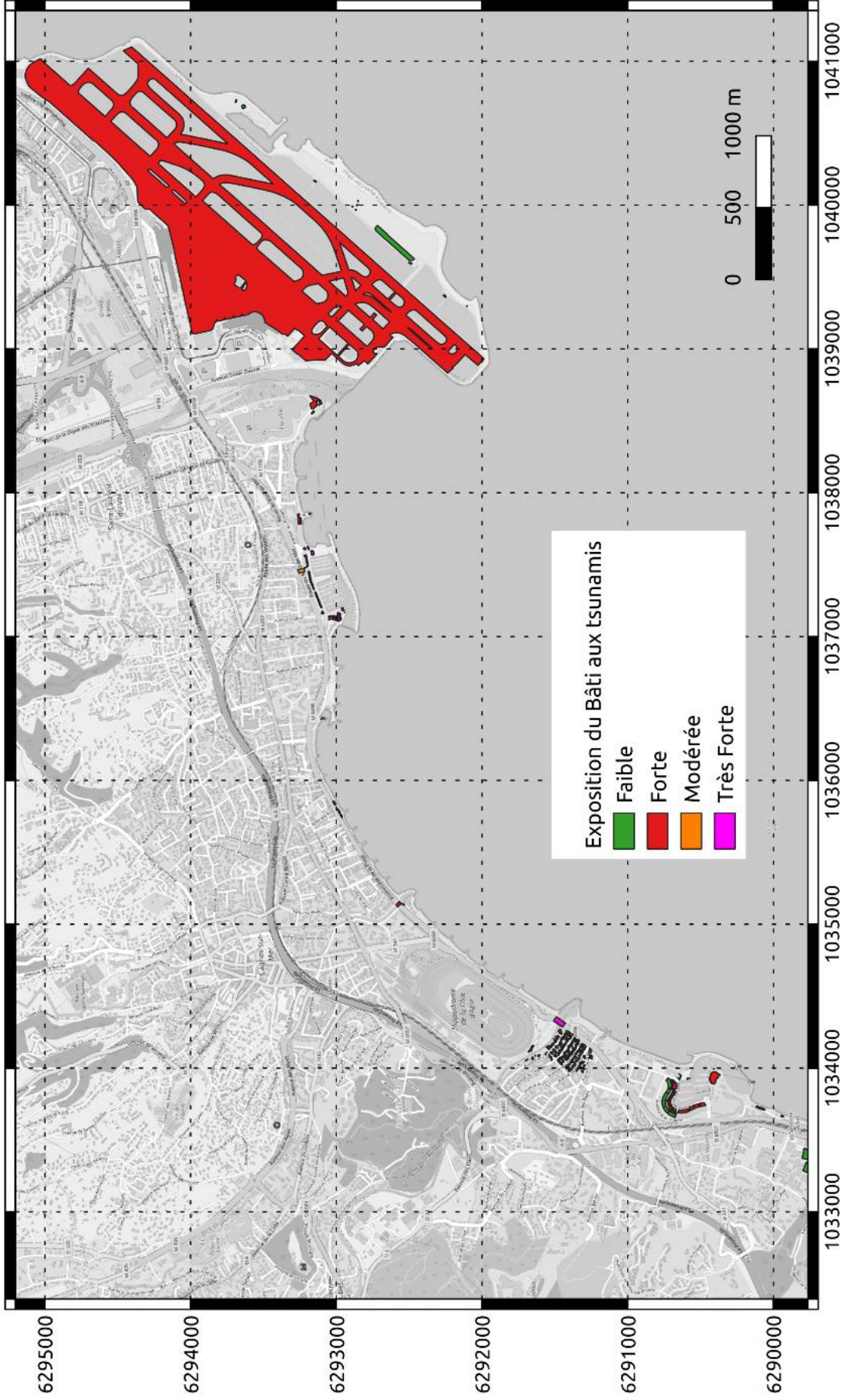


Figure 36 : Exposition potentielle du bâti aux tsunamis sur le littoral côtier allant du nord d'Antibes à l'aéroport de Nice. Fond Cartographique Open Street Map.

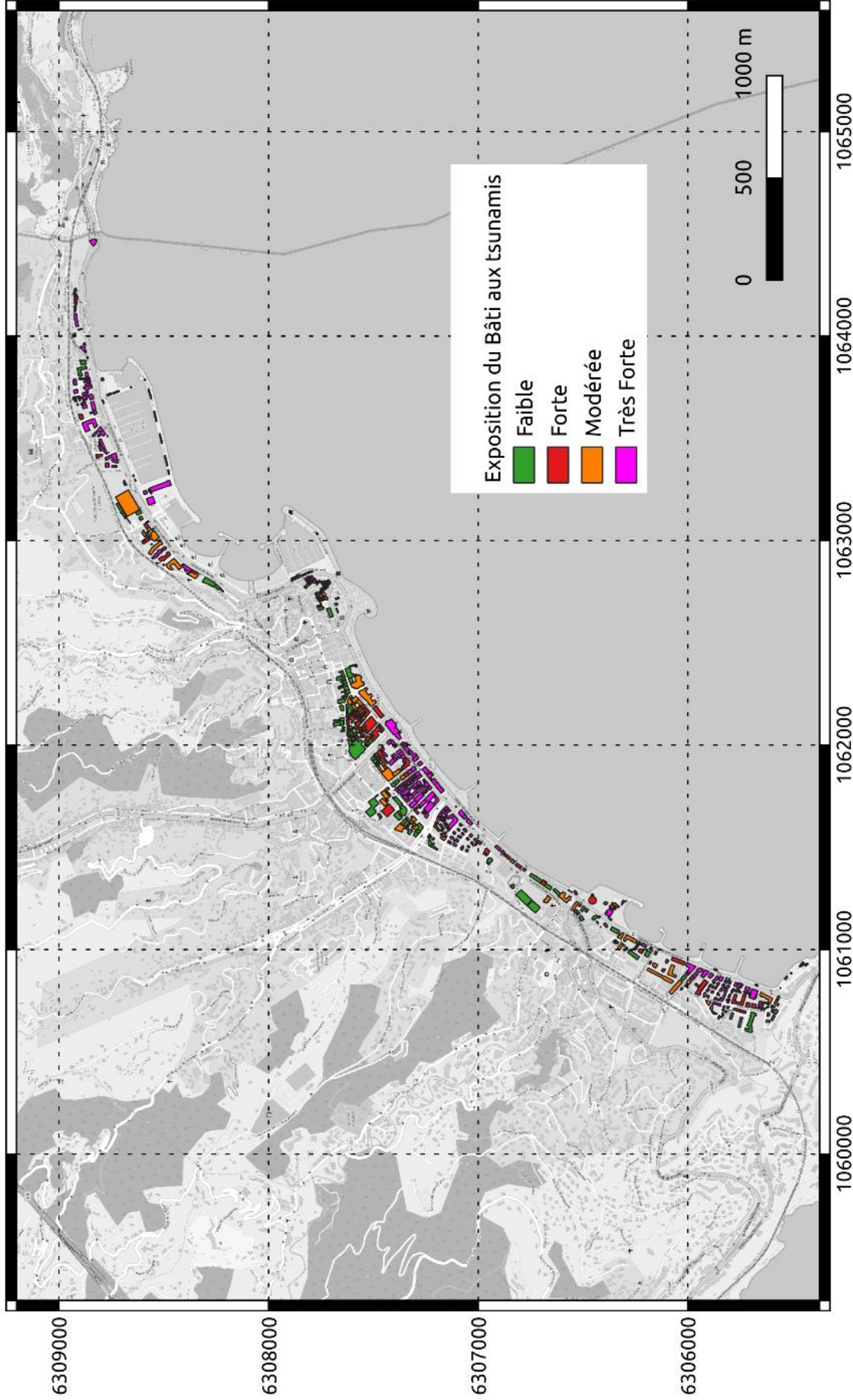


Figure 37 : Exposition potentielle du bâti aux tsunamis sur le linéaire côtier allant Cap-Martin au nord de Menton.
Fond Cartographique Open Street Map.

8. Conclusions et perspectives

Les modélisations des tsunamis ont été réalisées à partir de sources de tsunamis majorantes : on se place dans le « worst credible case » pour les zones sismiques identifiées comme les plus impactantes pour la côte des Alpes Maritimes.

Deux zones source potentielles en Méditerranée occidentale ont ainsi été considérées. Elles sont associées à des séismes et des tsunamis historiques ainsi qu'à des structures actives partiellement connues. Les périodes de retour des événements majorants considérés ne sont pas contraintes mais sont vraisemblablement importantes :

- la marge au Nord du Maghreb, sismiquement active ;
- les structures actives identifiées en mer Ligure, à l'origine du séisme tsunamigène d'Imperia en 1887.

Au total 110 scénarios de tsunamis (70 pour la marge maghrébine et 40 pour la mer Ligure) ont été établis en faisant varier notamment la position de l'épicentre, l'orientation des failles (azimut) et la distribution du glissement aléatoire de la faille (10 réalisations pour chaque géométrie de rupture retenue). De plus, concernant la mer Ligure, 3 magnitudes de séismes ont été examinées compte tenu des derniers travaux sur ce secteur.

La modélisation numérique de ces 110 scénarios a permis de déterminer les niveaux d'eau maximaux à proximité du rivage et les temps d'arrivée sur l'ensemble du littoral des Alpes-Maritimes (résolution spatiale de 100 m) :

- les niveaux atteignent facilement la cote +3 m NGF/IGN69, et localement plus (> +5 m NGF/IGN69) sur certaines localités comme à Cannes et à Menton par exemple ;
- les temps d'arrivée sont assez homogènes spatialement. Ils s'échelonnent de 1h07min à 1h12min pour les sources de la marge maghrébine. Ils sont de 2 min à 7 min pour la mer Ligure ce qui empêche, dans ce cas, toute prévision et alerte des tsunamis.

L'exploitation de ces simulations a permis également de dégager les scénarios les plus impactant par type de source. Ceux-ci nous montrent que :

- ce n'est pas forcément la 1^{ère} vague la plus haute et qu'il n'y a pas de retrait systématique de la mer avant la première vague. Cela implique qu'il n'y a pas d'alerte « naturelle » de l'arrivée du tsunami pour les personnes présentes sur le littoral ;
- la mer peut rester agitée longtemps après l'arrivée de la première vague : d'une à plusieurs heures en fonction de la portion du littoral et du type de source considérée ;
- à proximité des rivages, les vitesses des courants engendrés par les tsunamis peuvent atteindre des valeurs extrêmes entre 1m/s et 3m/s pour les sources de type mer Ligure et entre 3 m/s et 5 m/s pour celle liée à la marge maghrébine.

Par la suite, les zones inondées (extension et hauteurs d'eau maximales à terre) ont été calculées en croisant les niveaux d'eau maximaux proche du rivage simulés (tous scénarios confondus) et le produit litto3D-1m tout en vérifiant l'existence d'une connexion directe ou indirecte (via des buses, écluses, ...) de ces zones avec la mer ou les embouchures. Il est à noter que cette méthode de calcul est également majorante (mise à disposition de grands volumes d'eau, pas de prise en compte du frottement des écoulements à terre, ...). La cartographie des zones inondées résultante indique que :

- les aéroports de Cannes-Mandelieu et de Nice-Côte d'Azur seraient exposés à des submersions plus ou moins importantes ;
- plusieurs fronts de mer seraient concernés avec des hauteurs d'eau dépassant 2 m et pénétrant dans les terres sur plusieurs centaines de mètres comme à Cannes, Golfe-Juan, Antibes et Menton, par exemple. Bon nombre de ports à proximité de ces localités seraient exposés au débordement des eaux.

Enfin, l'exposition du bâti aux submersions engendrées par les tsunamis est déterminée suivant une matrice faisant intervenir différentes gammes de hauteur d'eau à terre pondérées par la distance du bâti au trait de côte pour qualifier l'exposition de faible, modérée, forte et très forte.

Cette étude montre que potentiellement 6 351 constructions côtières seraient exposées à une submersion liée à des tsunamis d'origine sismique. Parmi celles-ci, environ 56 % auraient une exposition forte à très forte et 44 % une exposition faible à modérée. À noter que plus de 33 % (2 111) de ce bâti a une exposition très forte.

Cette étude a permis de déterminer les scénarios d'origine sismique les plus impactants (sources de la marge maghrébine et de mer Ligure) et d'établir une première cartographie des zones inondées et de l'exposition du bâti en suivant une approche majorante.

Des études futures pourraient être conduites visant à :

- quantifier de façon plus réaliste la phase d'inondation (extension, hauteur d'eau) et l'exposition du bâti en faisant appel à la modélisation numérique de la submersion: en effet un modèle unique de tsunami exploitant un maillage non structuré (taille du maillage variable dans l'espace) pourrait être mis en place afin de simuler aussi bien la propagation (taille de maille kilométrique à la centaine de mètres) que la submersion (taille de maille de la dizaine de mètres) sur les secteurs à enjeux ;
- caractériser, grâce à ce type de modèle numérique de tsunami non structuré, les impacts induits (inondation, exposition du bâti) par d'autres scénarios moins pénalisants mais pouvant avoir une fréquence plus élevée (par exemple scénarios de magnitude 6.5 en mer Ligure).

9. Bibliographie

Abadie, S., Paris, A., Ata, R., Le Roy, S., Arnaud, G., Poupardin, A., ..., Pedreros, R. & Krien, Y. La Palma landslide tsunami: computation of the tsunami source with a calibrated multi-fluid Navier-Stokes model and wave impact assessment with propagation models of different types (2019). Nat. Haz. Earth Syst. Sc., Preprint <https://doi.org/10.5194/nhess-2019-225>.

Allgeyer, S., Quentel, É., Hébert, H., Gailler, A., & Loevenbruck, A. (2017). Tsunami hazard in La Réunion Island (SW Indian Ocean): Scenario-based numerical modelling on vulnerable coastal sites. Pure and Applied Geophysics, 174(8), 3123-3145.

Babonneau, N., Cattaneo, A., Ratzov, G., Déverchère, J., Yelles-Chaouche, A., Lateb, T., & Bachir, R. S. (2017). Turbidite chronostratigraphy off Algiers, central Algerian margin: A key for reconstructing Holocene paleo-earthquake cycles. Marine Geology, 384, 63-80.

Basili R., *et al.*, (2013). The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of the Project SHARE. <http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/>, doi:10.6092/INGV.IT-SHARE-EDSF.

Boschetti, L., Ioualalen, M., Nemati, F. *et al.* (2020). Tsunami intensity scale based on wave amplitude and current applied to the French Riviera: the case study of local seismicity. Nat Hazards 102, 219–248. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03921-0>.

Courboux, F., Larroque, C., Deschamps, A. *et al.* (2007). Seismic hazard on the French Riviera: observations, interpretations and simulations. Geophys. J. Int., 170, 387–400.

Delouis, B., Vallée, M., Meghraoui, M. *et al.* (2004). Slip distribution of the 2003 Boumerdes-Zemmouri earthquake, Algeria, from teleseismic, GPS, and coastal uplift data. Geophysical Research Letters, <https://doi.org/10.1029/2004GL020687>.

Déverchère, J., Yelles, K., Domzig, A., *et al.* (2005). Active thrust faulting offshore Boumerdes, Algeria and its relations to the 2003 Mw 6.9 earthquake. Geophys. Res. Lett., 32, p. L04311, [10.1029/2004GL021646](https://doi.org/10.1029/2004GL021646).

Gailler, A., Hébert, H., Loevenbruck, A., *et al.* (2013). Simulation systems for tsunami wave propagation forecasting within the French tsunami warning center. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 2465–2482.

Goda, K., Mai, P. M., Yasuda, T., & Mori, N. (2014). Sensitivity of tsunami wave profiles and inundation simulations to earthquake slip and fault geometry for the 2011 Tohoku earthquake. Earth, Planets and Space, 66(105), 2–20.

Goda, K., Yasuda, T., Mori, N. & Maruyama, T. (2016). New scaling relationships of earthquake source parameters for stochastic tsunami simulation, Coastal Engineering Journal, 58:3, 1650010-1-1650010-40, DOI: [10.1142/S0578563416500108](https://doi.org/10.1142/S0578563416500108)

Gonzalez, F. I., LeVeque, D. R. R. J., Waagan, K., & Lin, G. (2016) Generating random earthquake events for probabilistic tsunami hazard assessment. Page 2308.

- Grilli, S. T., Grilli, A. R., David, E., & Coulet, C. (2016). Tsunami hazard assessment along the north shore of Hispaniola from far-and near-field Atlantic sources. *Natural Hazards*, 82(2), 777-810.
- Grilli, S. T., Guérin, C.-A., Shelby, M., Grilli, A. R., Moran, P., Grosdidier, S., & Insua, T. L. (2017). Tsunami detection by High Frequency Radar beyond the continental shelf: II. Extension of algorithms and validation on realistic case studies. *Pure and Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1619-6>.
- Hamdache, M. (1998). Seismic hazard assessment for the main seismogenic zones in north Algeria. *pure and applied geophysics*, 152(2), 281-314.
- Harbi, A., Peresan, A., & Panza, G. F. (2010). Seismicity of Eastern Algeria: a revised and extended earthquake catalogue. *Natural hazards*, 54(3), 725-747.
- Ioualalen, M., Larroque, C., Scotti, O. *et al.* (2014). Tsunami Mapping Related to Local Earthquakes on the French–Italian Riviera (Western Mediterranean). *Pure Appl. Geophys.* 171, 1423–1443. <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0699-1>.
- Kazolea, M., Filippini, A., Ricchiuto, M., Abadie, S., Medina, M. M., Morichon, D., ... & Pedreros, R. (2019). Wave propagation, breaking, and overtopping on a 2D reef: A comparative evaluation of numerical codes for tsunami modelling. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 73, 122-131.
- Kherroubi, A., Devérchère, J., Yelles, A., *et al.* (2009). Recent and active deformation pattern off the easternmost Algerian margin, Western Mediterranean Sea: New evidence for contractional tectonic reactivation. *Marine Geology*, 261(1-4), 17-32.
- Kirby, J. T. (2016). Boussinesq models and their application to coastal processes across a wide range of scales. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, (3116005). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000350](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000350).
- Larroque, C., de Lépinay, B. M., & Migeon, S. (2011). Morphotectonic and fault–earthquake relationships along the northern Ligurian margin (western Mediterranean) based on high resolution, multibeam bathymetry and multichannel seismic-reflection profiles. *Marine Geophysical Research*, 32(1-2), 163-179.
- Larroque, C., Scotti, O., Ioualalen, M., (2012). Reappraisal of the 1887 Ligurian earthquake (western Mediterranean) from macroseismicity, active tectonics and tsunami modelling. *Geophys. J. Int.*, 190, 87–104.
- Le Roy, S., Lemoine, A., Nachbaur, A., Legendre, Y., Lambert, J., Terrier, M. (2017). Détermination de la submersion marine liée aux tsunamis en Martinique. Rapport final. BRGM/RP-66547-FR, 177 p., 7 ann.
- Le Roy, S., Pedreros, R., Monfort-Climent, D., Terrier, M. (2015). Numerical tsunamis simulations on the French Mediterranean coast: the case of Antibes. *La Houille Blanche*, n°6, 2015, p. 12-20.
- LeVeque, R.J., Waagan, K., González, F.I. *et al.* (2016). Generating Random Earthquake Events for Probabilistic Tsunami Hazard Assessment. *Pure Appl. Geophys.* 173, 3671–3692. <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1357-1>.
- Mai, P. M., & Beroza, G. C. (2002). A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip. *J. Geophys. Res.*, B11(107), 2308.

MEDDE (2014). Guide méthodologique : plan de prévention des risques littoraux. MEDDE/DGPR, 169 p.

Nemati, F., Grilli, S.T., Ioualalen, M. *et al.* (2019) High-resolution coastal hazard assessment along the French Riviera from co-seismic tsunamis generated in the Ligurian fault system. *Nat Hazards* 96, 553–586 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3555-x>.

Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the seismological society of America*, 75(4), 1135-1154.

Pardo-Iguzquiza, E., & M. Chica-Olmo. (1993). The Fourier integral method: An efficient spectral method for simulation of random fields, *Math. Geol.*, 25, 177– 217.

Références Altimétriques Maritimes (RAM), Ports de France métropolitaine et d'outre-mer, Edition 2017. SHOM.

Roger J., H. Hébert, J.-C. Ruegg, P. Briole, The El Asnam 1980 October 10 inland earthquake: a new hypothesis of tsunami generation, *Geophysical Journal International*, Volume 185, Issue 3, June 2011, Pages 1135–1146, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05003.x>.

Rohmer, J., Rousseau, M., Lemoine, A., Pedreros, R., Lambert, J., & Benki, A. (2018). Source characterisation by mixing long-running tsunami wave numerical simulations and historical observations within a metamodel-aided ABC setting. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 32(4), 967-984.

Sahal A., J. Roger, S. Allgeyer, B. Lemaire, H. Hébert, *et al.*. The Tsunami Triggered by the 21 May 2003 Boumerdès-Zemmouri (Algeria) Earthquake: Field Investigations on the French Mediterranean Coast and Tsunami Modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, European Geosciences Union, 2009, 9 (6), pp.1823--1834.

Satake, K., Fujii, Y., Harada, T., & Namegaya, Y. (2013). Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data. *Bulletin of the seismological society of America*, 103(2B), 1473-1492.

Serpelloni, E., Vannucci, G., Pondrelli, S., Argnan, A., Casula, G., Anzidei, M., ... & Gasperini, P. (2007). Kinematics of the Western Africa-Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data. *Geophysical Journal International*, 169(3), 1180-1200.

Schindelé, F., Gailler, A., Hébert, H. *et al.* (2015) Implementation and Challenges of the Tsunami Warning System in the Western Mediterranean. *Pure Appl. Geophys.* 172, 821–833. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0950-4>.

Shi, F., Kirby, J. T., Harris, J. C., Geiman, J. D., & Grilli, S. T. (2012). A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation. *Ocean Modelling*, 43, 36-51.

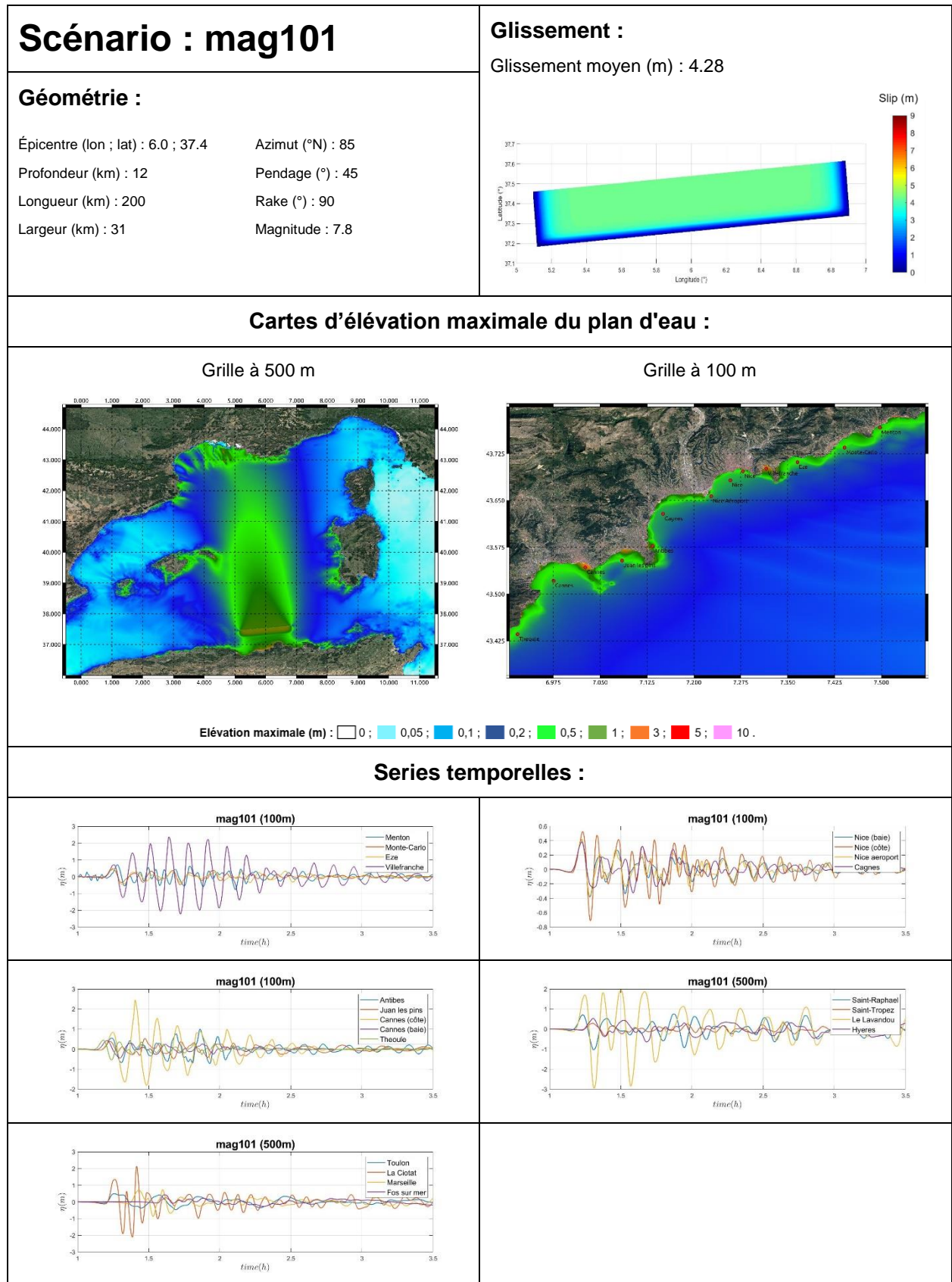
Sorensen, M. B., Spada, M., Babeyko, A., *et al.* (2012). Probabilistic tsunami hazard in the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 117, B01305, doi:10.1029/2010JB008169.

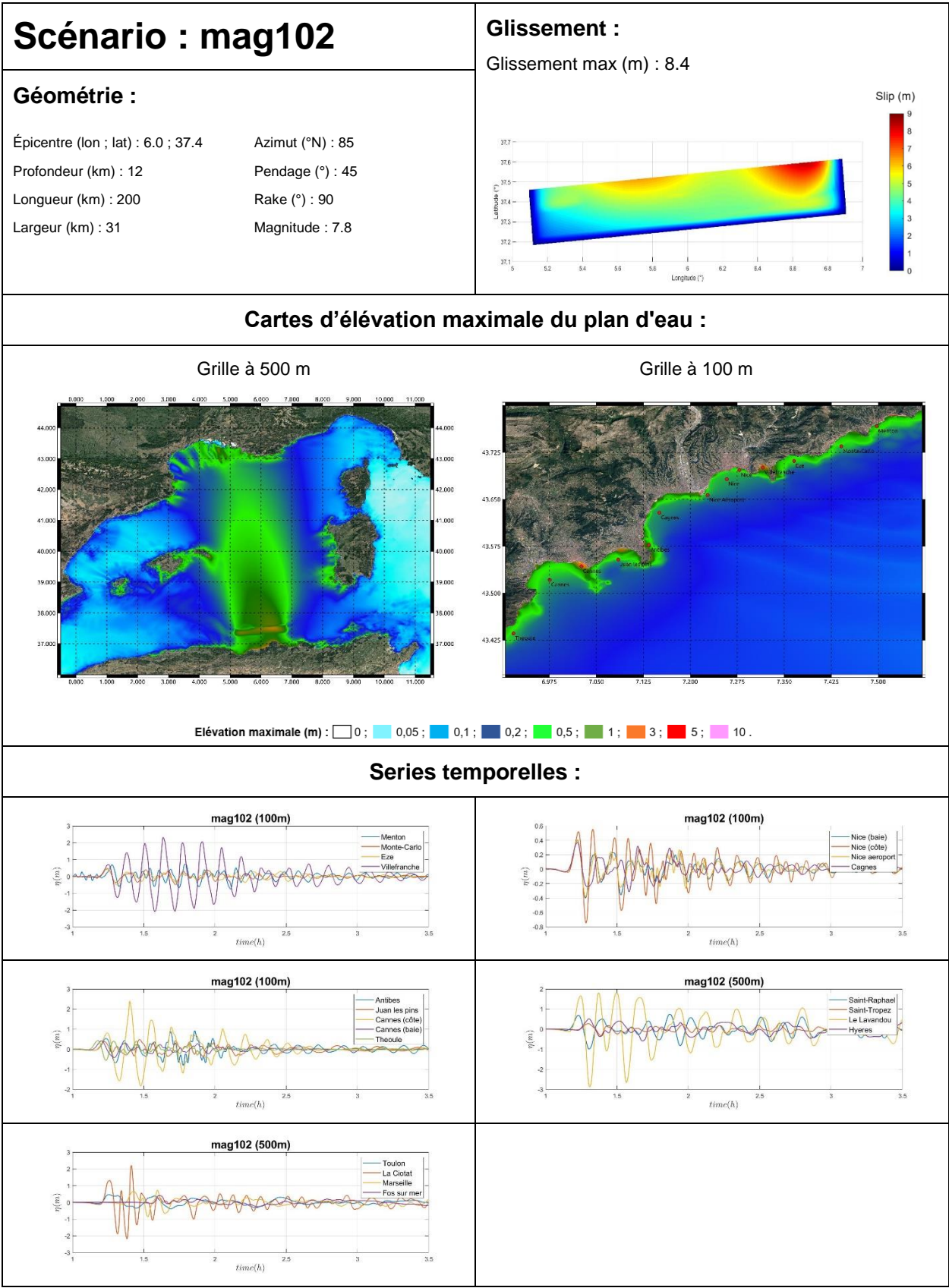
Tappin, D. R., Grilli, S. T., Harris, J. C., Geller, R. J., Masterlark, T., Kirby, J. T., ... & Mai, P. M. (2014). Did a submarine landslide contribute to the 2011 Tohoku tsunami?. *Marine Geology*, 357, 344-361.

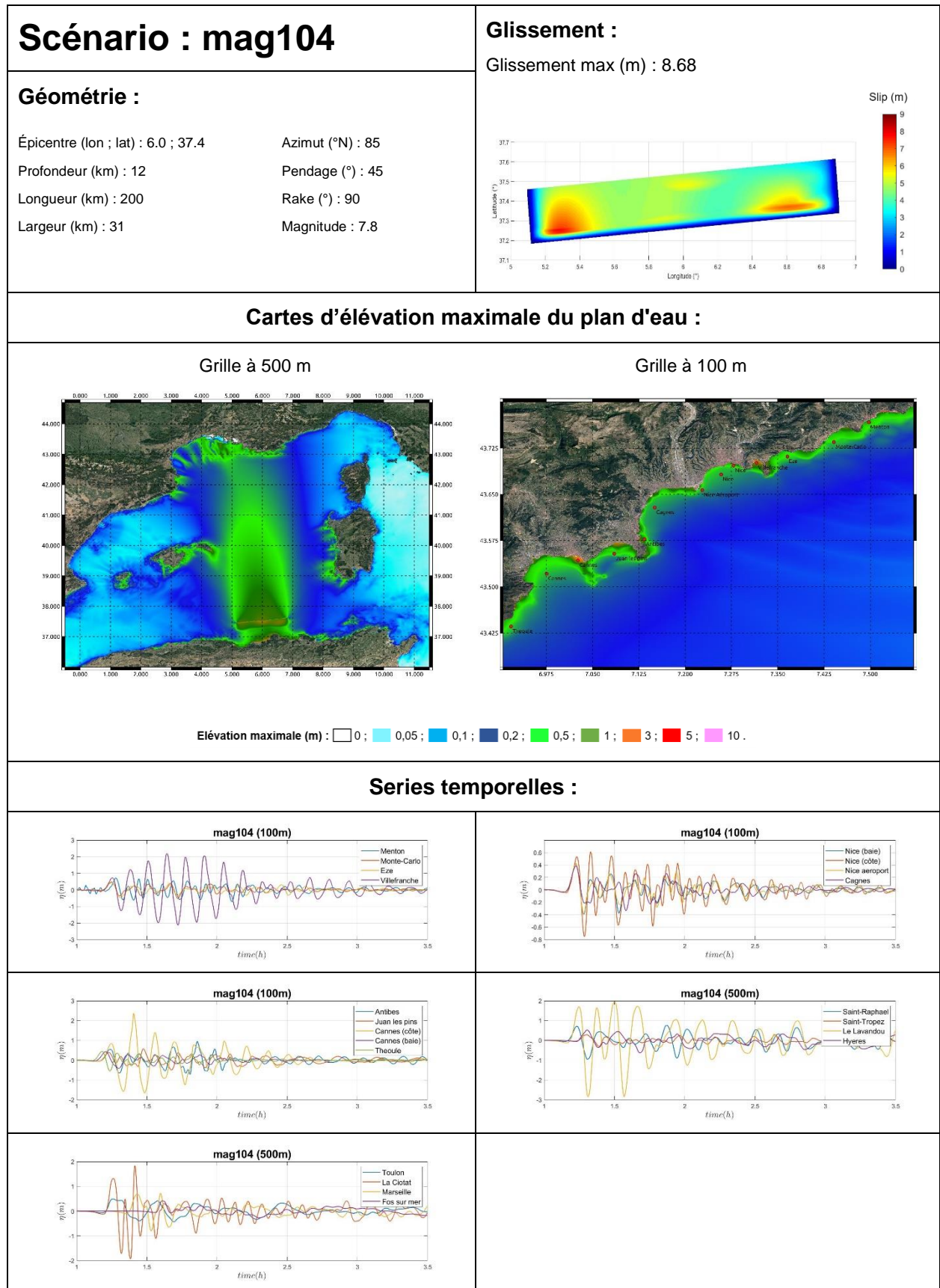
- Terrier, M. (2007). 'Réalisation d'un zonage sismique de la Méditerranée occidentale à 1/2 000 000 préalable aux choix de scénarios de tsunamis'. Rapport BRGM/RP -55353 –Fr.
- Terrier, M., Pedreros, R., Poisson, B., (2007). Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française. Rapport BRGM/RP -55353 –Fr.
- Tinti, S., Maramai, A., & Graziani, L. (2004). The new catalogue of Italian tsunamis. *Natural Hazards*, 33(3), 439-465.
- Weatherall, P., Marks, K. M., Jakobsson, M., Schmitt, T., Tani, S., Arndt, J. E., Rovere, M., Chayes, D., Ferrini, V. & Wigley, R., 2015. A new digital bathymetric model of the world's oceans. *Earth and Space Science*, 2(8), 331-345.
- Wei, Y., Newman, A. V., Hayes, G. P., Titov, V. V., & Tang, L. (2014). Tsunami forecast by joint inversion of real-time tsunami waveforms and seismic or GPS data: application to the Tohoku 2011 tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 171(12), 3281-3305.
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J. (1994) New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture width, Rupture Area and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 974-1002.
- Yelles, A., Domzig, A., Déverchère, J., Bracène, R., de Lépinay, B. M., Strzerzynski, P., ... & Le Roy, P. (2009). Plio-Quaternary reactivation of the Neogene margin off NW Algiers, Algeria: the Khayr al Din bank. *Tectonophysics*, 475(1), 98-116.
- Yielding, G., Jackson, J. A., King, G. C. P., Sinval, H., Vita-Finzi, C., & Wood, R. M. (1981). Relations between surface deformation, fault geometry, seismicity, and rupture characteristics during the El Asnam (Algeria) earthquake of 10 October 1980. *Earth and Planetary Science Letters*, 56, 287-304.

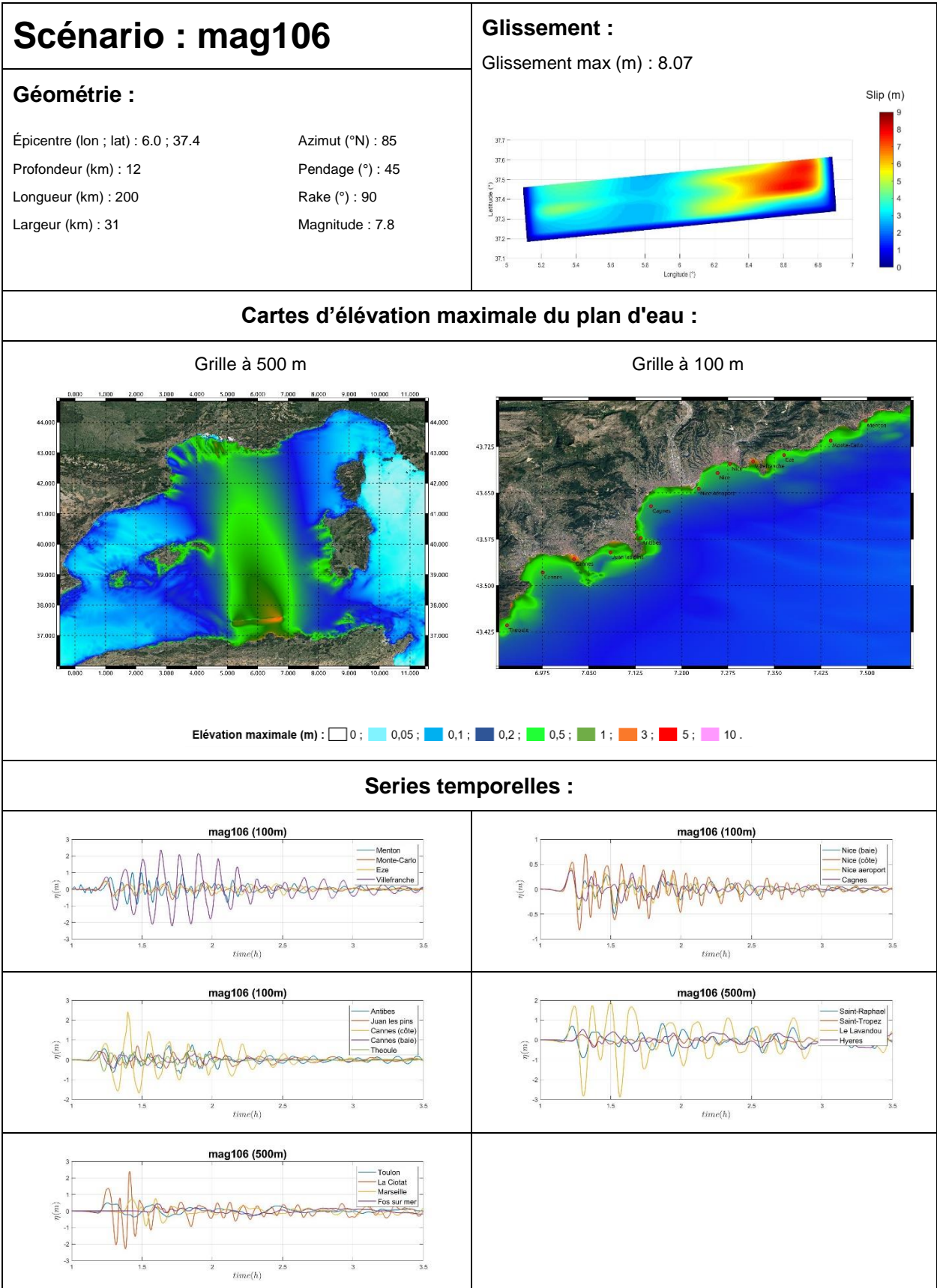
Annexe 1

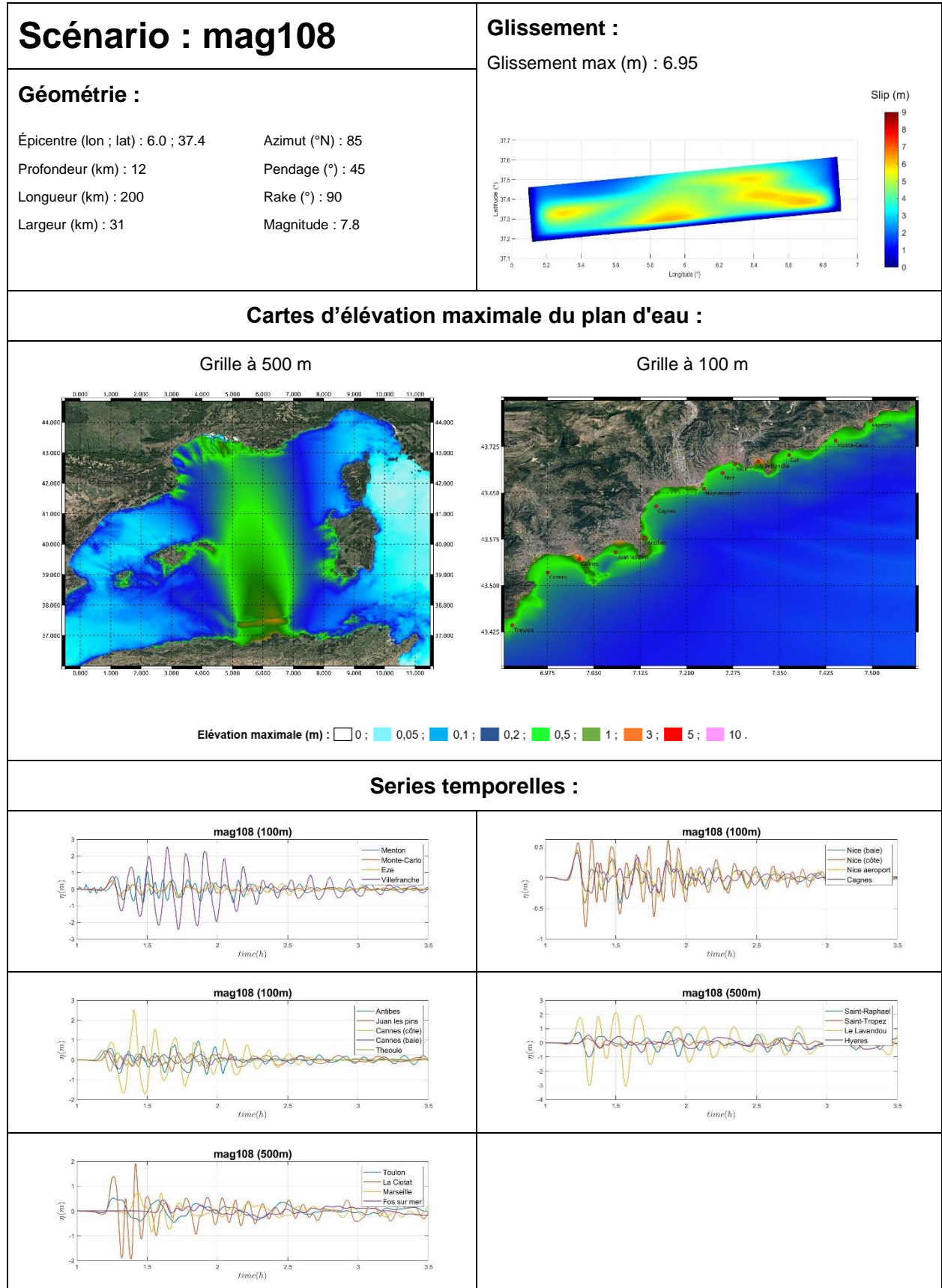
Scénarios marge nord maghrébine





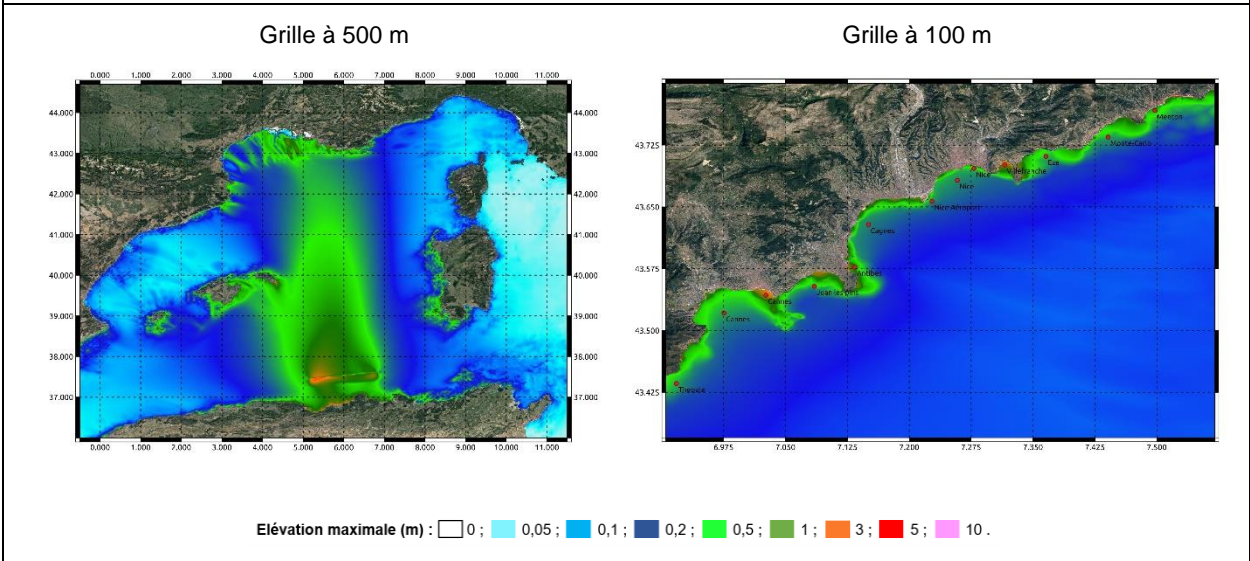




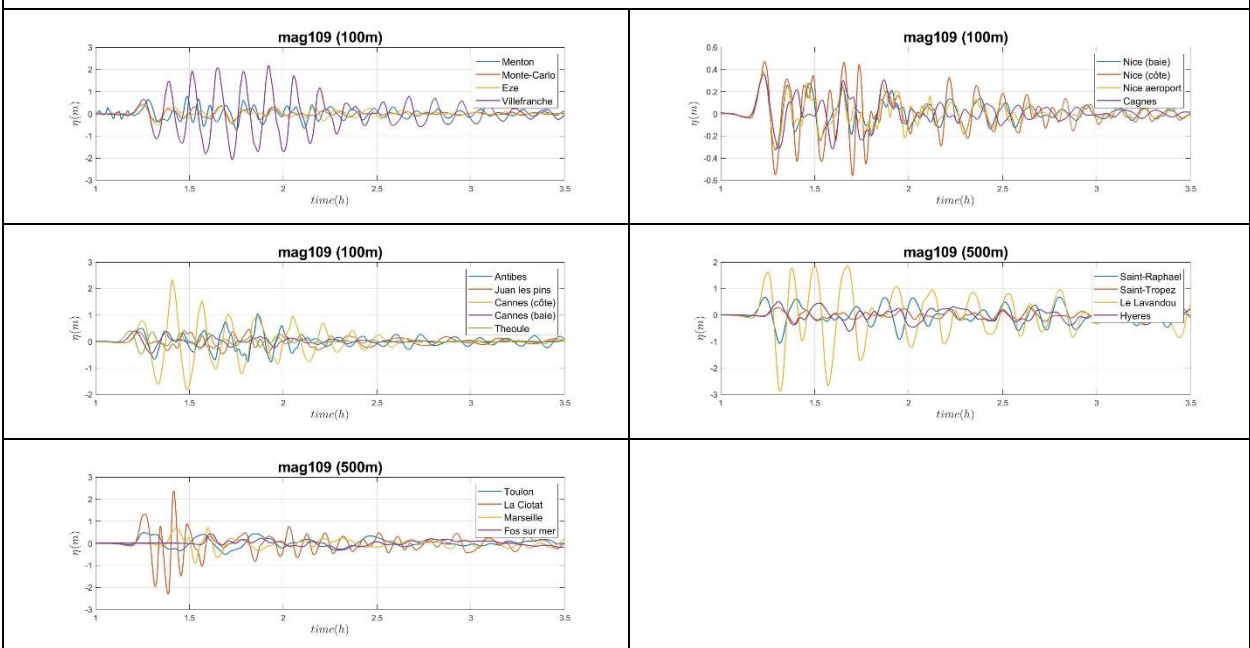


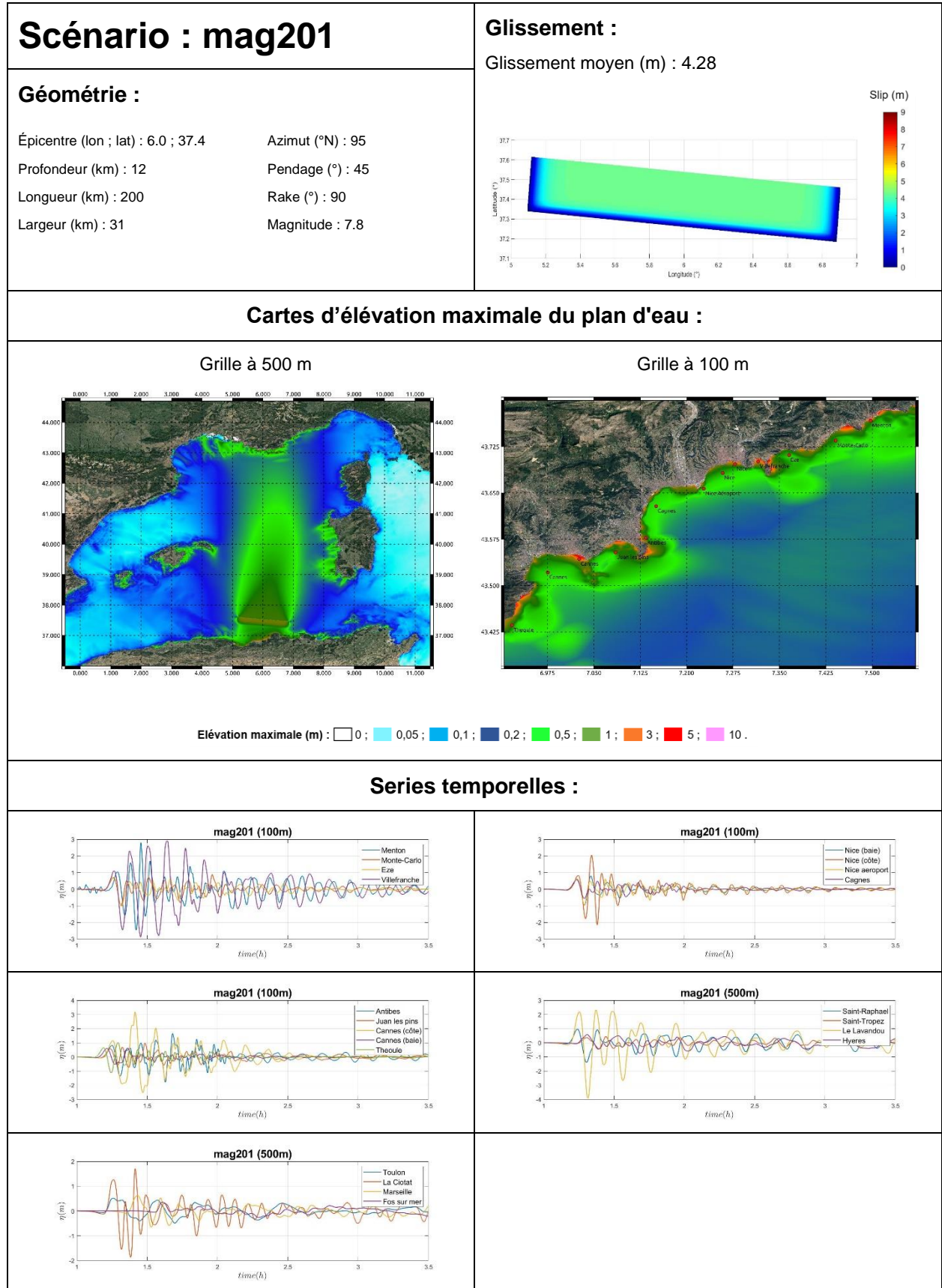
<h2>Scénario : mag109</h2> <p>Géométrie :</p> <p>Épicentre (lon ; lat) : 6.0 ; 37.4 Azimut (°N) : 85 Profondeur (km) : 12 Pendage (°) : 45 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8</p>	<p>Glissement :</p> <p>Glissement max (m) : 8.91</p>
--	---

Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :



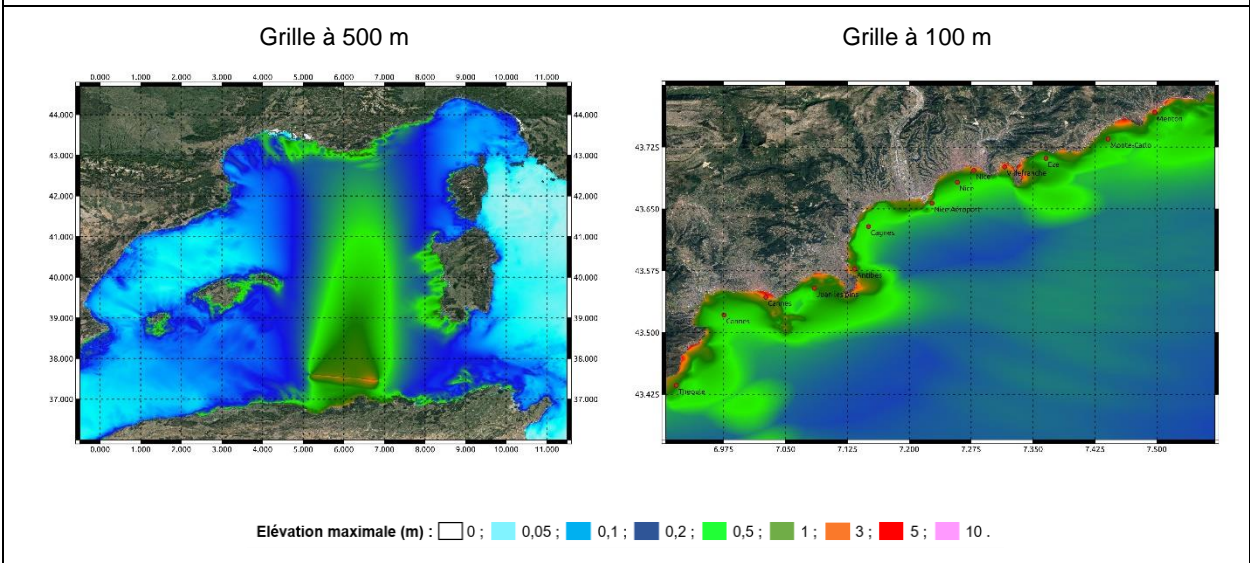
Séries temporelles :



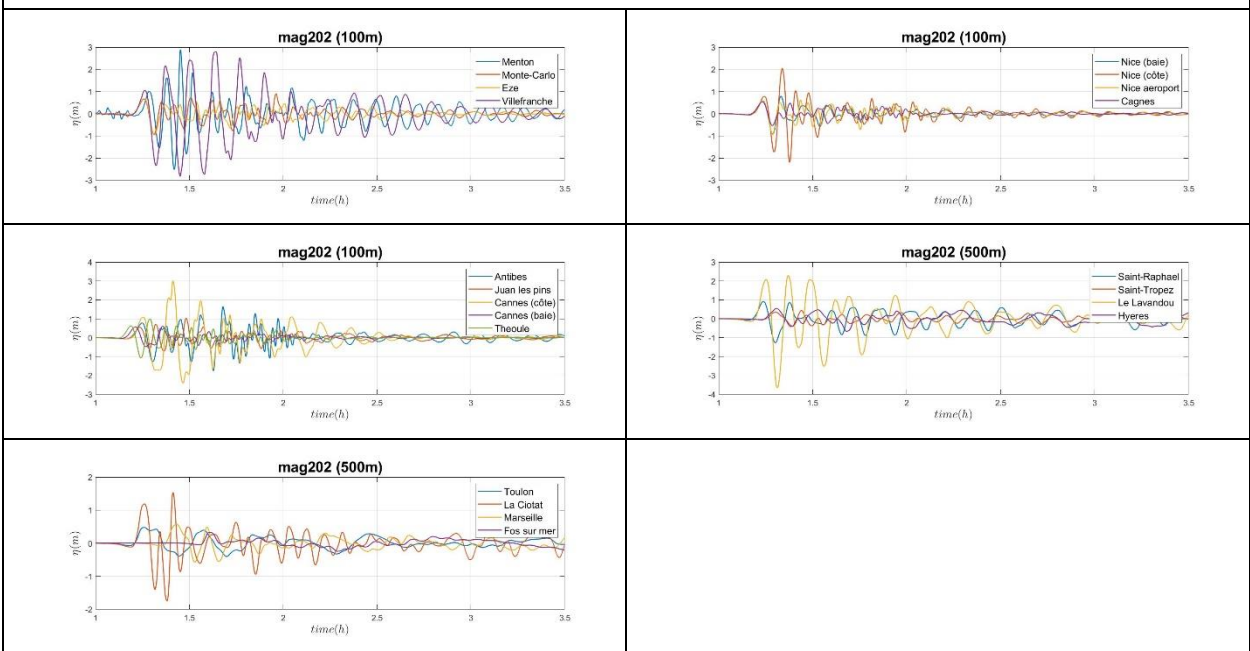


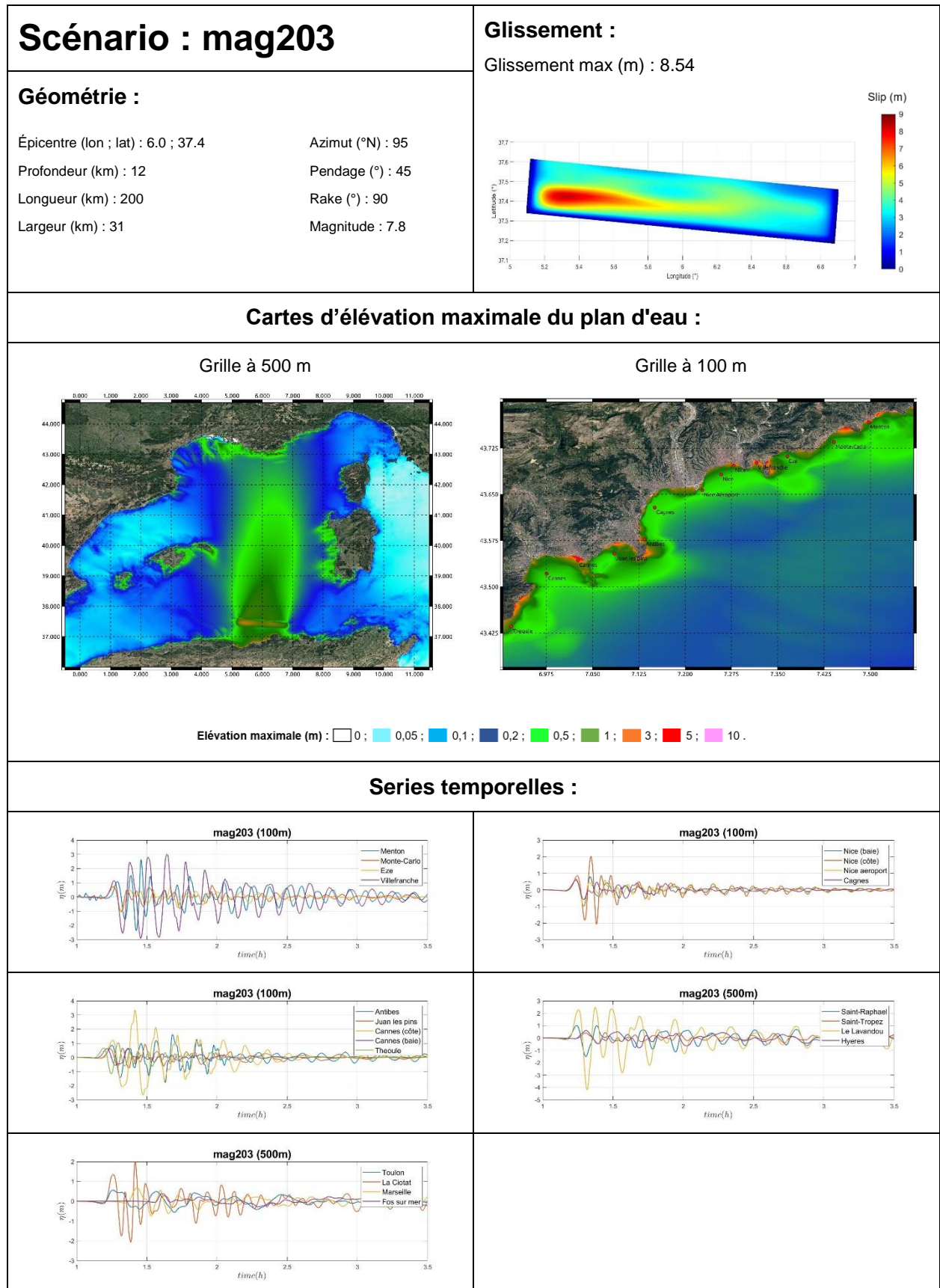
<h2>Scénario : mag202</h2> <p>Géométrie :</p> <p>Épicentre (lon ; lat) : 6.0 ; 37.4 Azimut (°N) : 95 Profondeur (km) : 12 Pendage (°) : 45 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8</p>	<p>Glissement :</p> <p>Glissement max (m) : 8.4</p>
--	--

Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :



Séries temporelles :





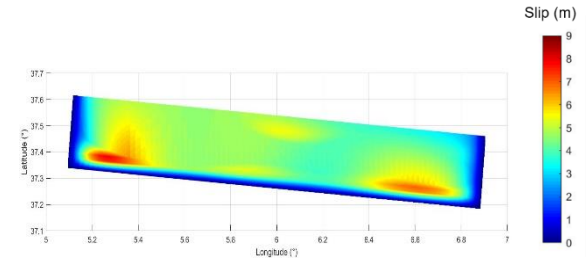
Scénario : mag204

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 6.0 ; 37.4 Azimut (°N) : 95
 Profondeur (km) : 12 Pendage (°) : 45
 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8

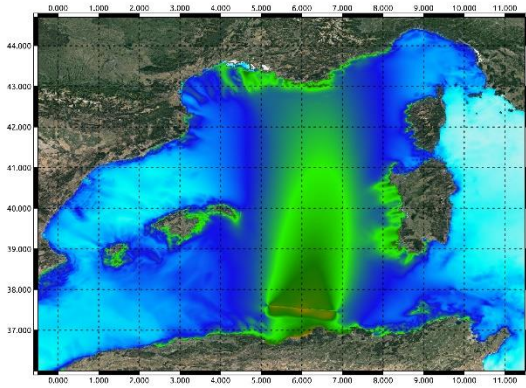
Glissement :

Glissement max (m) : 8.68

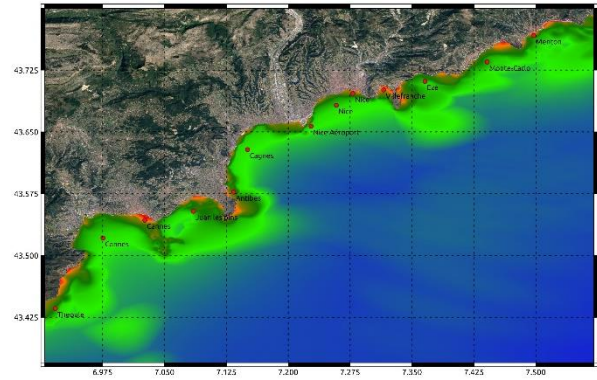


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 500 m

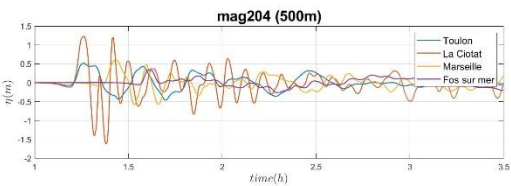
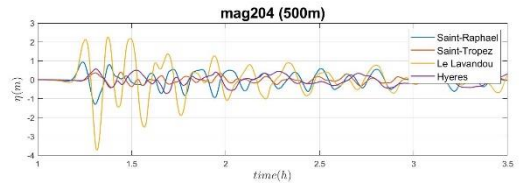
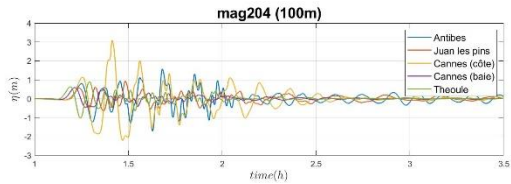
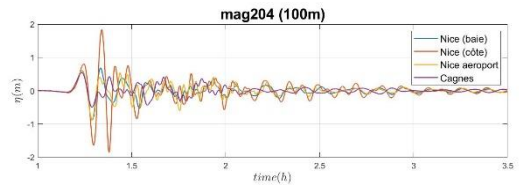
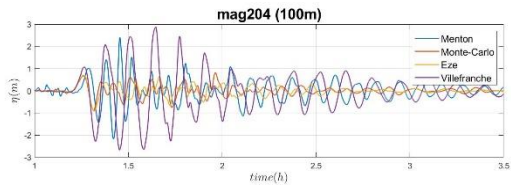


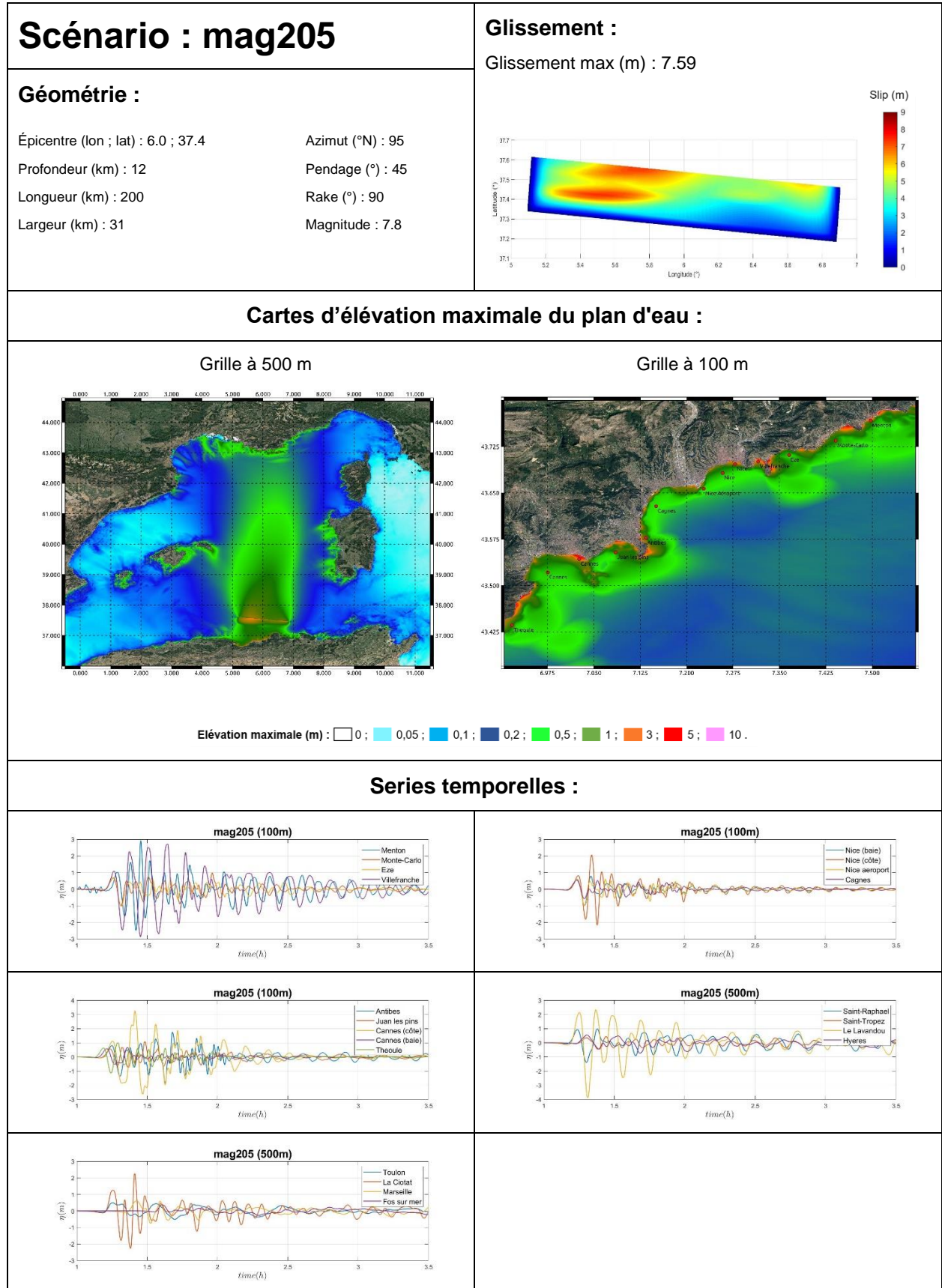
Grille à 100 m

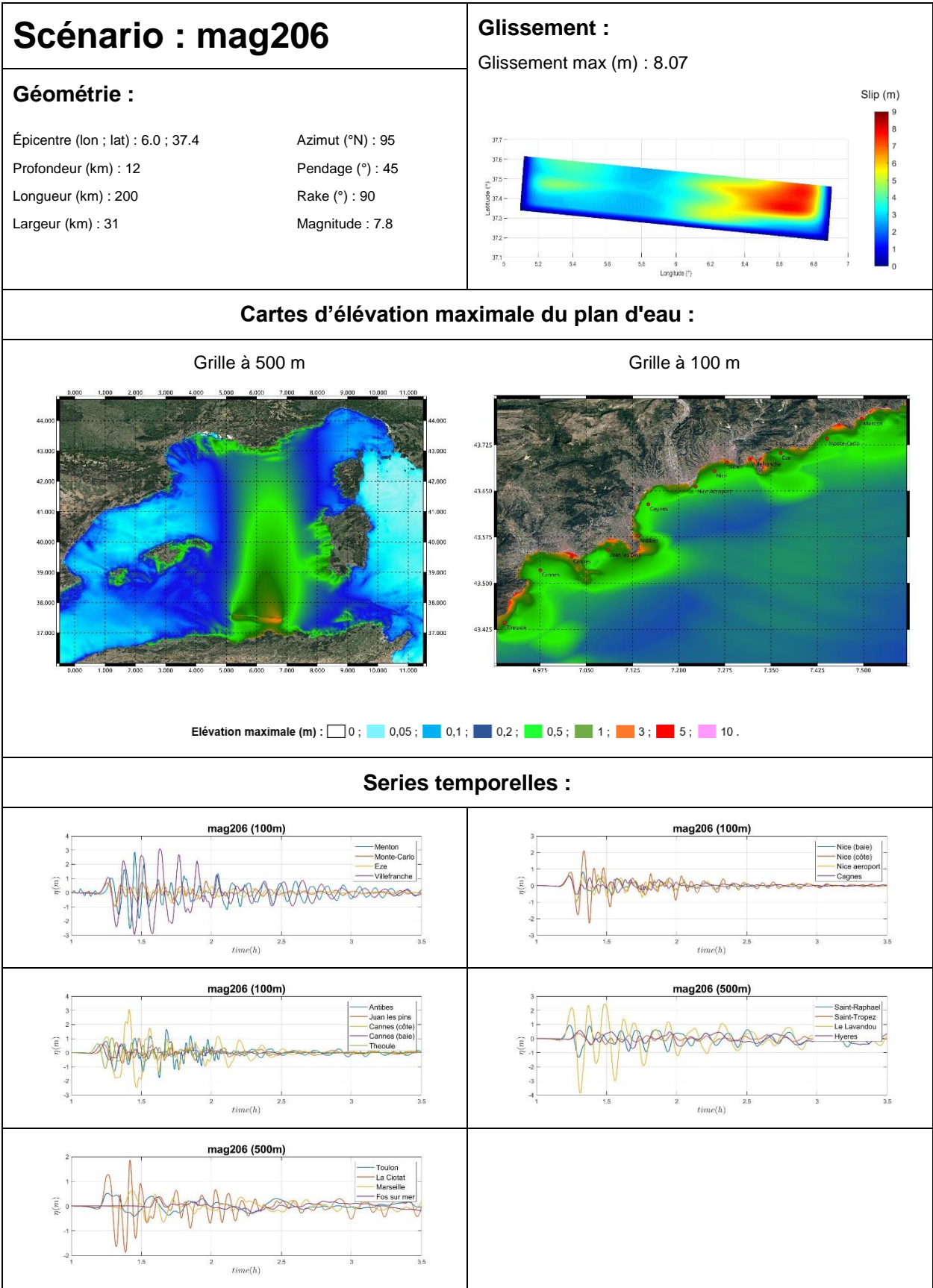


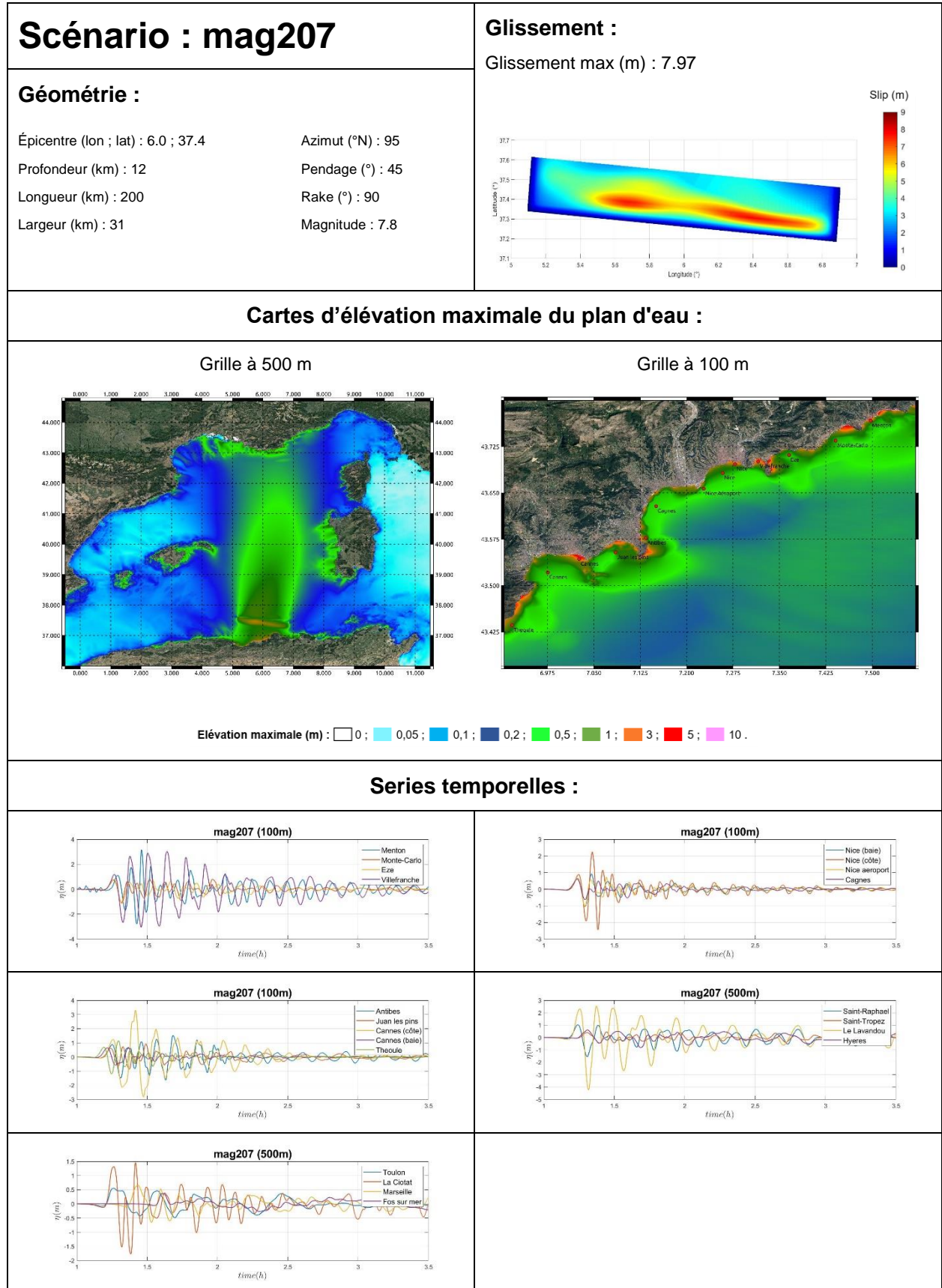
Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :









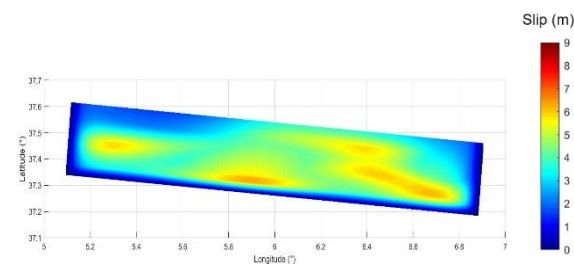
Scénario : mag208

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 6.0 ; 37.4 Azimut (°N) : 95
 Profondeur (km) : 12 Pendage (°) : 45
 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8

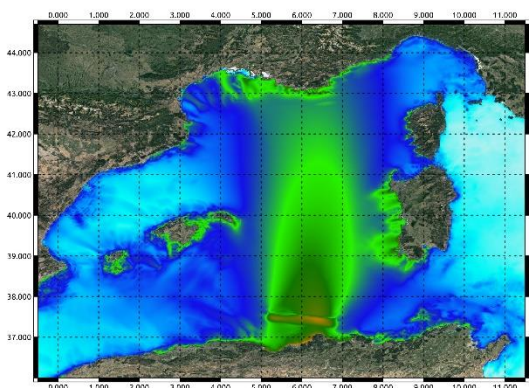
Glissement :

Glissement max (m) : 6.95

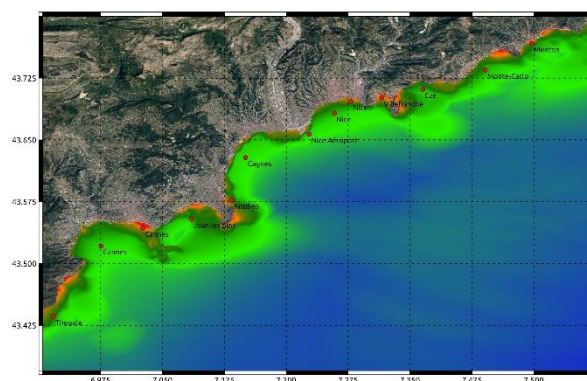


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 500 m

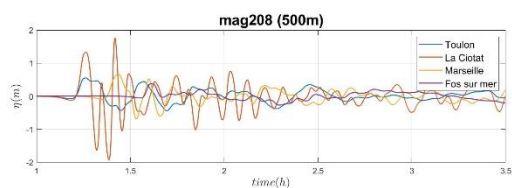
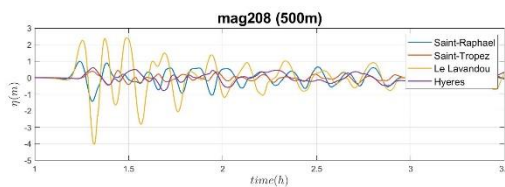
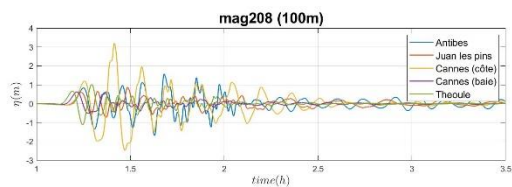
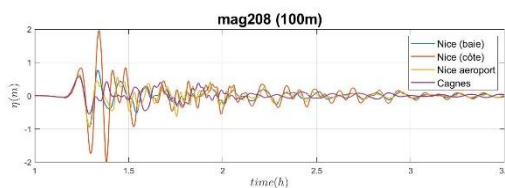
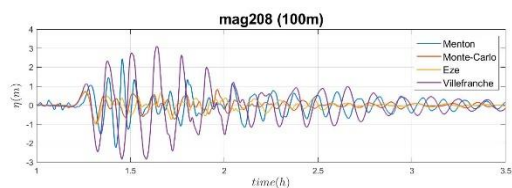


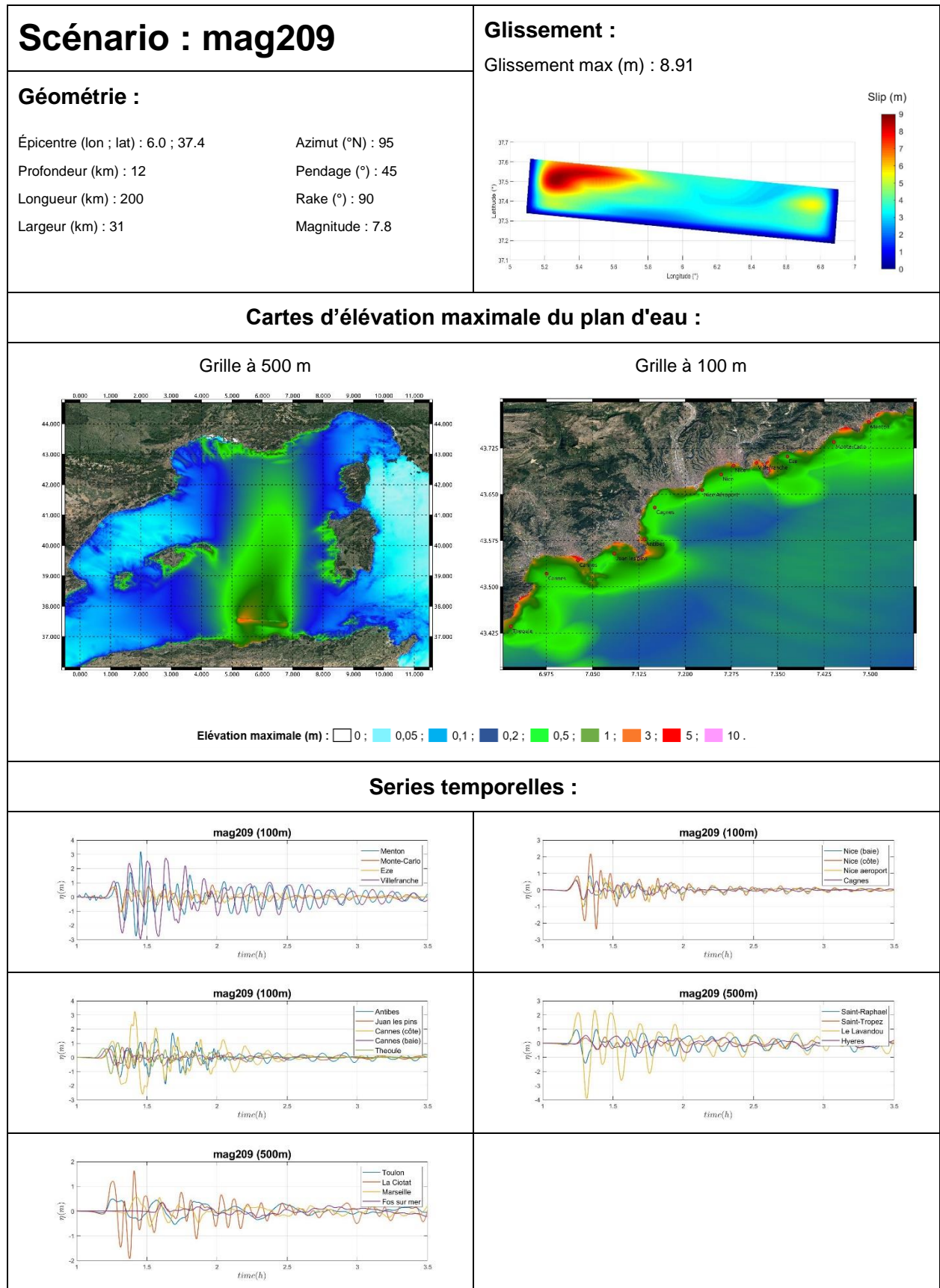
Grille à 100 m



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :





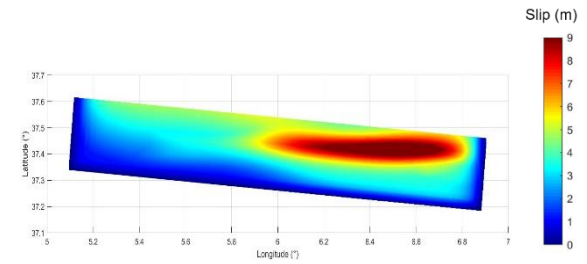
Scénario : mag210

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 6.0 ; 37.4 Azimut (°N) : 95
 Profondeur (km) : 12 Pendage (°) : 45
 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8

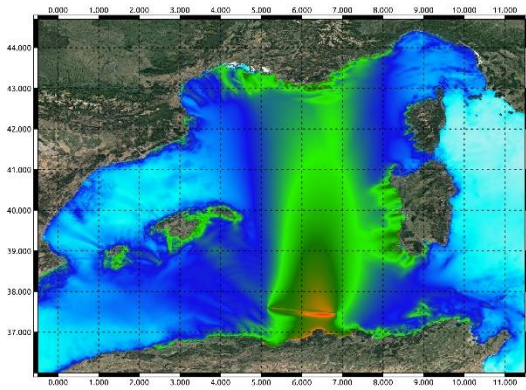
Glissement :

Glissement max (m) : 10.9

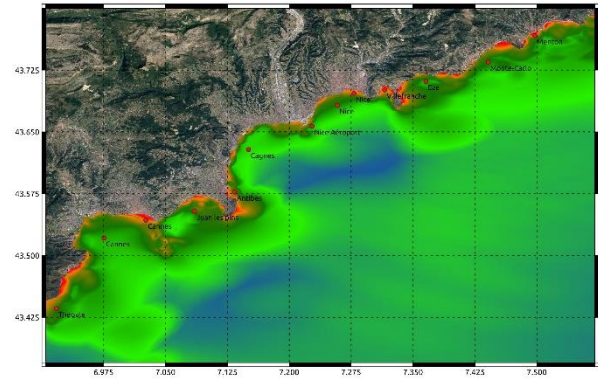


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 500 m

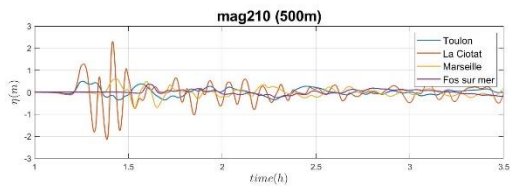
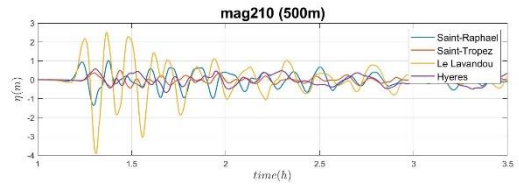
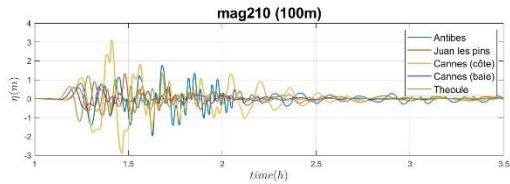
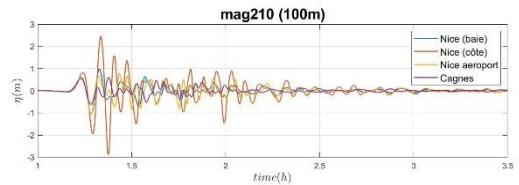
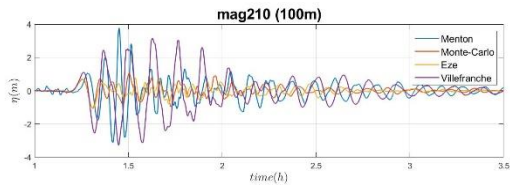


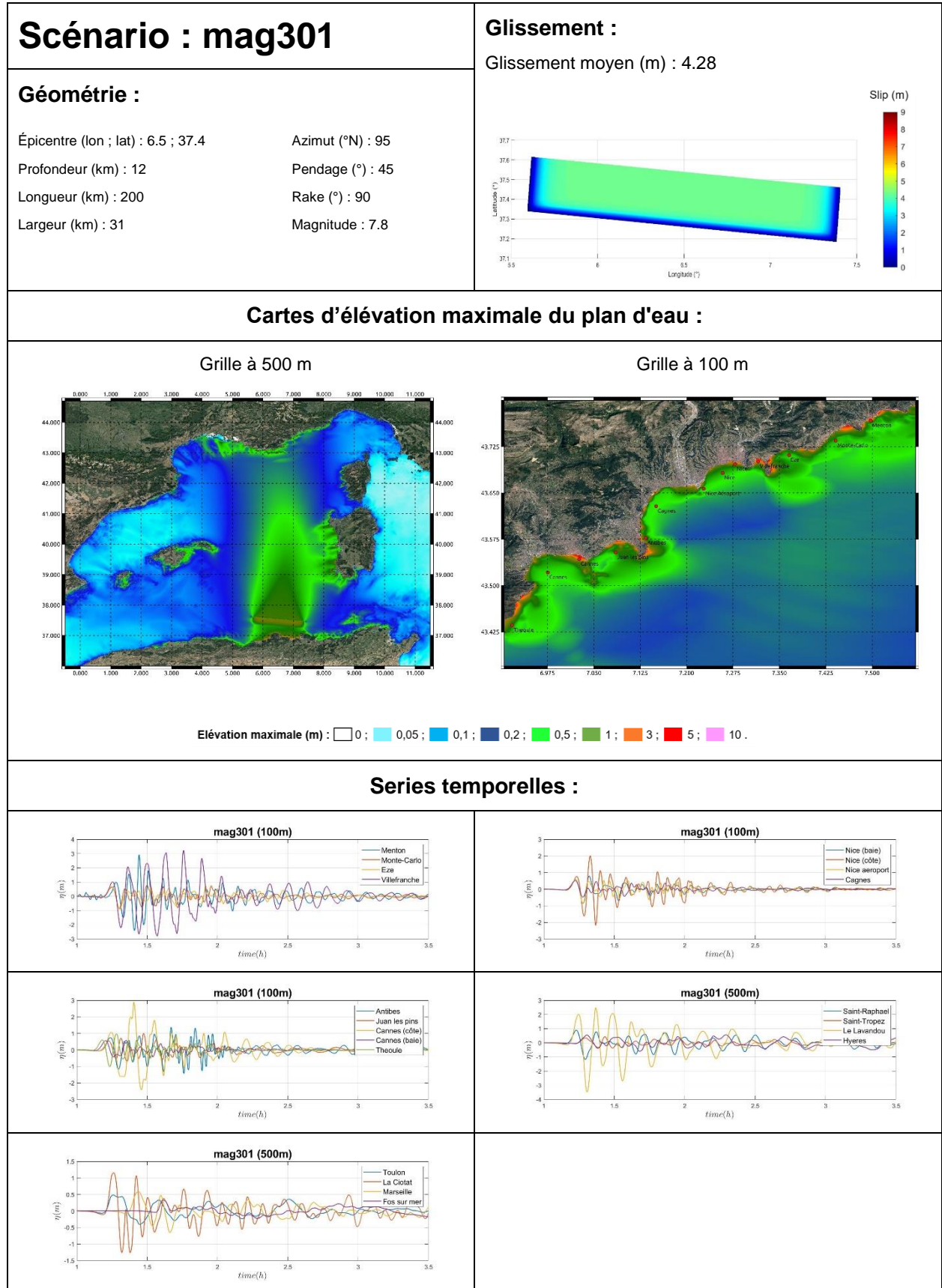
Grille à 100 m



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :





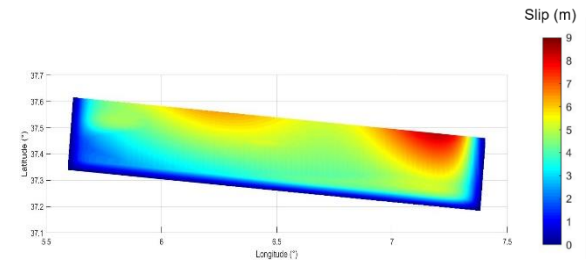
Scénario : mag302

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 6.5 ; 37.4 Azimut (°N) : 95
 Profondeur (km) : 12 Pendage (°) : 45
 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8

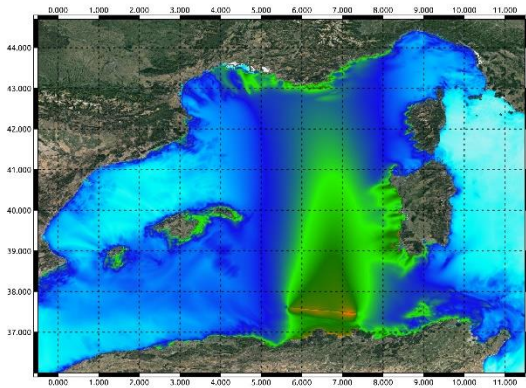
Glissement :

Glissement max (m) : 8.4

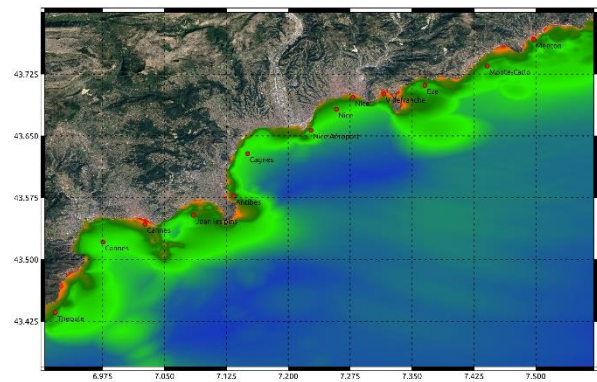


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 500 m

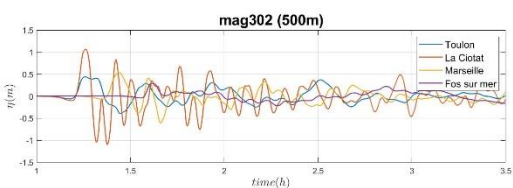
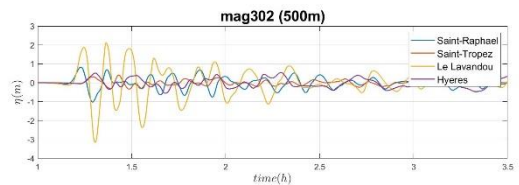
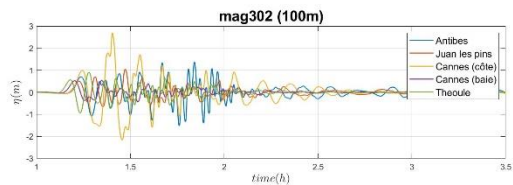
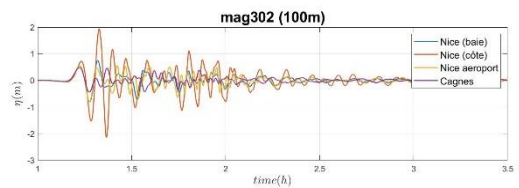
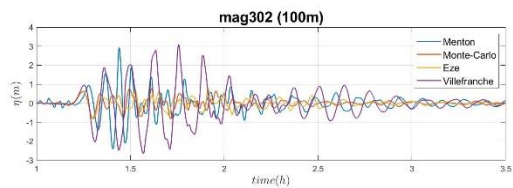


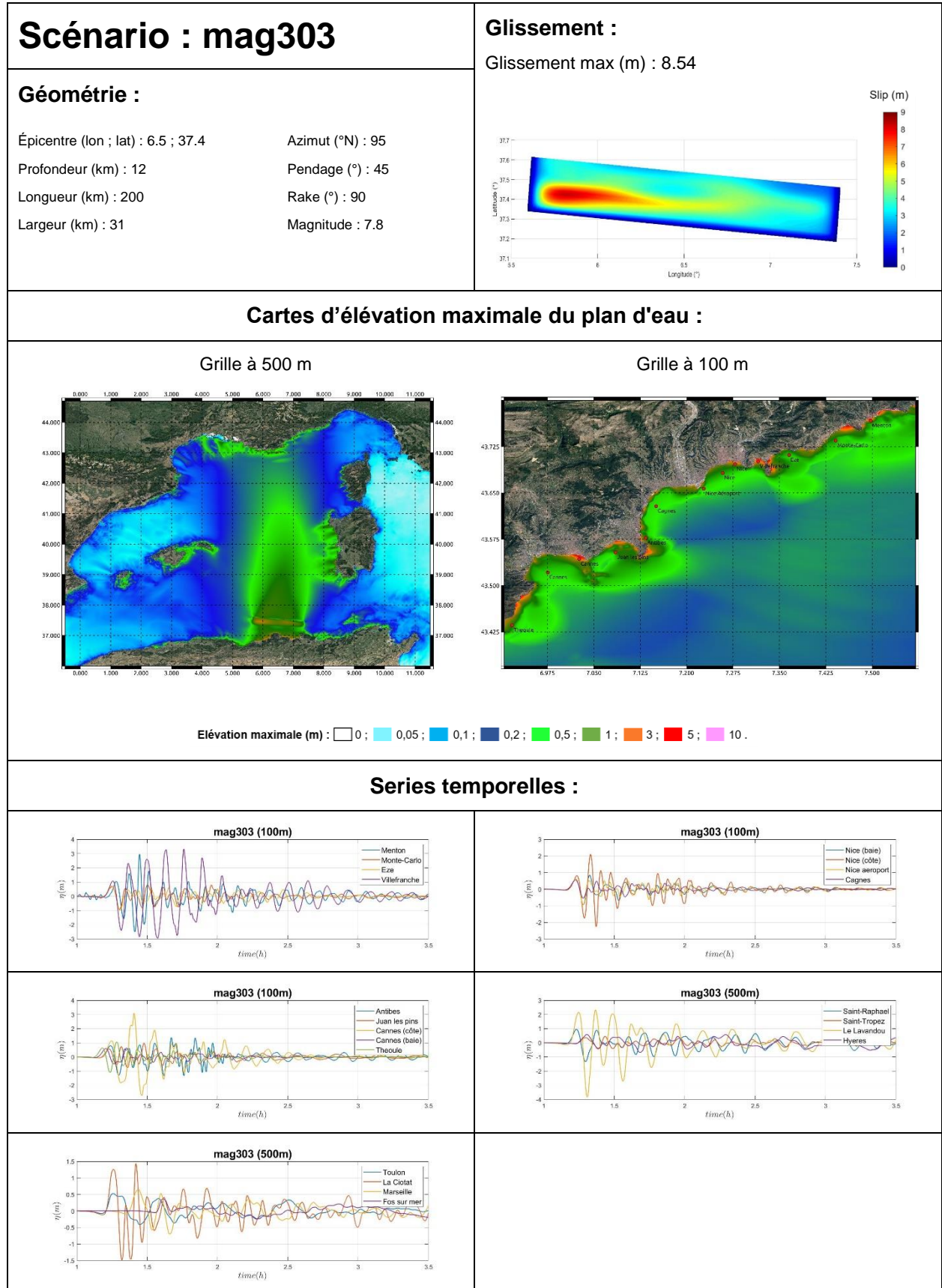
Grille à 100 m

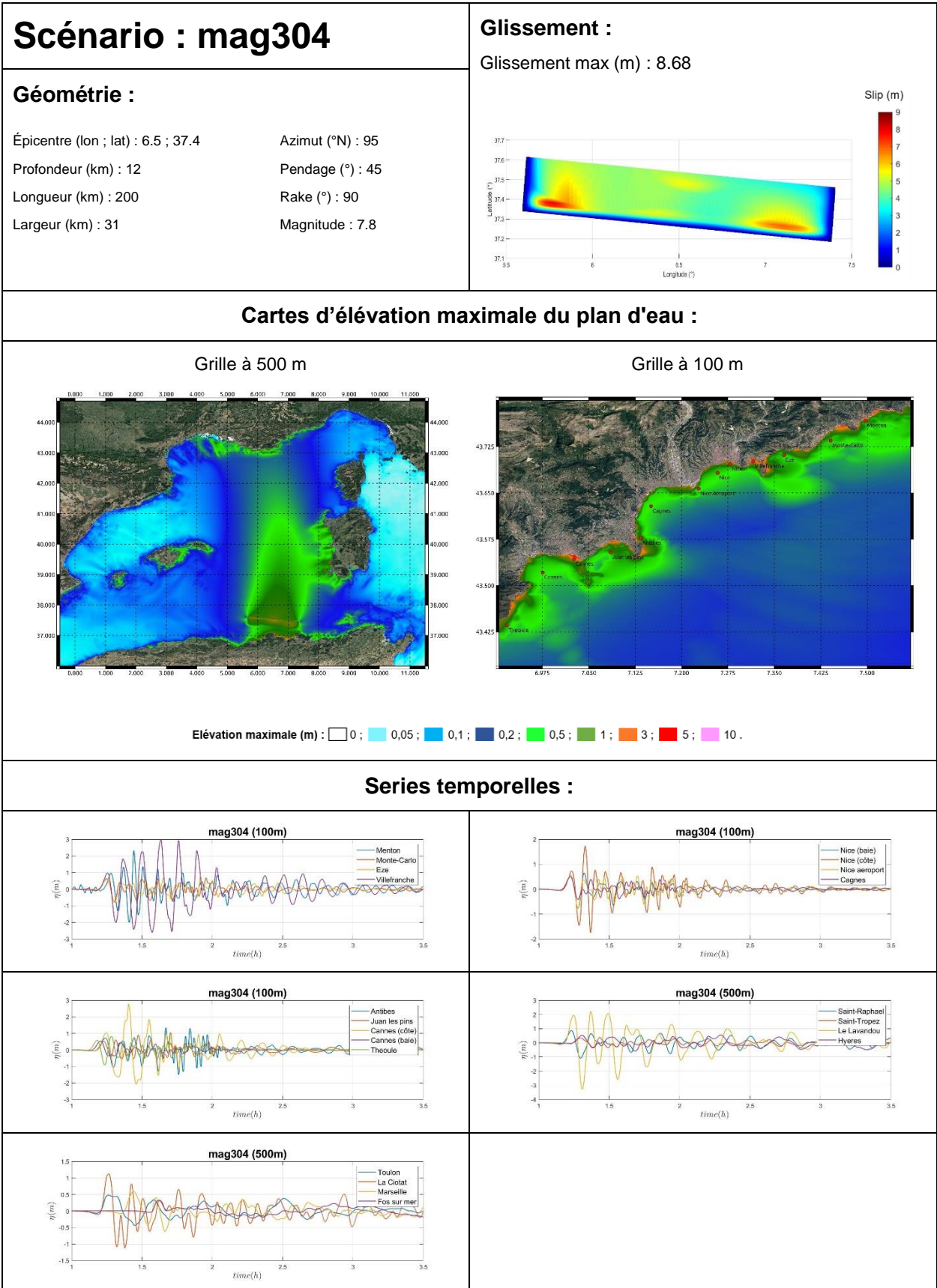


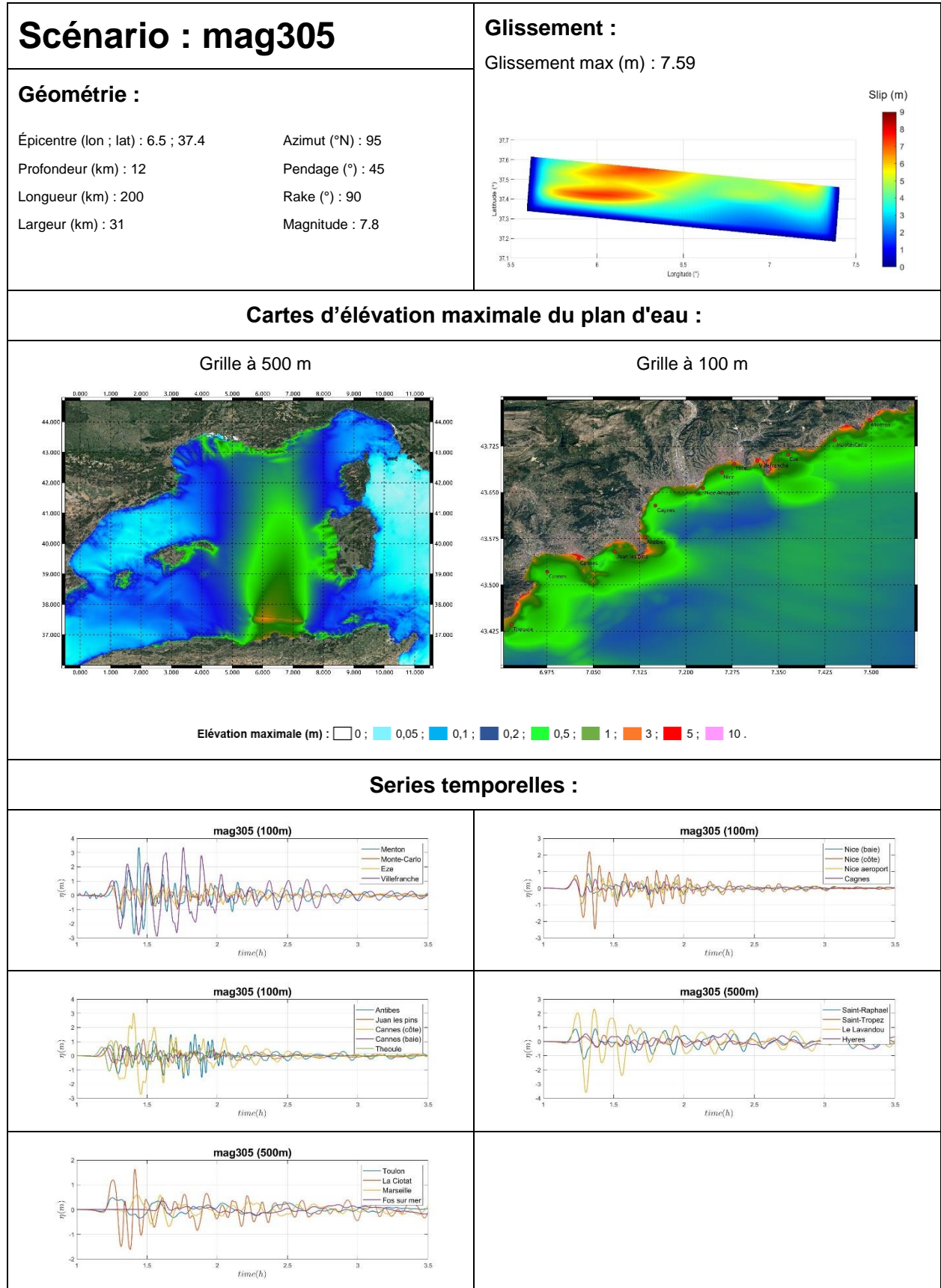
Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

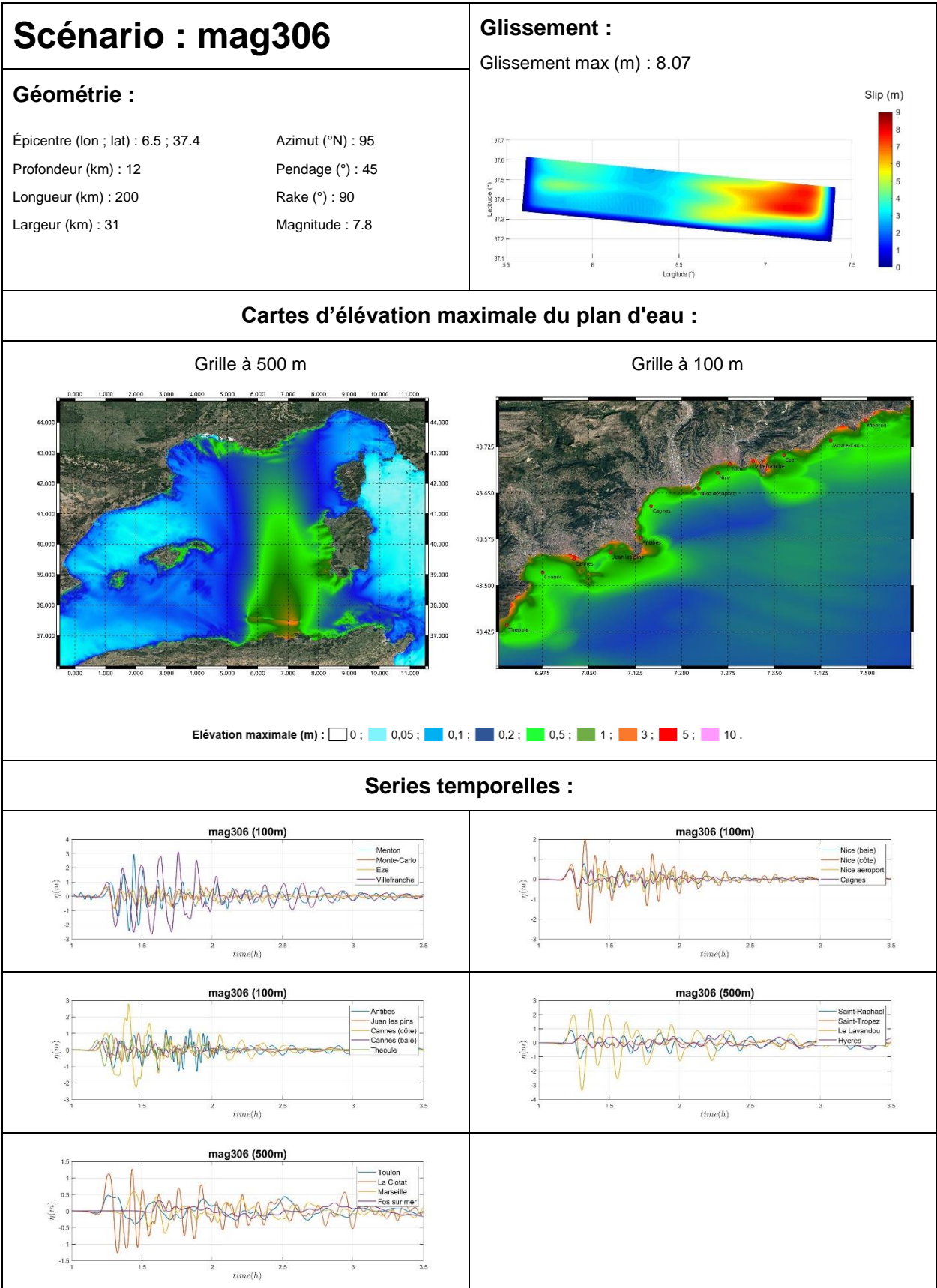
Séries temporelles :

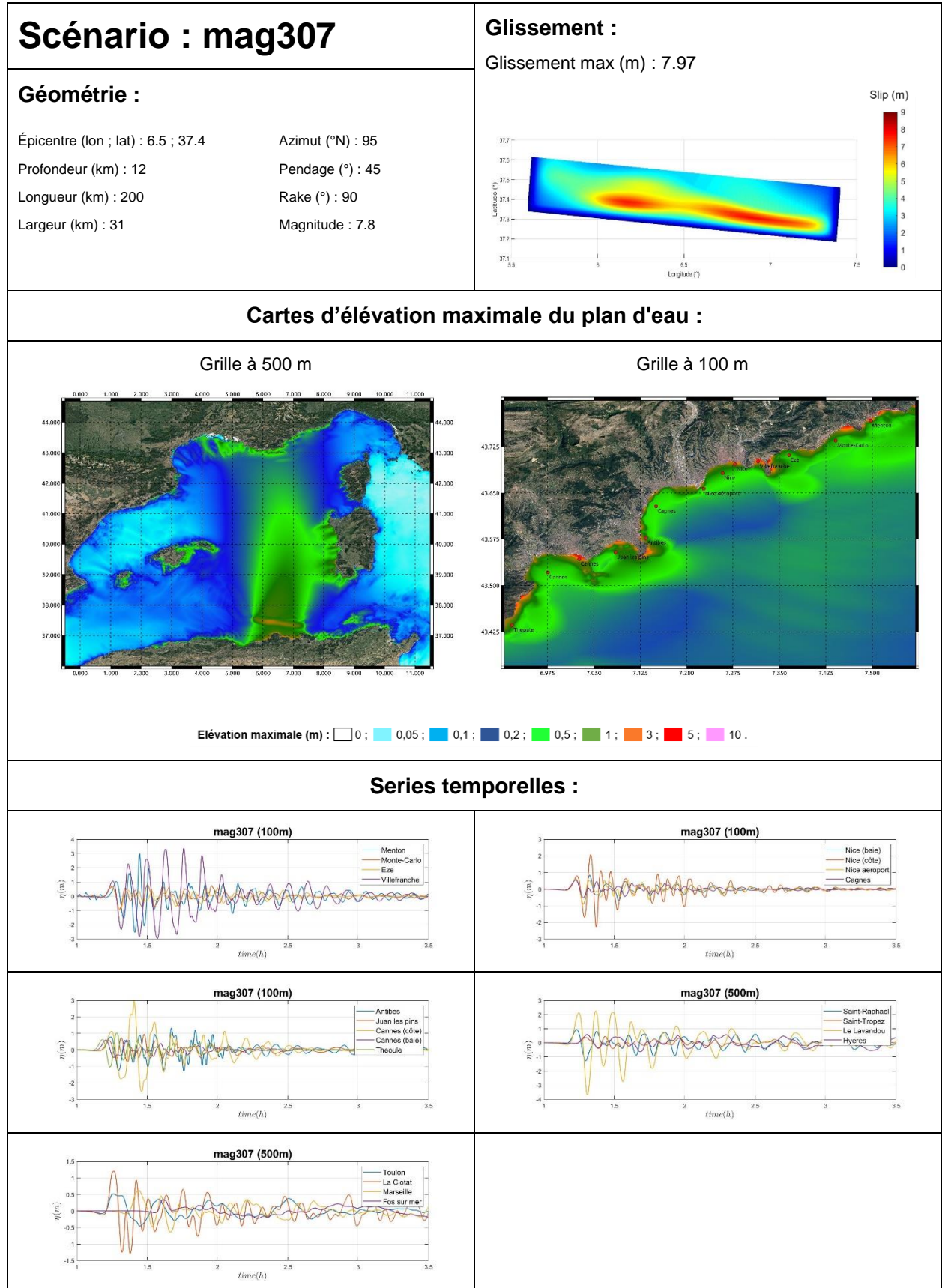












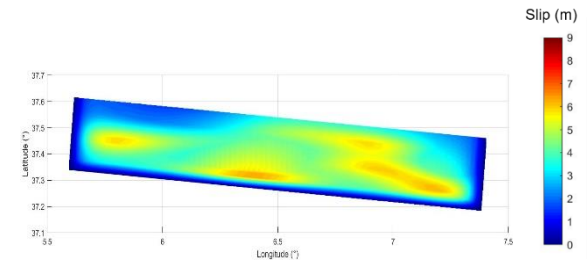
Scénario : mag308

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 6.5 ; 37.4 Azimut (°N) : 95
 Profondeur (km) : 12 Pendage (°) : 45
 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8

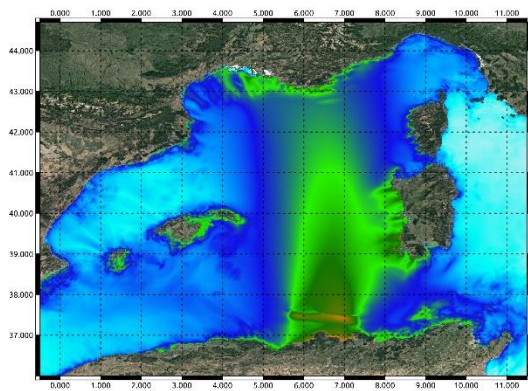
Glissement :

Glissement max (m) : 6.95

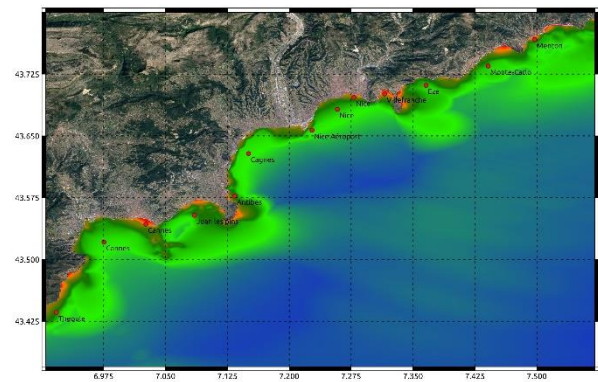


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 500 m

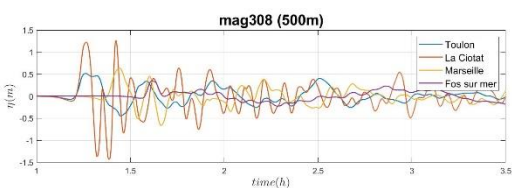
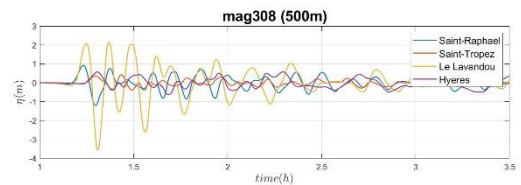
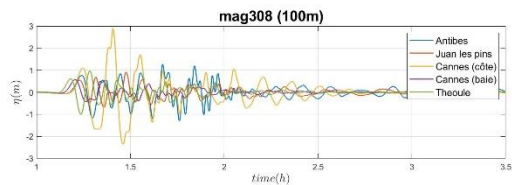
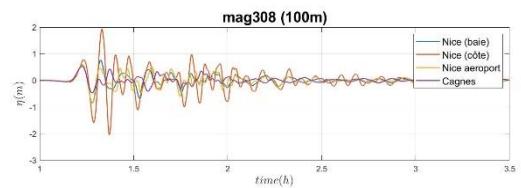
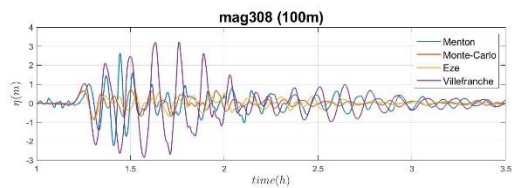


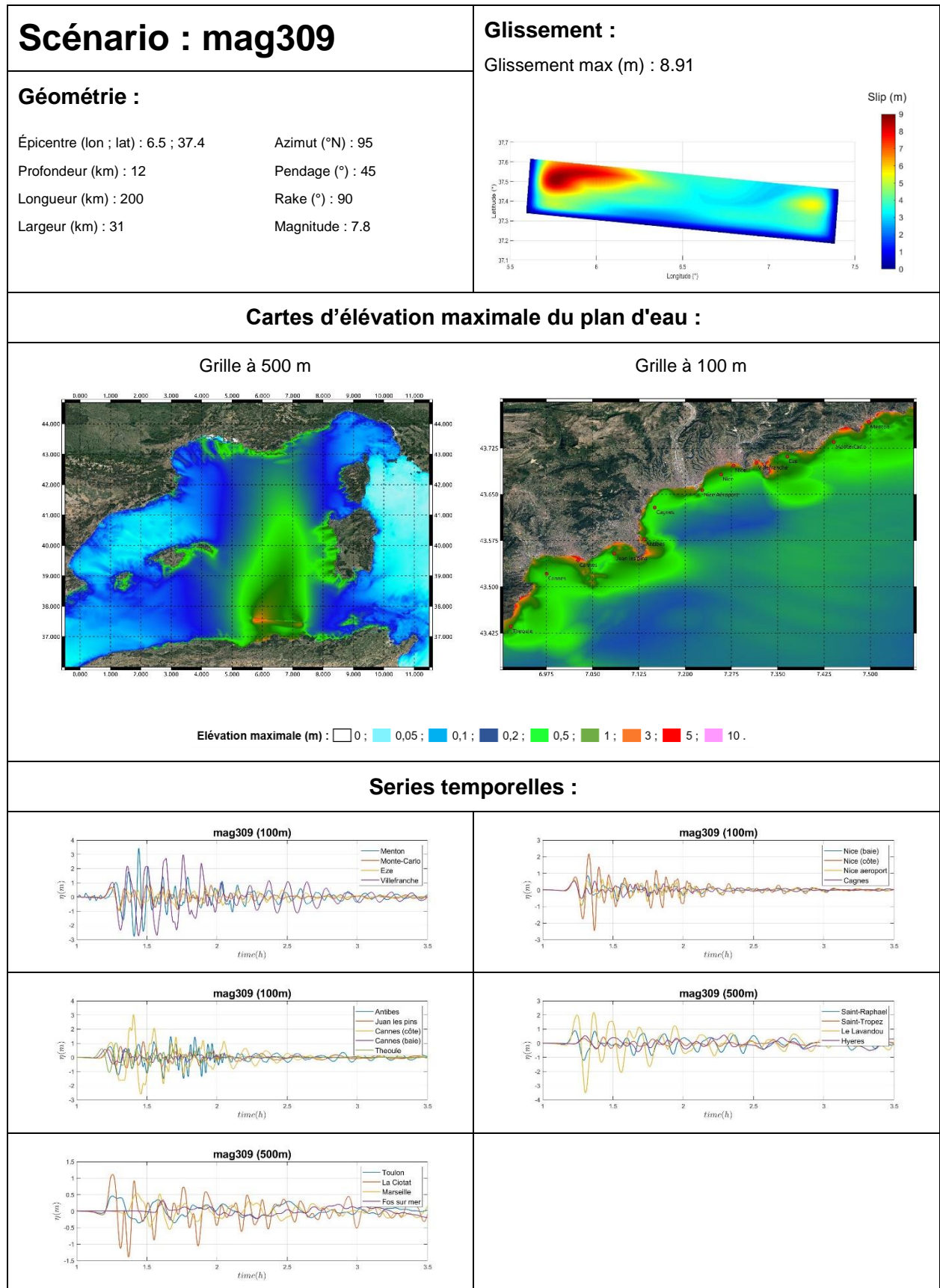
Grille à 100 m

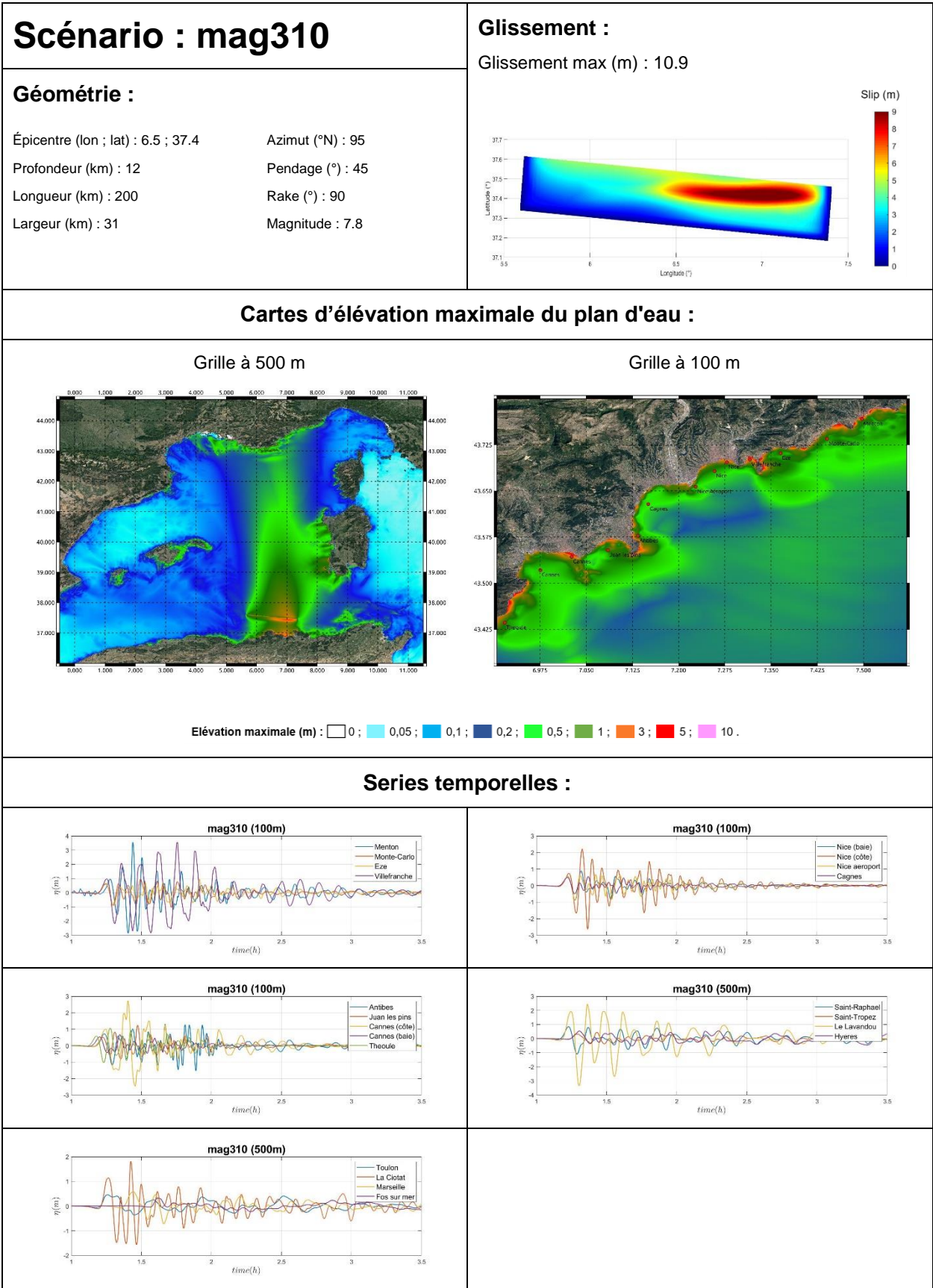


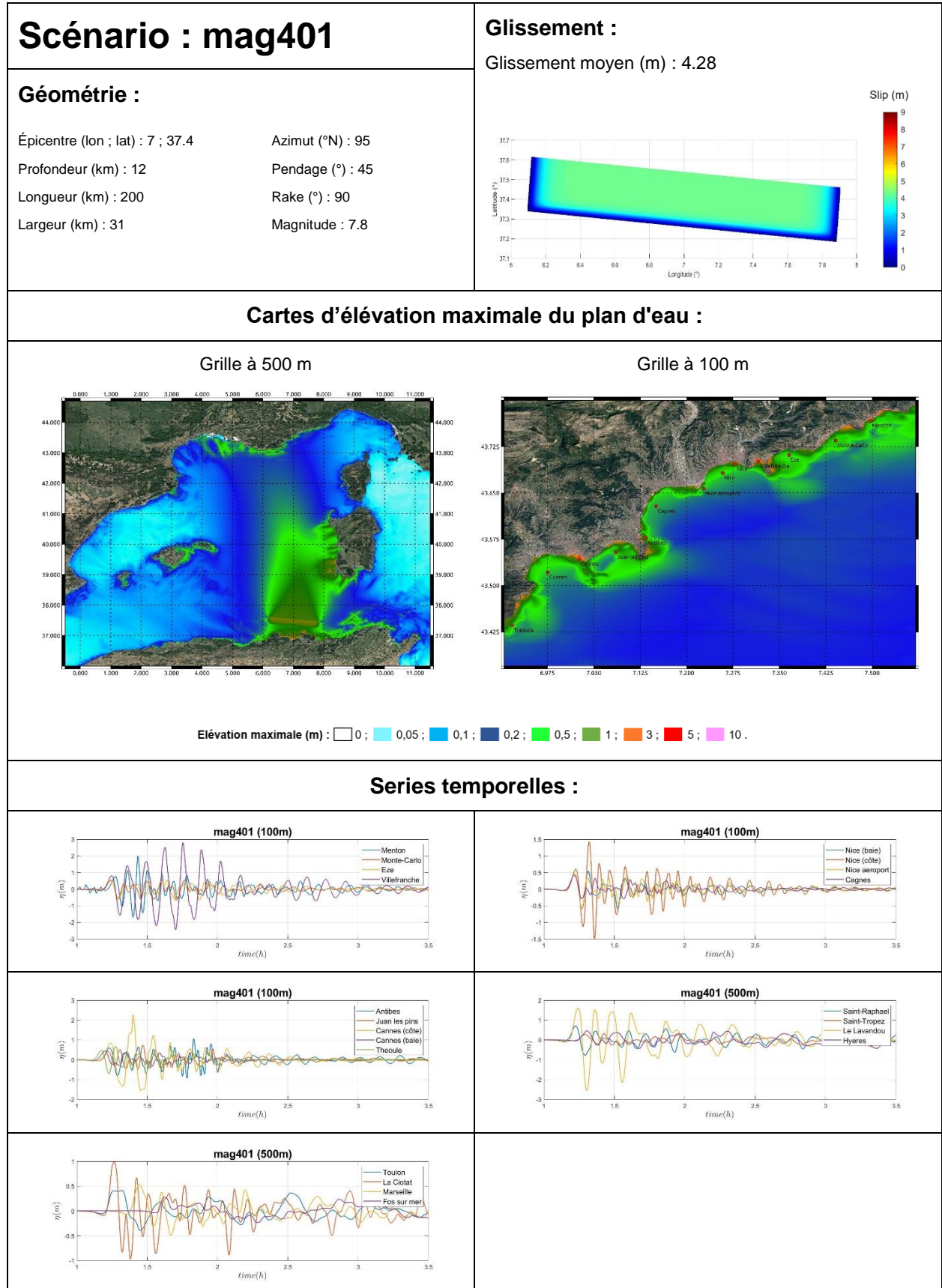
Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

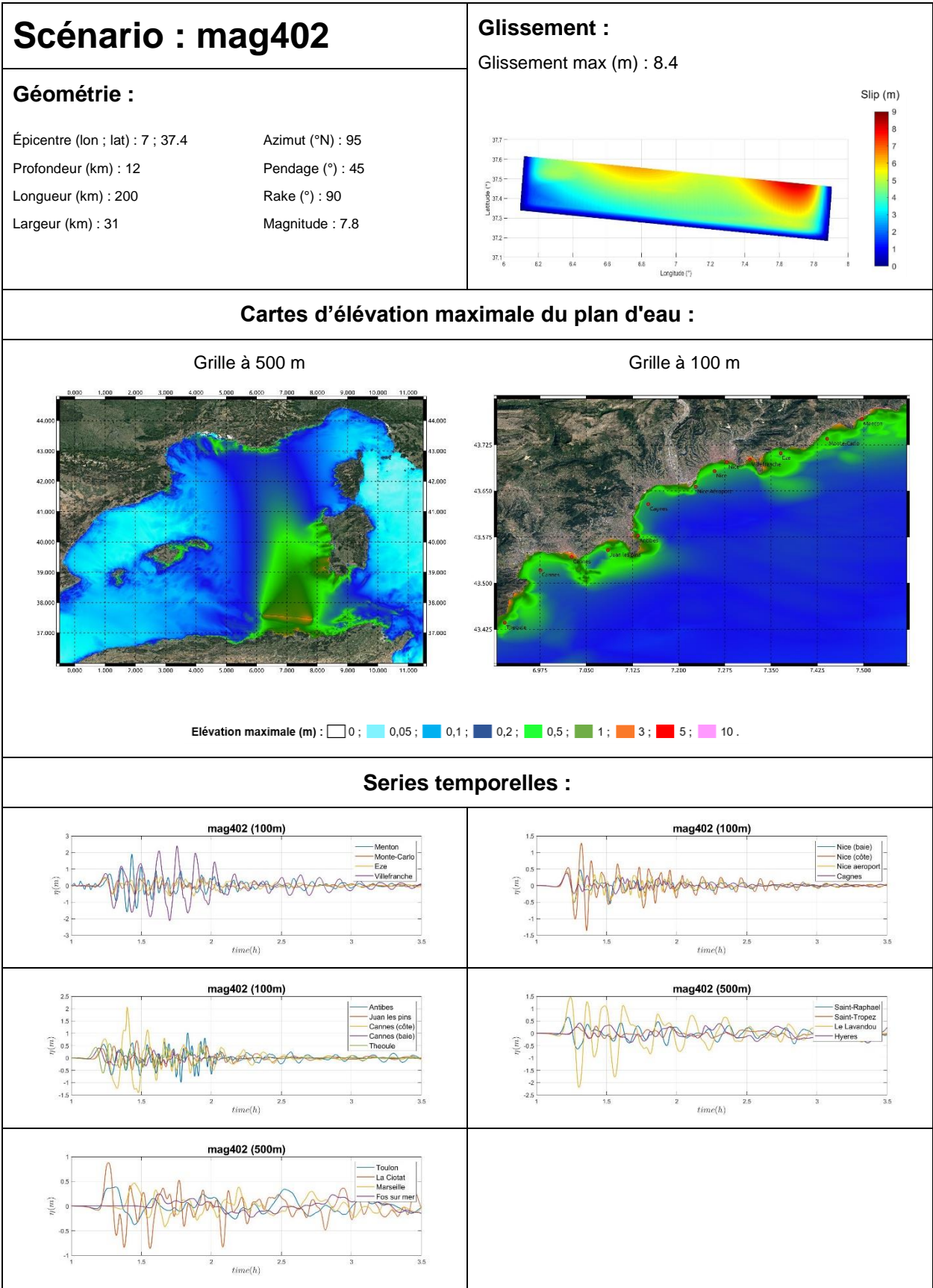
Séries temporelles :

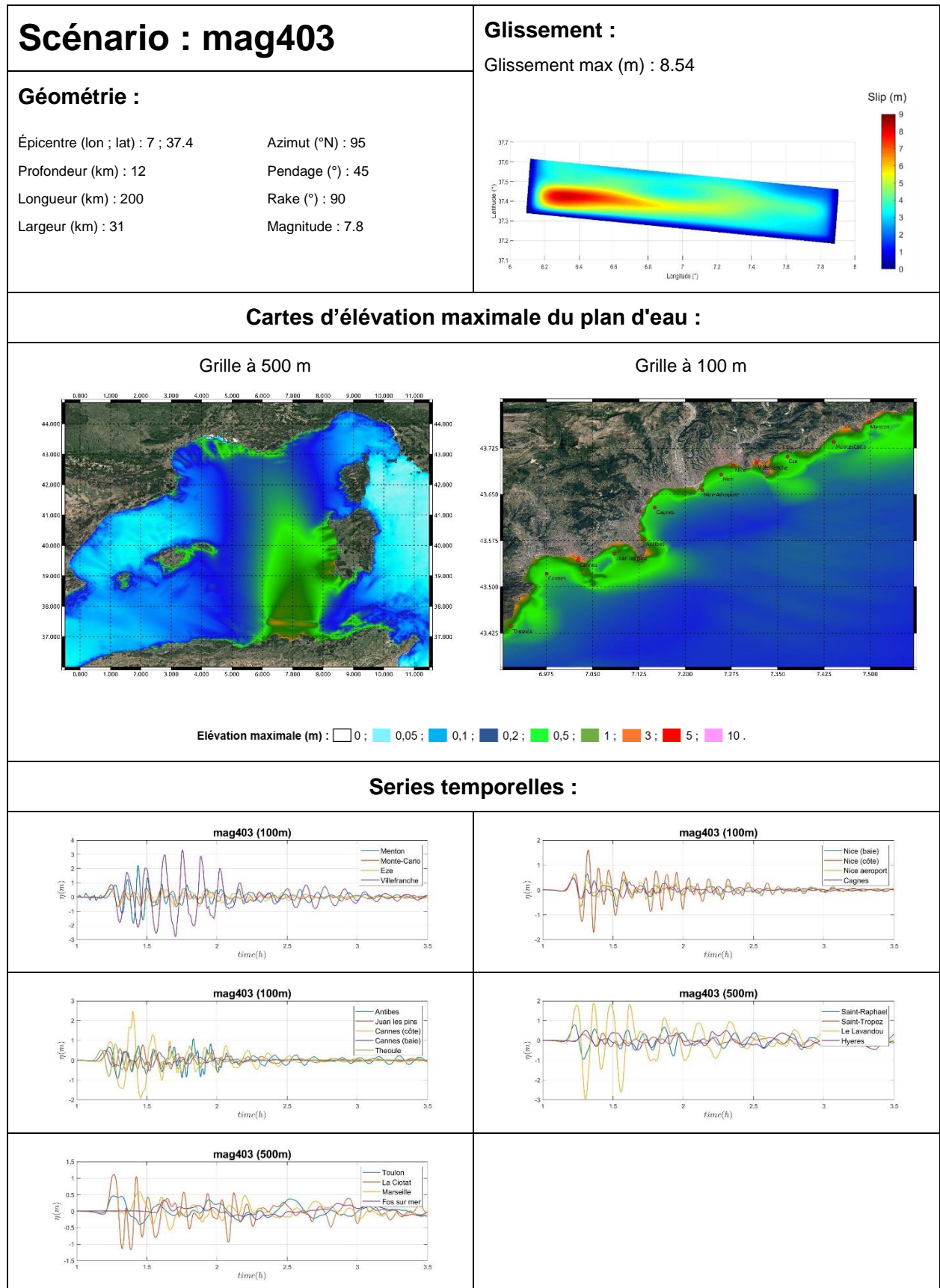












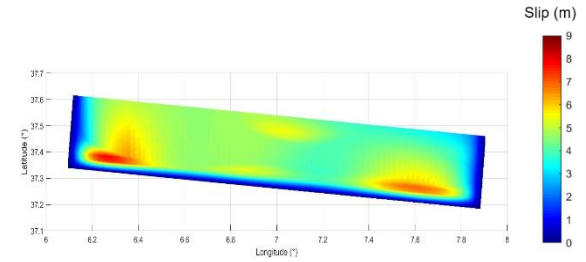
Scénario : mag404

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7 ; 37.4 Azimut (°N) : 95
 Profondeur (km) : 12 Pendage (°) : 45
 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8

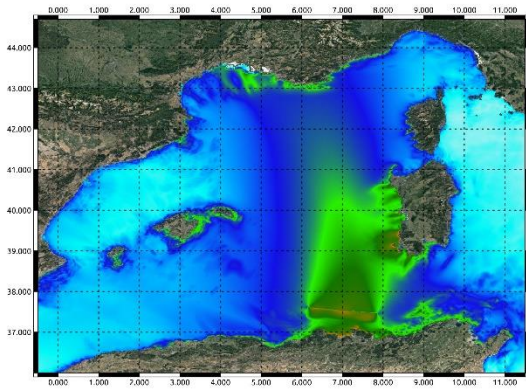
Glissement :

Glissement max (m) : 8.68

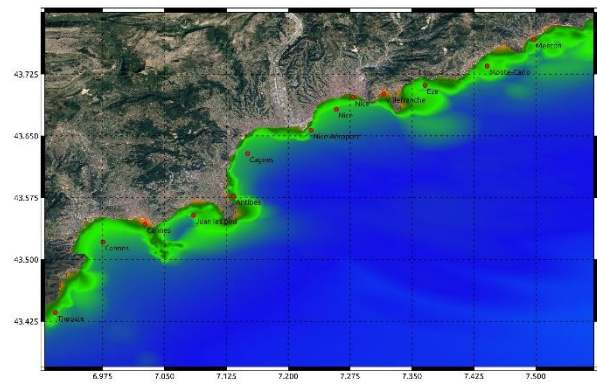


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 500 m

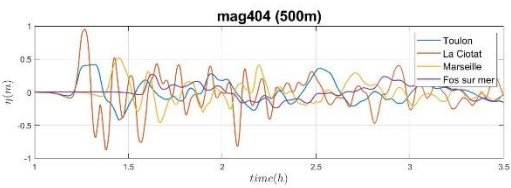
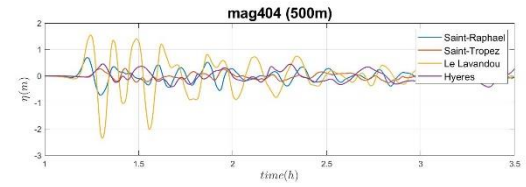
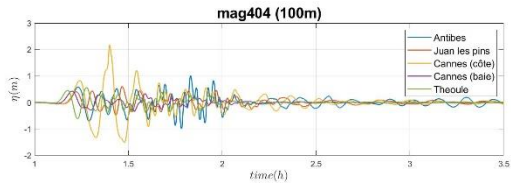
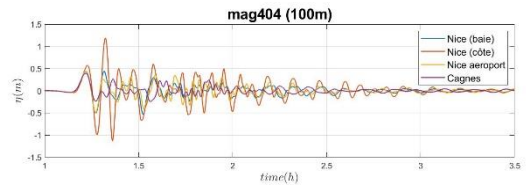
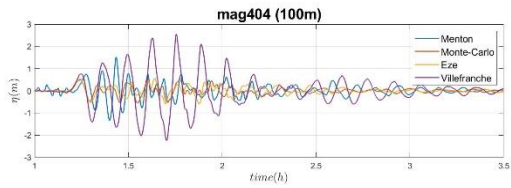


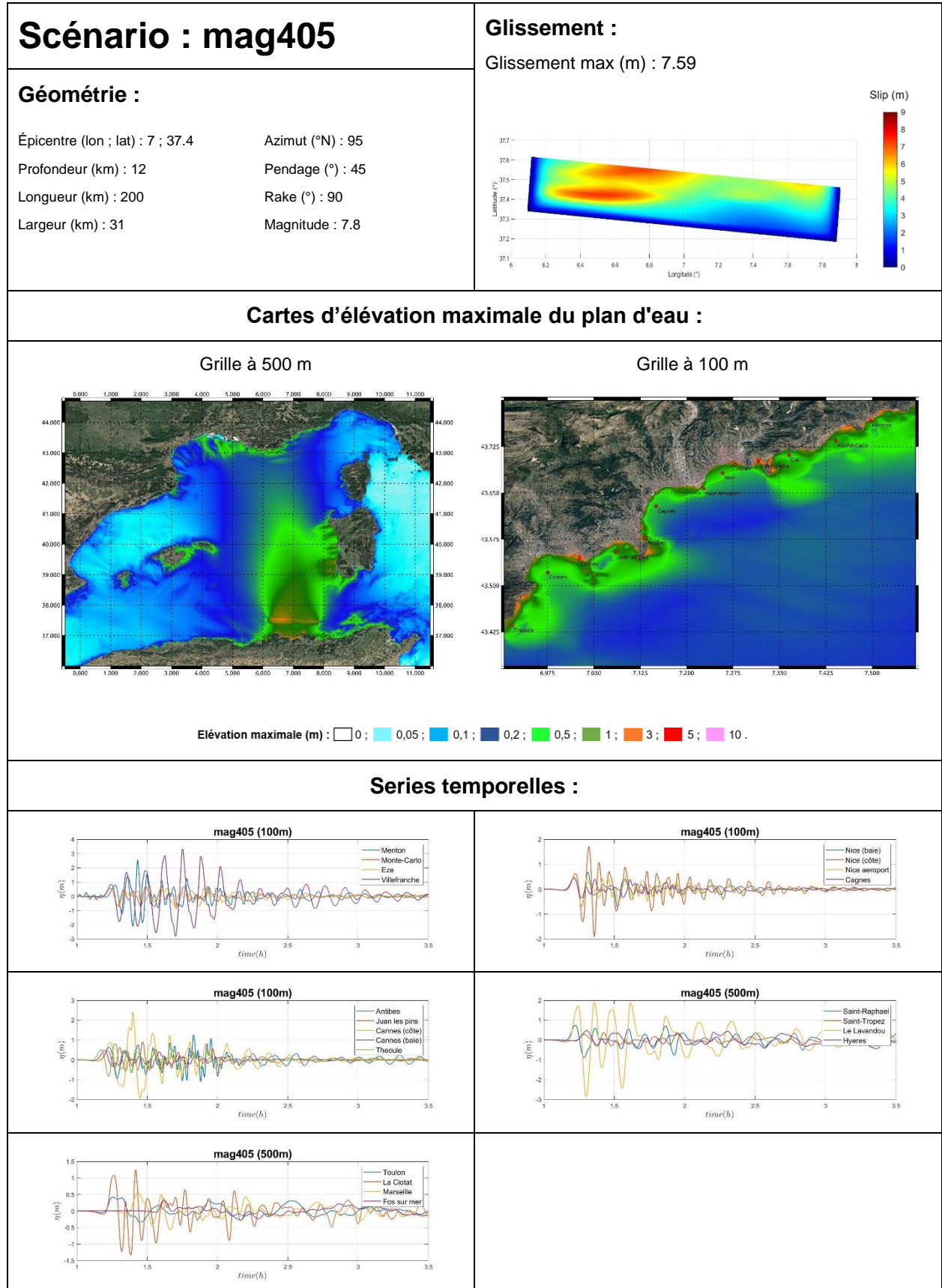
Grille à 100 m

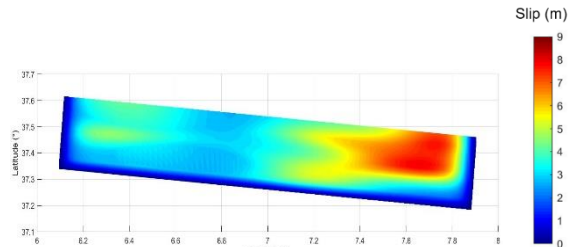


Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

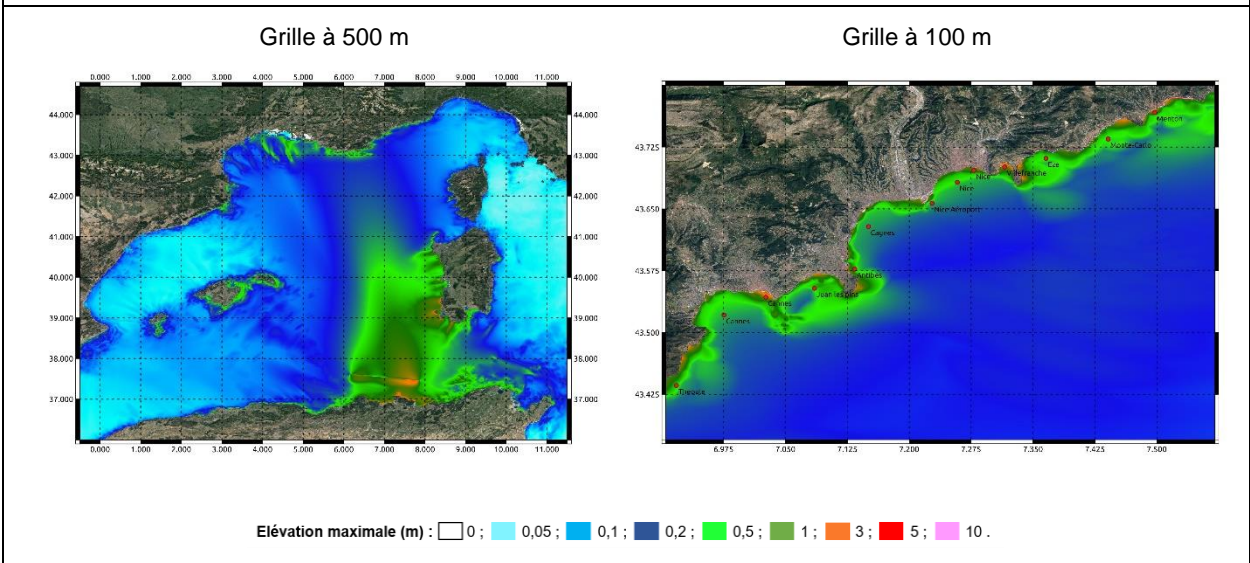
Séries temporelles :



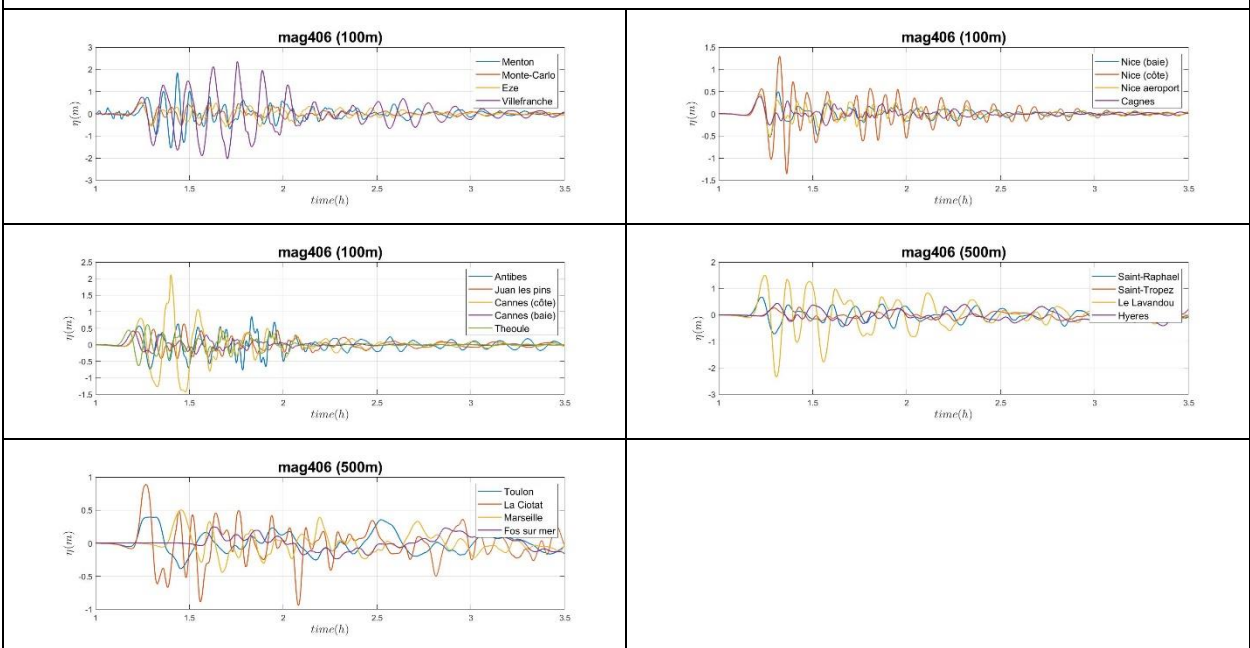


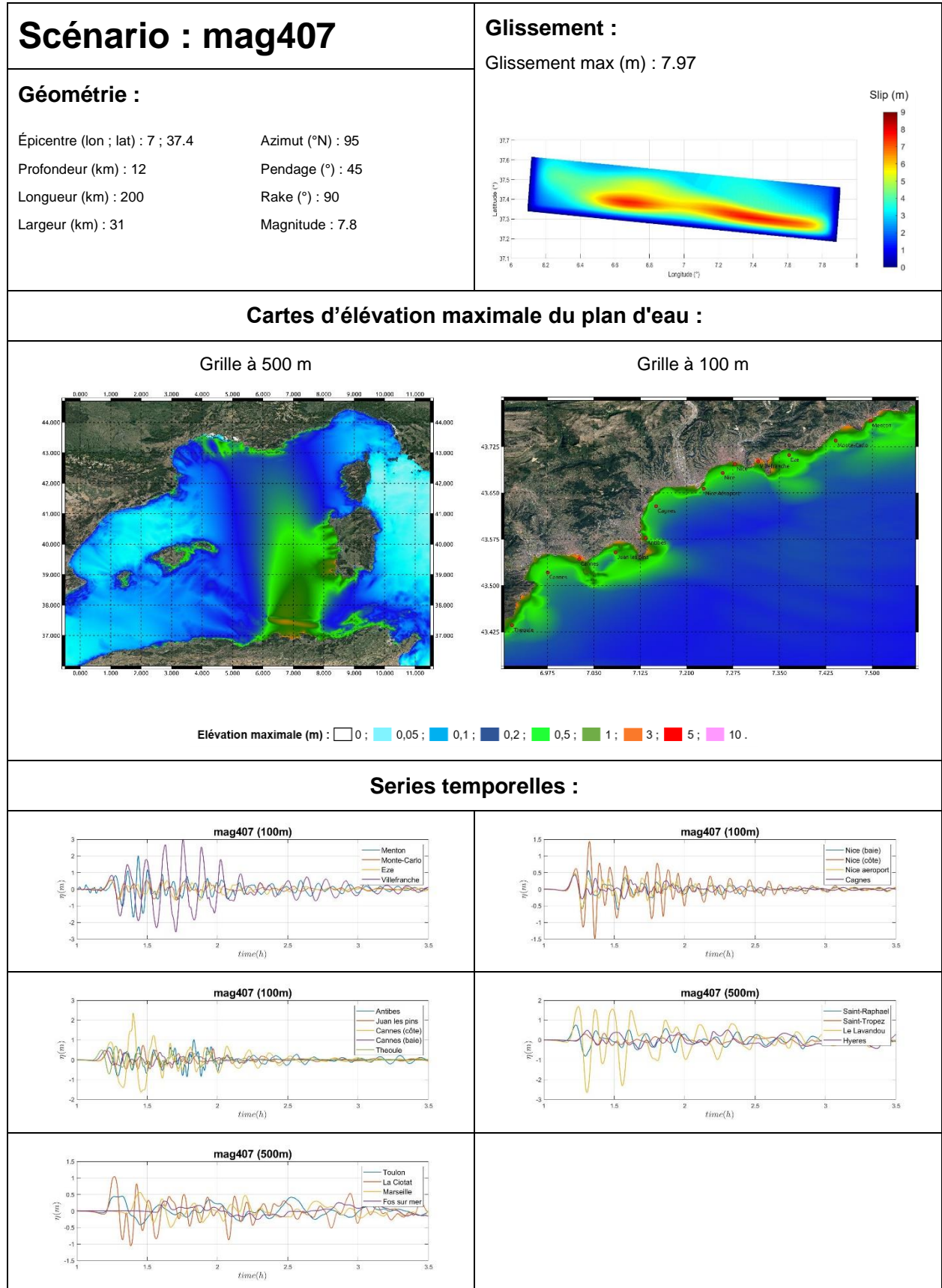
<h2 style="margin: 0;">Scénario : mag406</h2> <p>Géométrie :</p> <p>Épicentre (lon ; lat) : 7 ; 37.4 Azimut (°N) : 95 Profondeur (km) : 12 Pendage (°) : 45 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8</p>	<p>Glissement :</p> <p>Glissement max (m) : 8.07</p> 
---	--

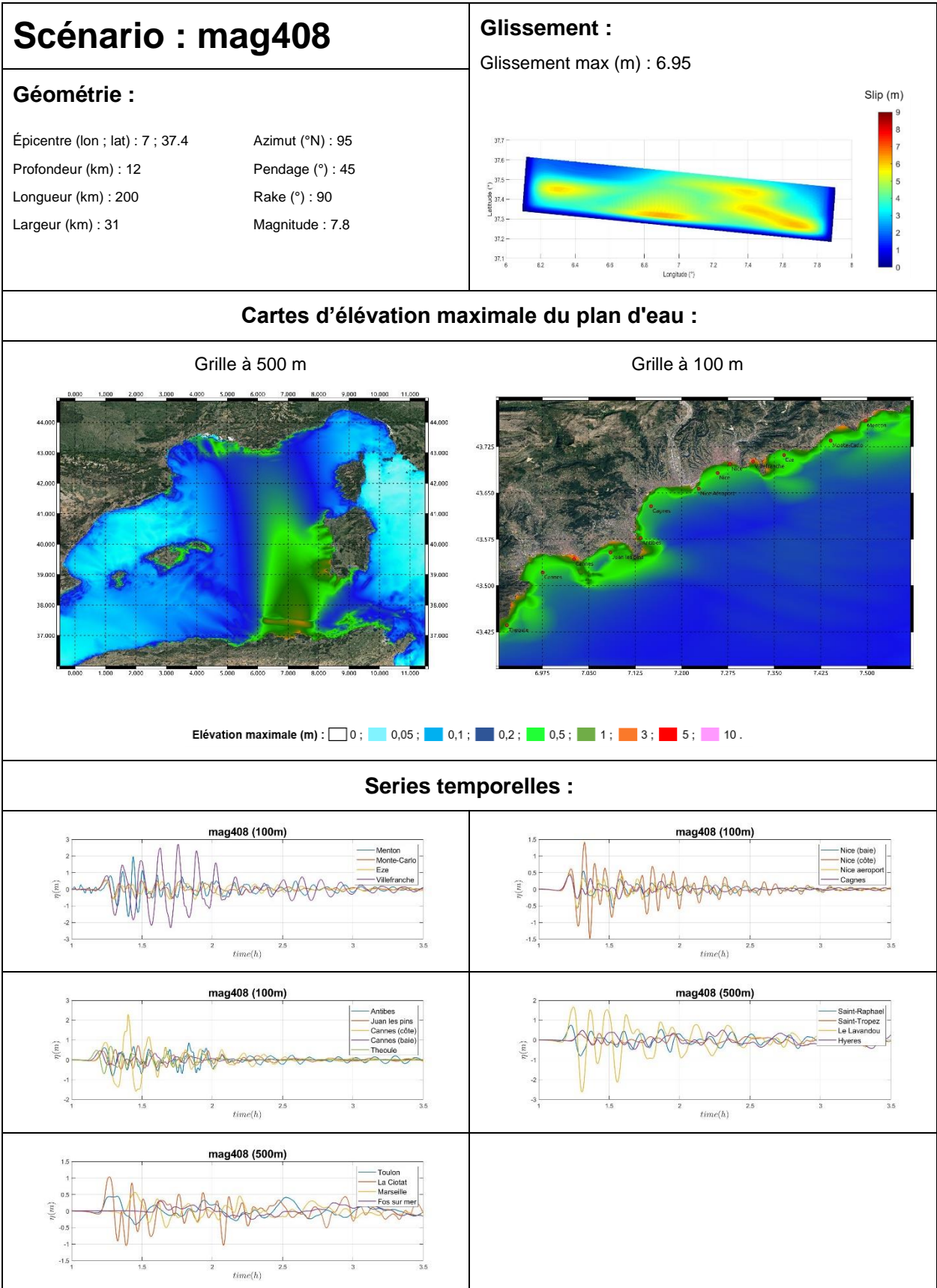
Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

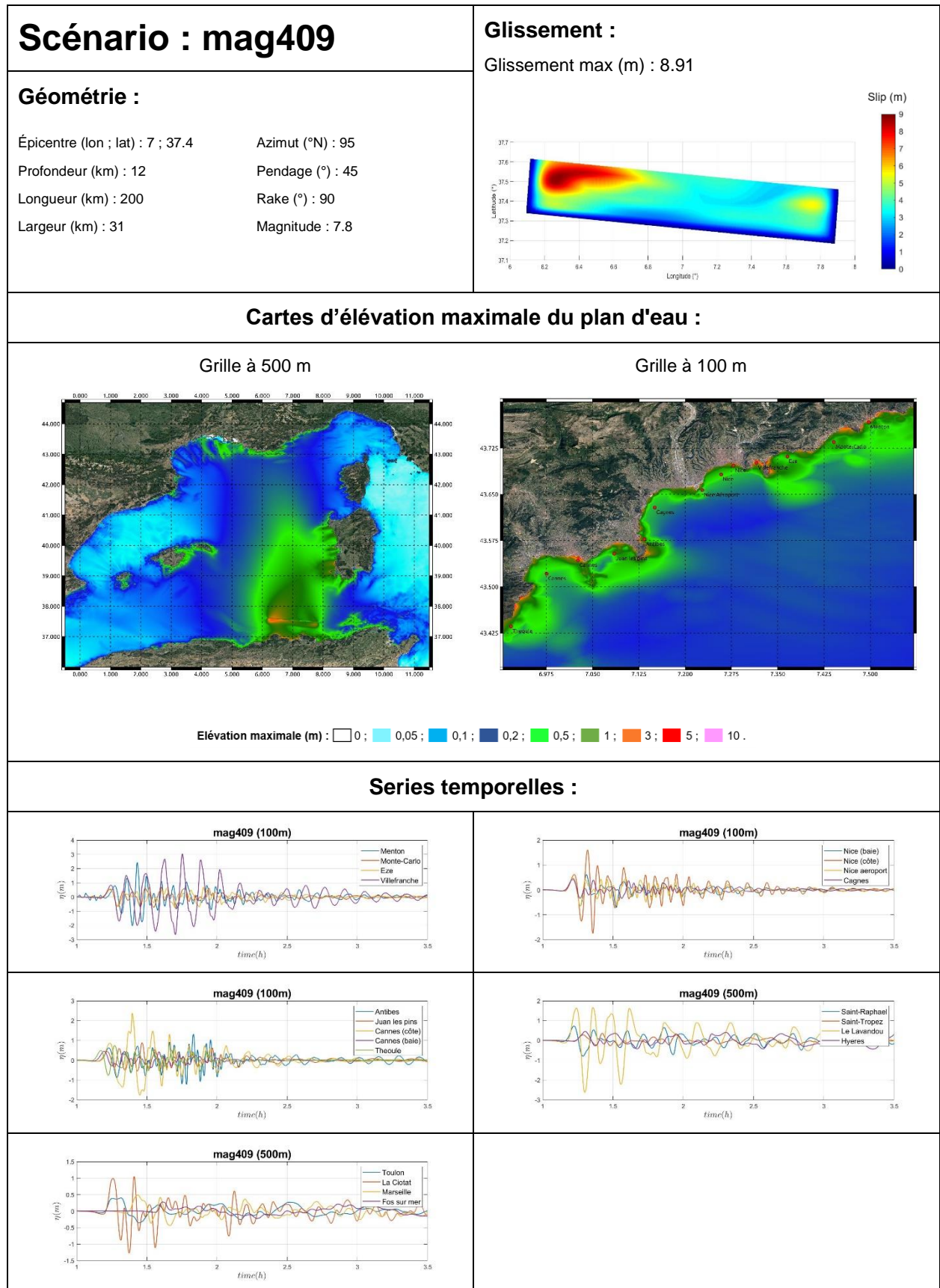


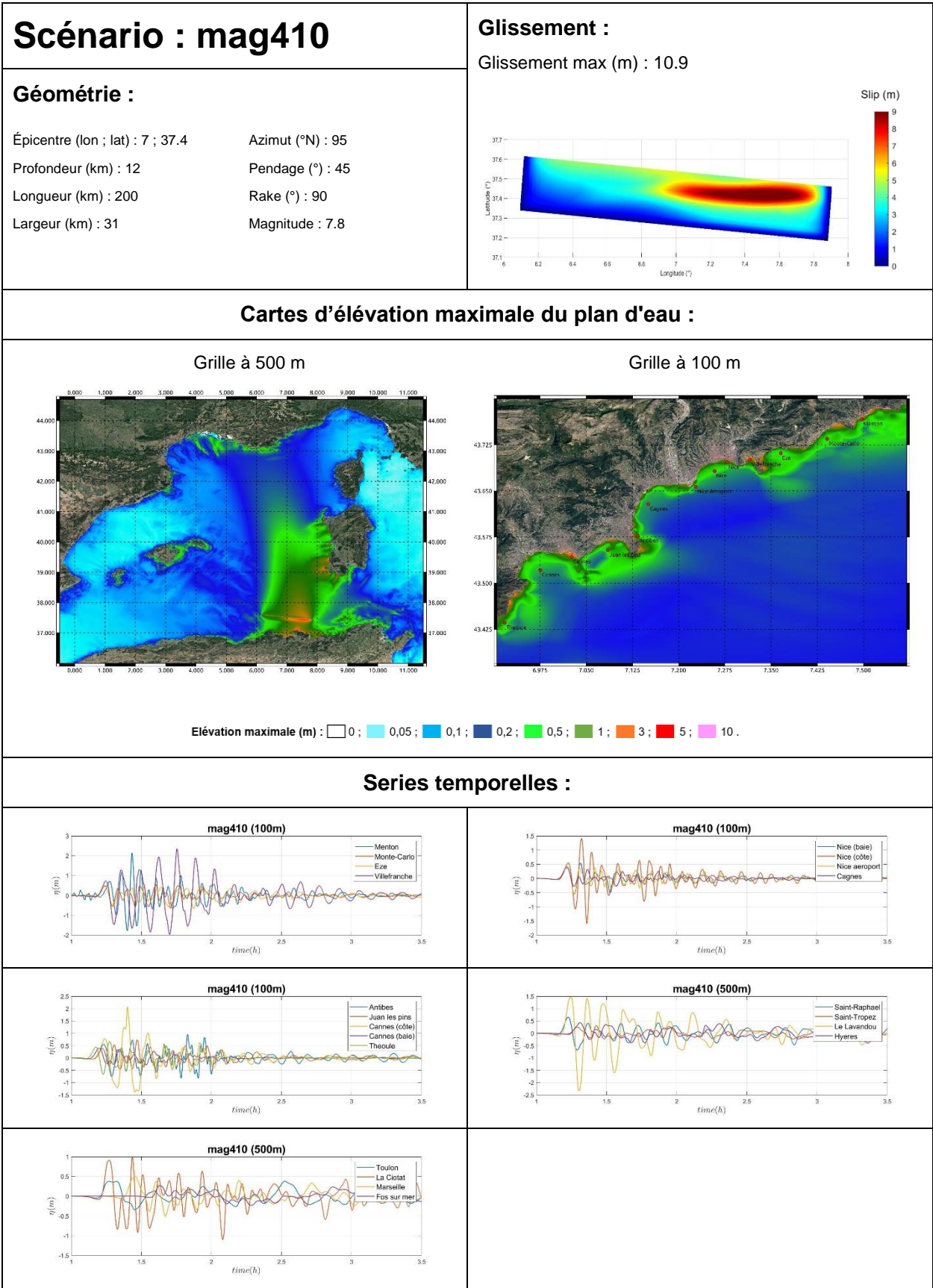
Séries temporelles :

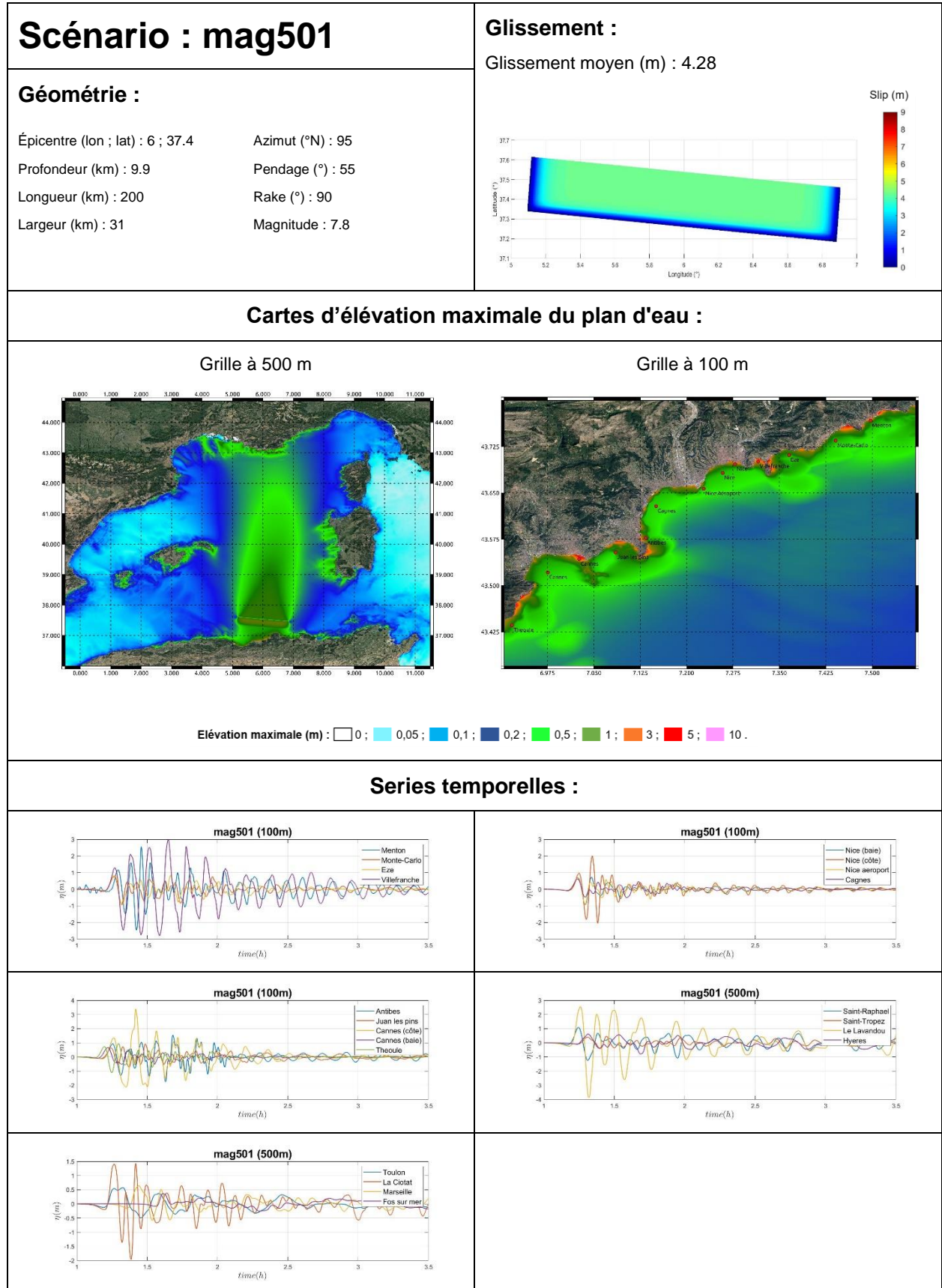












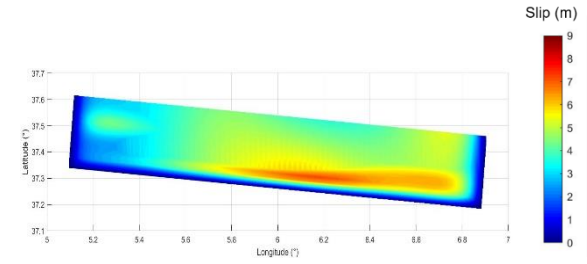
Scénario : mag502

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 6 ; 37.4 Azimut (°N) : 95
 Profondeur (km) : 9.9 Pendage (°) : 55
 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8

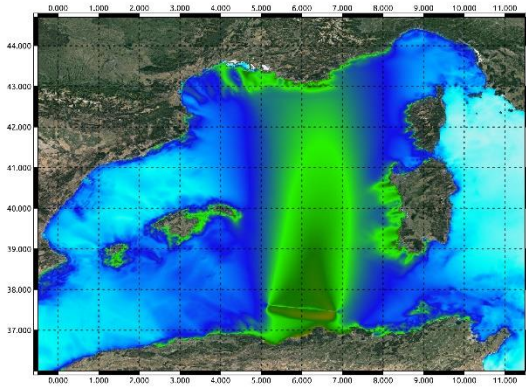
Glissement :

Glissement max (m) : 8.4

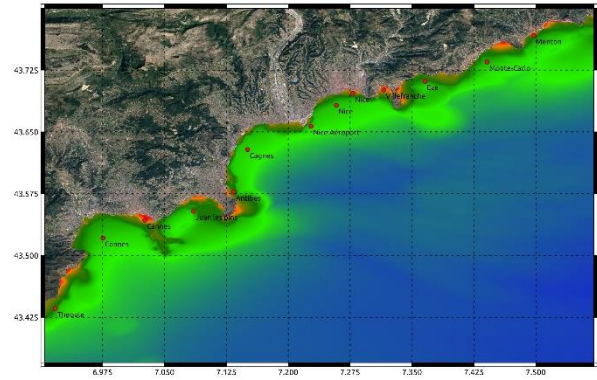


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 500 m

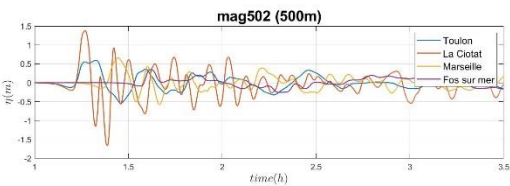
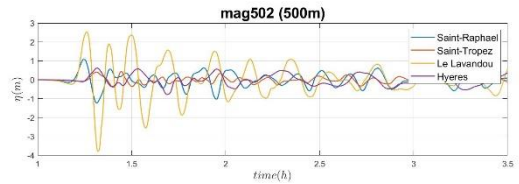
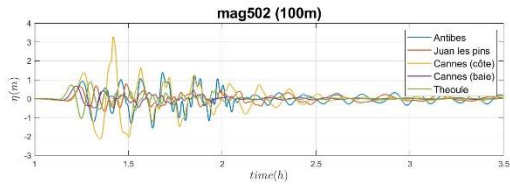
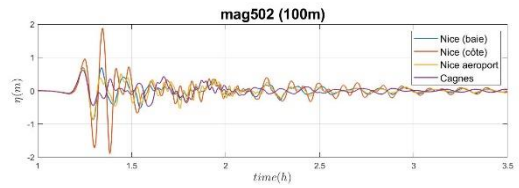
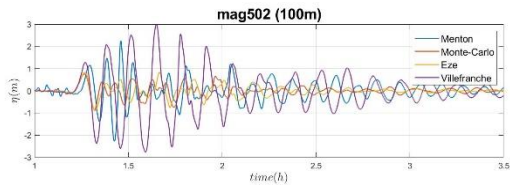


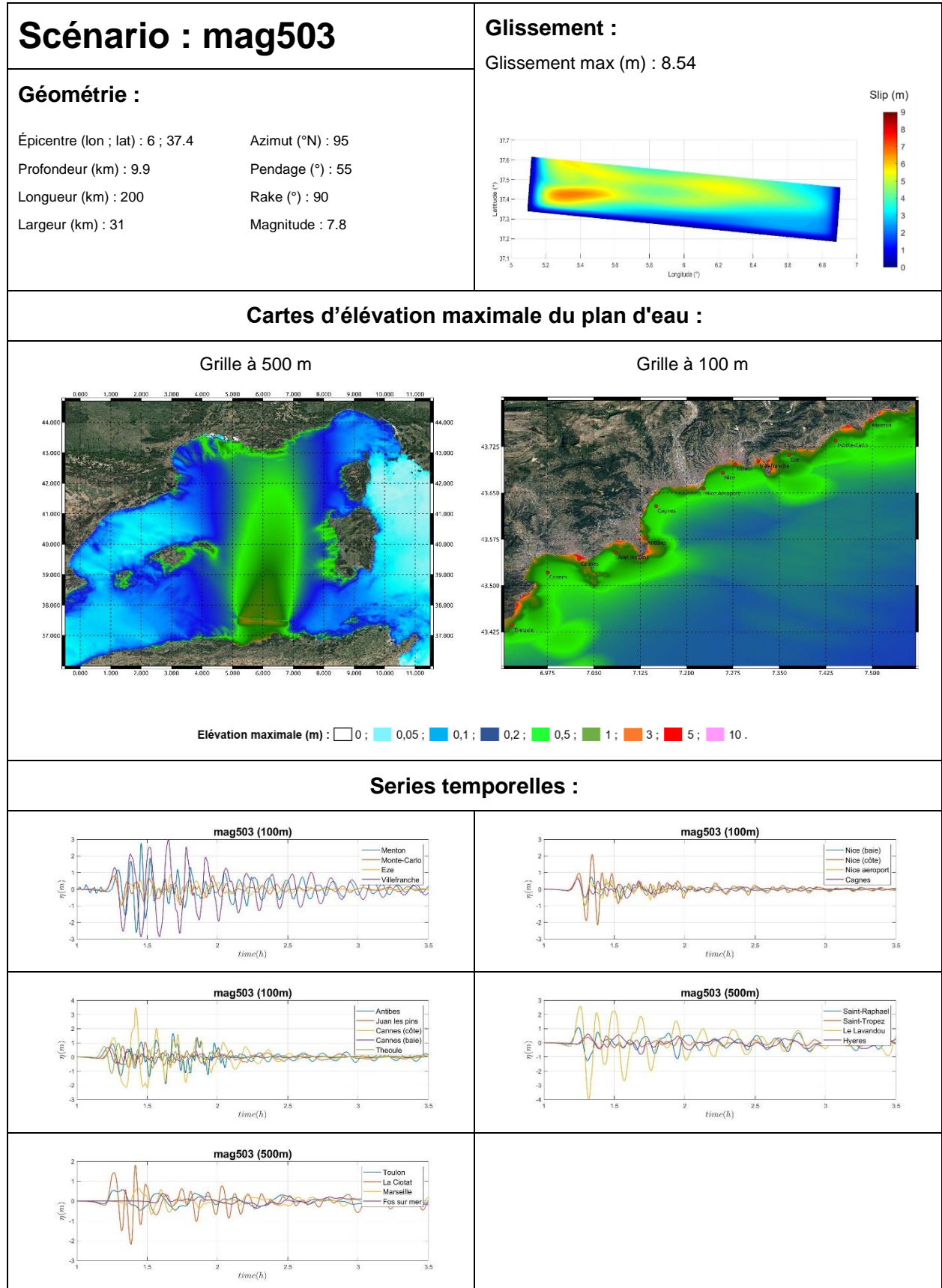
Grille à 100 m



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :





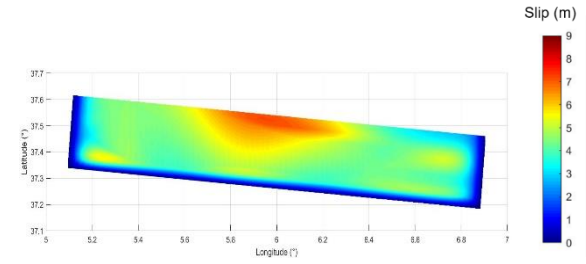
Scénario : mag504

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 6 ; 37.4 Azimut (°N) : 95
 Profondeur (km) : 9.9 Pendage (°) : 55
 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8

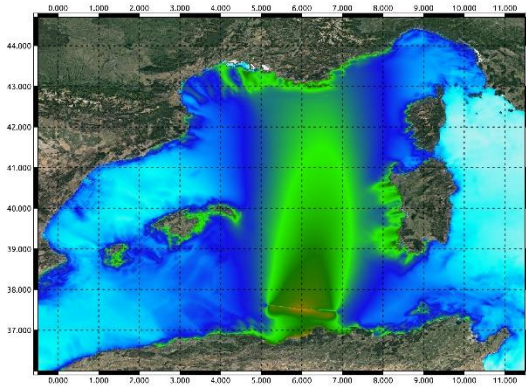
Glissement :

Glissement max (m) : 8.68

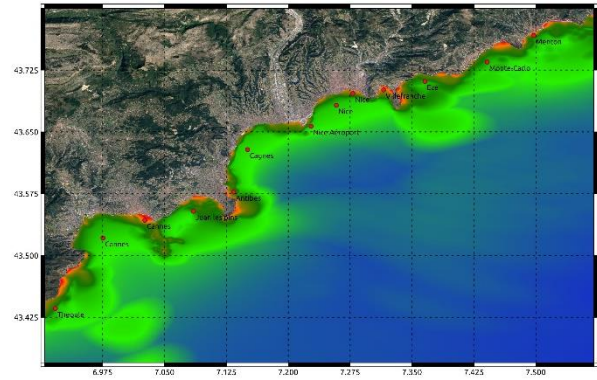


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 500 m

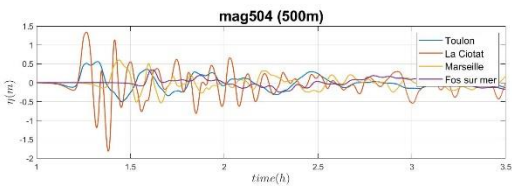
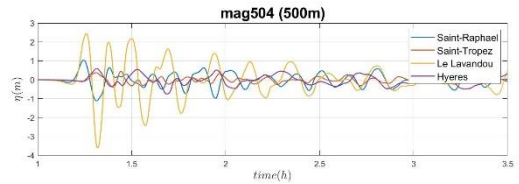
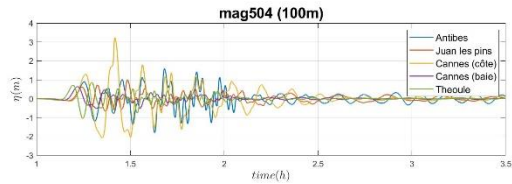
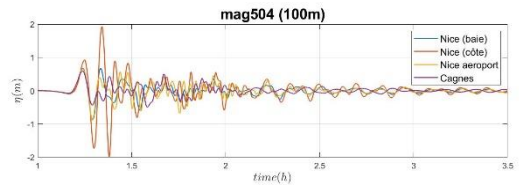
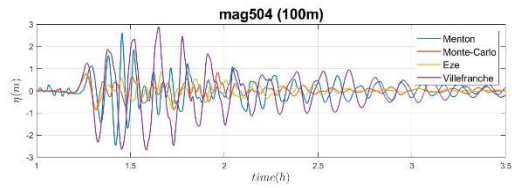


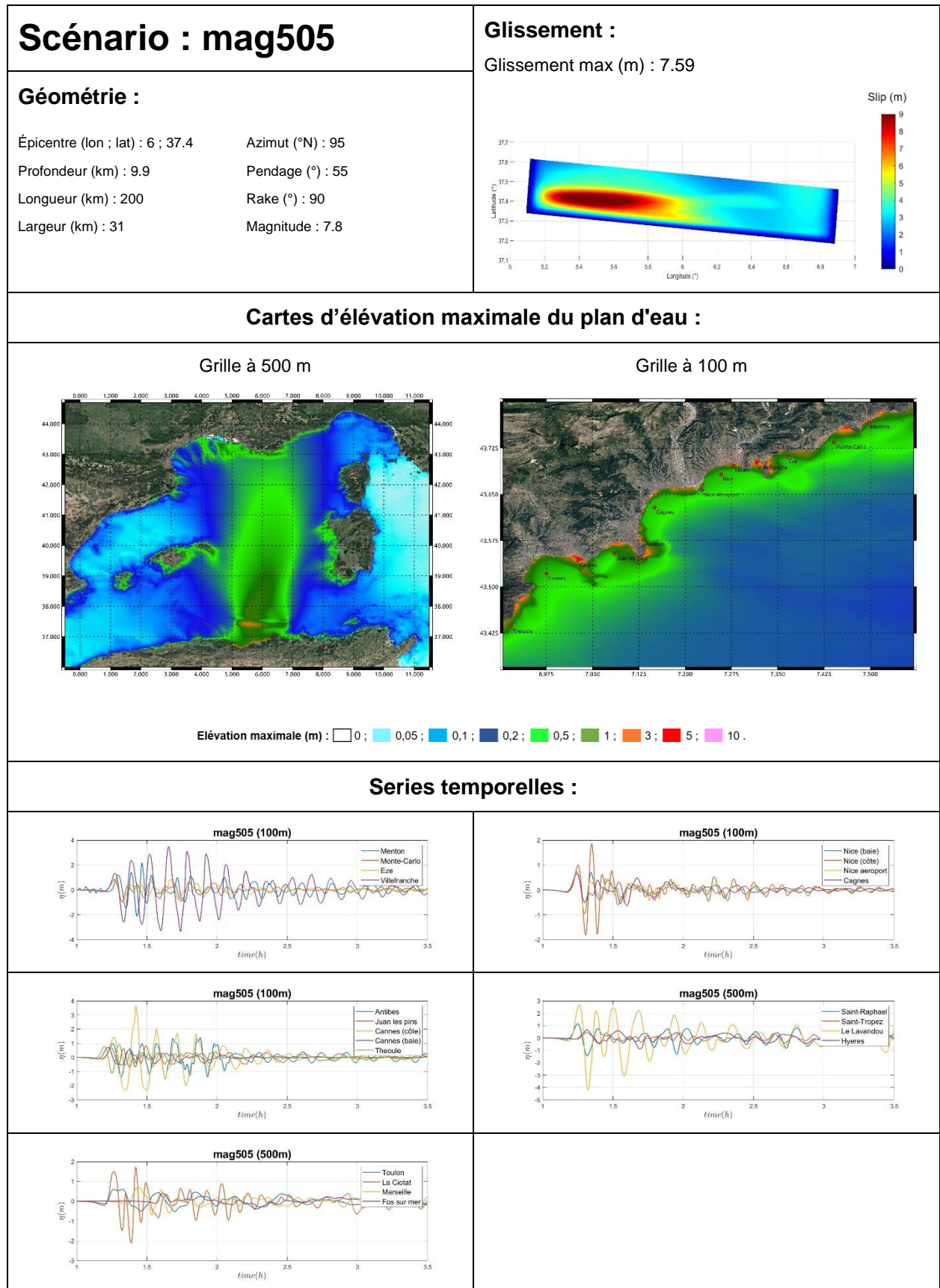
Grille à 100 m



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :





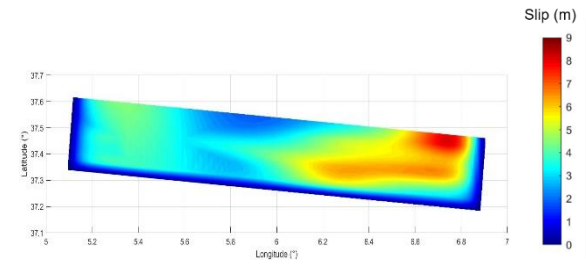
Scénario : mag506

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 6 ; 37.4 Azimut (°N) : 95
 Profondeur (km) : 9.9 Pendage (°) : 55
 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8

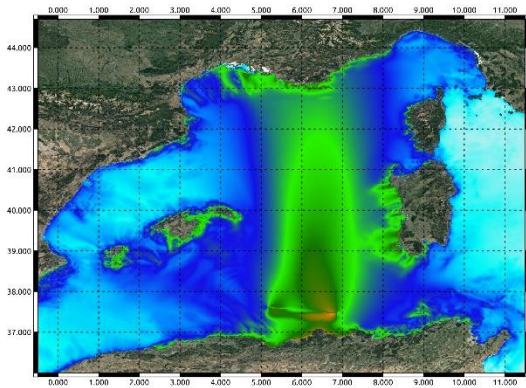
Glissement :

Glissement max (m) : 8.07

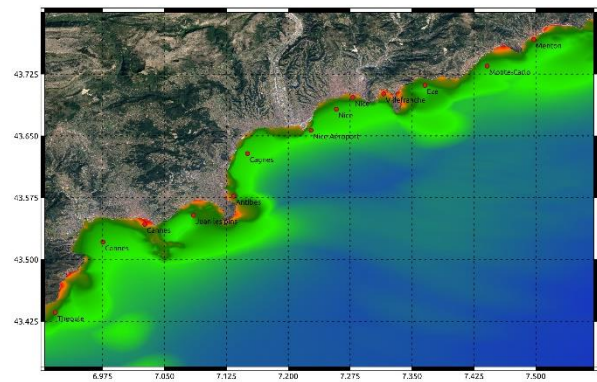


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 500 m

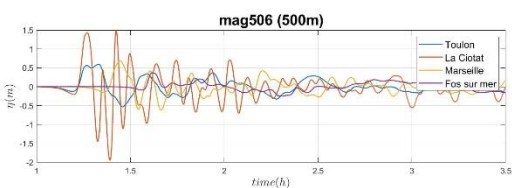
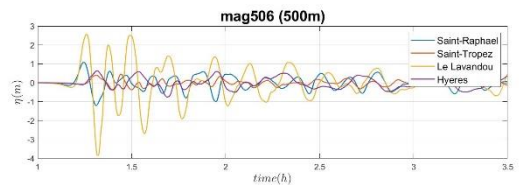
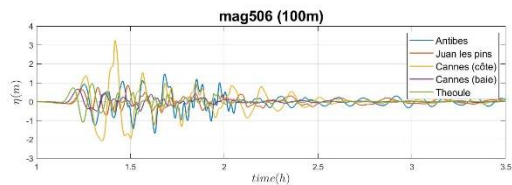
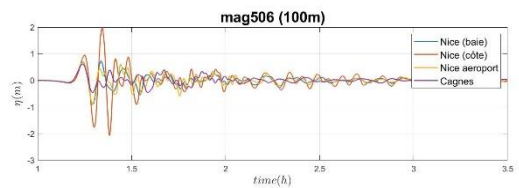
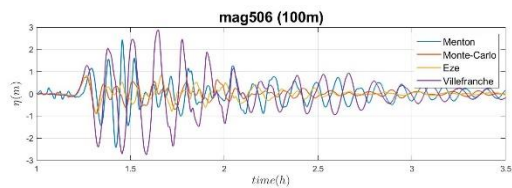


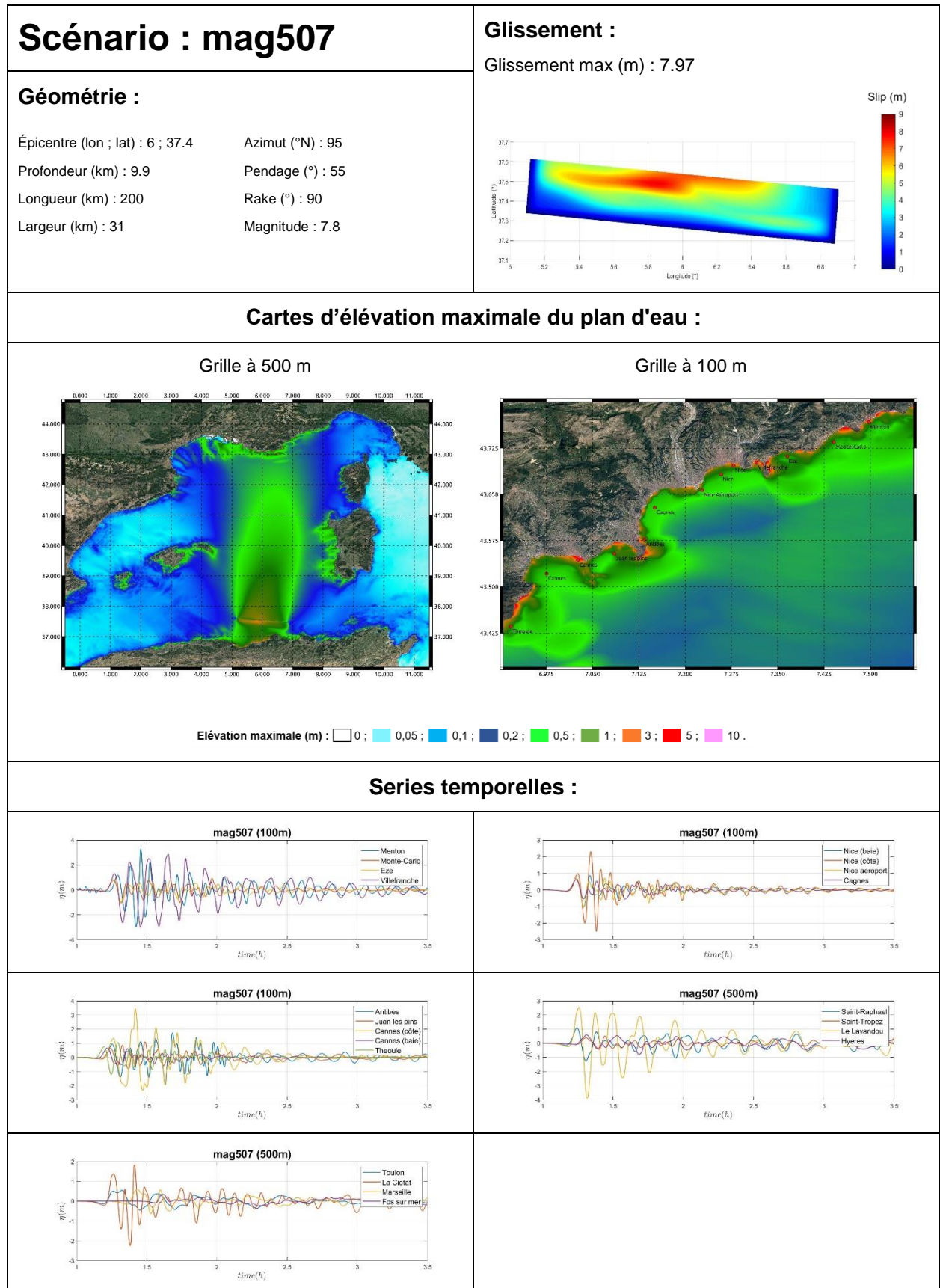
Grille à 100 m



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :





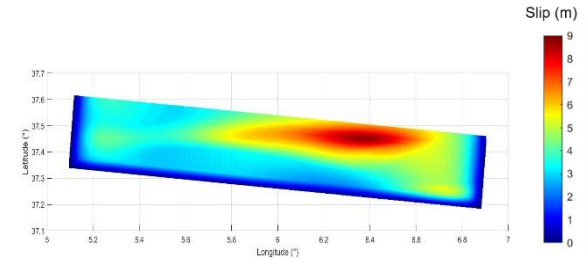
Scénario : mag508

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 6 ; 37.4 Azimut (°N) : 95
 Profondeur (km) : 9.9 Pendage (°) : 55
 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8

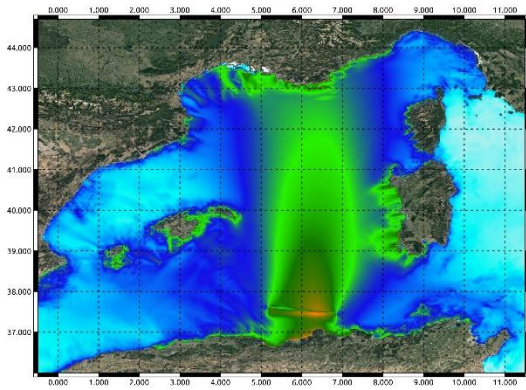
Glissement :

Glissement max (m) : 6.95

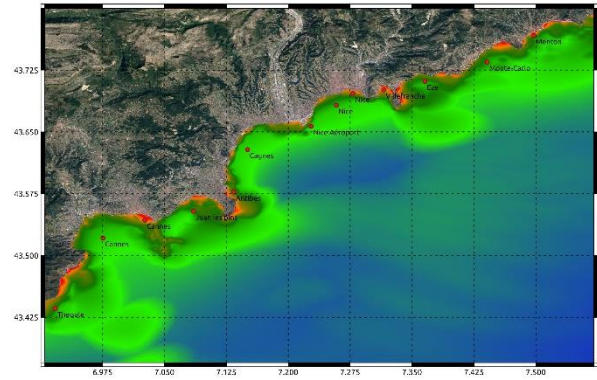


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 500 m

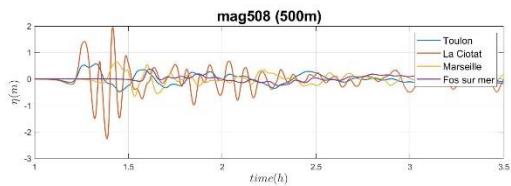
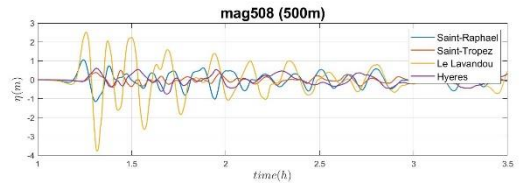
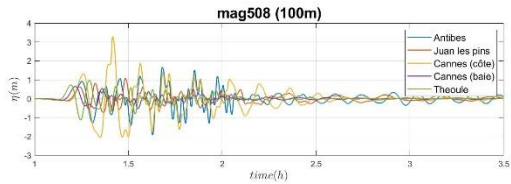
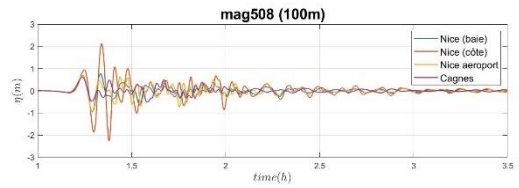
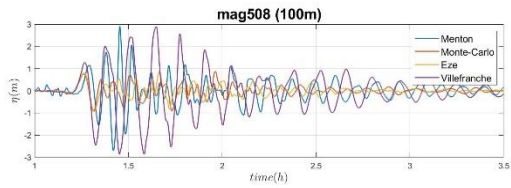


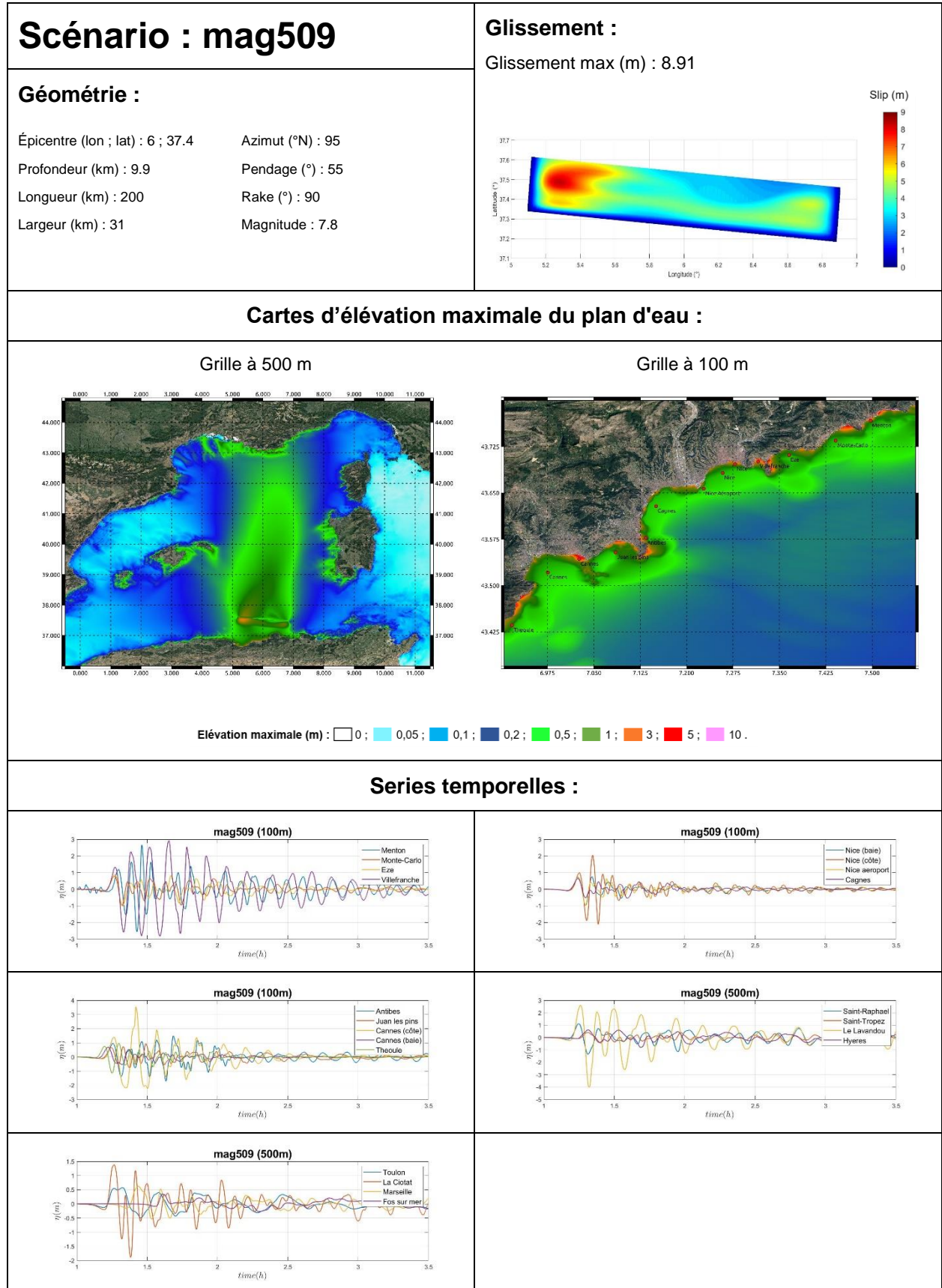
Grille à 100 m



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :





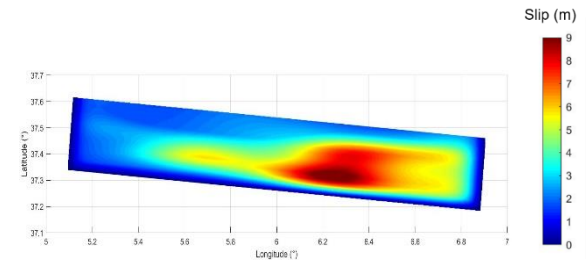
Scénario : mag510

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 6 ; 37.4 Azimut (°N) : 95
 Profondeur (km) : 9.9 Pendage (°) : 55
 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8

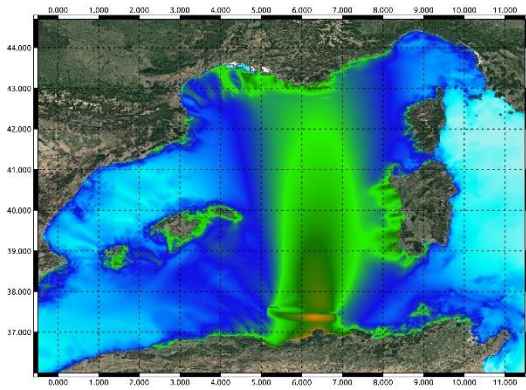
Glissement :

Glissement max (m) : 10.9

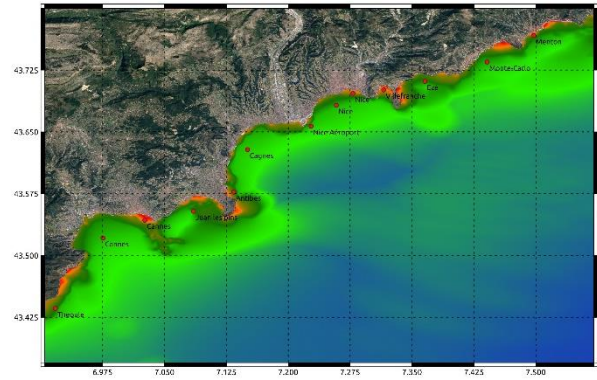


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 500 m

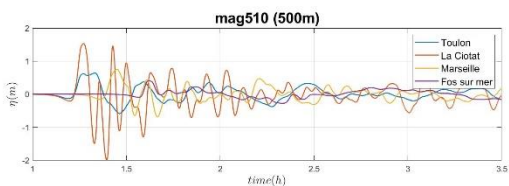
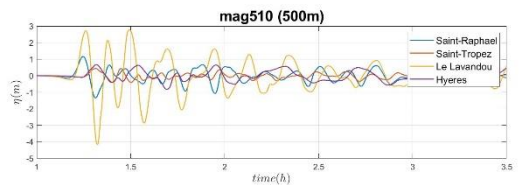
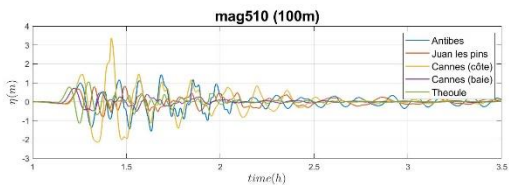
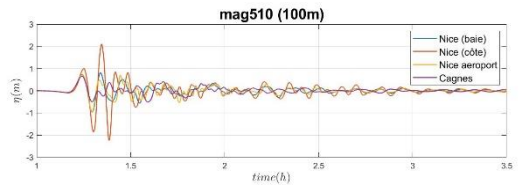
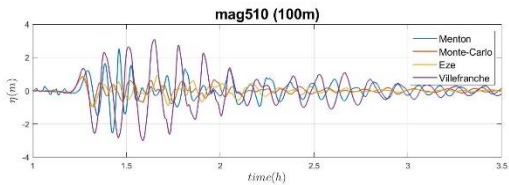


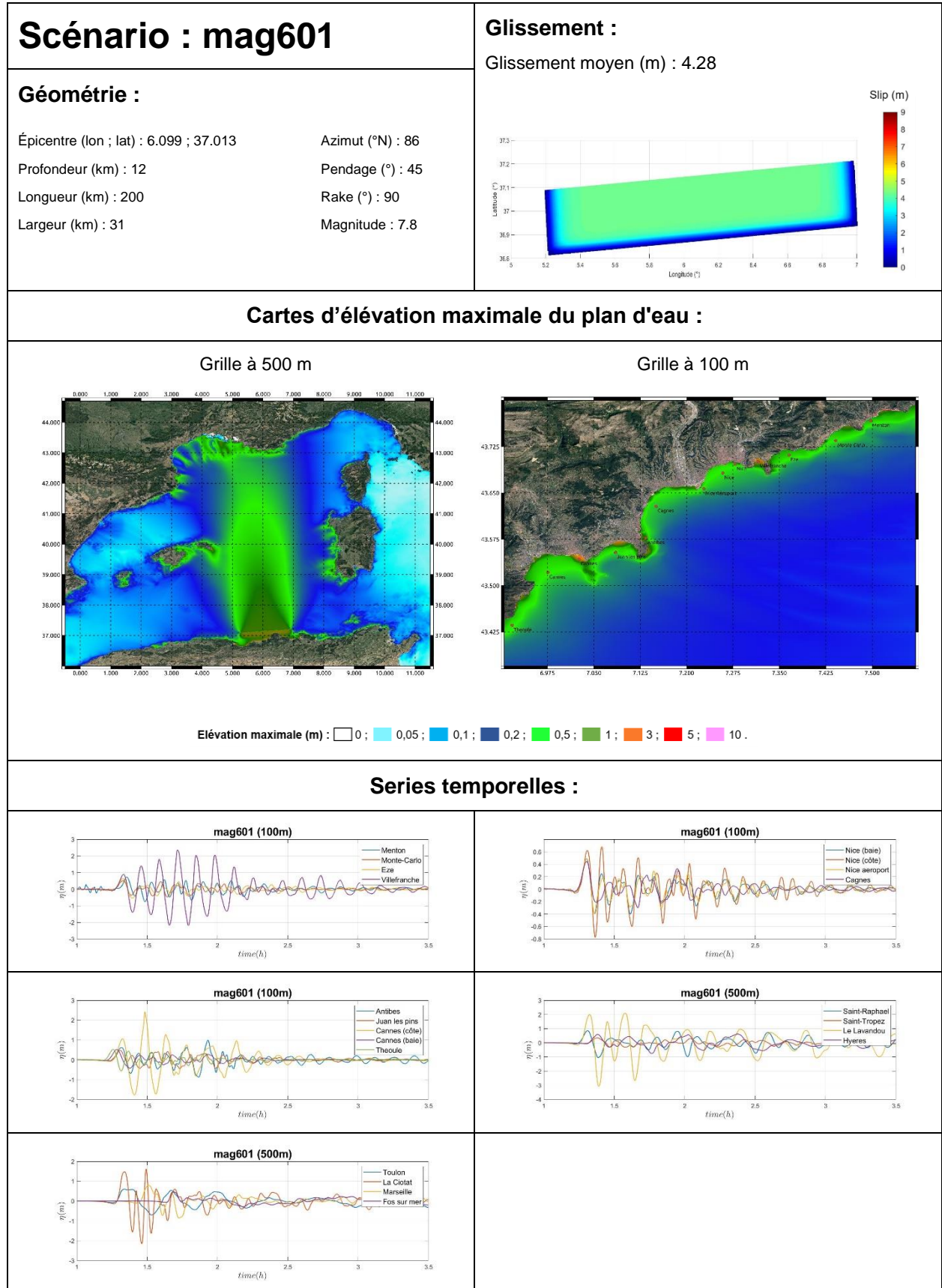
Grille à 100 m

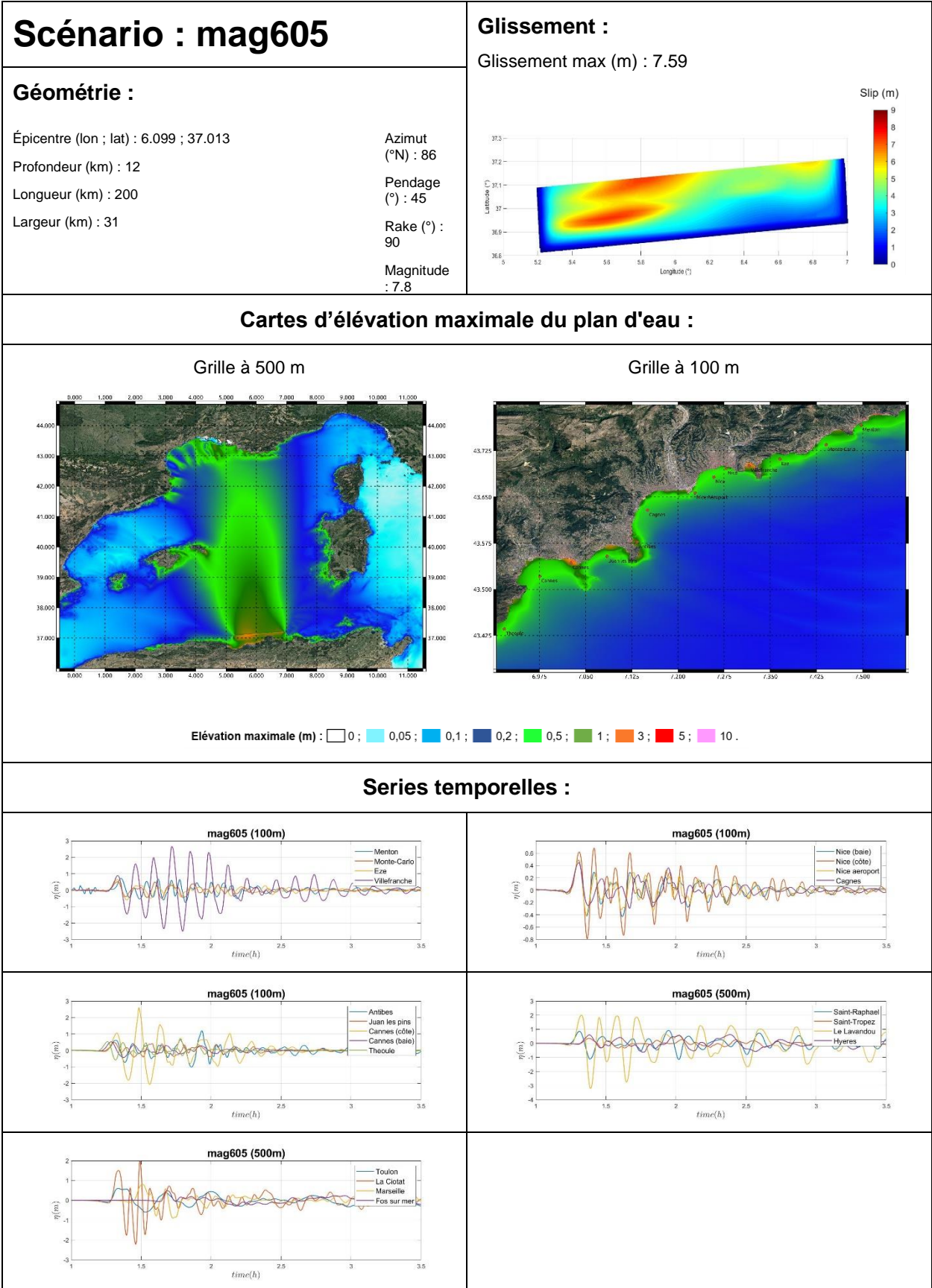


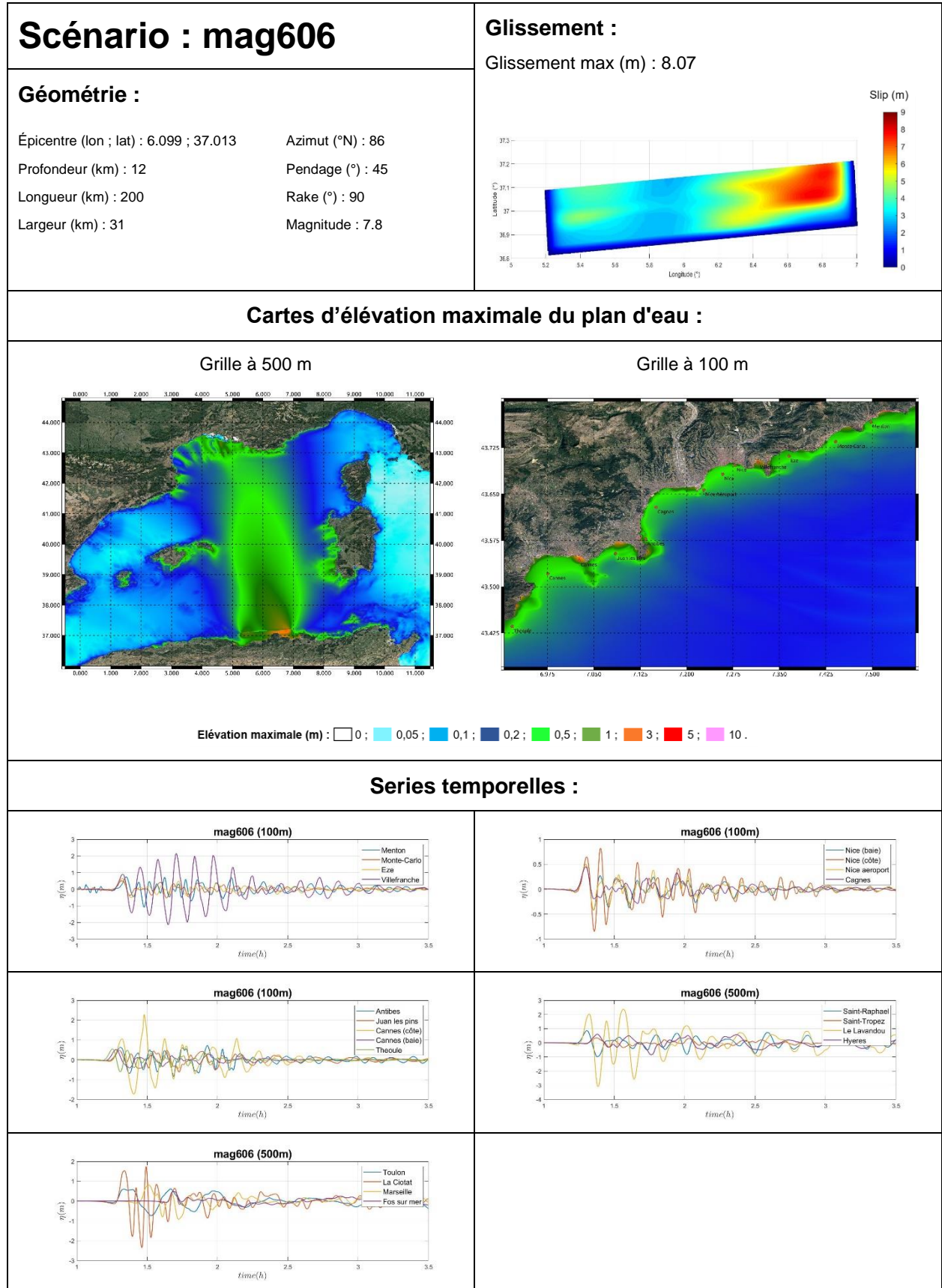
Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

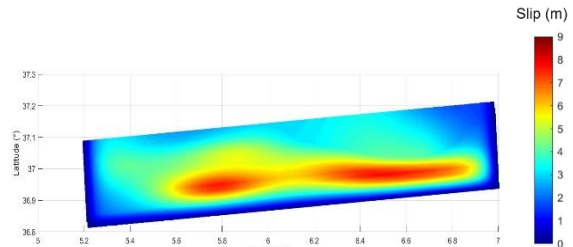
Séries temporelles :



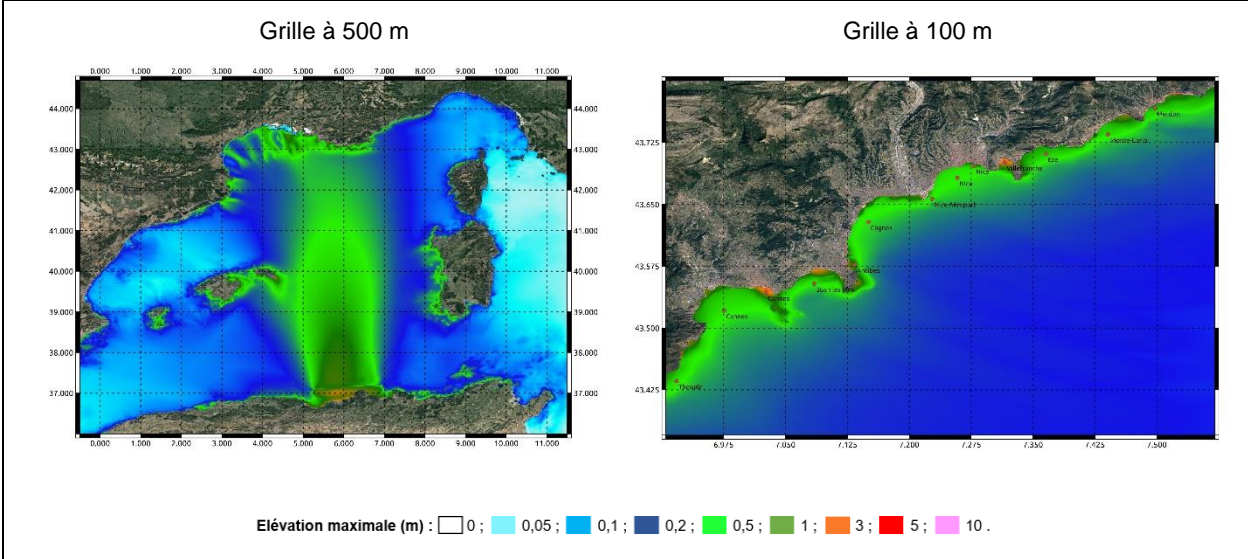




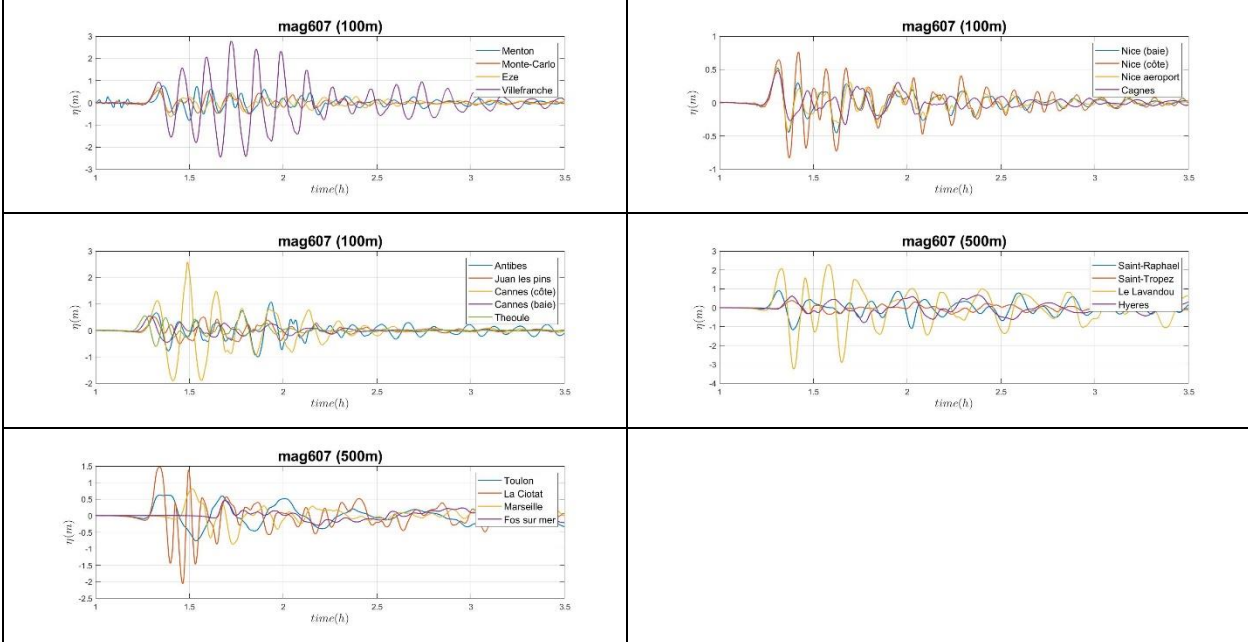


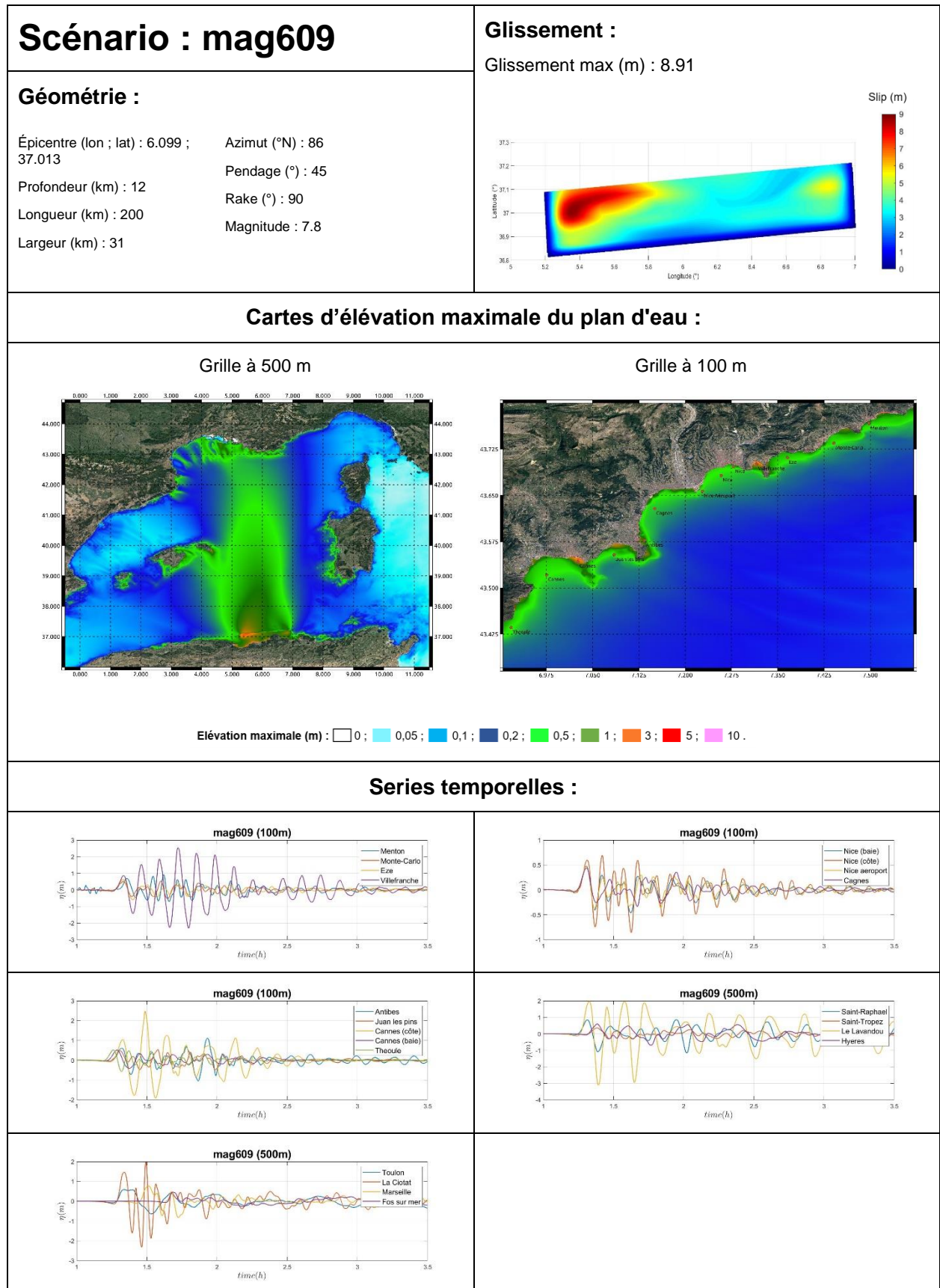
<h2 style="margin: 0;">Scénario : mag607</h2> <p>Géométrie :</p> <p>Épicentre (lon ; lat) : 6.099 ; 37.013 Azimut (°N) : 86 Profondeur (km) : 12 Pendage (°) : 45 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8</p>	<p>Glissement :</p> <p>Glissement max (m) : 7.97</p> 
---	--

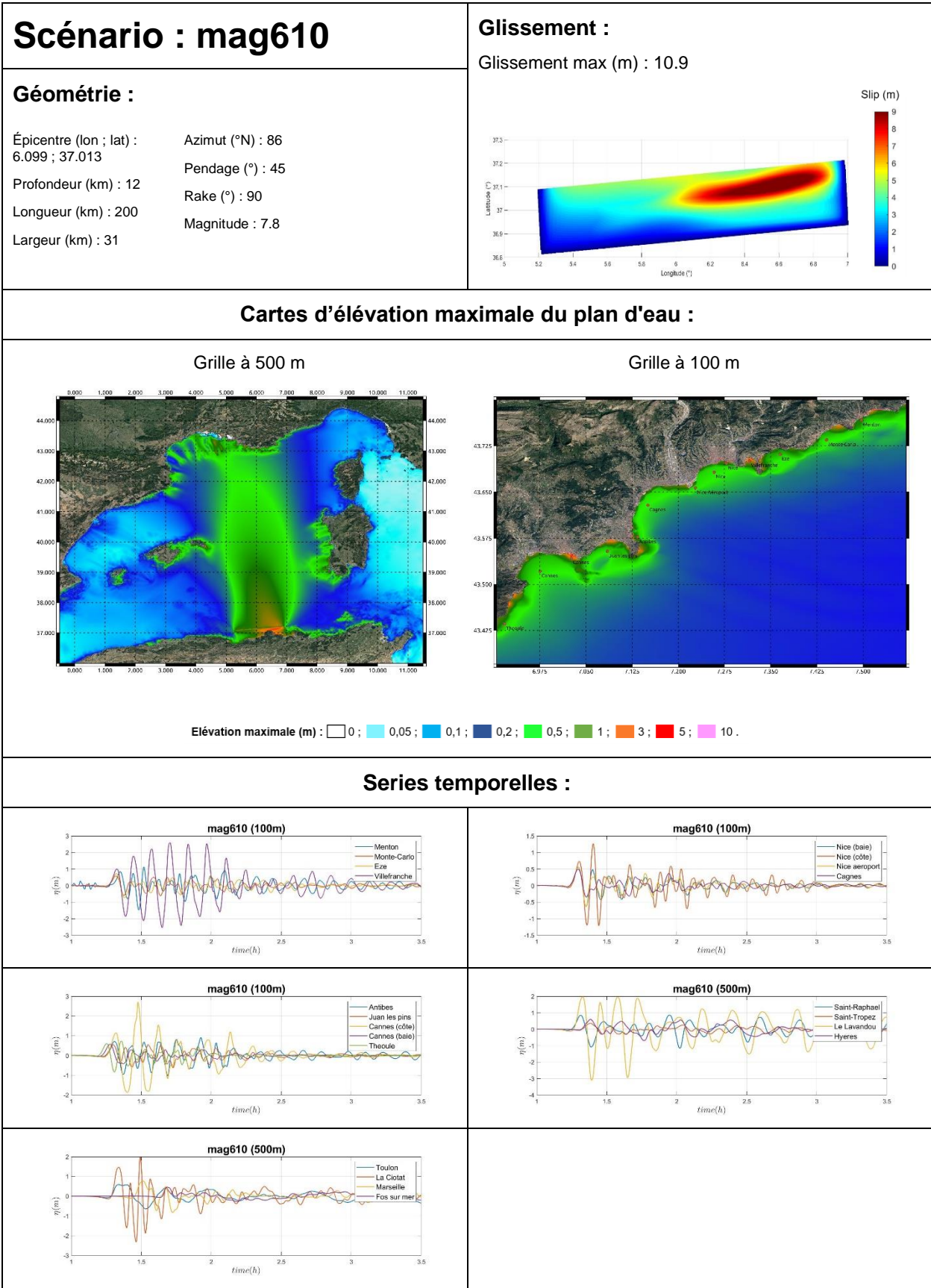
Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

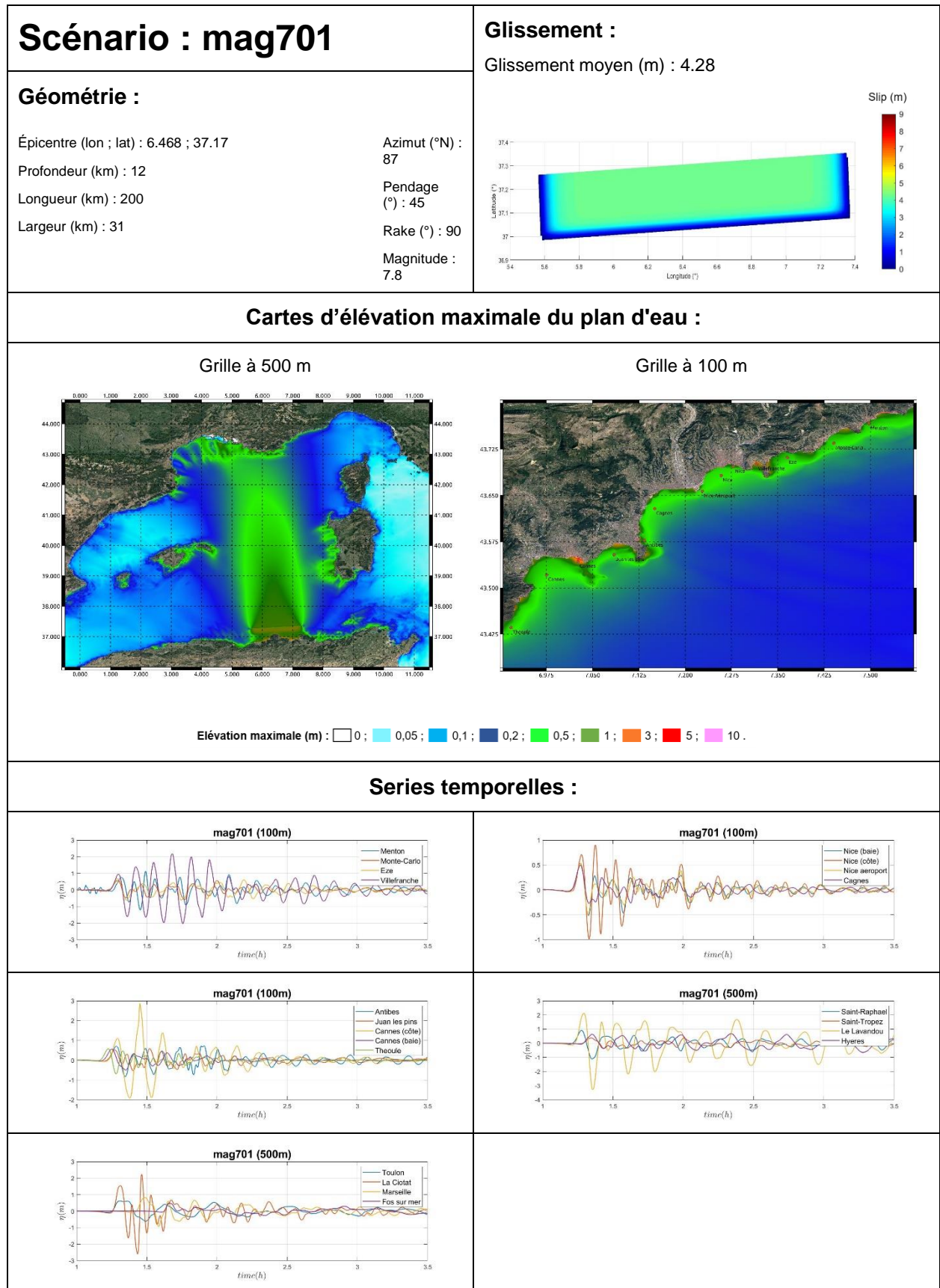


Séries temporelles :









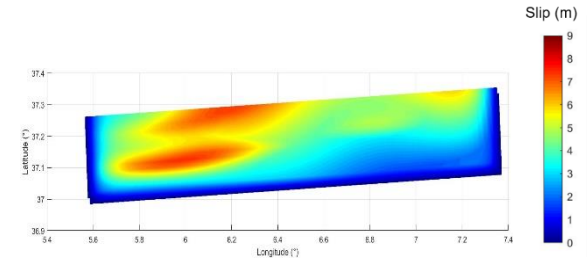
Scénario : mag705

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 6.468 ; 37.17 Azimut (°N) : 87
 Profondeur (km) : 12 Pendage (°) : 45
 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8

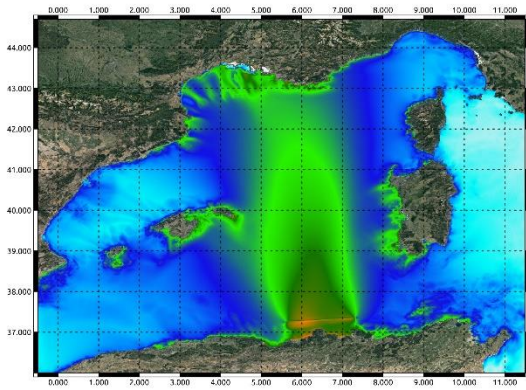
Glissement :

Glissement max (m) : 7.59

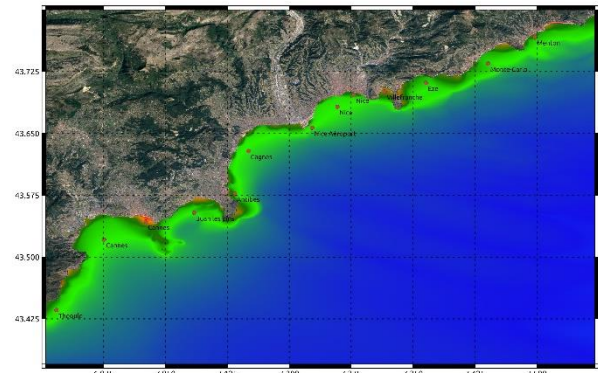


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 500 m

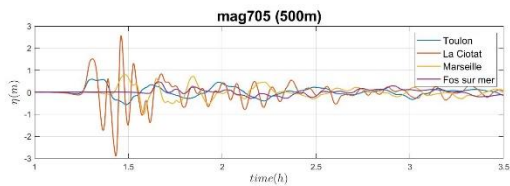
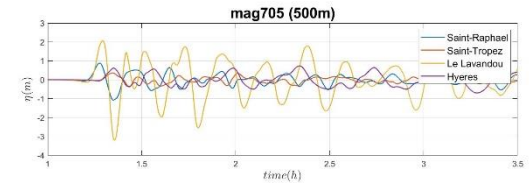
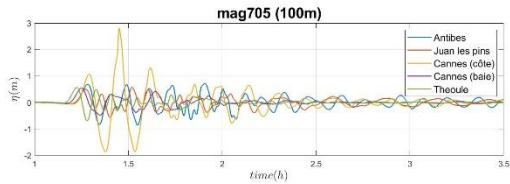
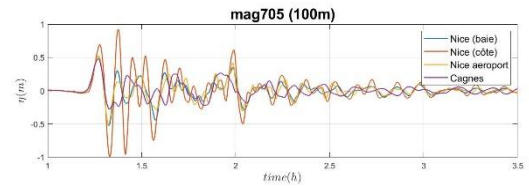
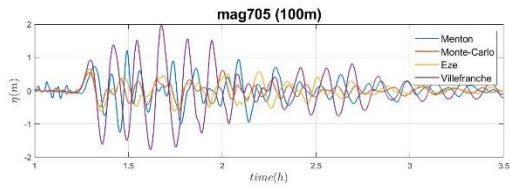


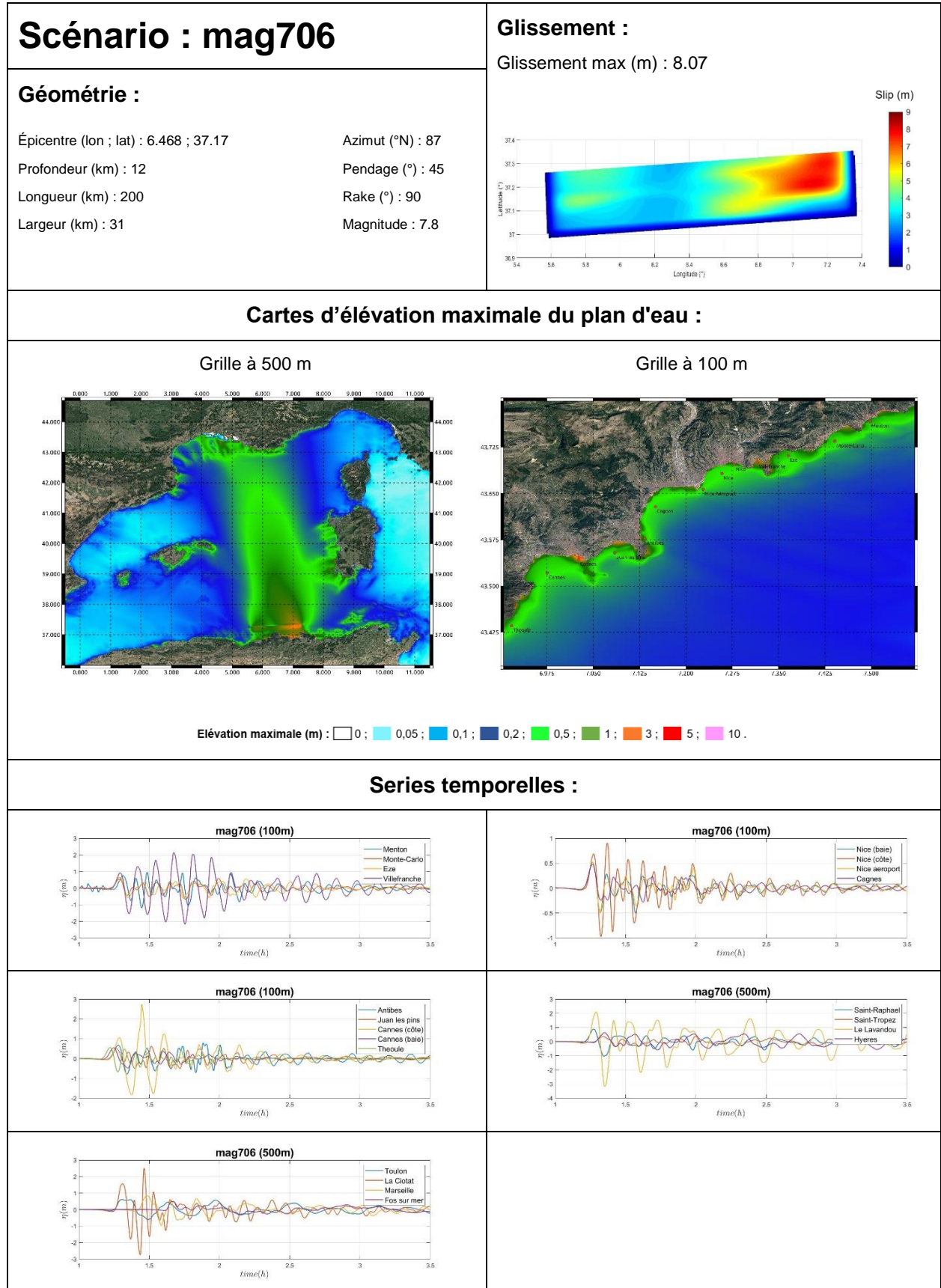
Grille à 100 m

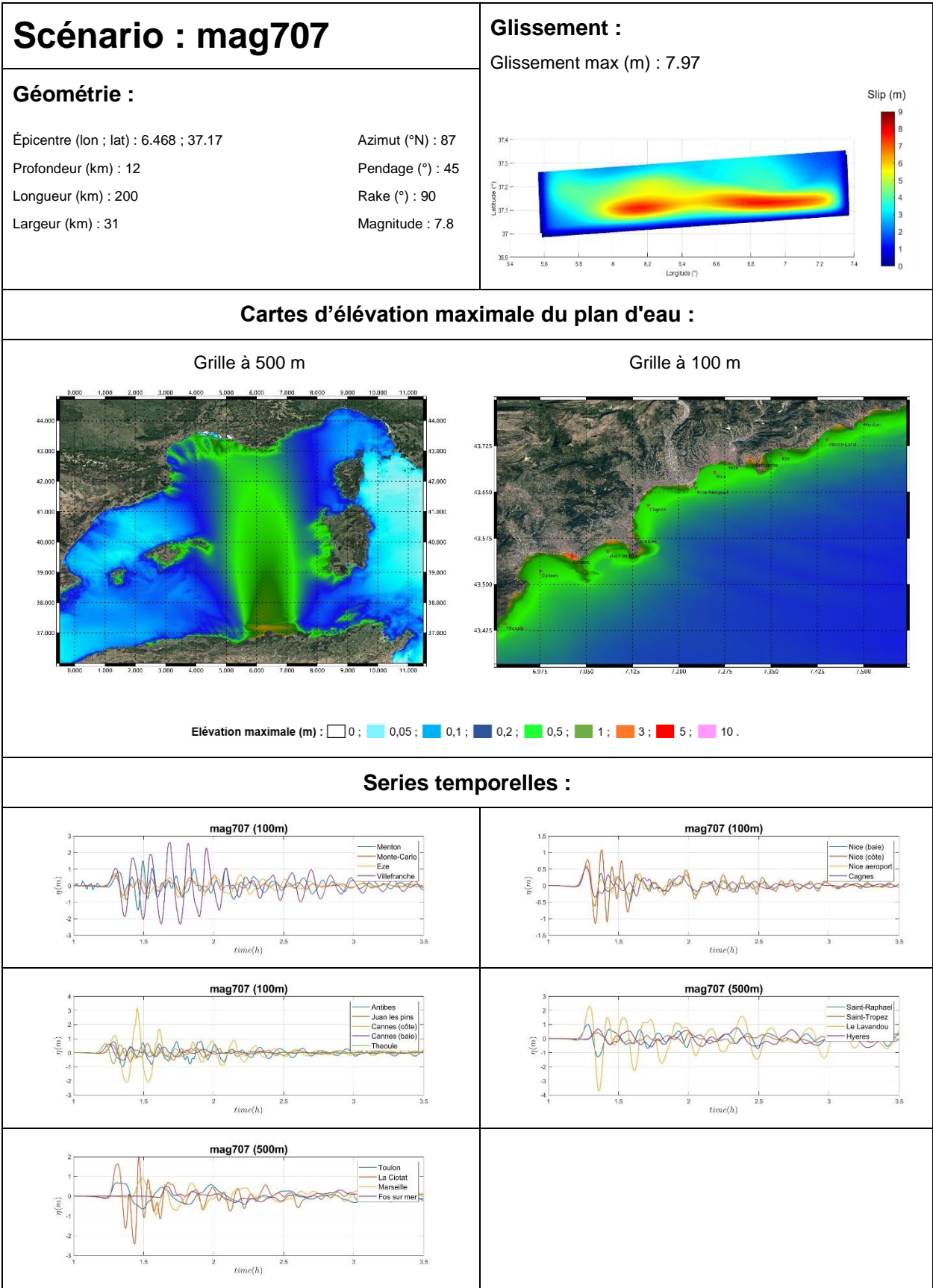


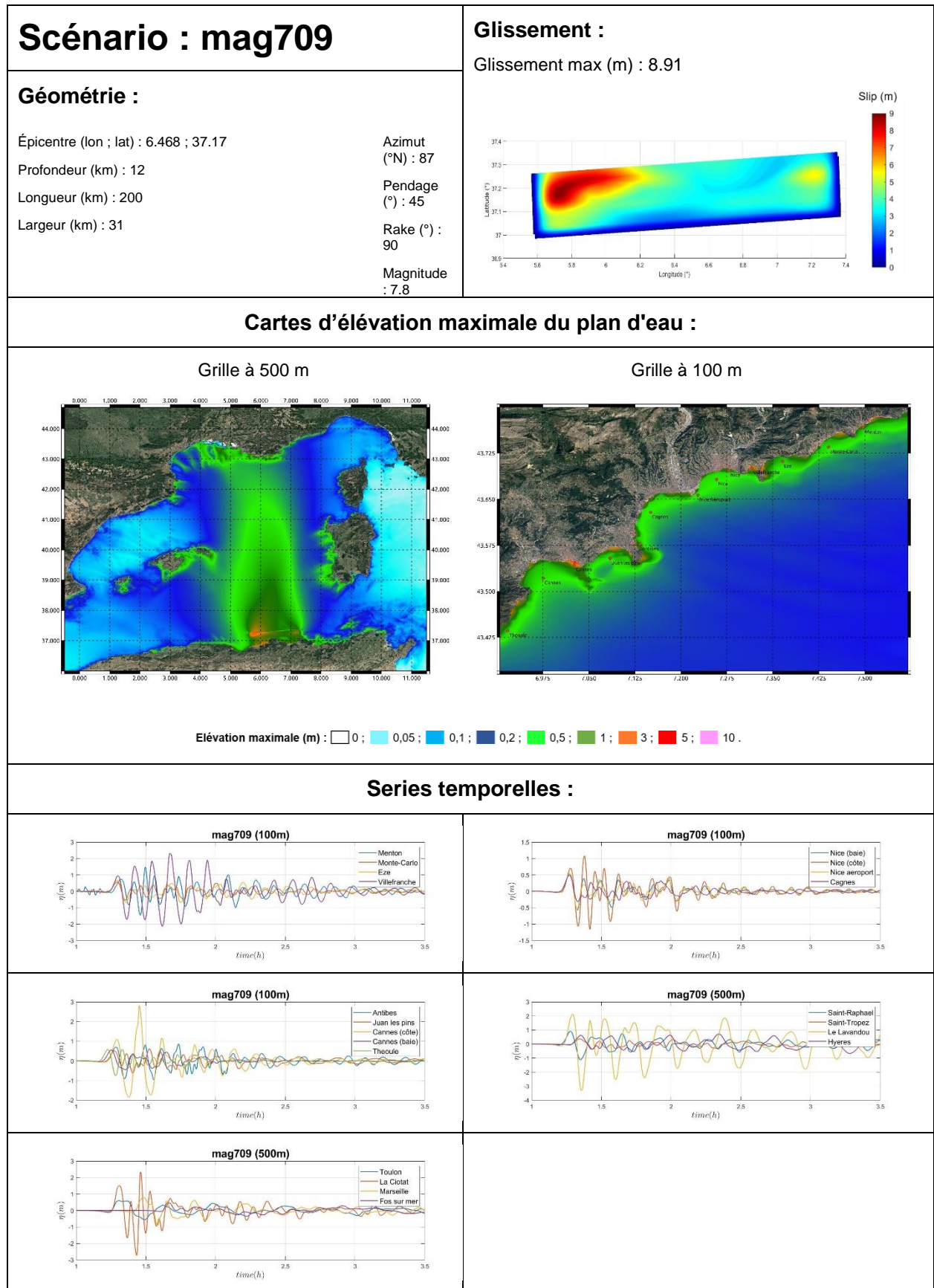
Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

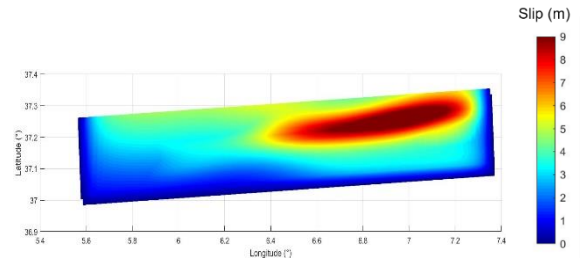
Séries temporelles :



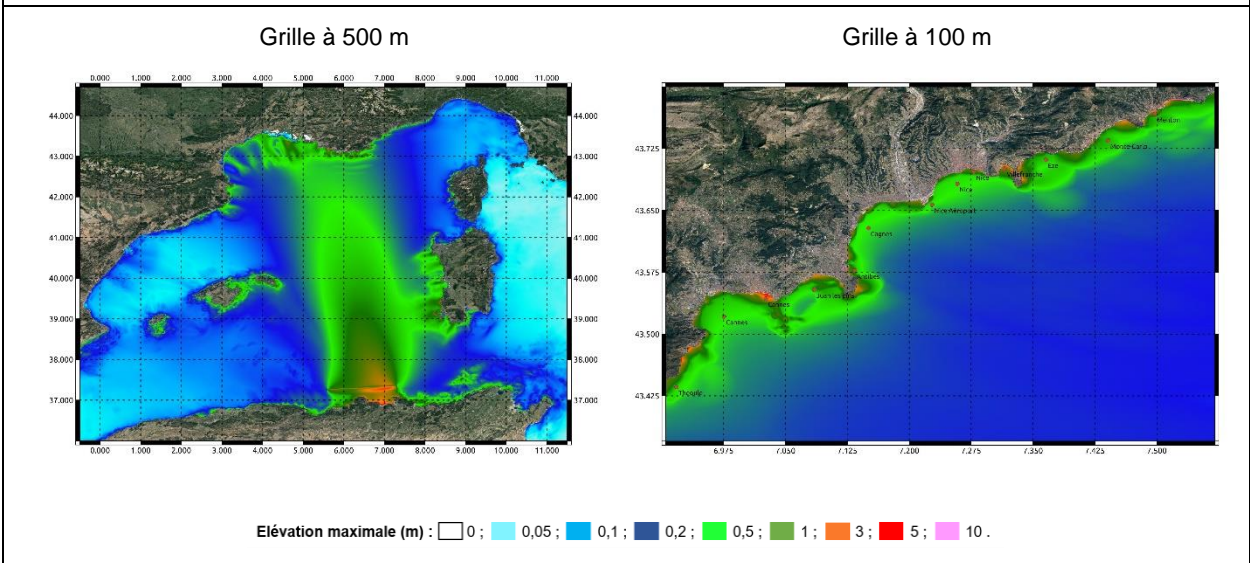




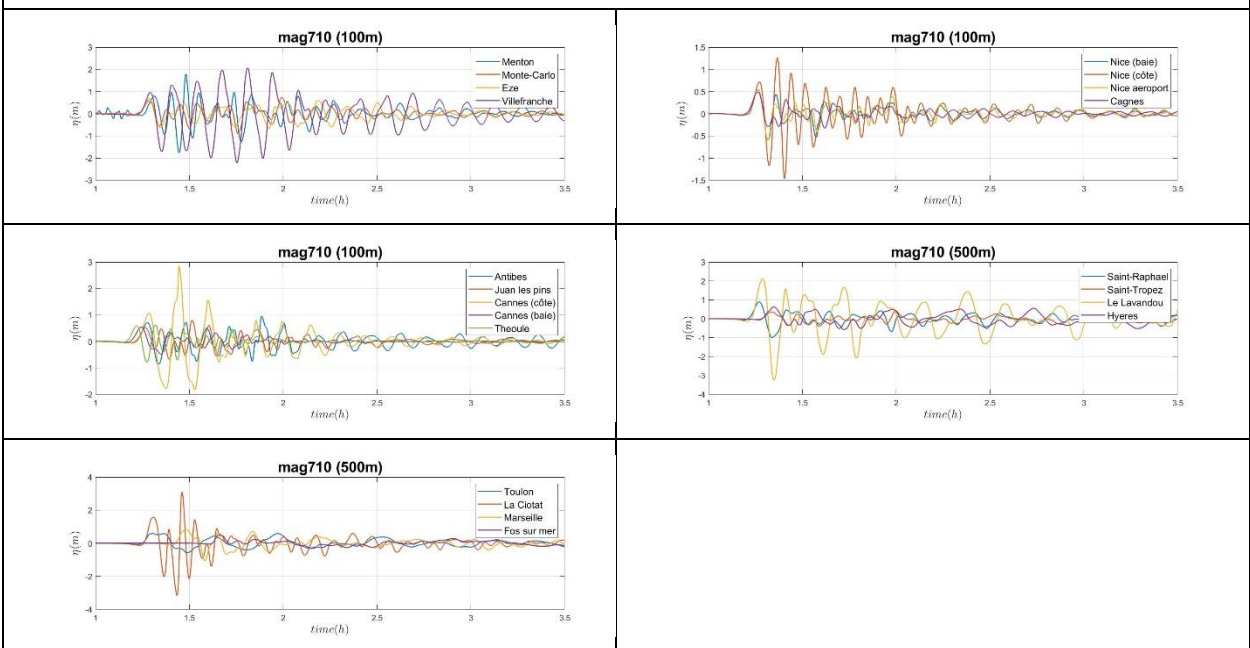


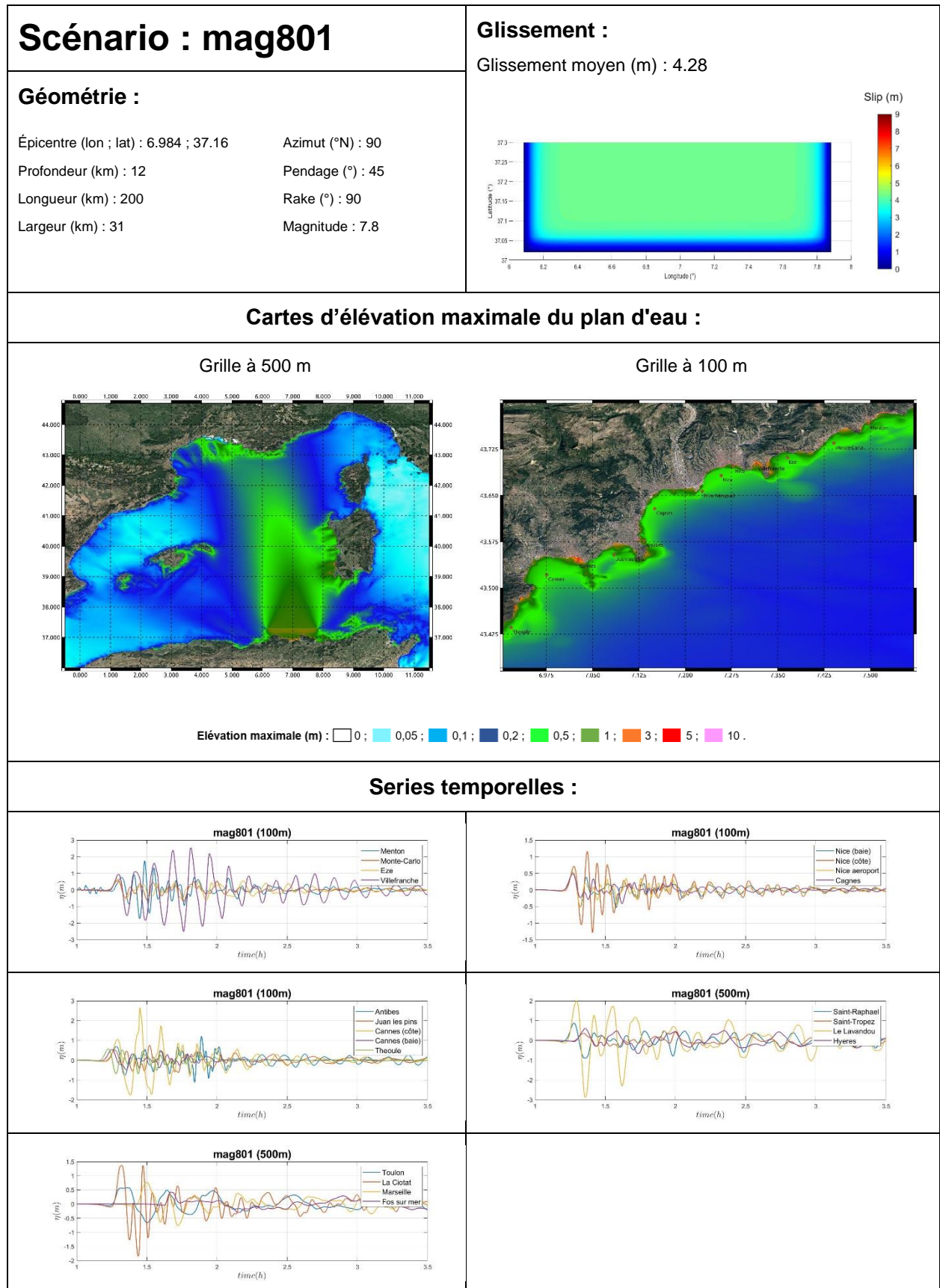
<h2 style="margin: 0;">Scénario : mag710</h2> <p>Géométrie :</p> <p>Épicentre (lon ; lat) : 6.468 ; 37.17 Azimut (°N) : 87 Profondeur (km) : 12 Pendage (°) : 45 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8</p>	<p>Glissement :</p> <p>Glissement max (m) : 10.9</p> 
--	--

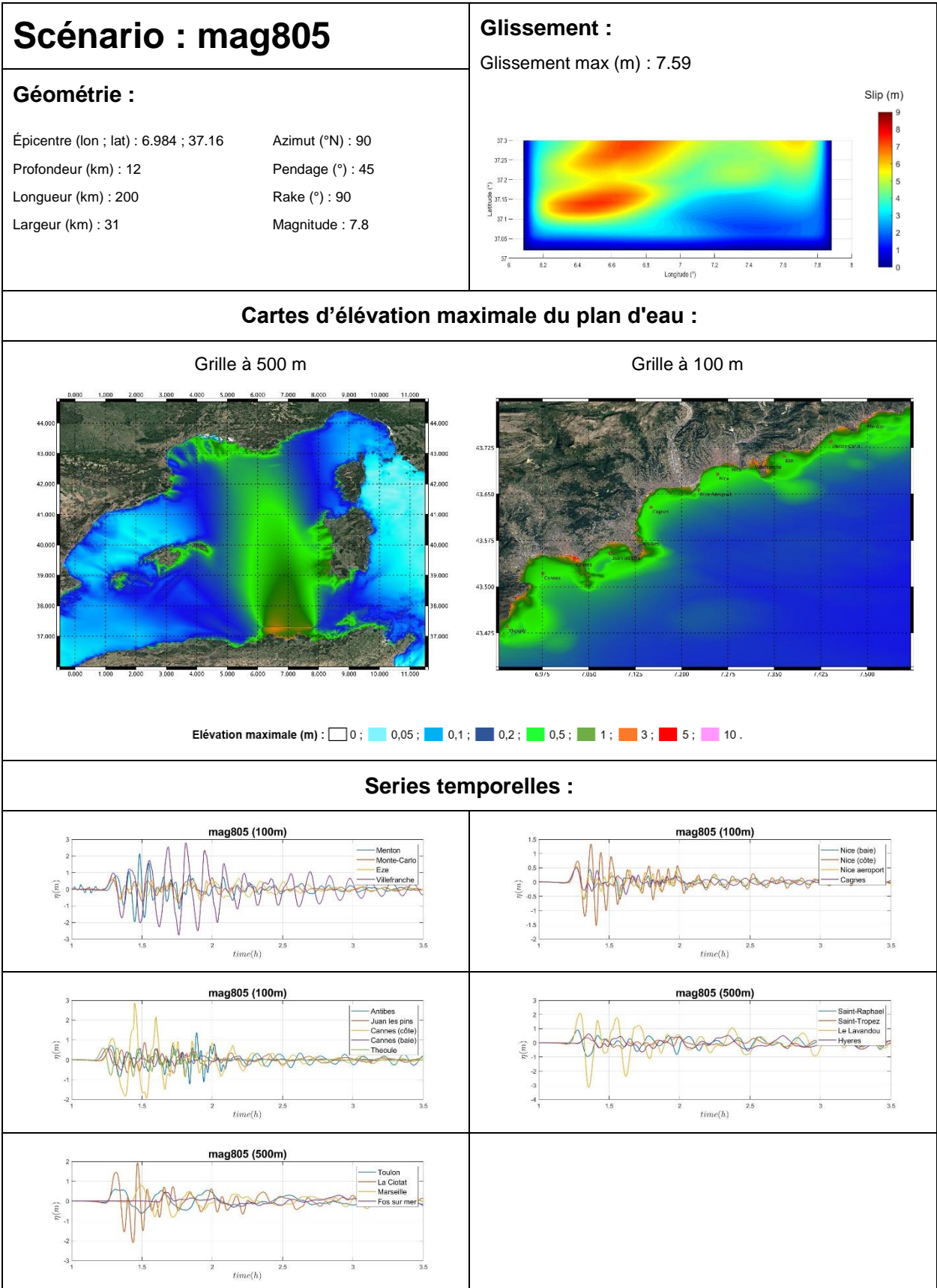
Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

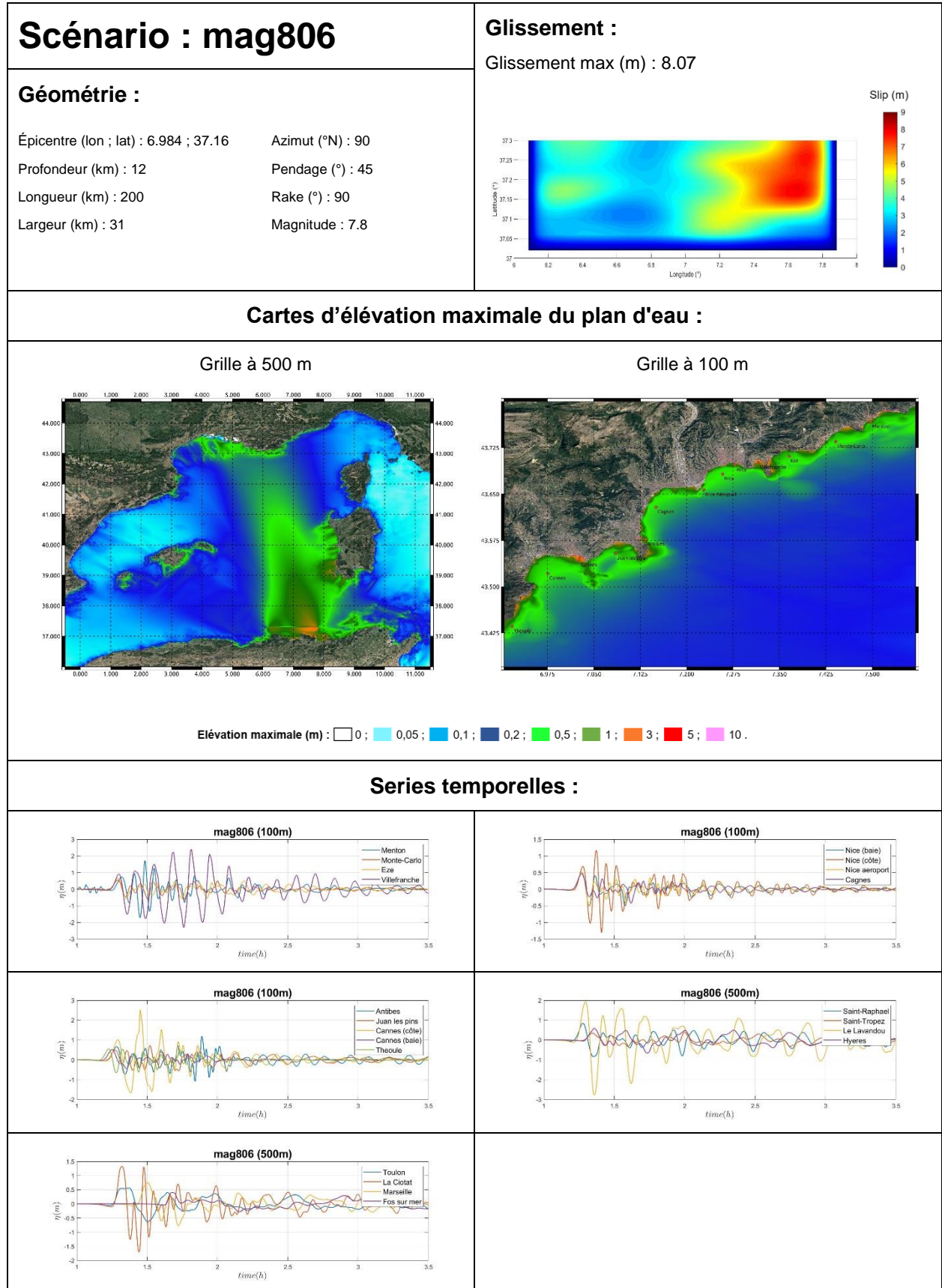


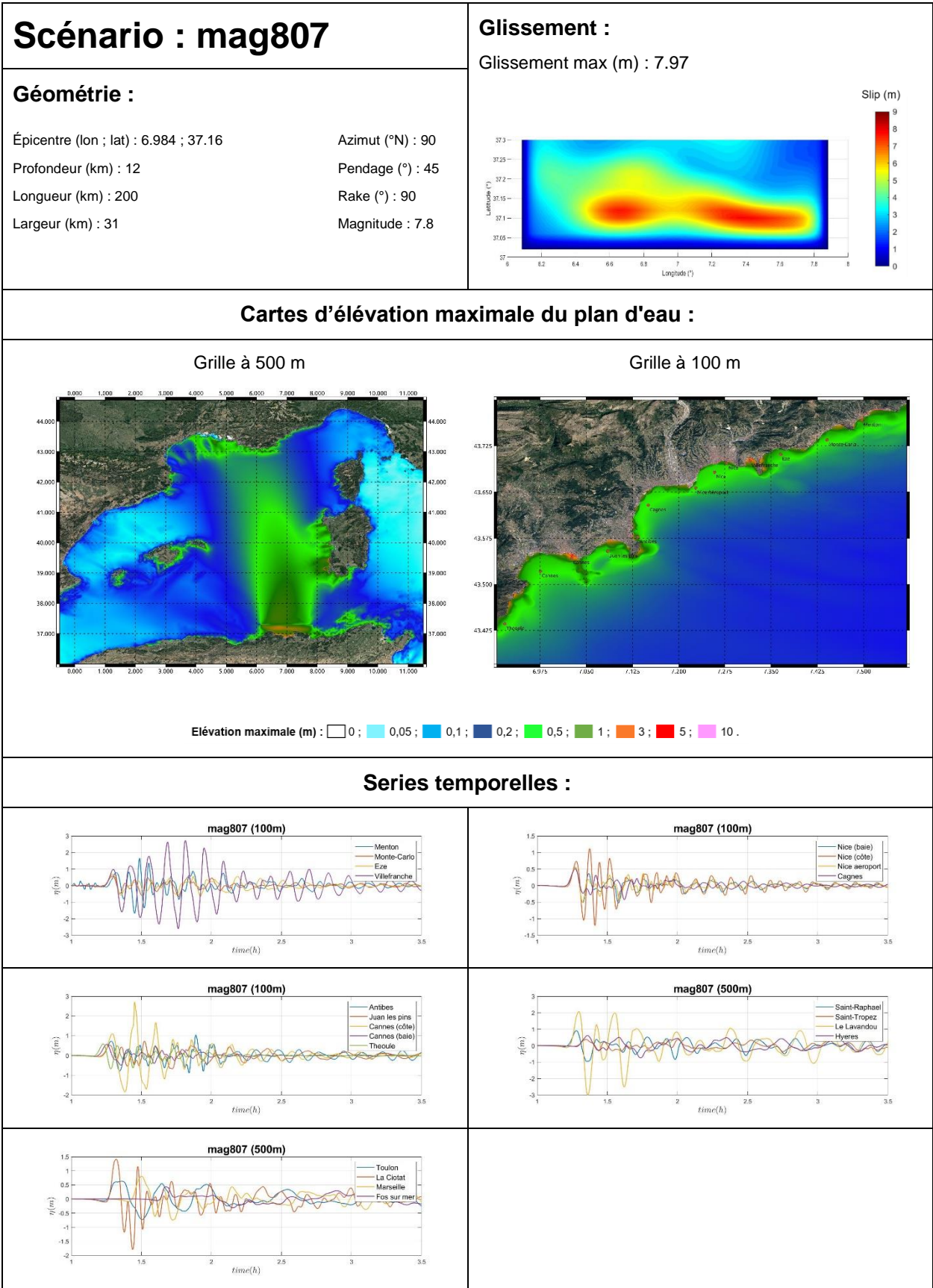
Séries temporelles :

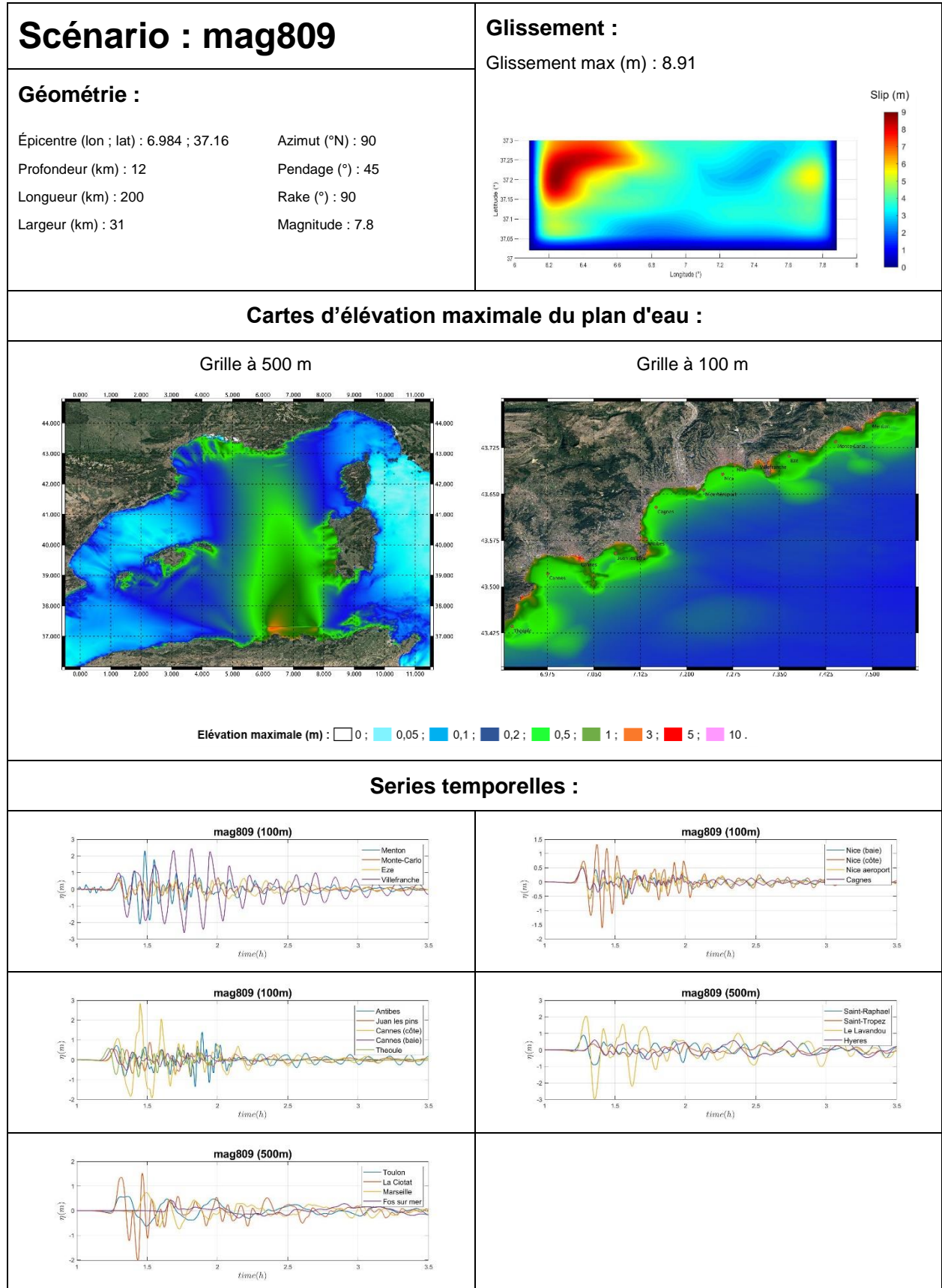












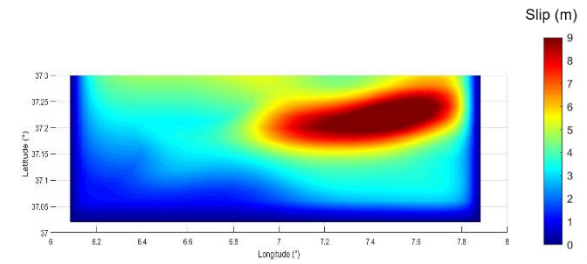
Scénario : mag810

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 6.984 ; 37.16 Azimut (°N) : 90
 Profondeur (km) : 12 Pendage (°) : 45
 Longueur (km) : 200 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 31 Magnitude : 7.8

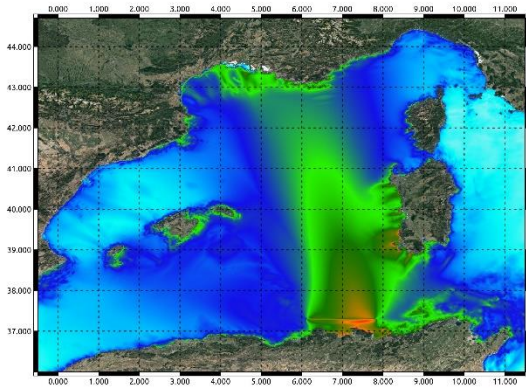
Glissement :

Glissement max (m) : 10.9

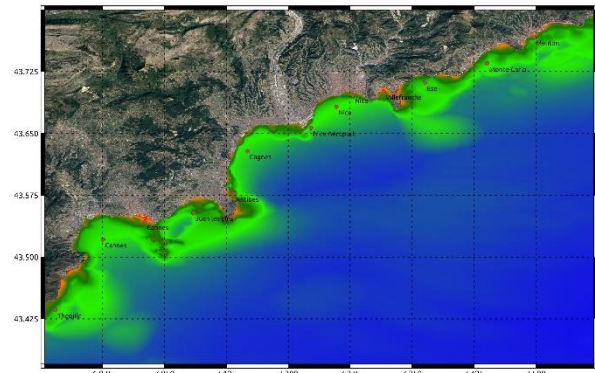


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 500 m

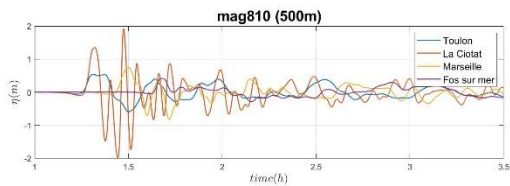
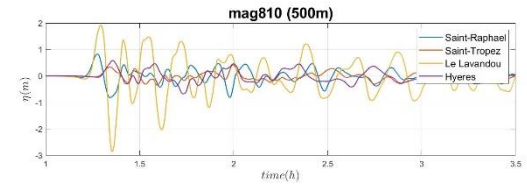
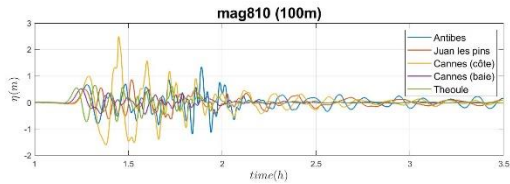
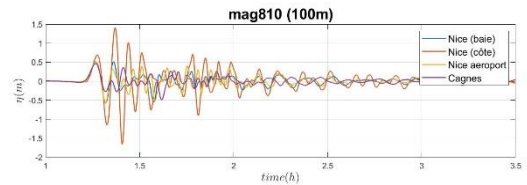
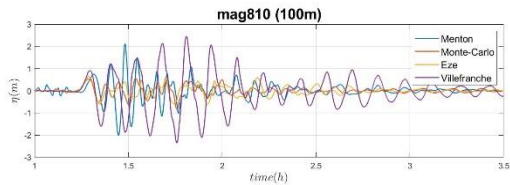


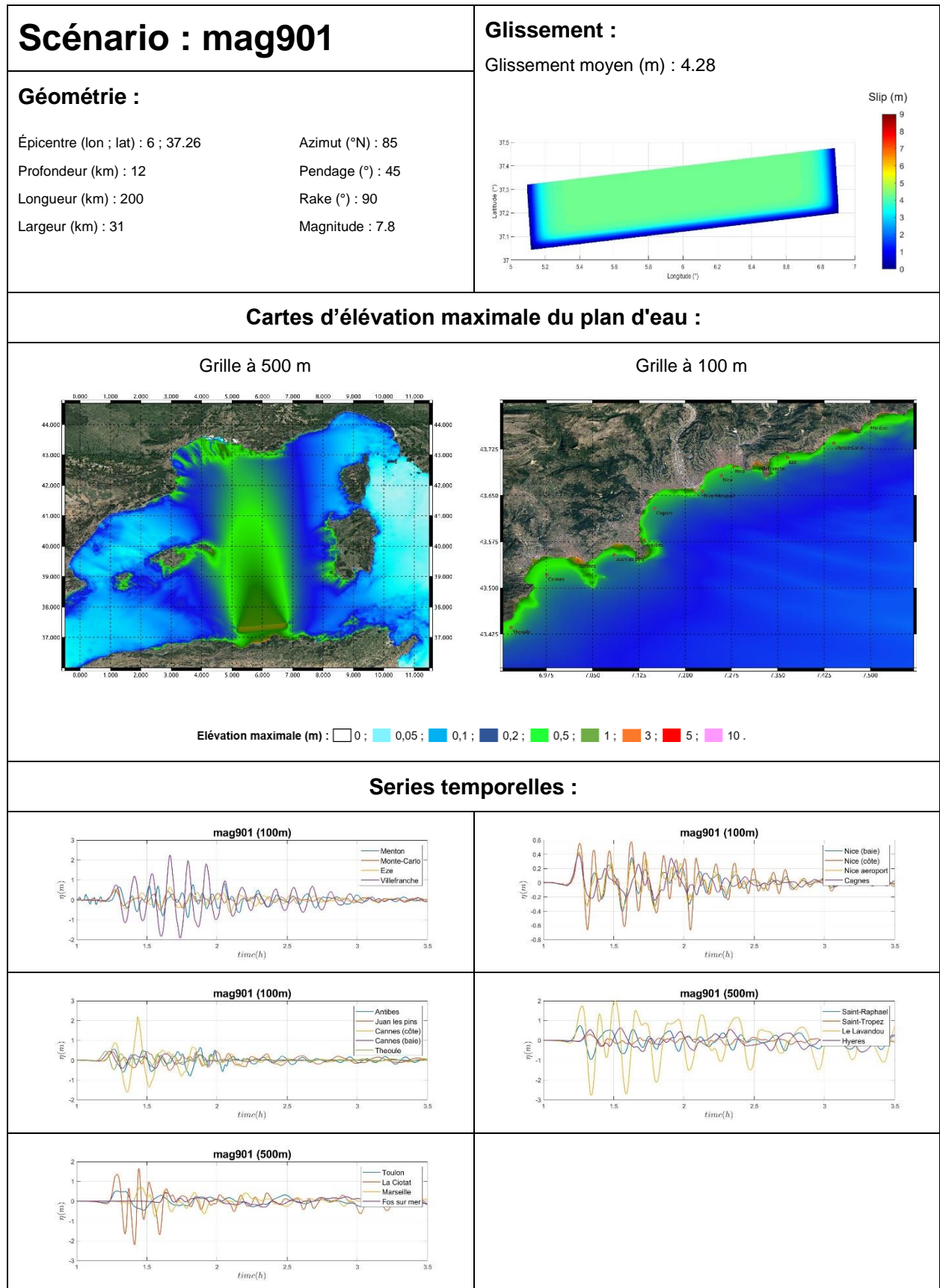
Grille à 100 m

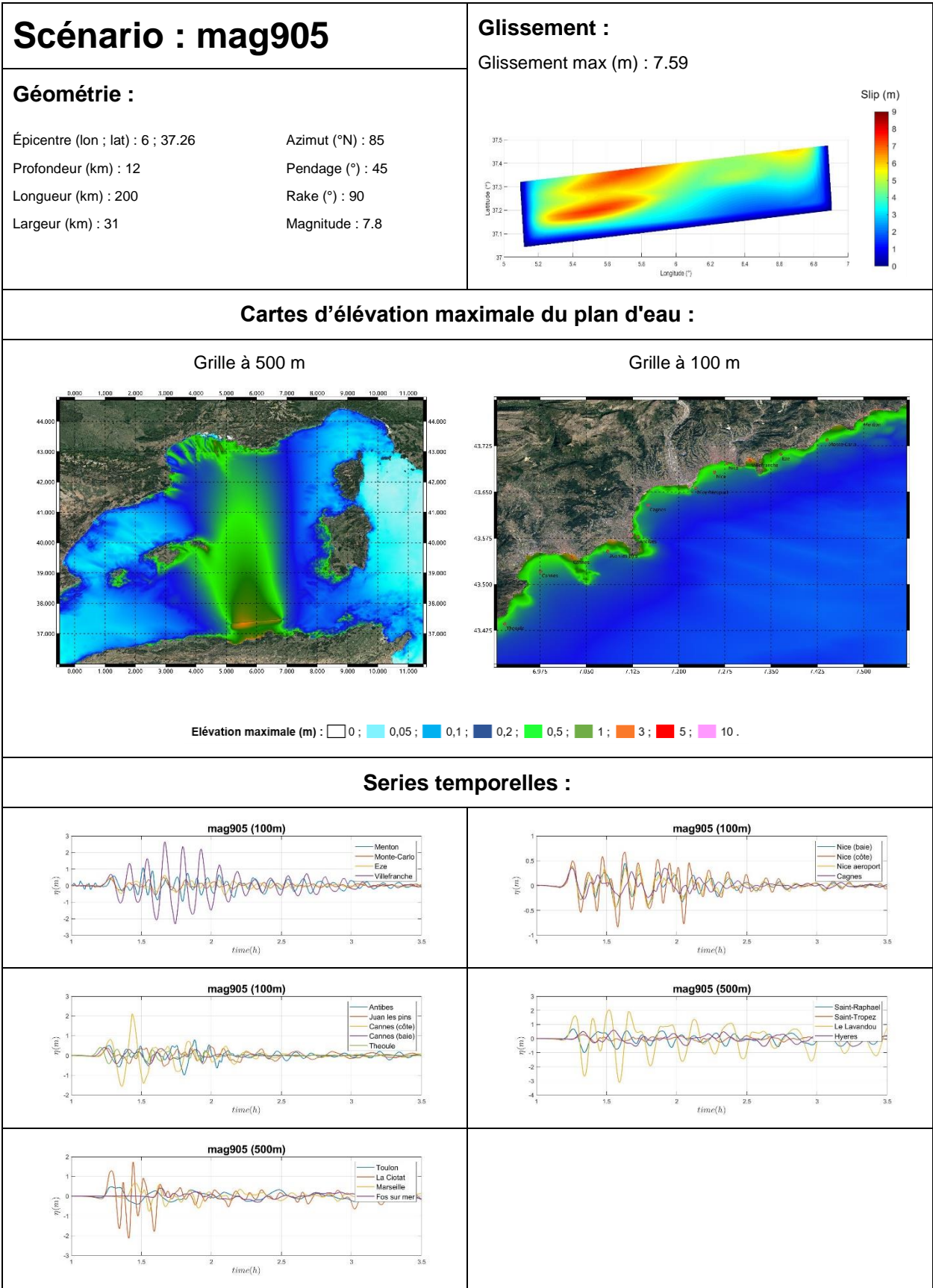


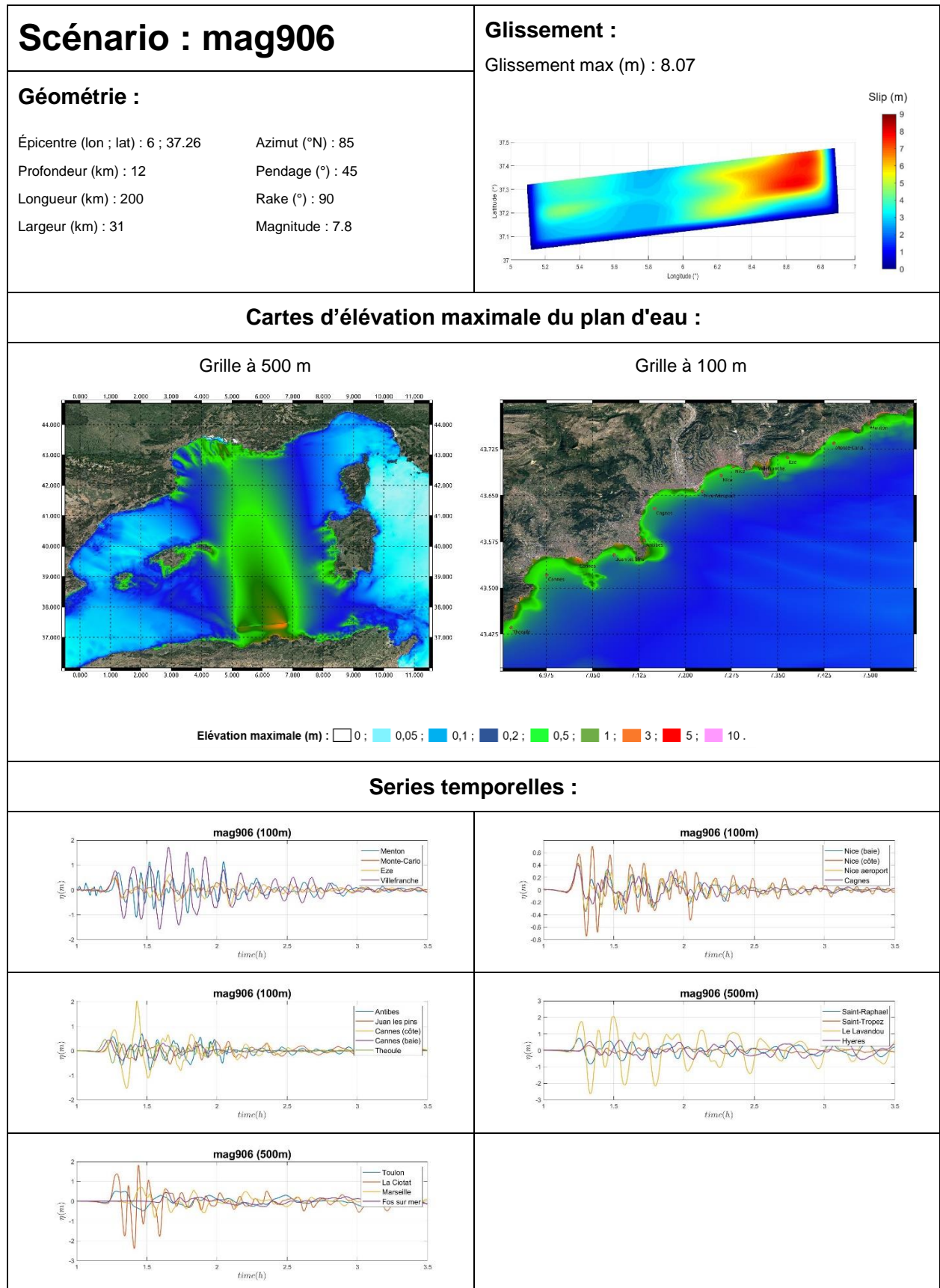
Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

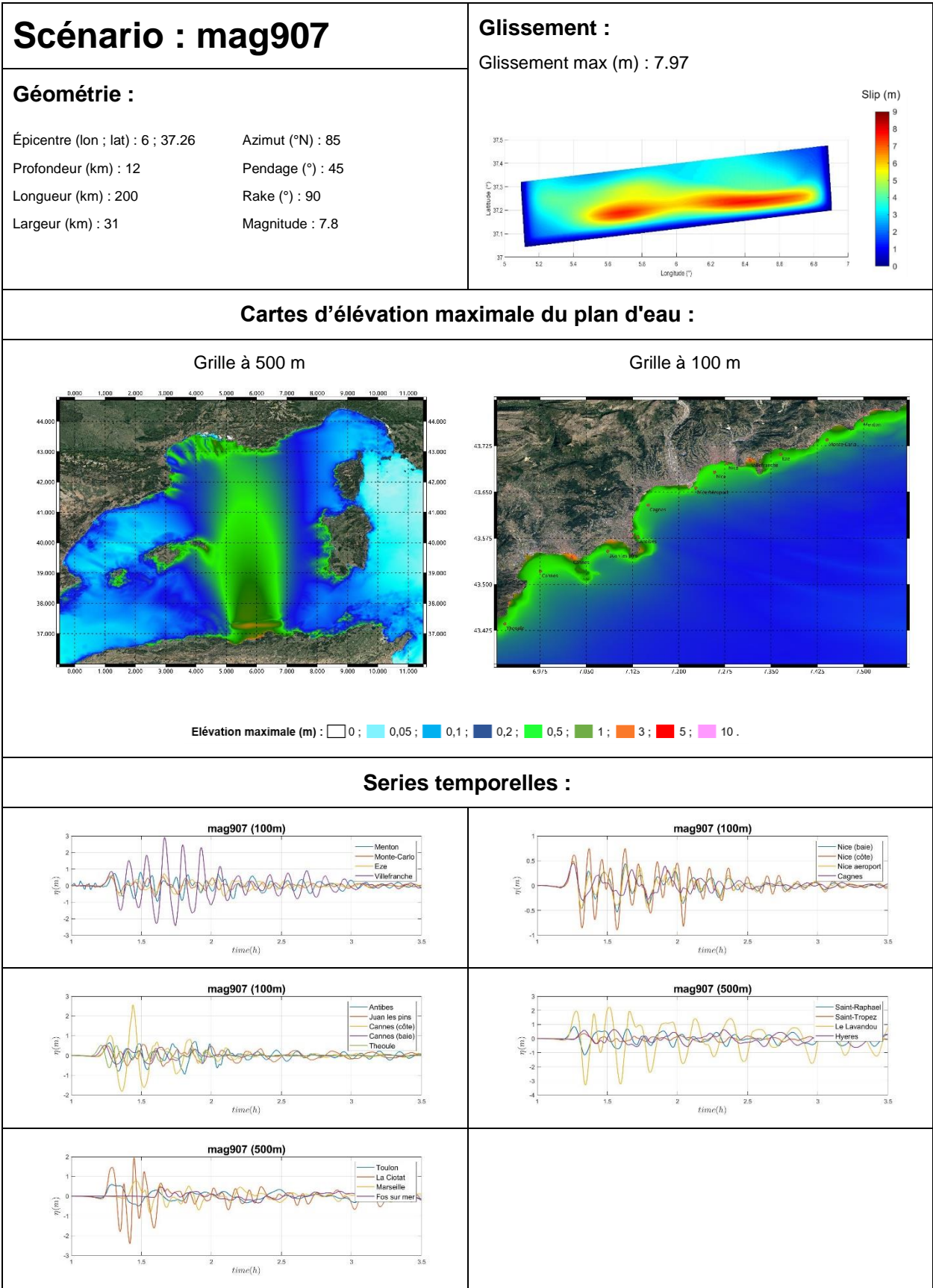
Séries temporelles :

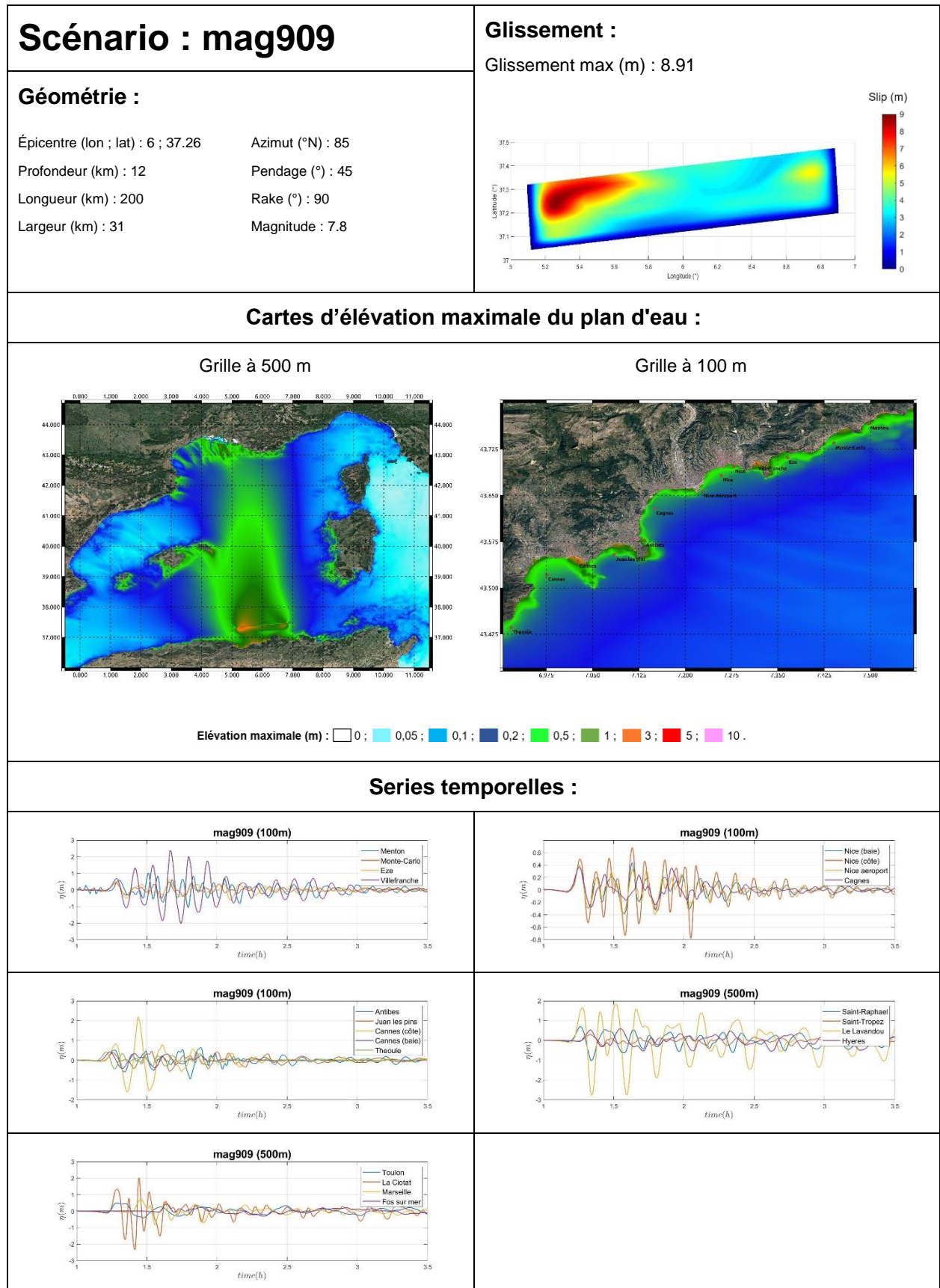


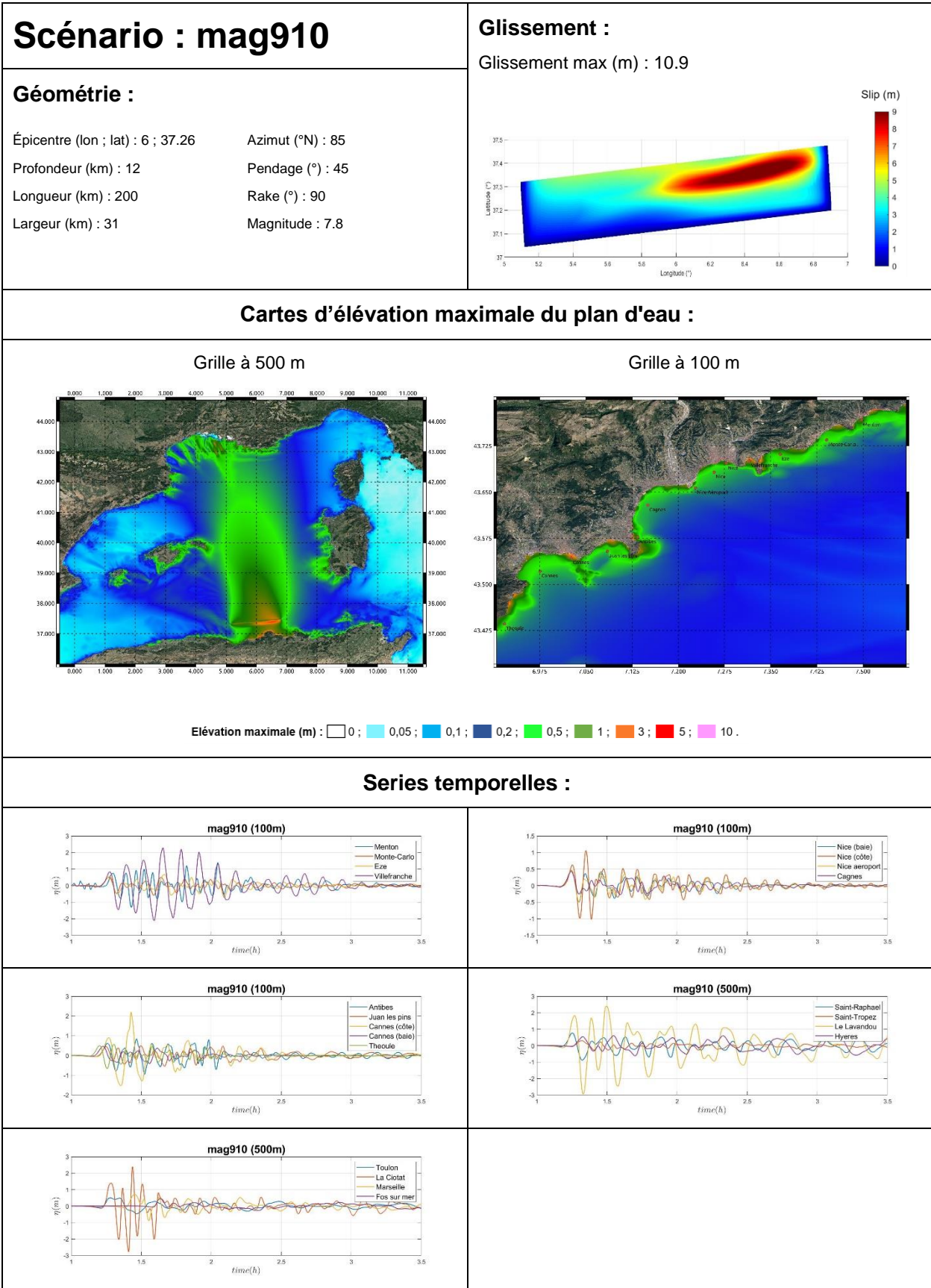












Annexe 2

Scénarios marge de la mer Ligure

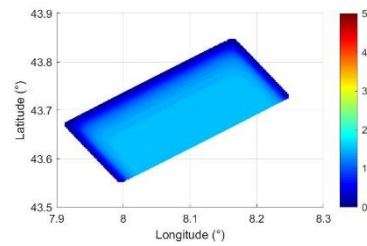
Scénario : lig101

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 8.08 ; 43.7 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

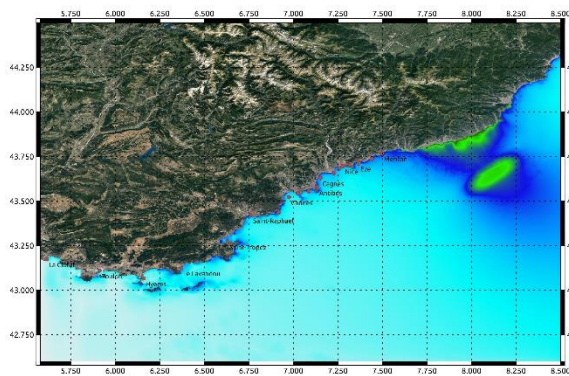
Glissement :

Glissement moyen (m) : 1.55

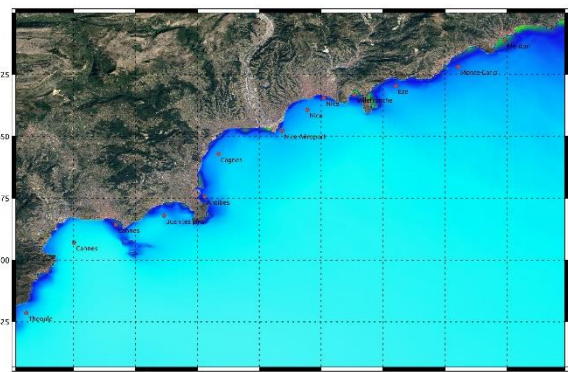


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

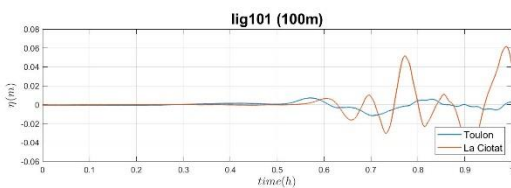
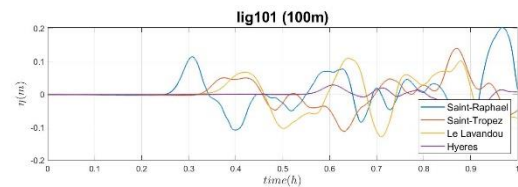
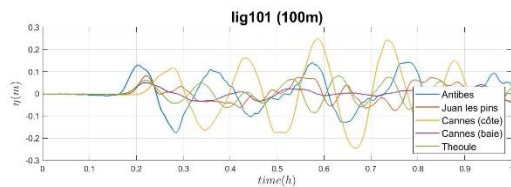
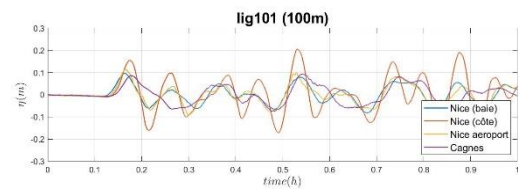
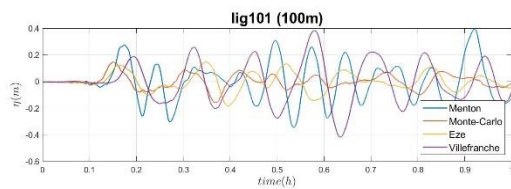


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



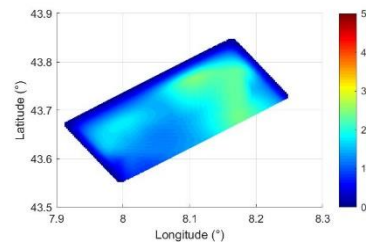
Scénario : lig102

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 8.08 ; 43.7 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

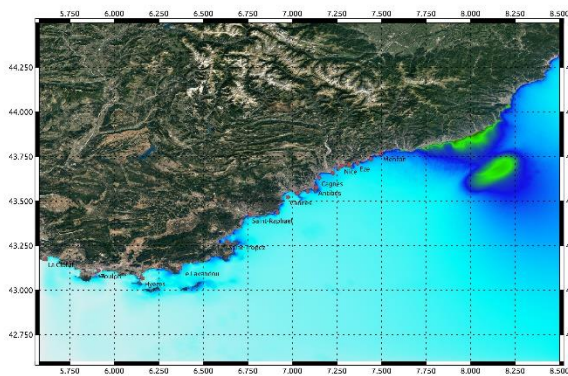
Glissement :

Glissement max (m) : 2.59

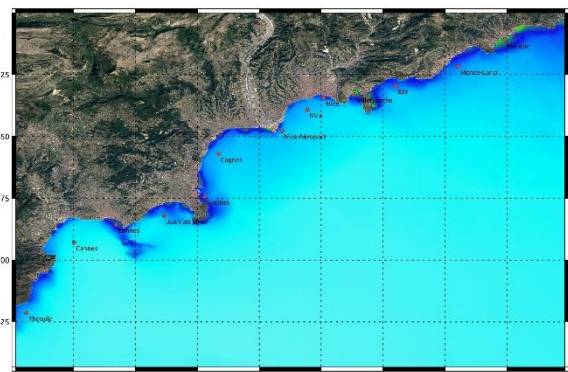


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

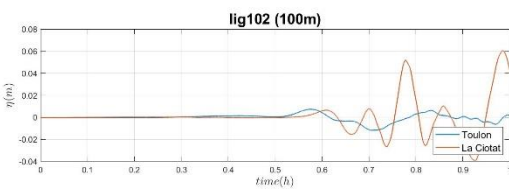
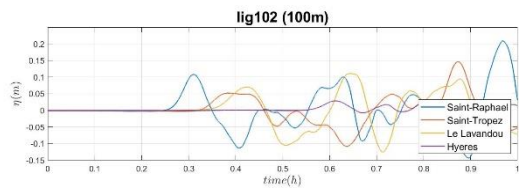
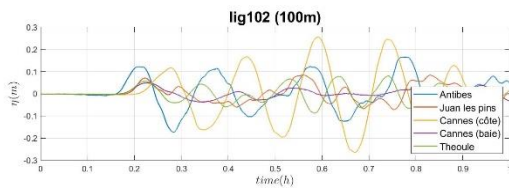
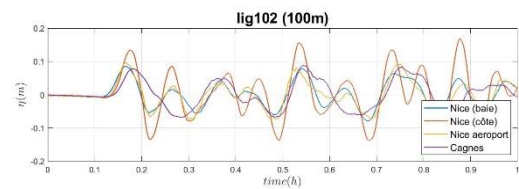
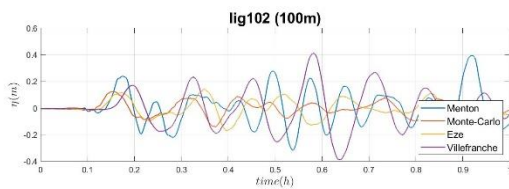


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



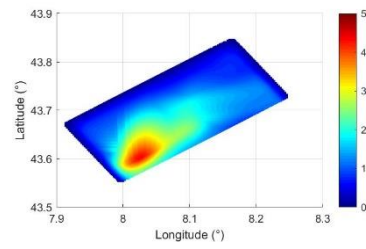
Scénario : lig103

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 8.08 ; 43.7 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

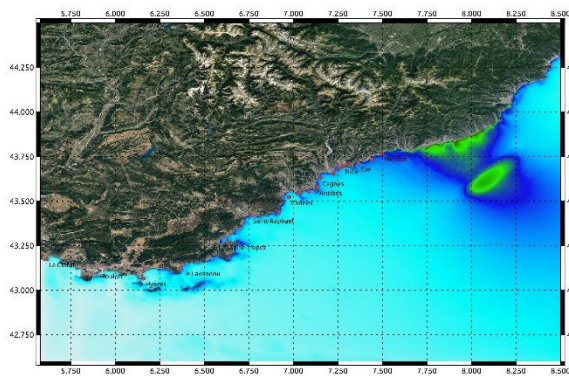
Glissement :

Glissement max (m) : 4.62

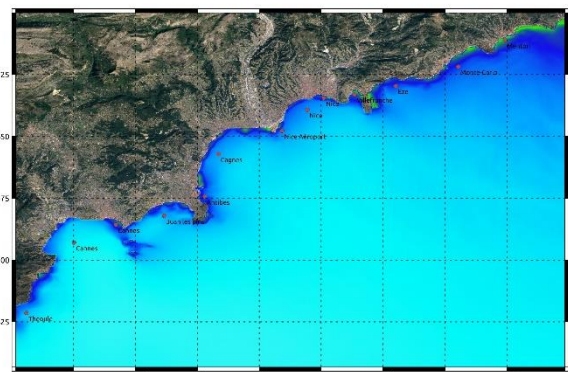


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

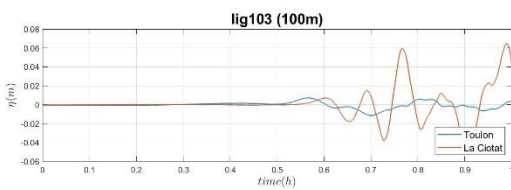
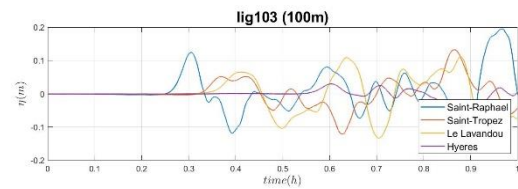
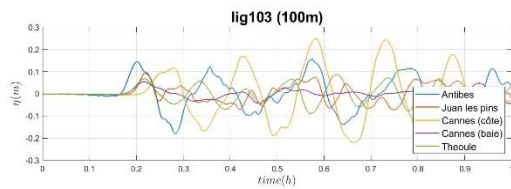
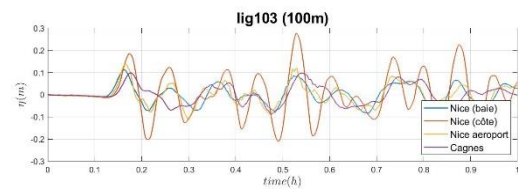
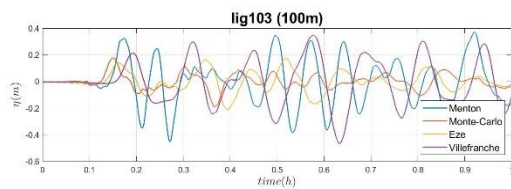


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



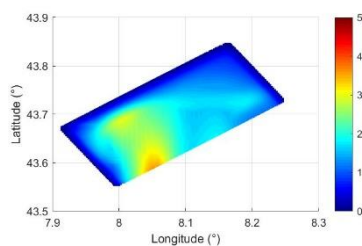
Scénario : lig104

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 8.08 ; 43.7 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

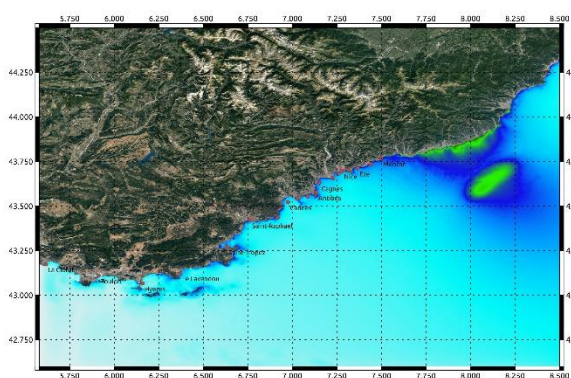
Glissement :

Glissement max (m) : 3.64

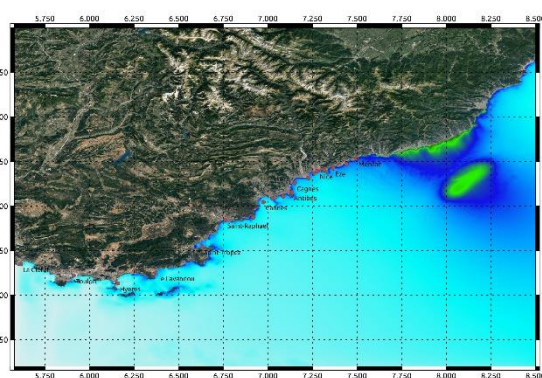


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

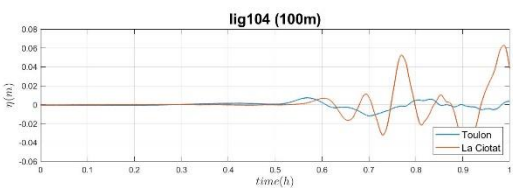
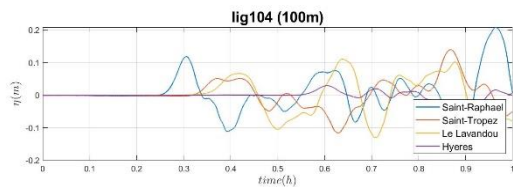
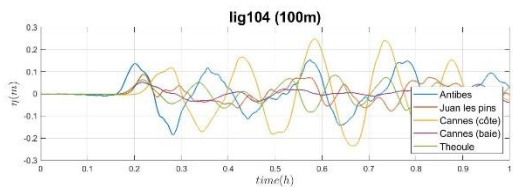
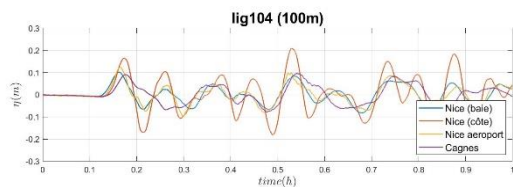
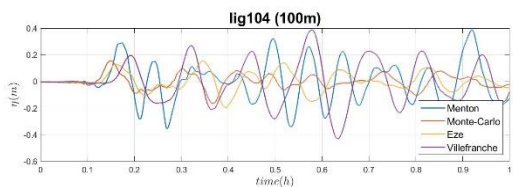


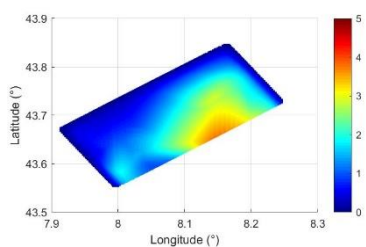
Grille à 100 m (zoom)



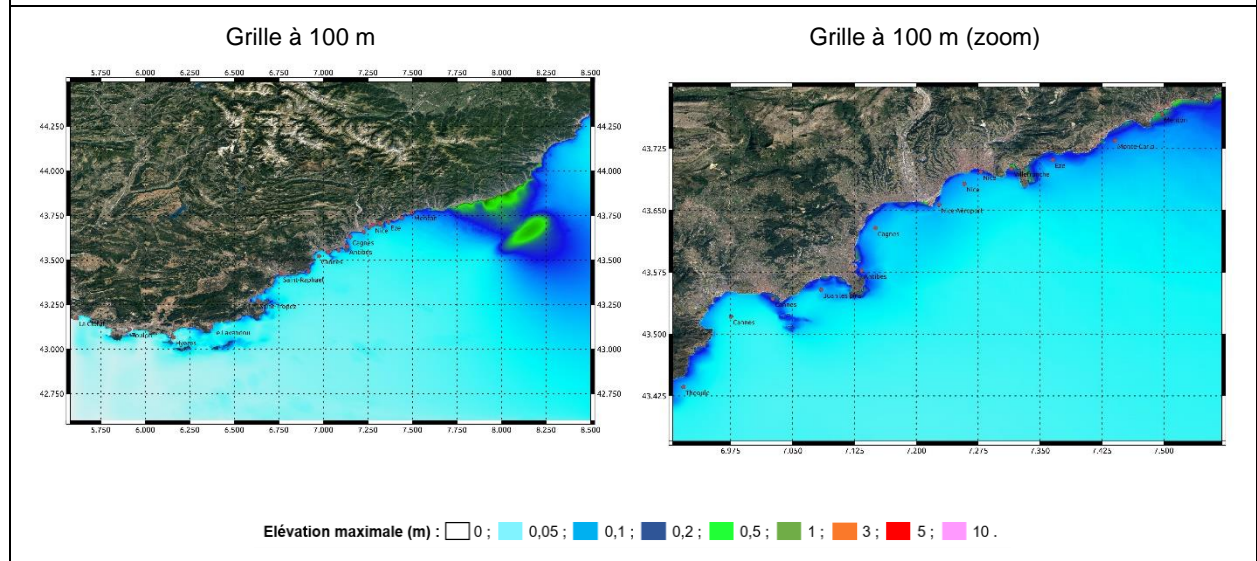
Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :

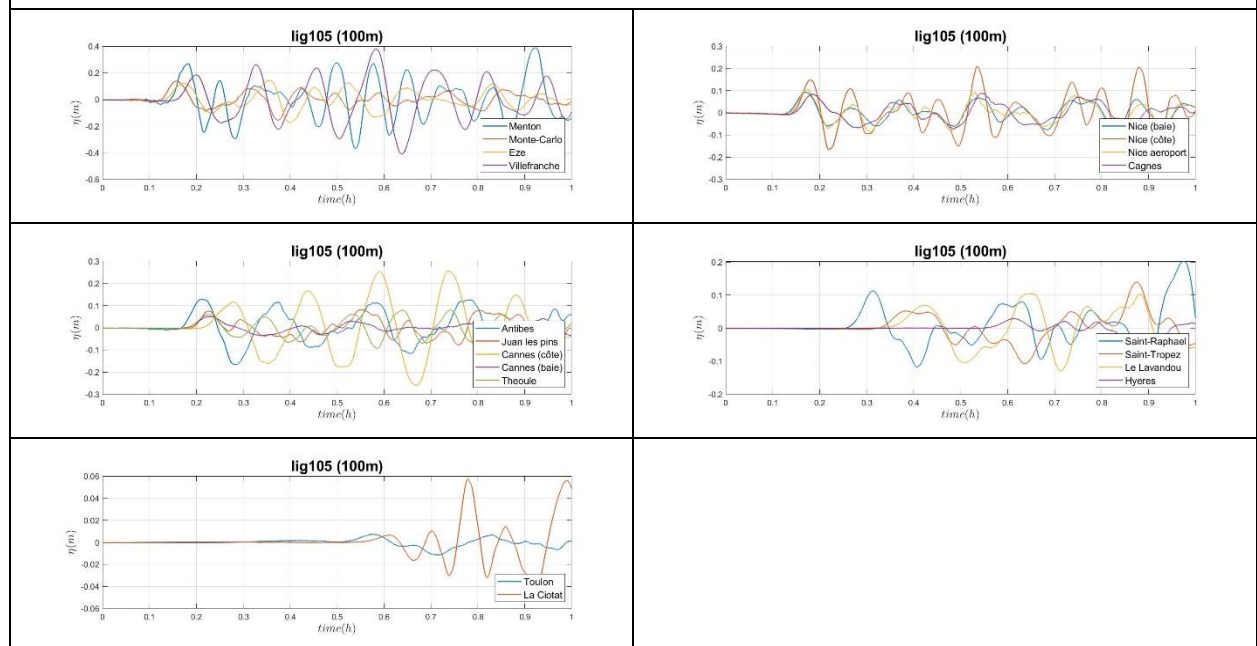


<h2 style="margin: 0;">Scénario : lig105</h2> <p>Géométrie :</p> <p>Épicentre (lon ; lat) : 8.08 ; 43.7 Azimut (°N) : 235 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9</p>	<p>Glissement :</p> <p>Glissement max (m) : 3.82</p> 
---	--

Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :



Series temporelles :



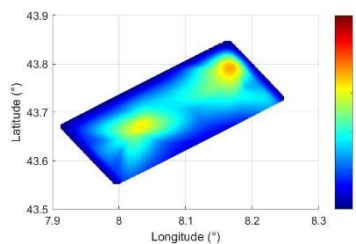
Scénario : lig106

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 8.08 ; 43.7 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

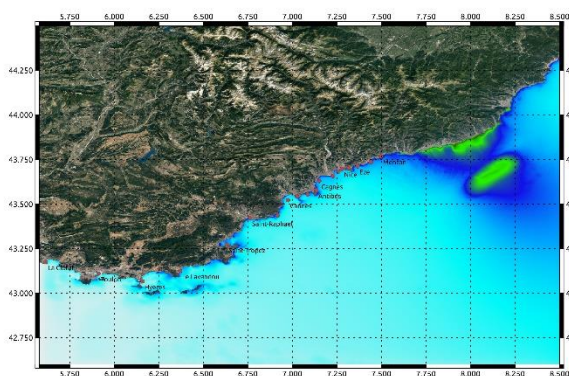
Glissement :

Glissement max (m) : 3.65

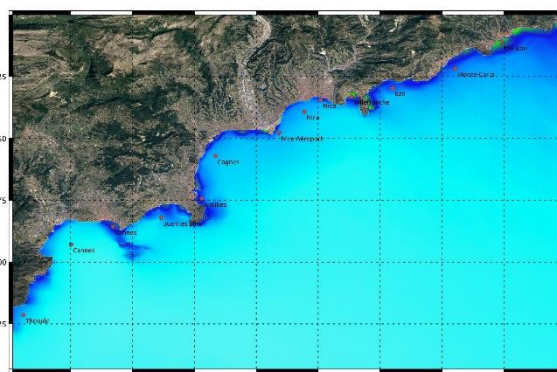


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

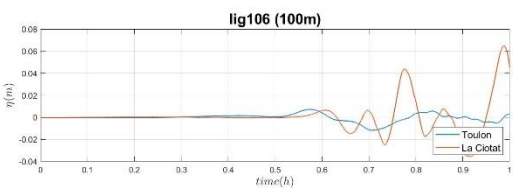
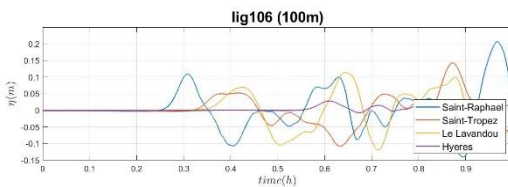
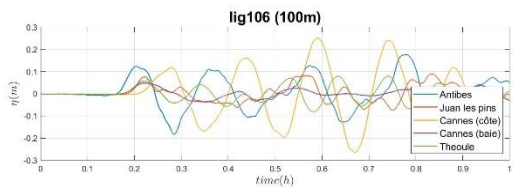
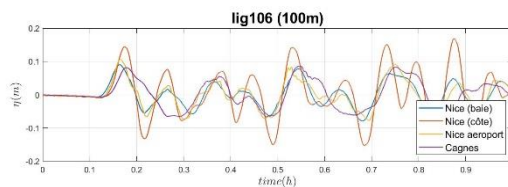
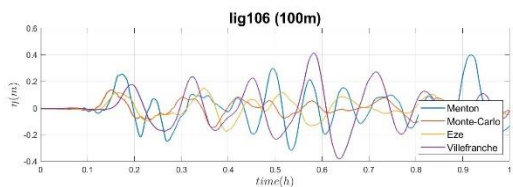


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



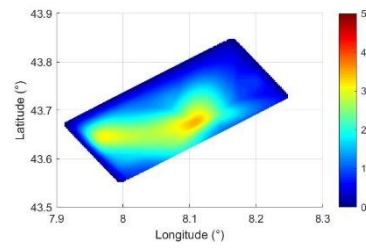
Scénario : lig107

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 8.08 ; 43.7 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

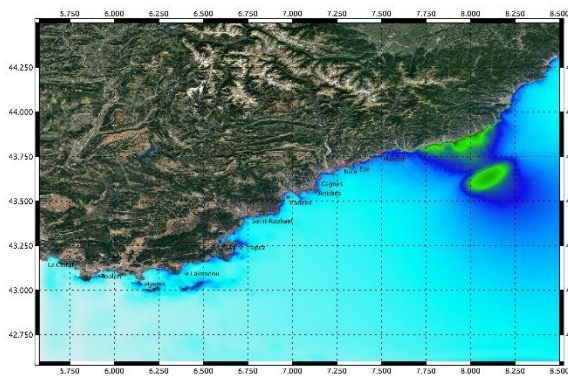
Glissement :

Glissement max (m) : 3.65

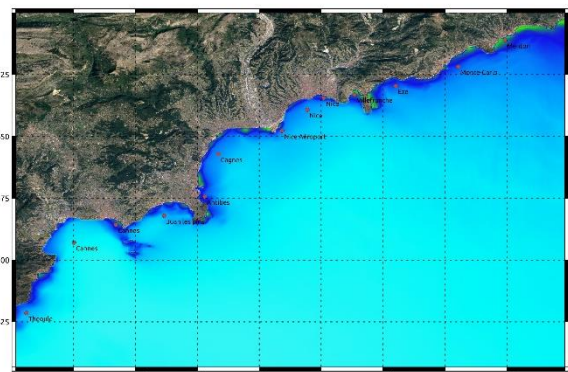


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

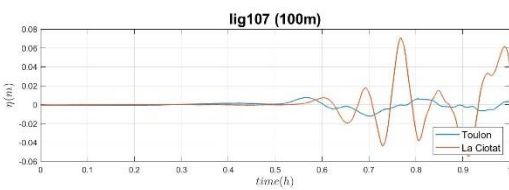
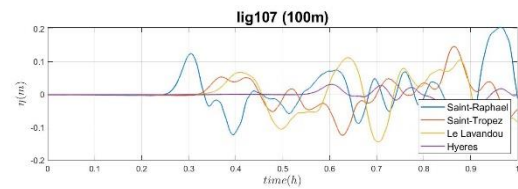
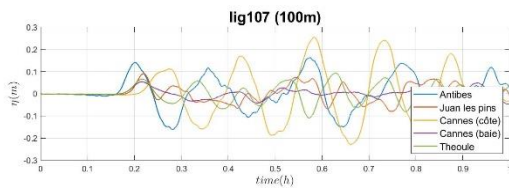
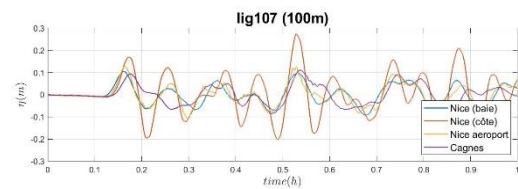
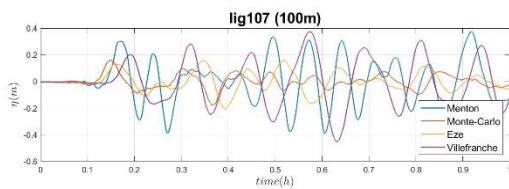


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



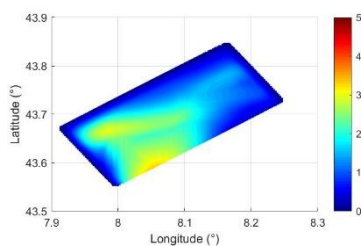
Scénario : lig108

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 8.08 ; 43.7 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

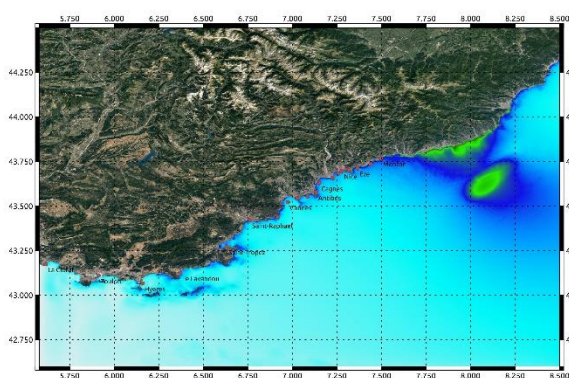
Glissement :

Glissement max (m) : 3.35

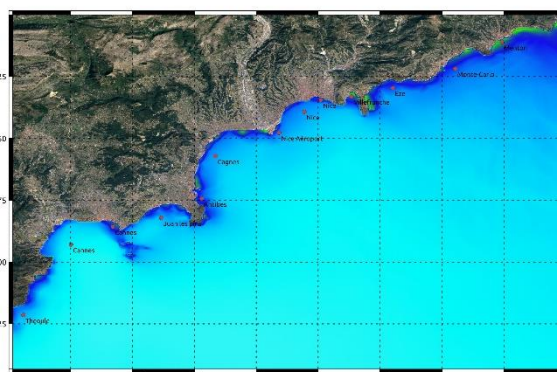


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

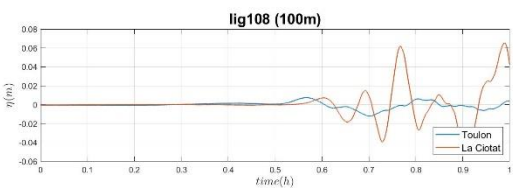
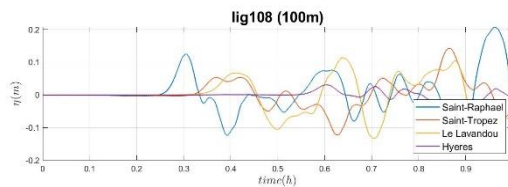
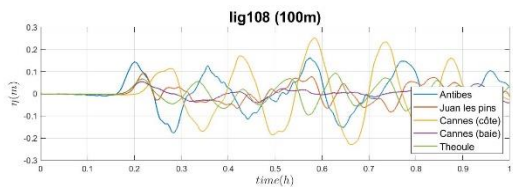
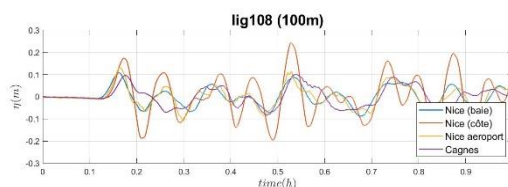
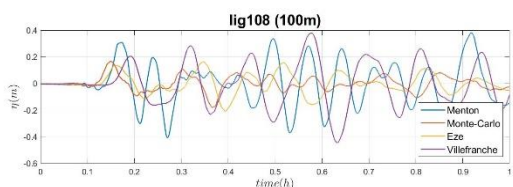


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



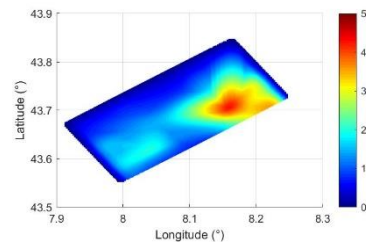
Scénario : lig109

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 8.08 ; 43.7 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

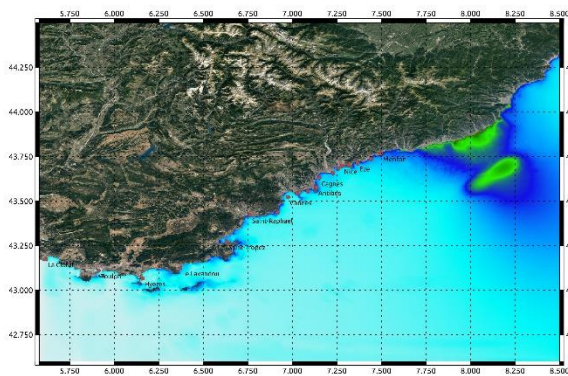
Glissement :

Glissement max (m) : 4.45

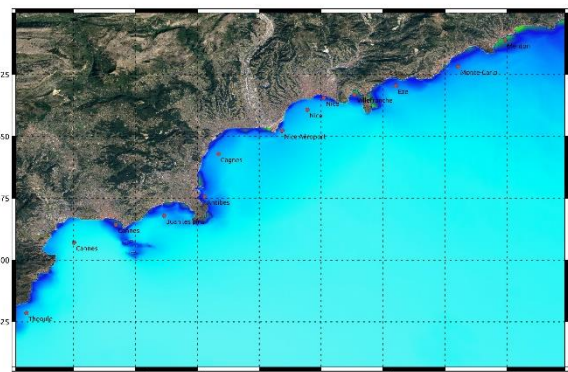


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

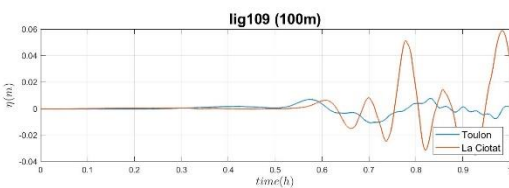
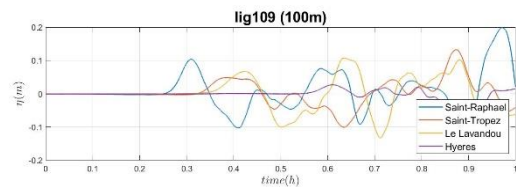
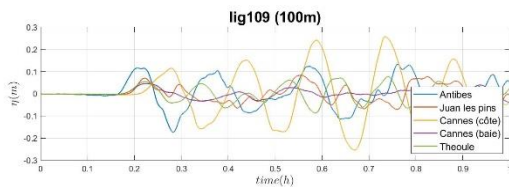
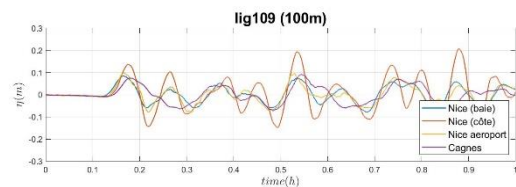
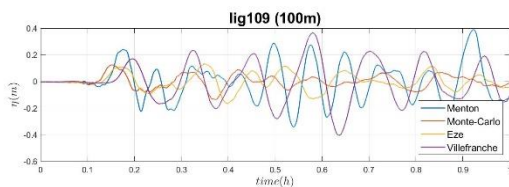


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



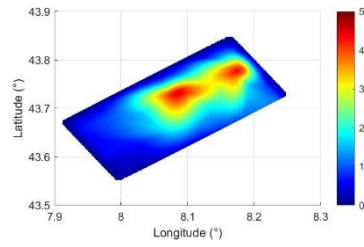
Scénario : lig110

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 8.08 ; 43.7 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

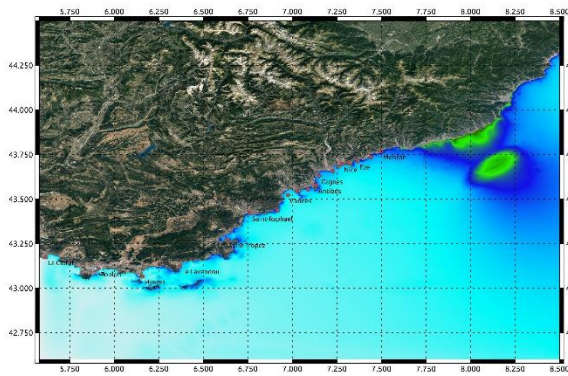
Glissement :

Glissement max (m) : 4.68

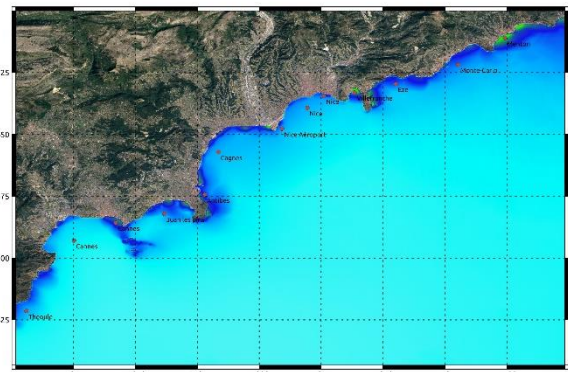


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

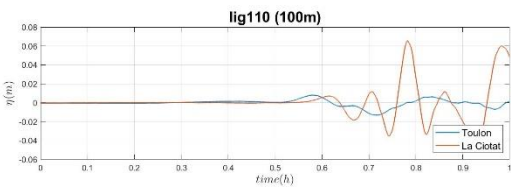
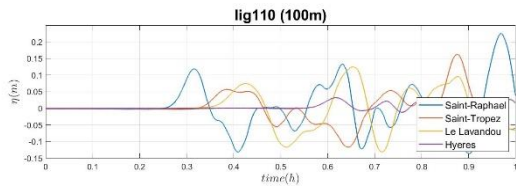
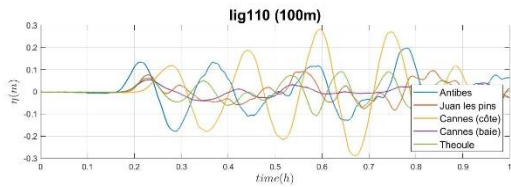
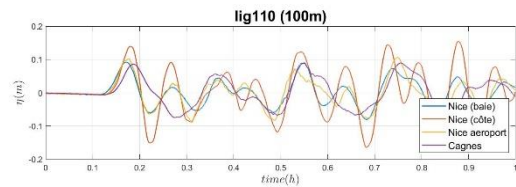
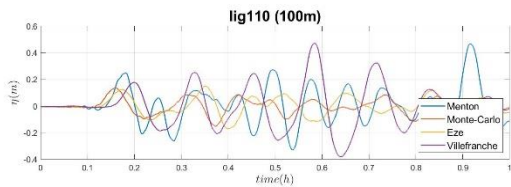


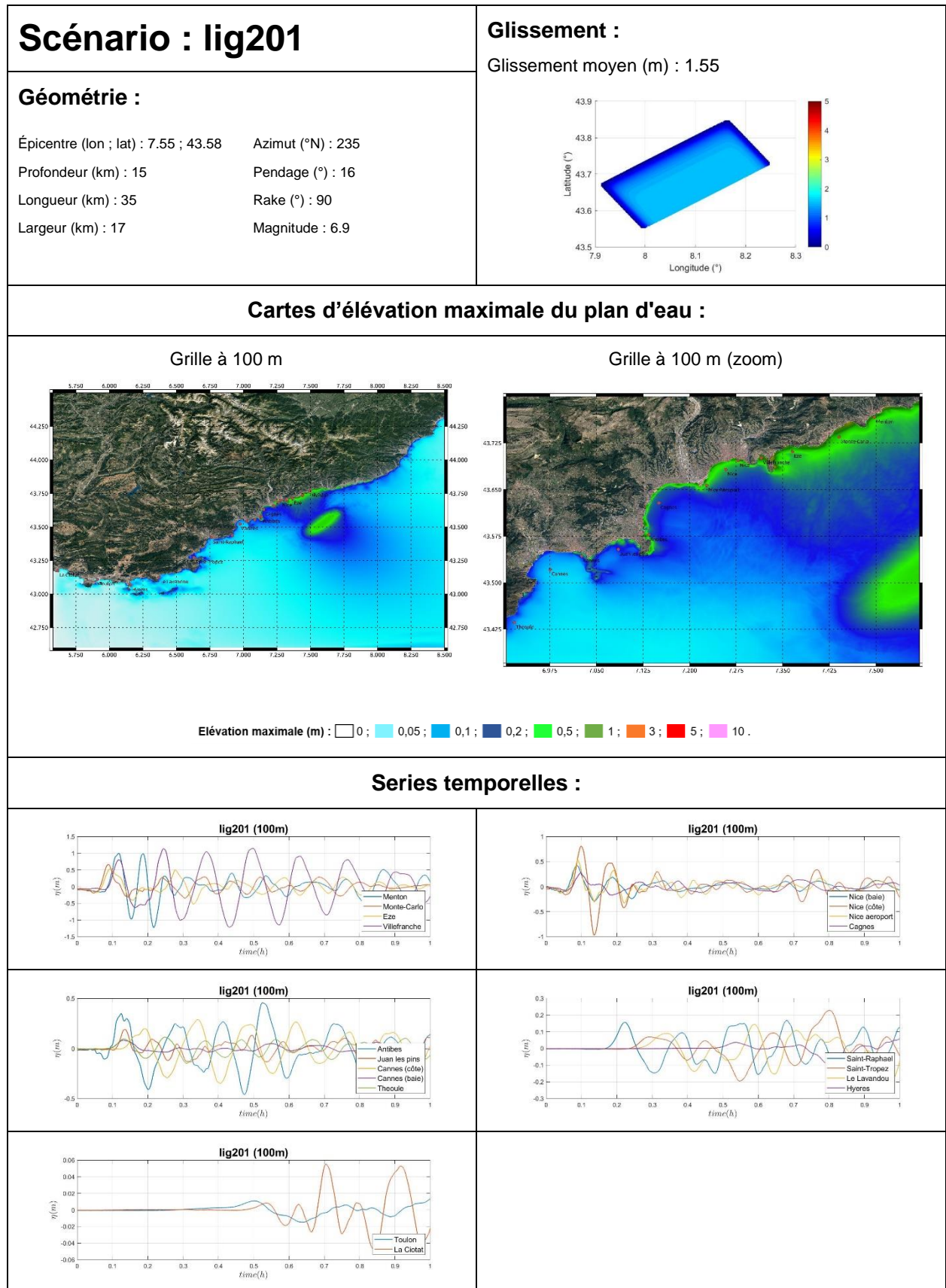
Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :





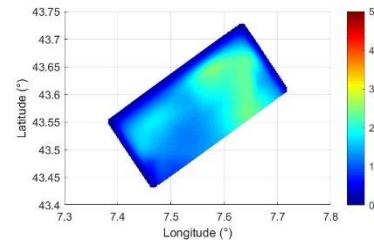
Scénario : lig202

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.55 ; 43.58 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

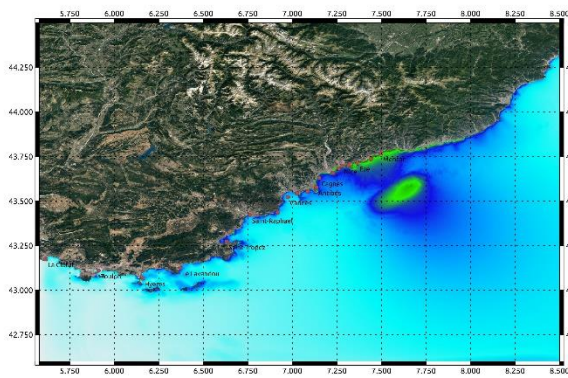
Glissement :

Glissement max (m) : 2.59

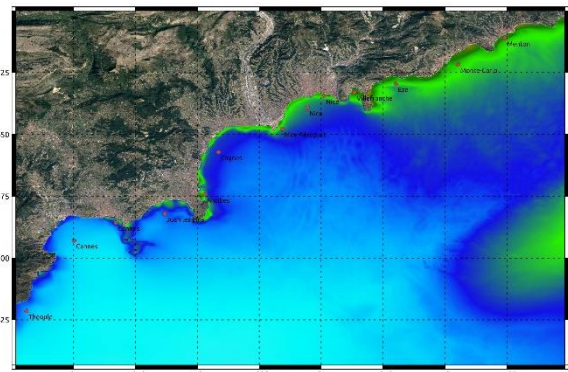


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

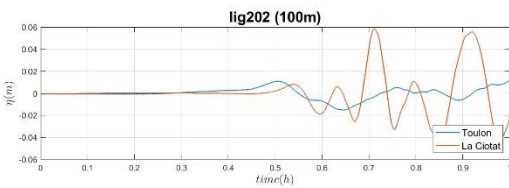
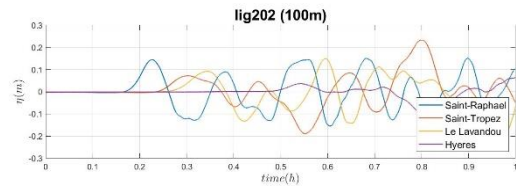
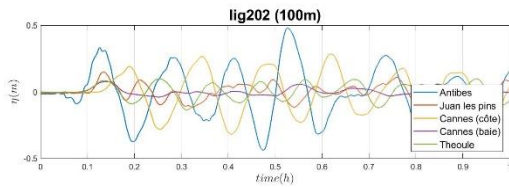
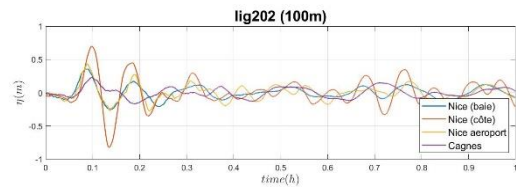
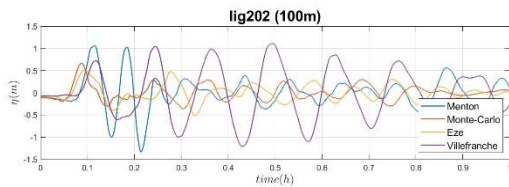


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



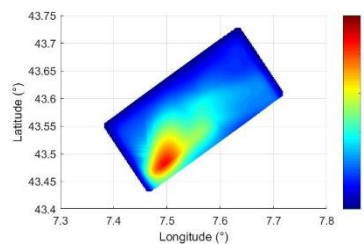
Scénario : lig203

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.55 ; 43.58 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

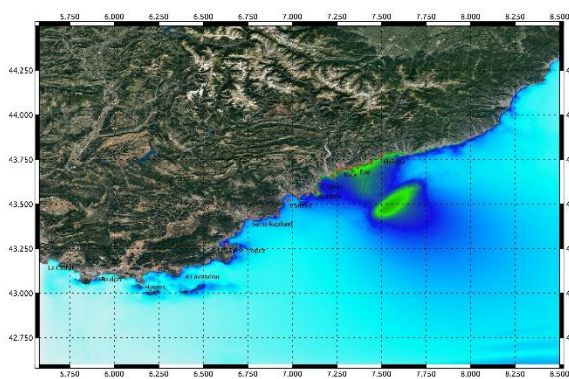
Glissement :

Glissement max (m) : 4.62

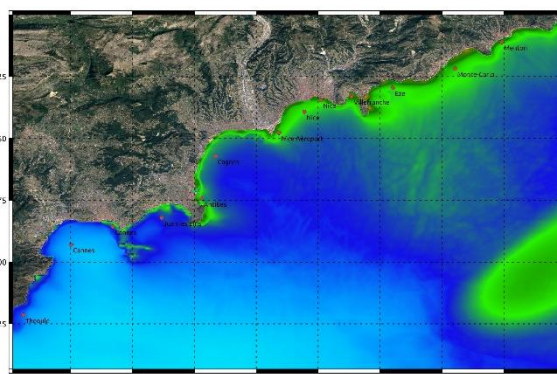


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

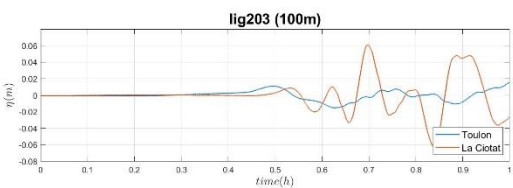
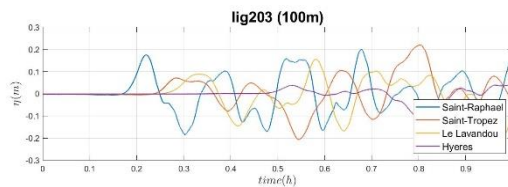
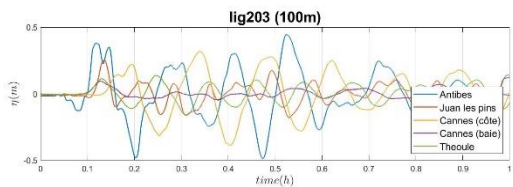
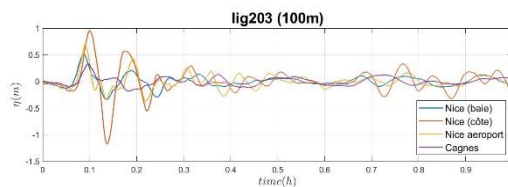
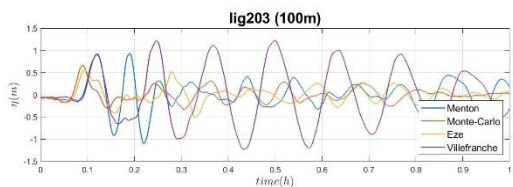


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



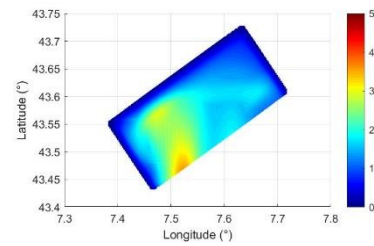
Scénario : lig204

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.55 ; 43.58 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

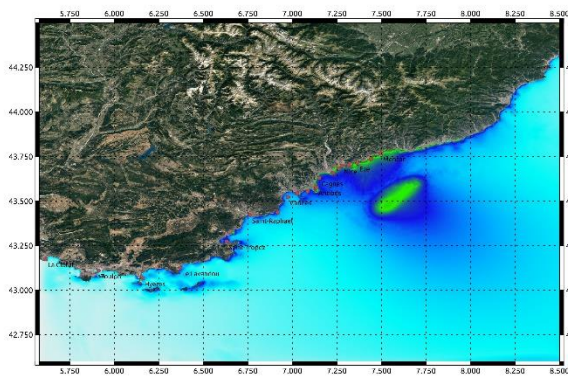
Glissement :

Glissement max (m) : 3.64

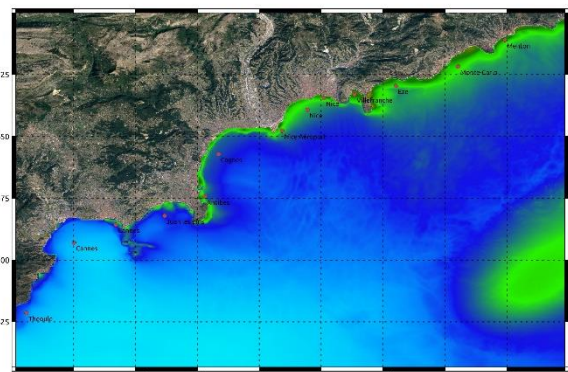


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

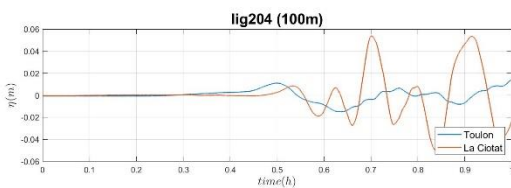
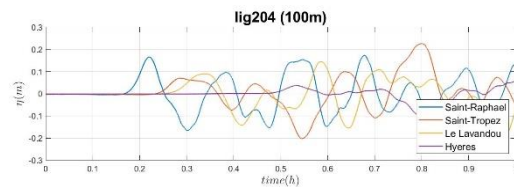
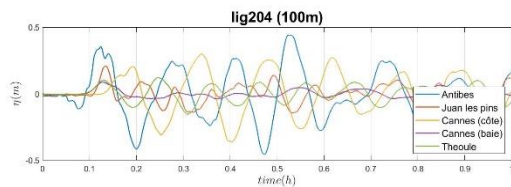
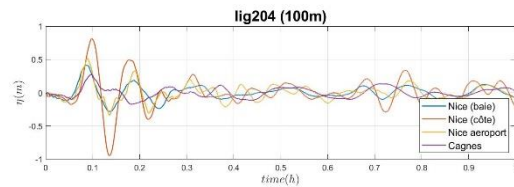
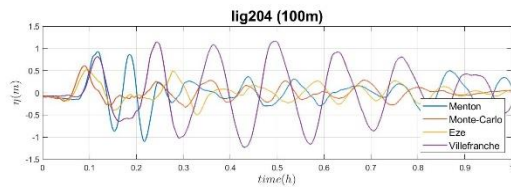


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



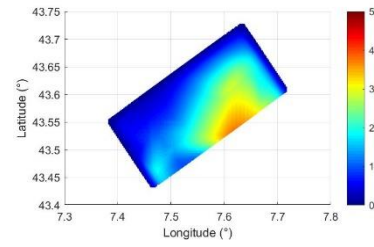
Scénario : lig205

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.55 ; 43.58 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

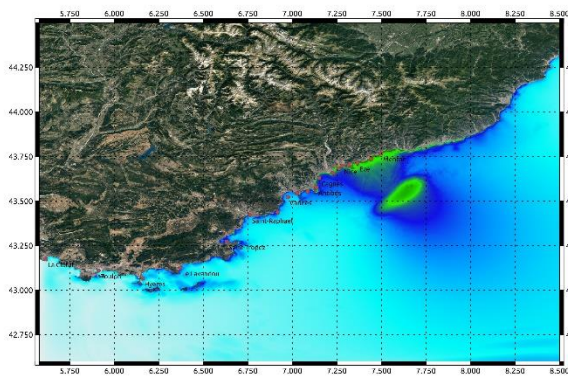
Glissement :

Glissement max (m) : 3.82

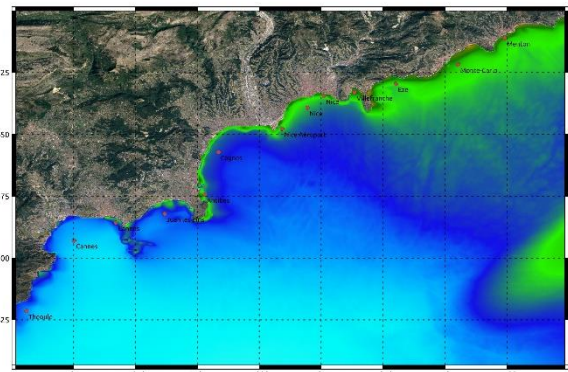


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

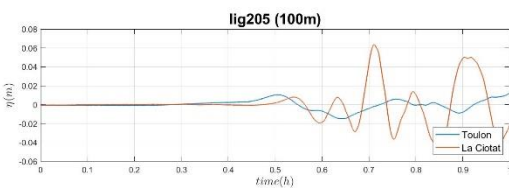
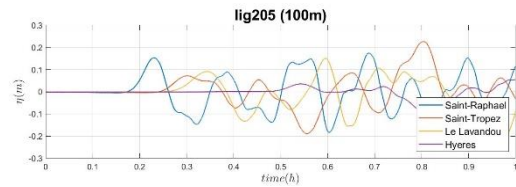
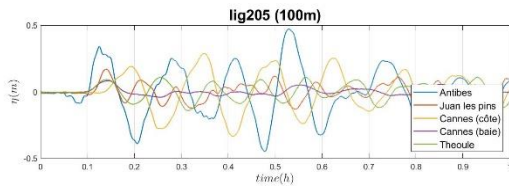
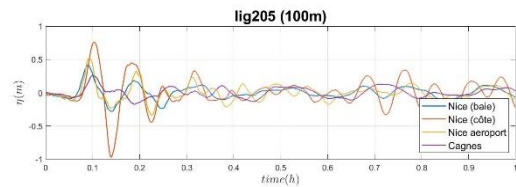
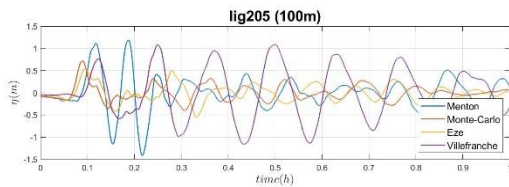


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



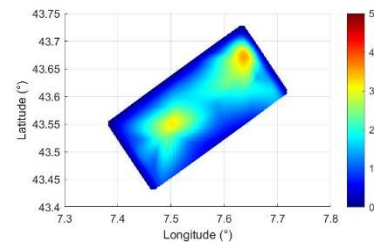
Scénario : lig206

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.55 ; 43.58 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

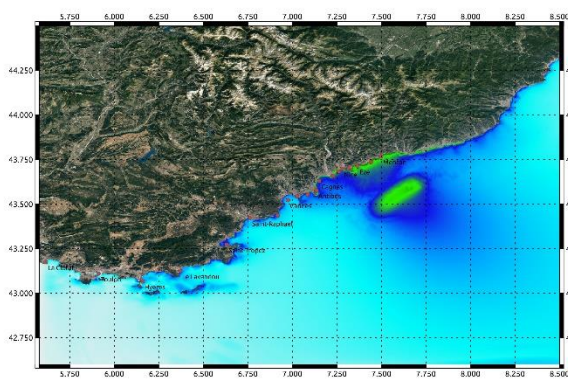
Glissement :

Glissement max (m) : 3.65

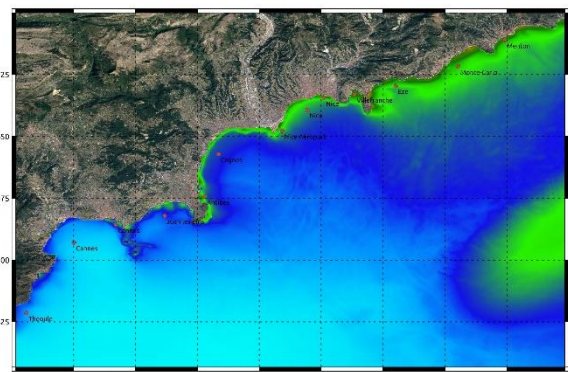


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

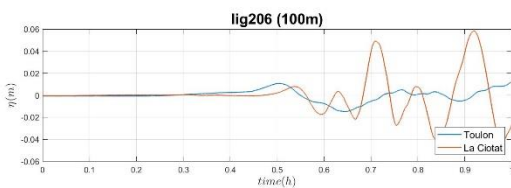
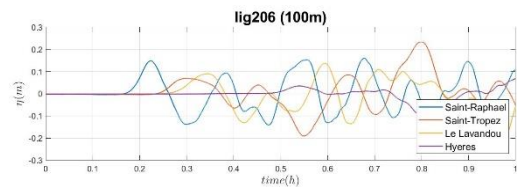
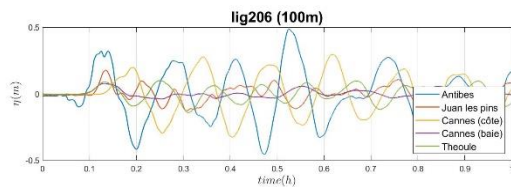
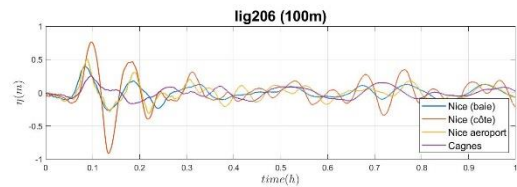
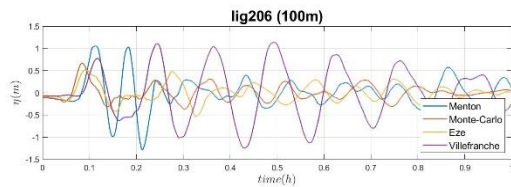


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



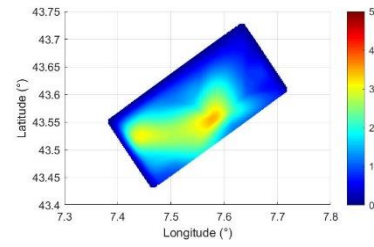
Scénario : lig207

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.55 ; 43.58 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

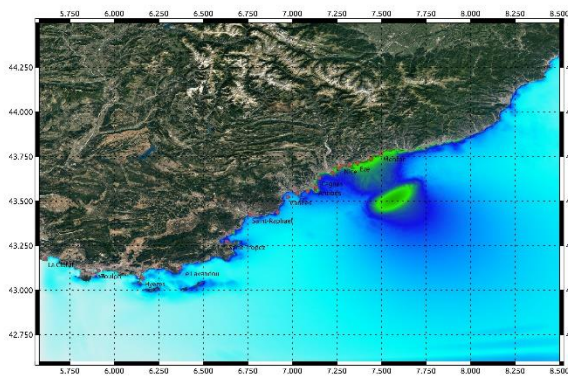
Glissement :

Glissement max (m) : 3.65

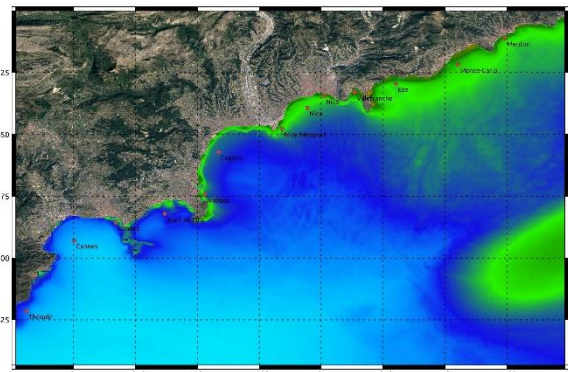


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

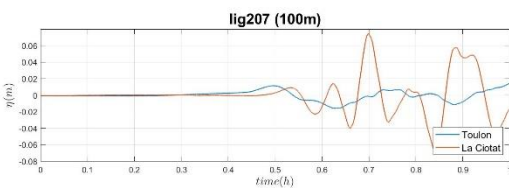
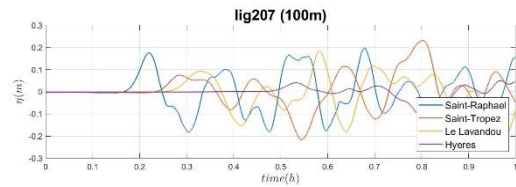
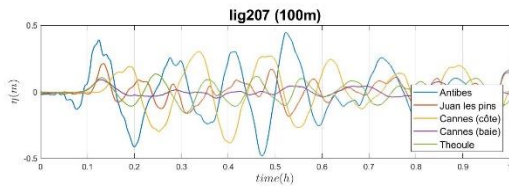
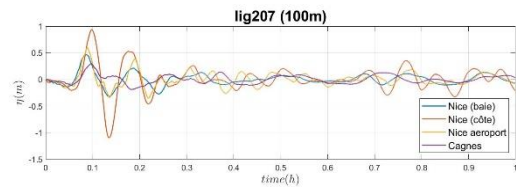
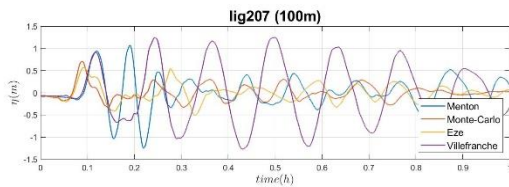


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



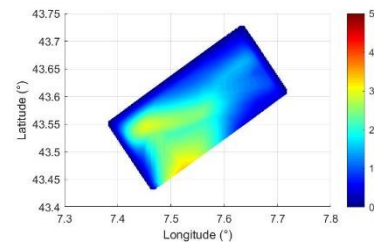
Scénario : lig208

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.55 ; 43.58 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

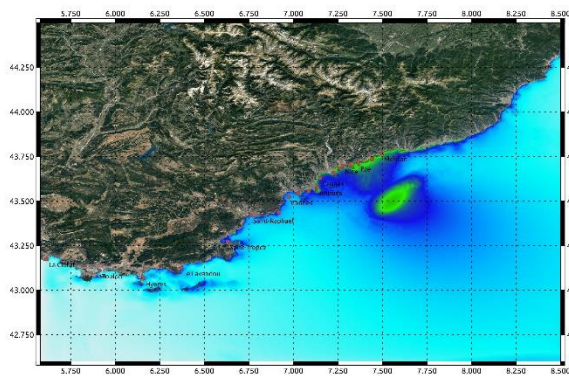
Glissement :

Glissement max (m) : 3.35

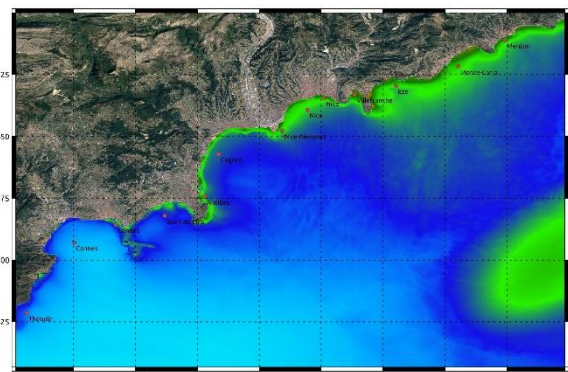


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

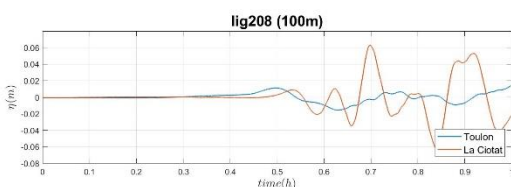
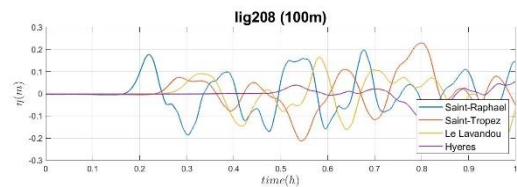
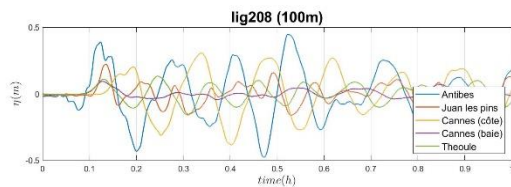
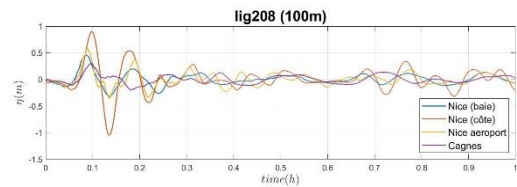
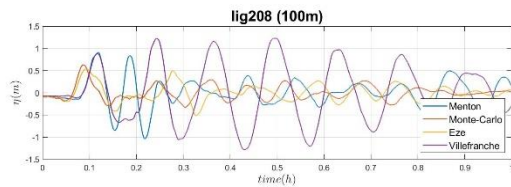


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



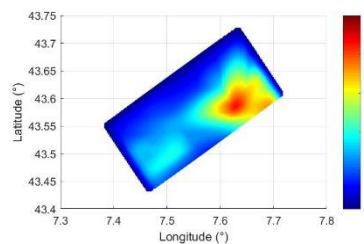
Scénario : lig209

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.55 ; 43.58 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

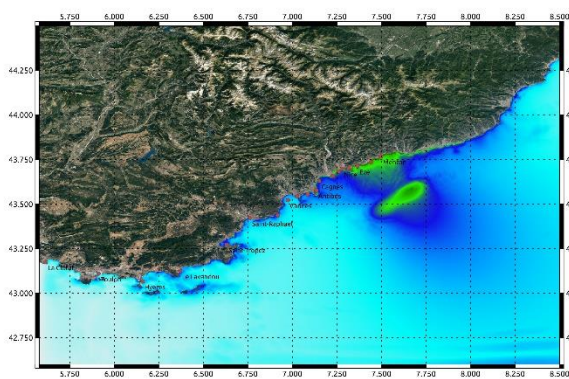
Glissement :

Glissement max (m) : 4.45

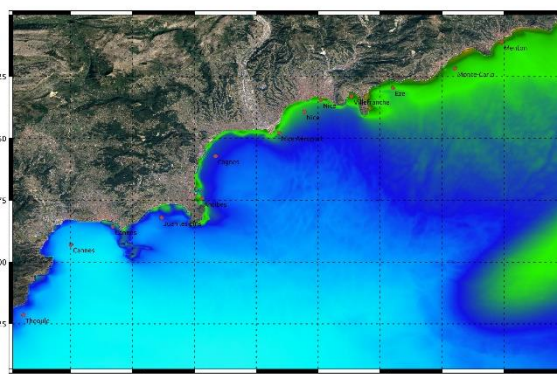


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

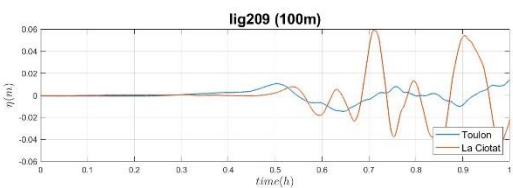
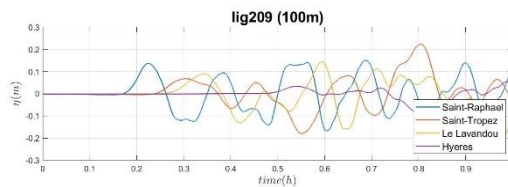
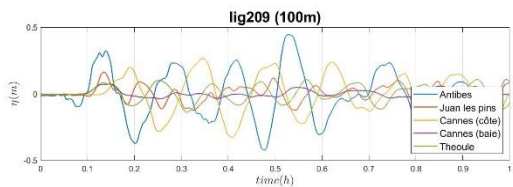
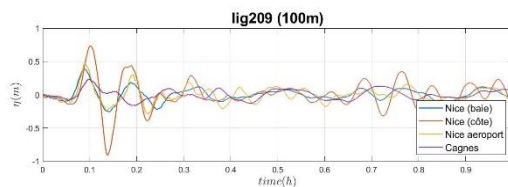
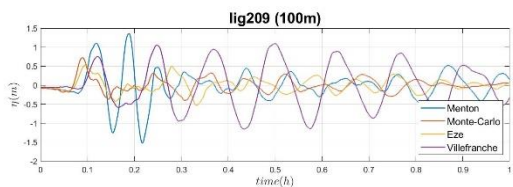


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



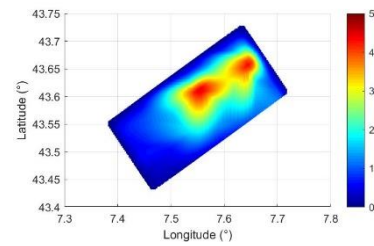
Scénario : lig210

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.55 ; 43.58 Azimut (°N) : 235
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 35 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 17 Magnitude : 6.9

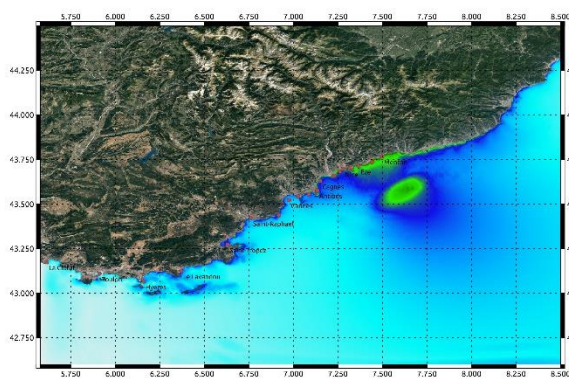
Glissement :

Glissement max (m) : 4.68

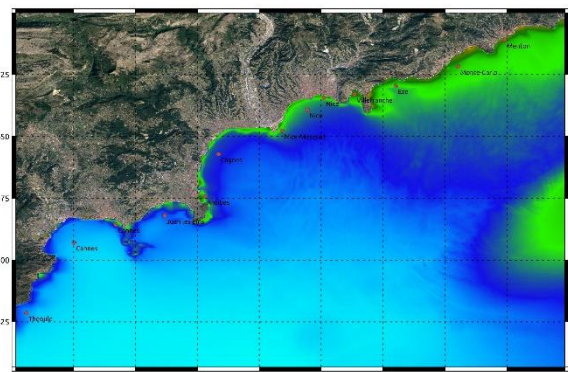


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

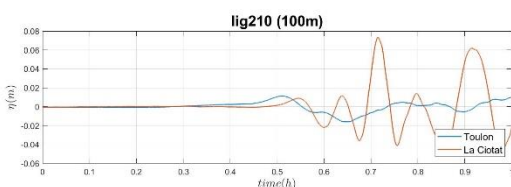
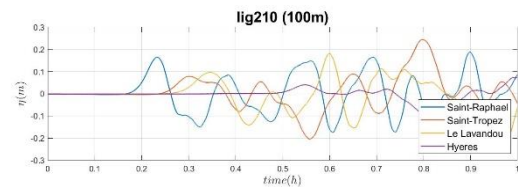
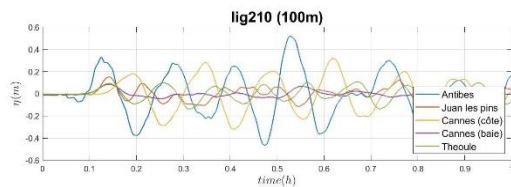
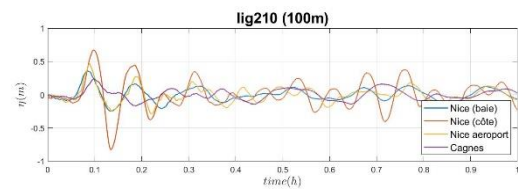
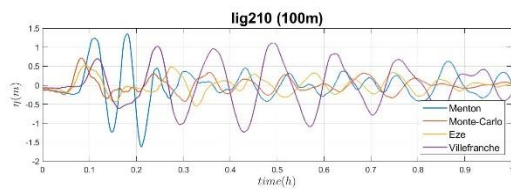


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



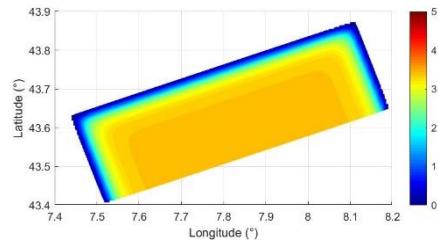
Scénario : lig301

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.815 ; 43.64 Azimut (°N) : 250
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 80 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 27 Magnitude : 7.5

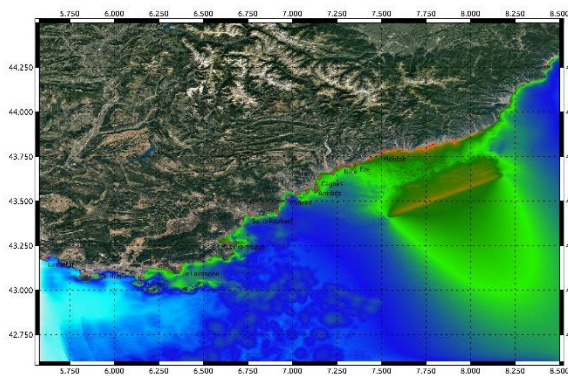
Glissement :

Glissement moyen (m) : 3.38

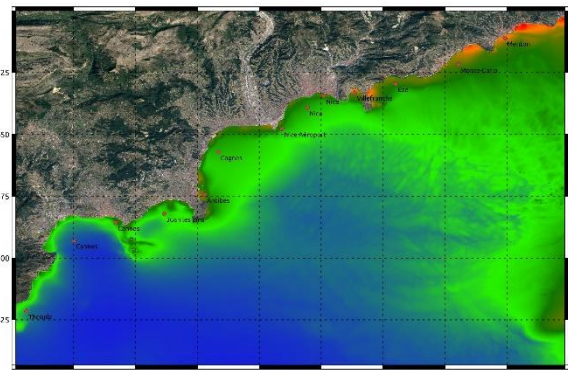


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

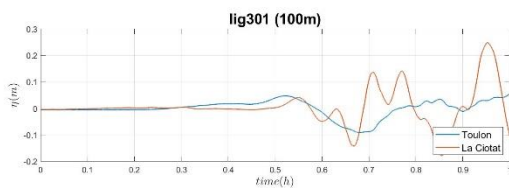
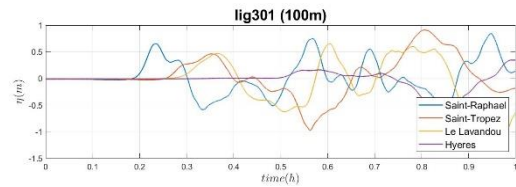
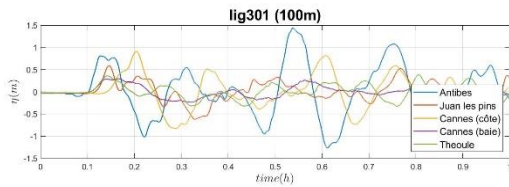
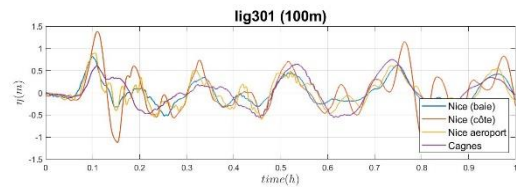
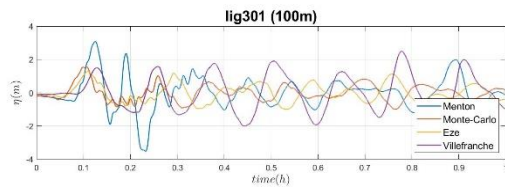


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



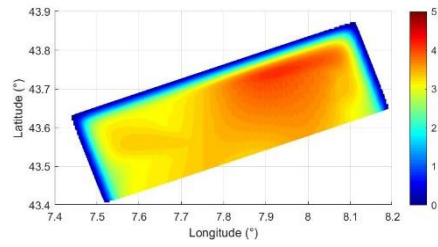
Scénario : lig302

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.815 ; 43.64 Azimut (°N) : 250
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 80 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 27 Magnitude : 7.5

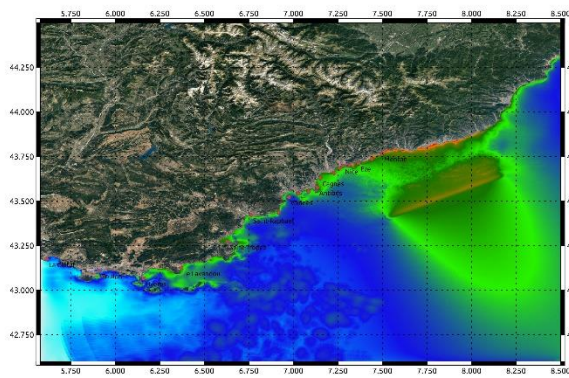
Glissement :

Glissement max (m) : 4.19

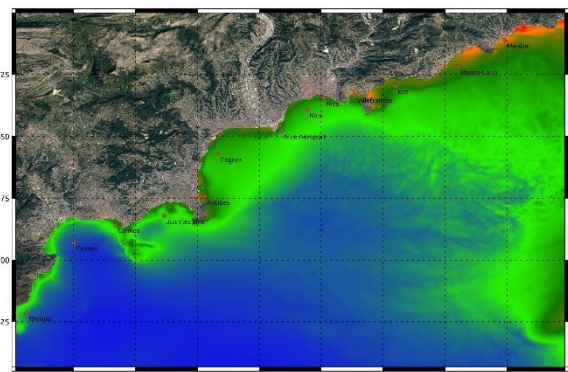


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

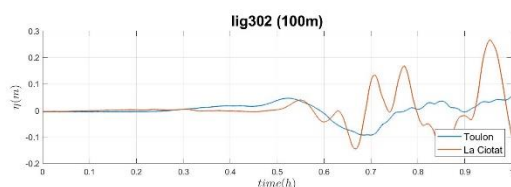
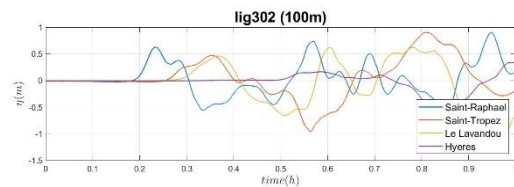
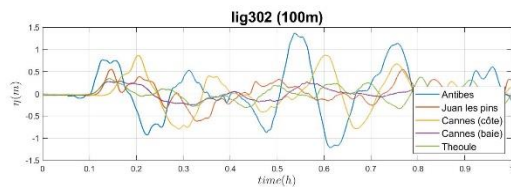
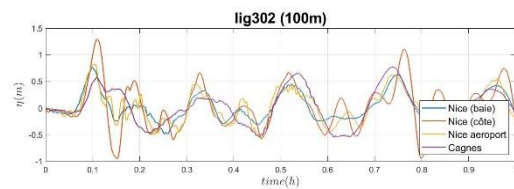
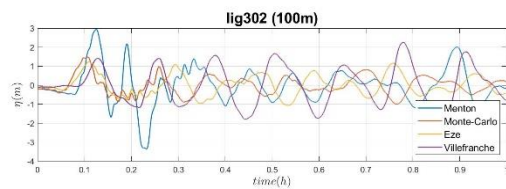


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



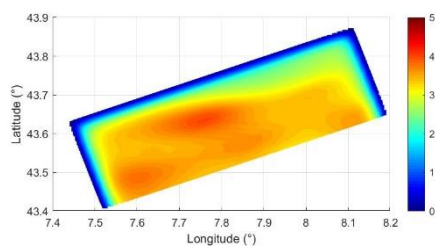
Scénario : lig303

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.815 ; 43.64 Azimut (°N) : 250
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 80 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 27 Magnitude : 7.5

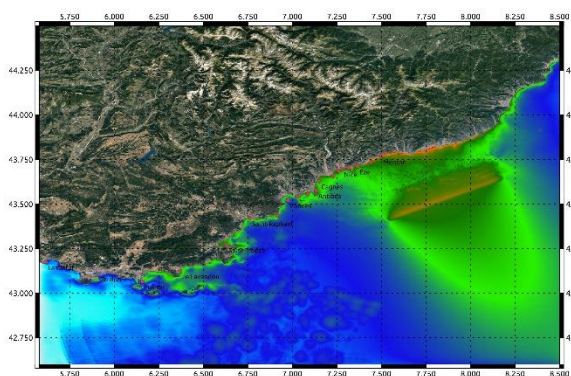
Glissement :

Glissement max (m) : 4.03

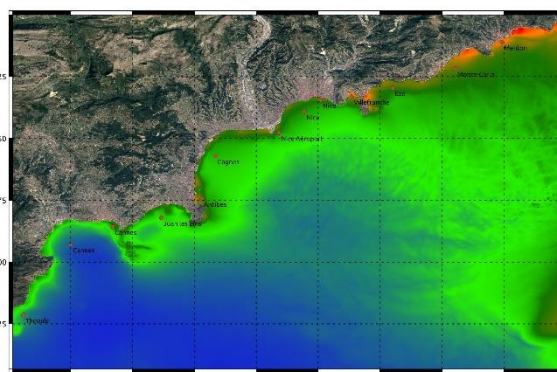


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

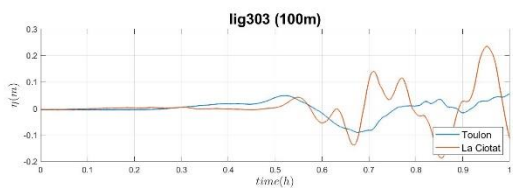
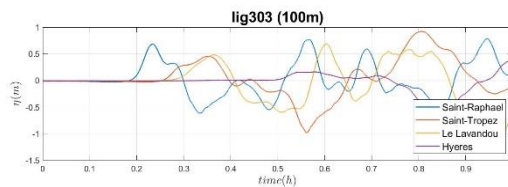
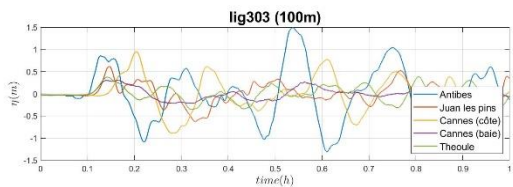
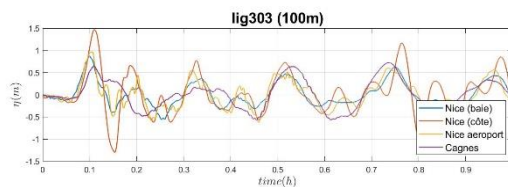
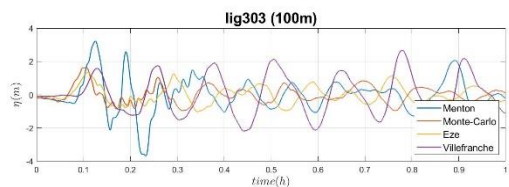


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



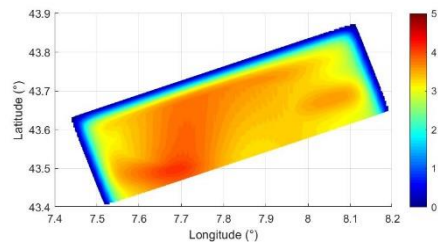
Scénario : lig304

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.815 ; 43.64 Azimut (°N) : 250
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 80 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 27 Magnitude : 7.5

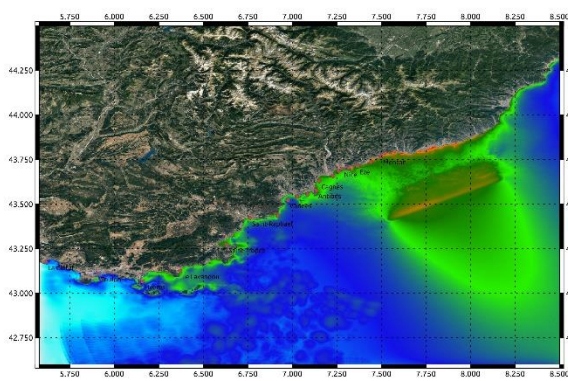
Glissement :

Glissement max (m) : 4.16

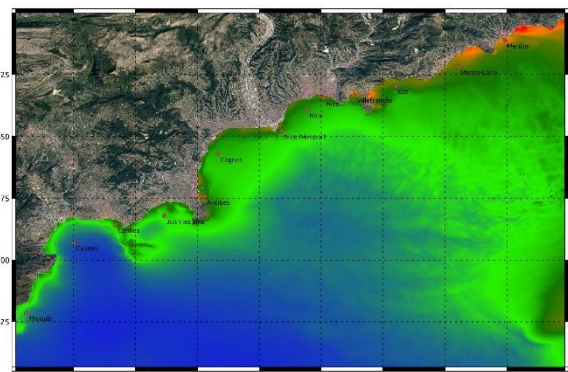


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

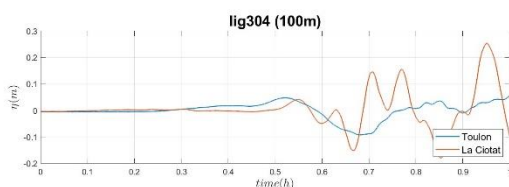
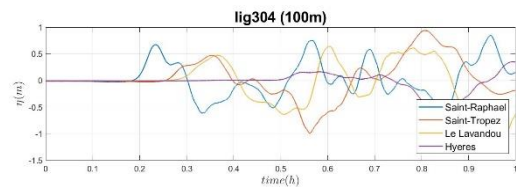
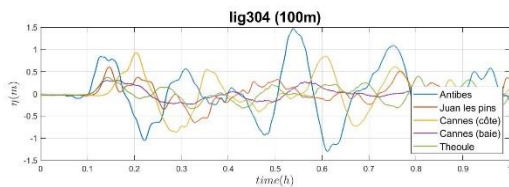
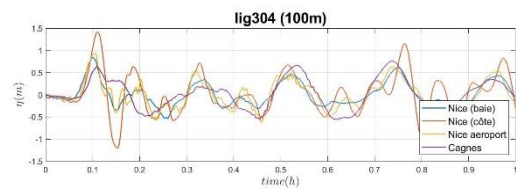
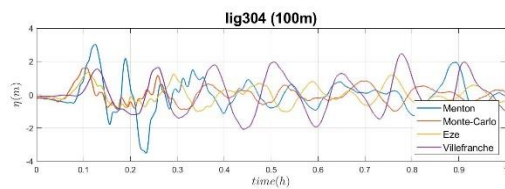


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



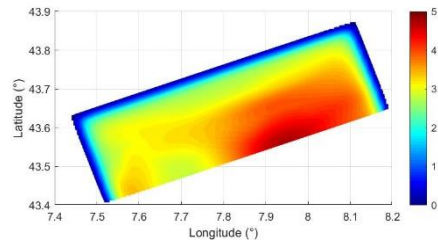
Scénario : lig305

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.815 ; 43.64 Azimut (°N) : 250
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 80 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 27 Magnitude : 7.5

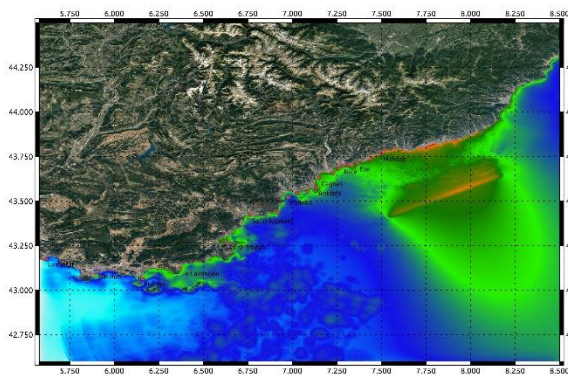
Glissement :

Glissement max (m) : 4.71

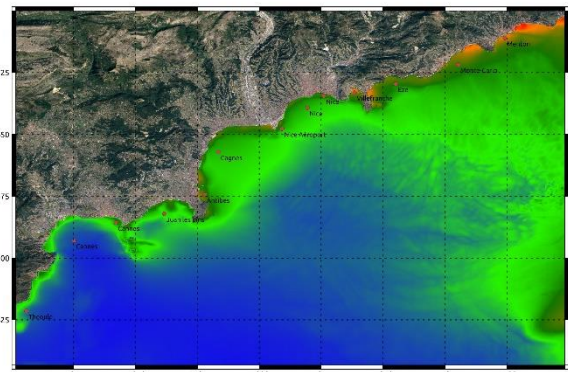


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

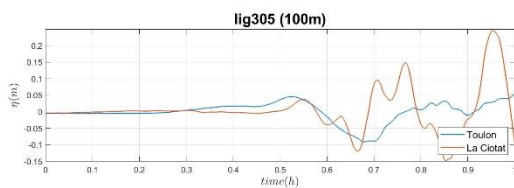
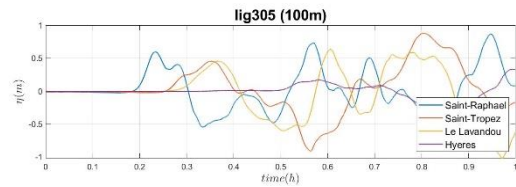
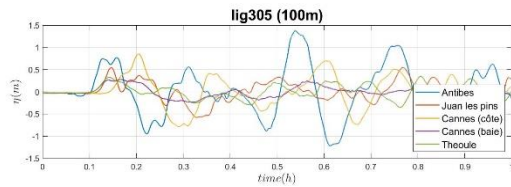
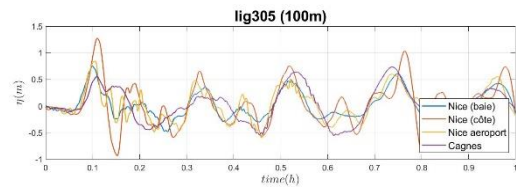
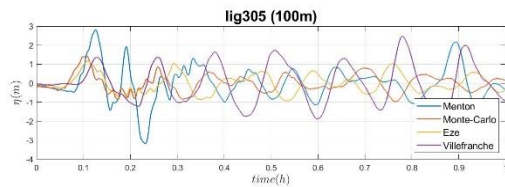


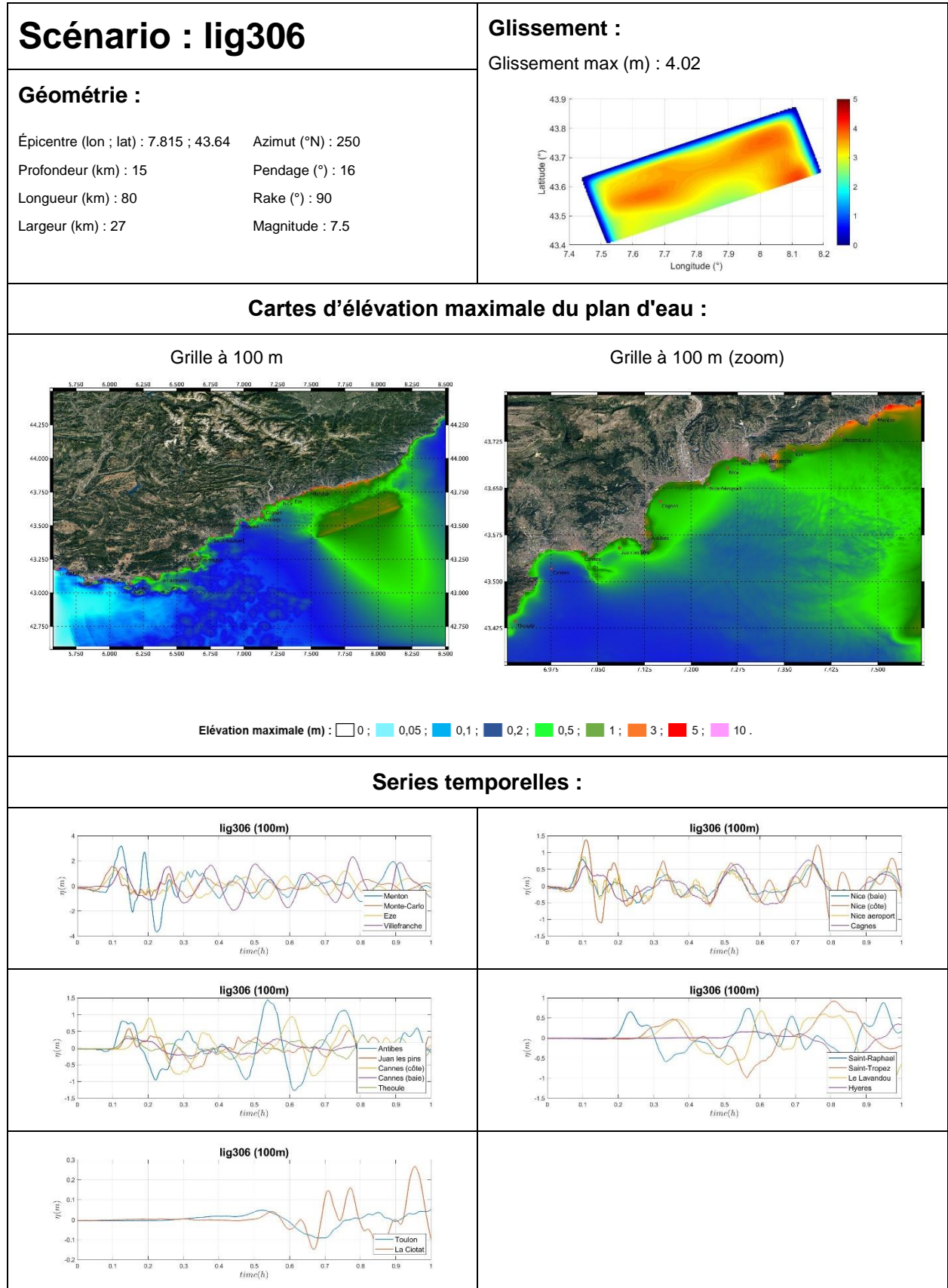
Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :





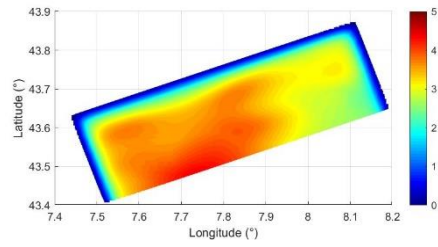
Scénario : lig307

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.815 ; 43.64 Azimut (°N) : 250
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 80 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 27 Magnitude : 7.5

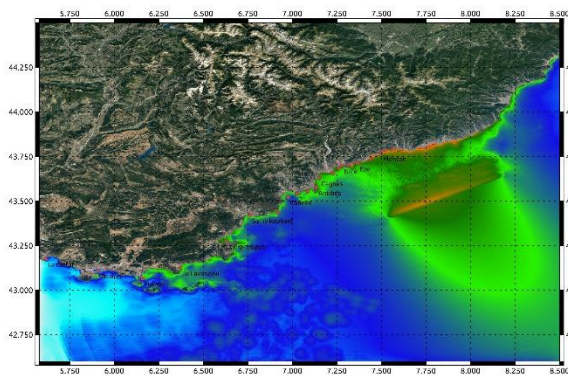
Glissement :

Glissement max (m) : 4.37

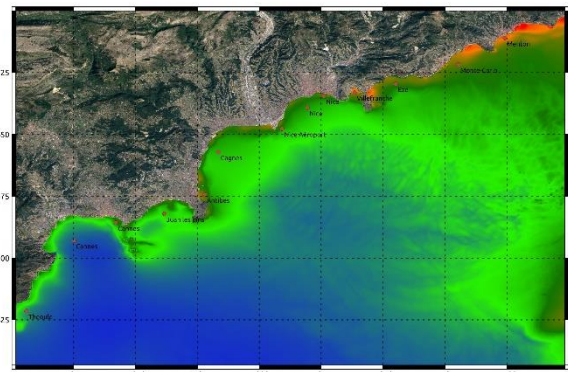


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

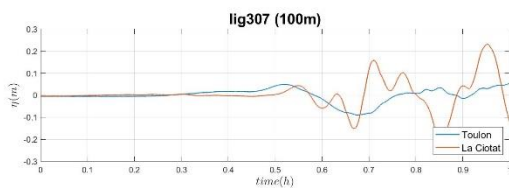
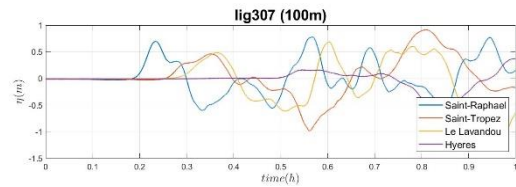
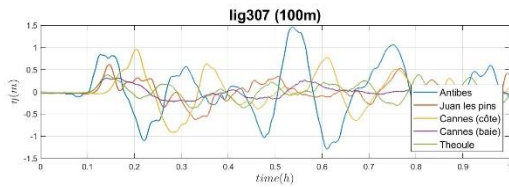
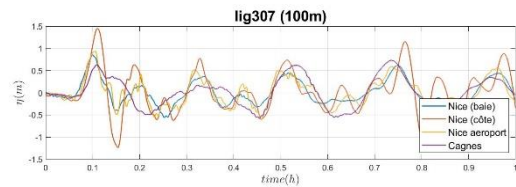
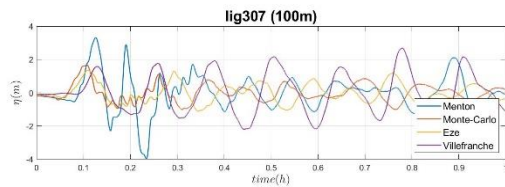


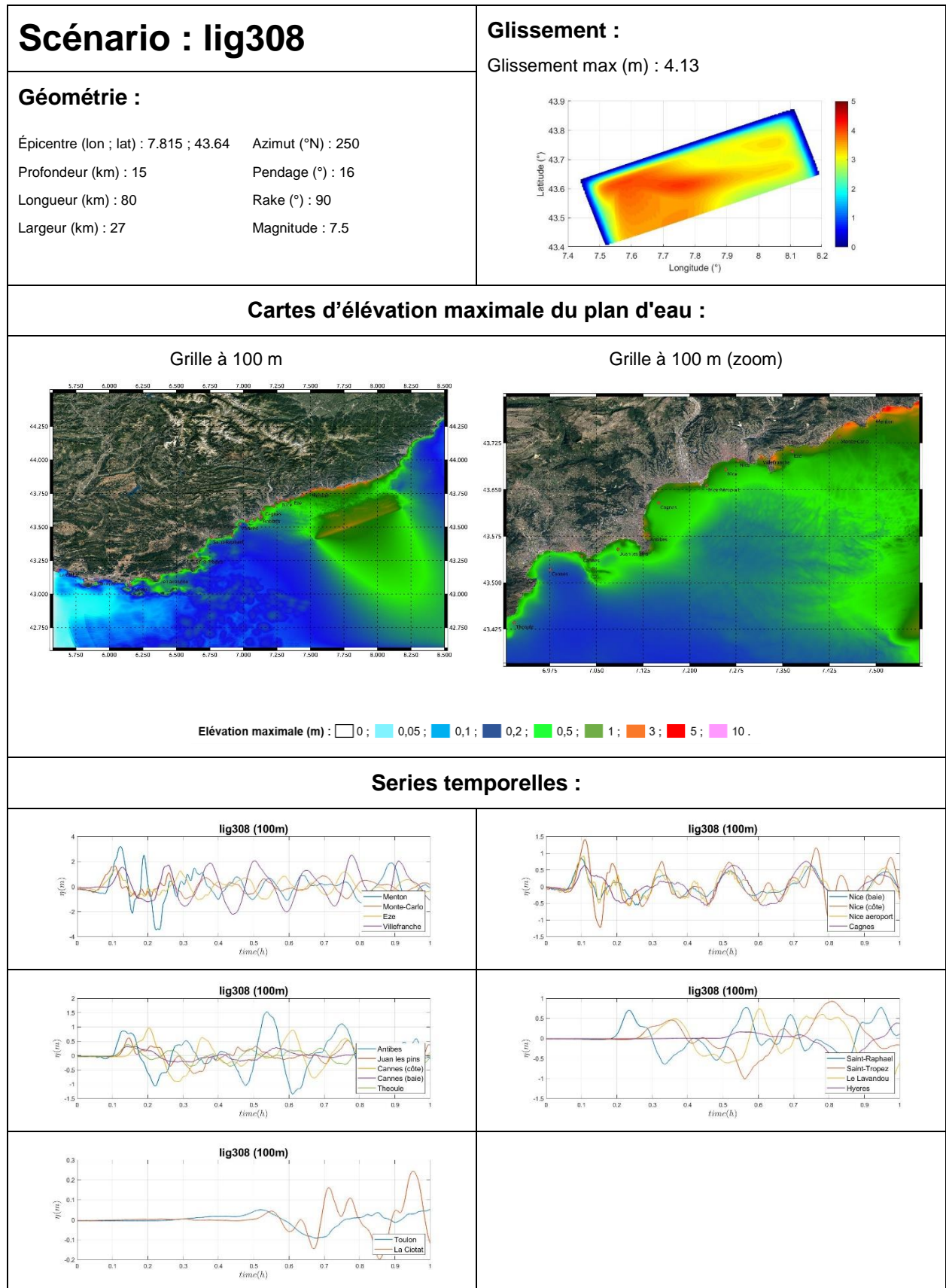
Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :





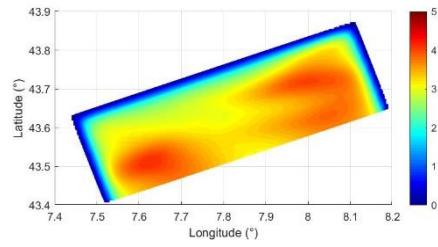
Scénario : lig309

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.815 ; 43.64 Azimut (°N) : 250
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 80 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 27 Magnitude : 7.5

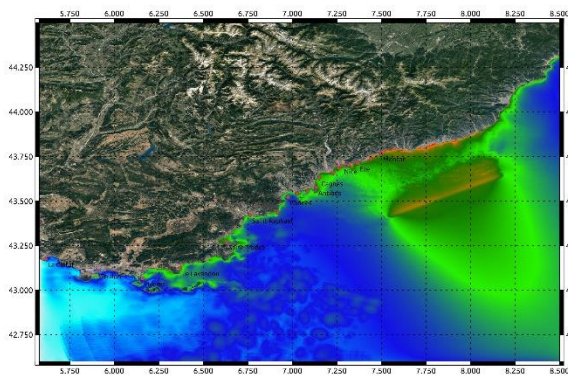
Glissement :

Glissement max (m) : 4.16

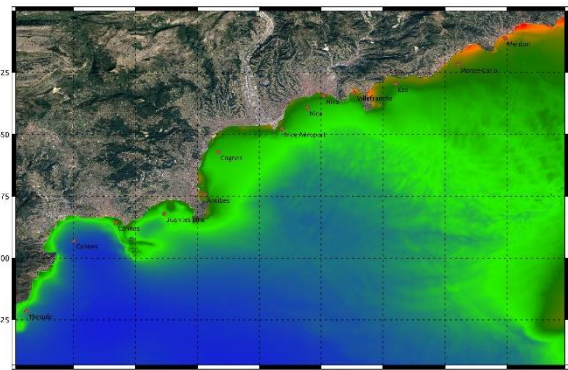


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

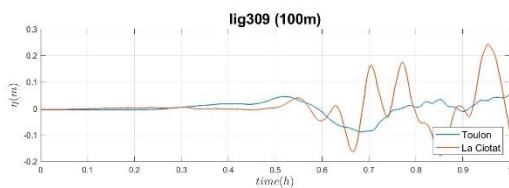
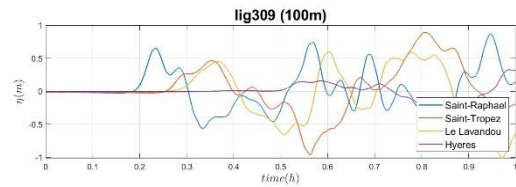
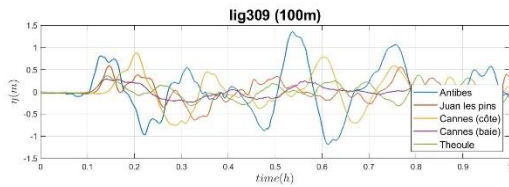
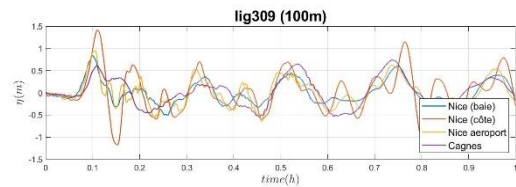
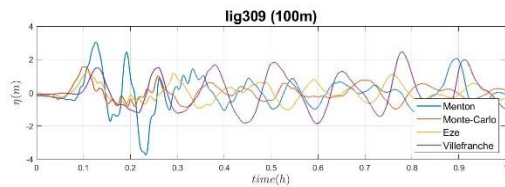


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



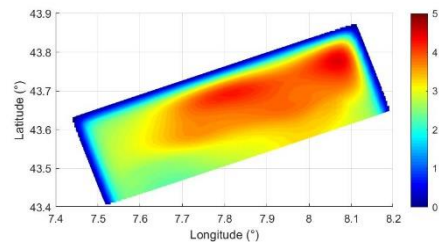
Scénario : lig310

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.815 ; 43.64 Azimut (°N) : 250
 Profondeur (km) : 15 Pendage (°) : 16
 Longueur (km) : 80 Rake (°) : 90
 Largeur (km) : 27 Magnitude : 7.5

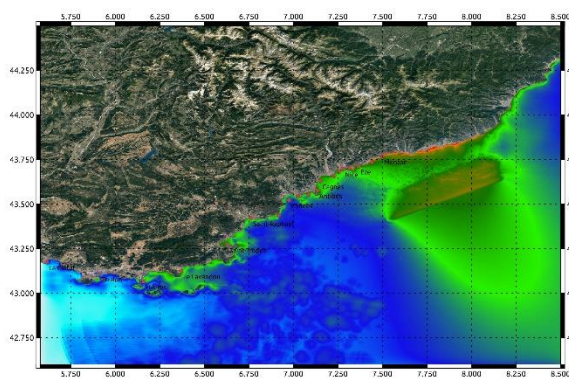
Glissement :

Glissement max (m) : 4.55

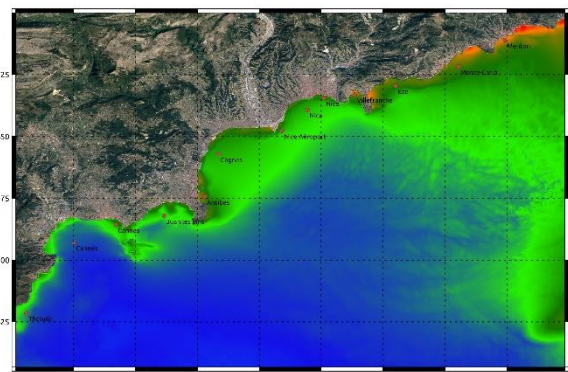


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

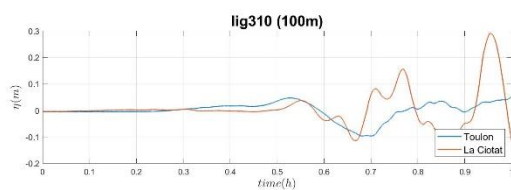
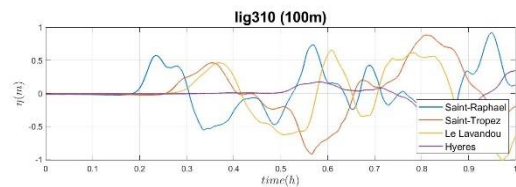
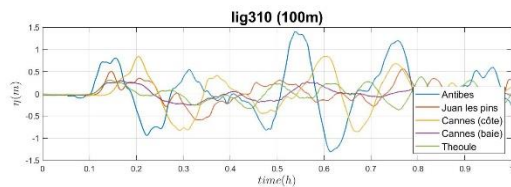
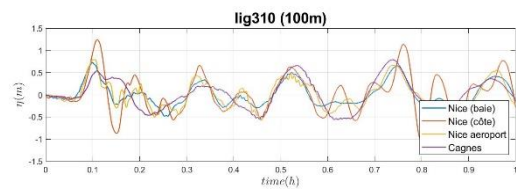
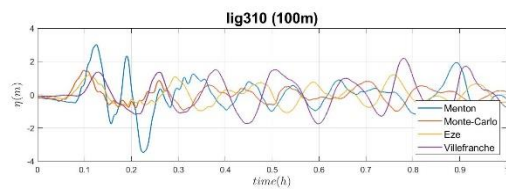


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



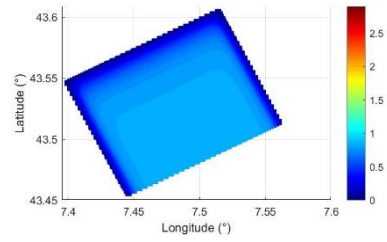
Scénario : lig401

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.48 ; 43.53 Azimut (°N) : 243
 Profondeur (km) : 11 Pendage (°) : 41
 Longueur (km) : 15 Rake (°) : 74
 Largeur (km) : 12 Magnitude : 6.5

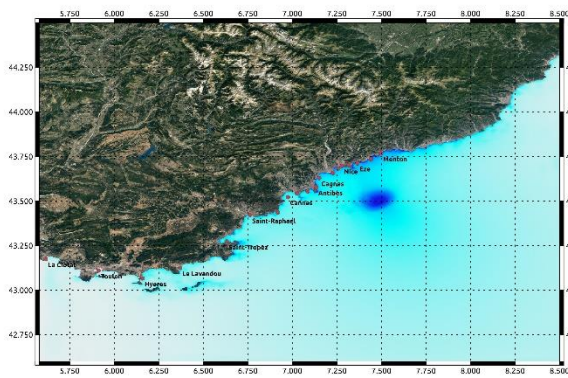
Glissement :

Glissement moyen (m) : 0.83

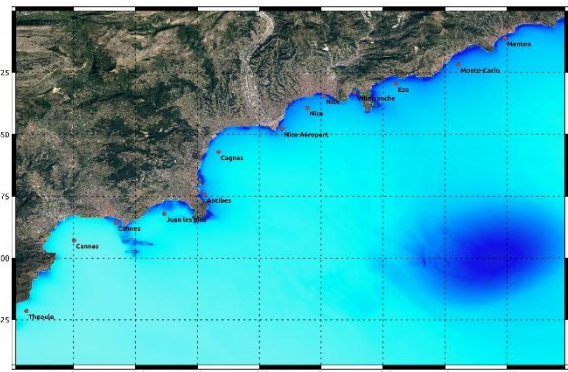


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

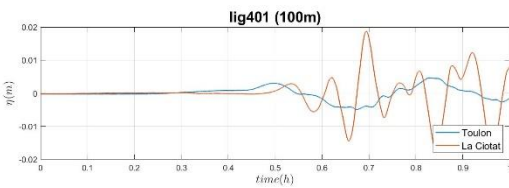
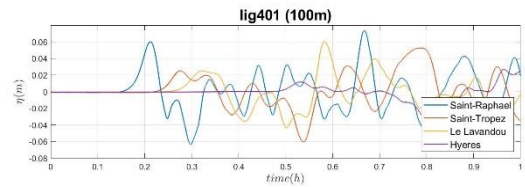
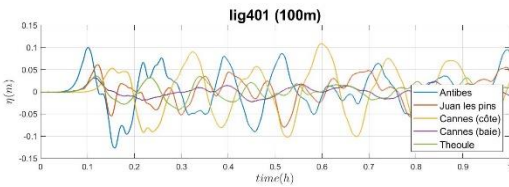
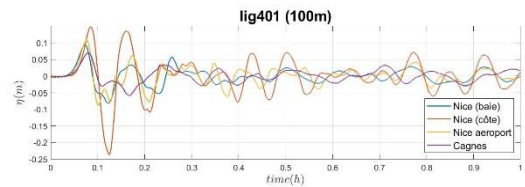
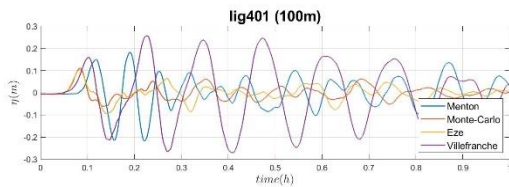


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



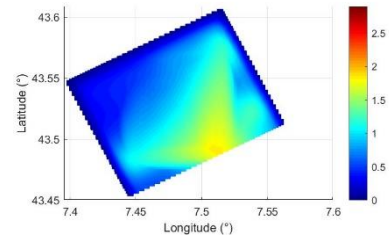
Scénario : lig402

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.48 ; 43.53 Azimut (°N) : 243
 Profondeur (km) : 11 Pendage (°) : 41
 Longueur (km) : 15 Rake (°) : 74
 Largeur (km) : 12 Magnitude : 6.5

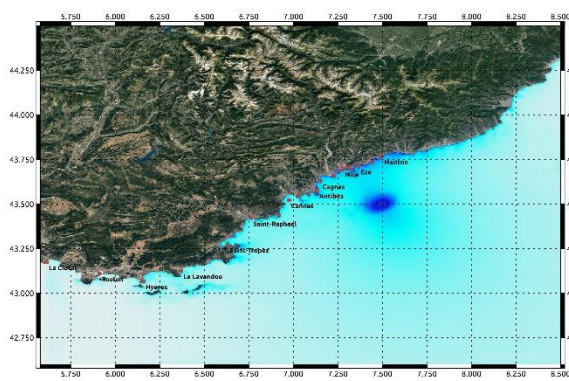
Glissement :

Glissement max (m) : 1.88

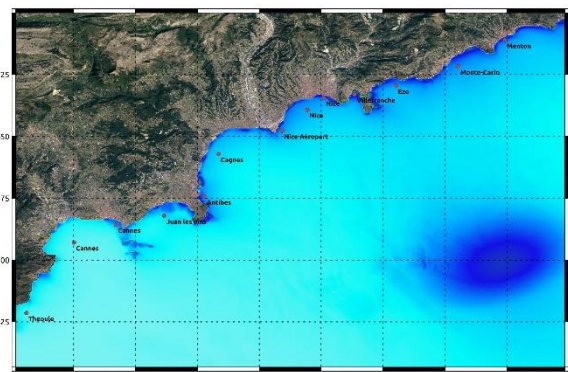


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

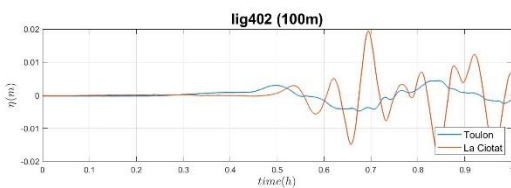
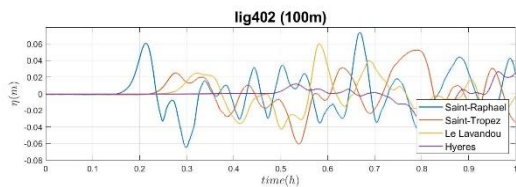
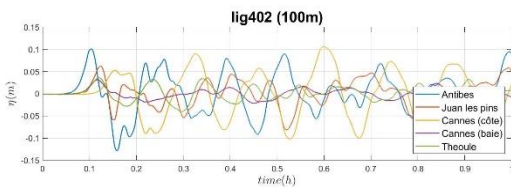
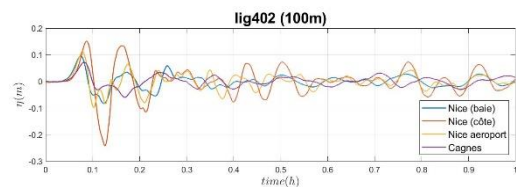
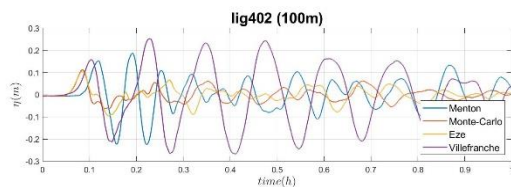


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



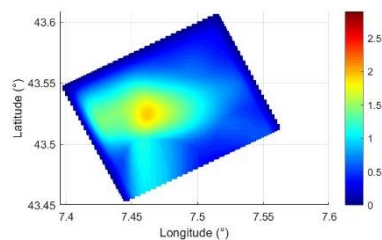
Scénario : lig403

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.48 ; 43.53 Azimut (°N) : 243
 Profondeur (km) : 11 Pendage (°) : 41
 Longueur (km) : 15 Rake (°) : 74
 Largeur (km) : 12 Magnitude : 6.5

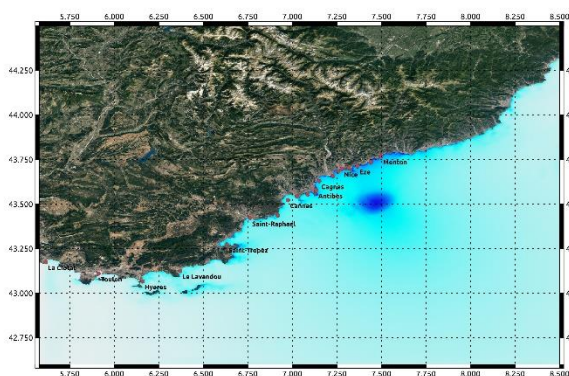
Glissement :

Glissement max (m) : 1.98

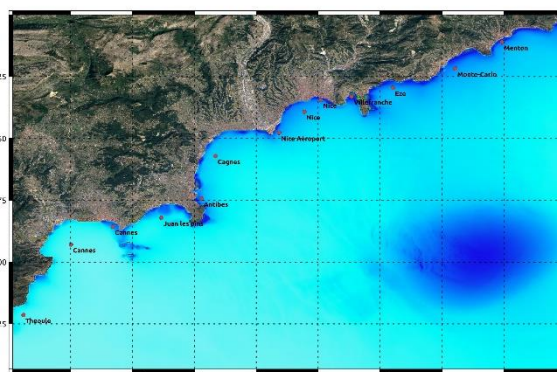


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

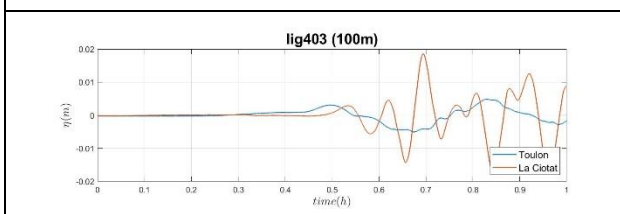
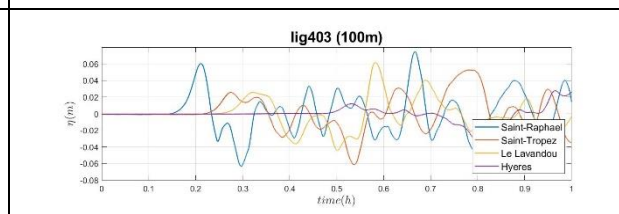
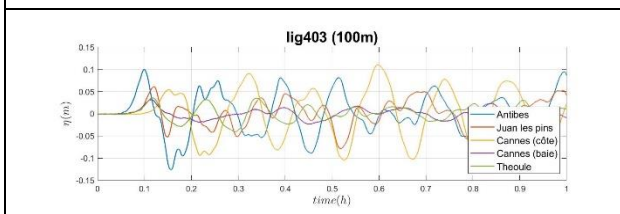
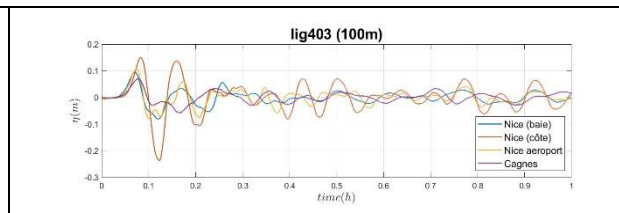
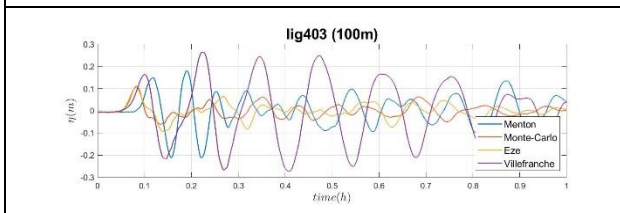


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



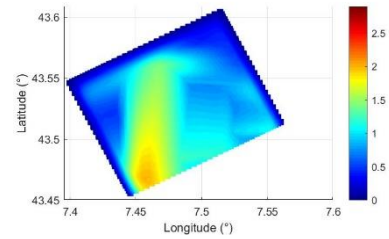
Scénario : lig404

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.48 ; 43.53 Azimut (°N) : 243
 Profondeur (km) : 11 Pendage (°) : 41
 Longueur (km) : 15 Rake (°) : 74
 Largeur (km) : 12 Magnitude : 6.5

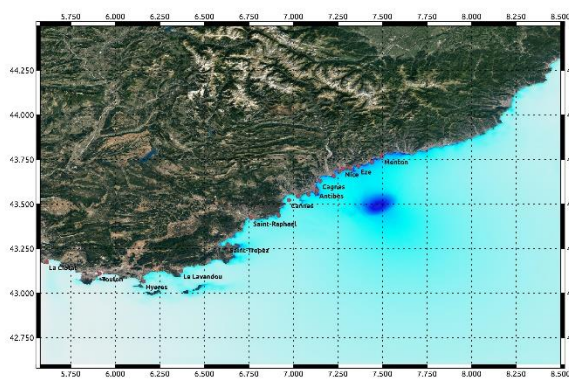
Glissement :

Glissement max (m) : 2.03

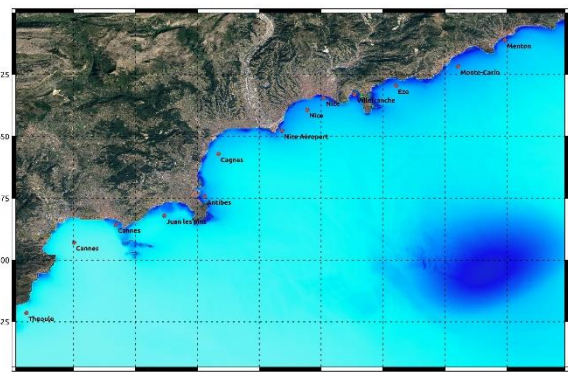


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

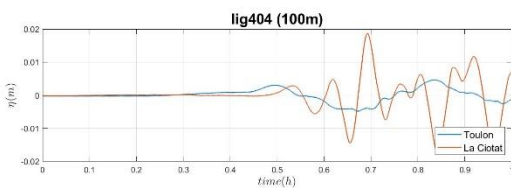
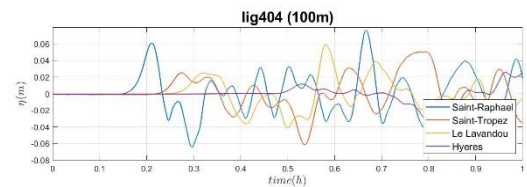
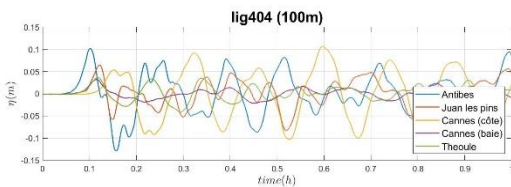
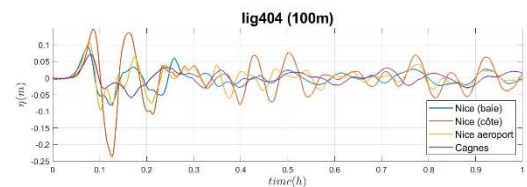
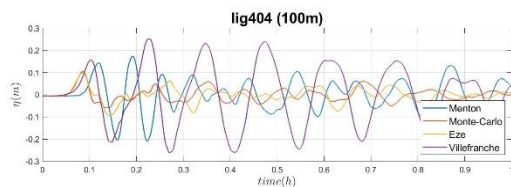


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



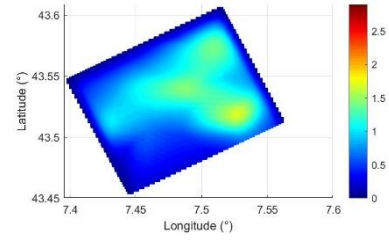
Scénario : lig405

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.48 ; 43.53 Azimut (°N) : 243
 Profondeur (km) : 11 Pendage (°) : 41
 Longueur (km) : 15 Rake (°) : 74
 Largeur (km) : 12 Magnitude : 6.5

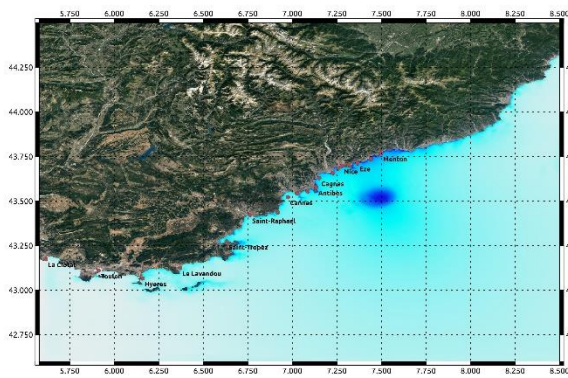
Glissement :

Glissement max (m) : 1.73

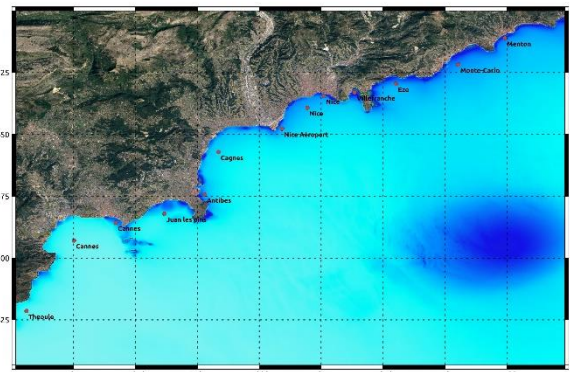


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

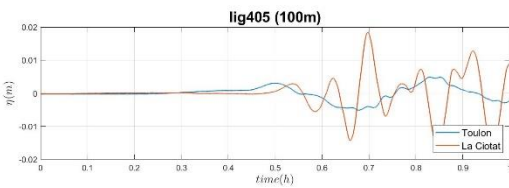
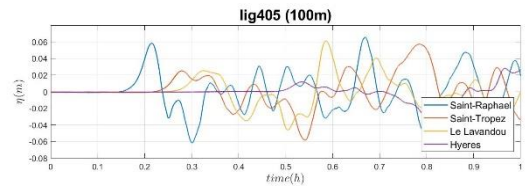
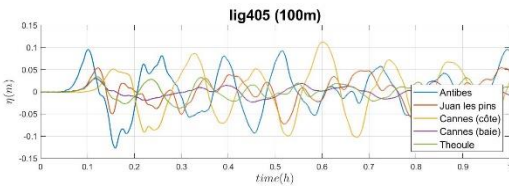
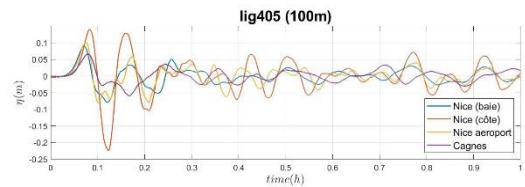
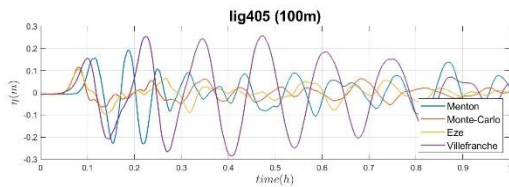


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



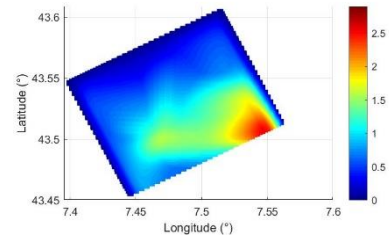
Scénario : lig406

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.48 ; 43.53 Azimut (°N) : 243
 Profondeur (km) : 11 Pendage (°) : 41
 Longueur (km) : 15 Rake (°) : 74
 Largeur (km) : 12 Magnitude : 6.5

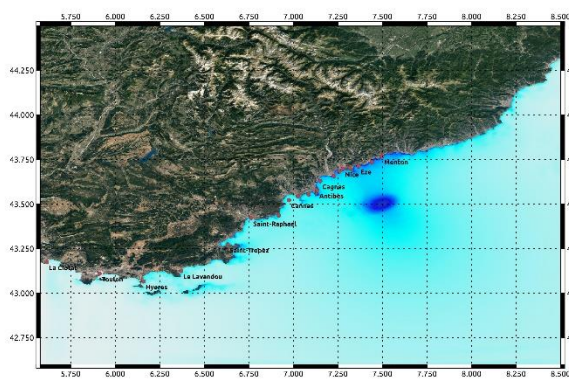
Glissement :

Glissement max (m) : 2.57

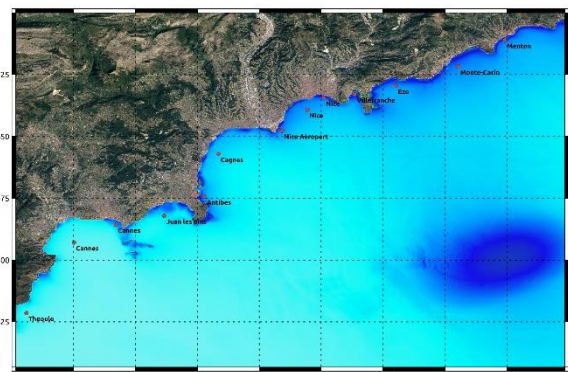


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

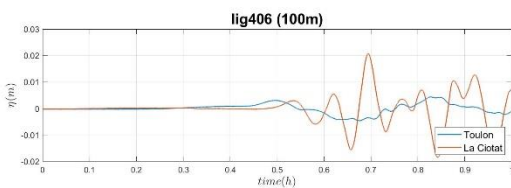
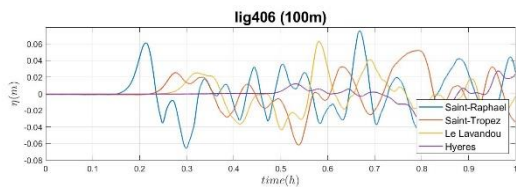
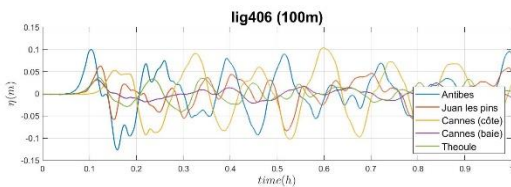
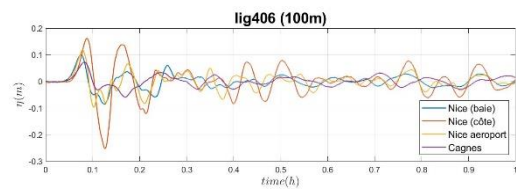
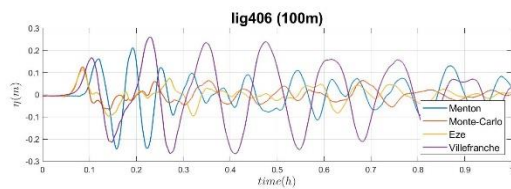


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



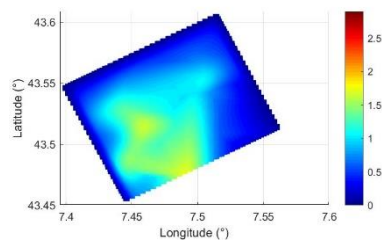
Scénario : lig407

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.48 ; 43.53 Azimut (°N) : 243
 Profondeur (km) : 11 Pendage (°) : 41
 Longueur (km) : 15 Rake (°) : 74
 Largeur (km) : 12 Magnitude : 6.5

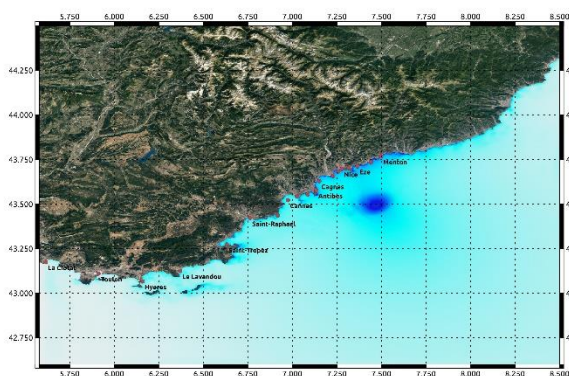
Glissement :

Glissement max (m) : 1.76

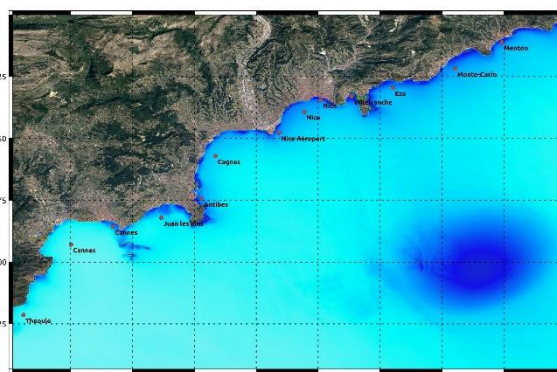


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

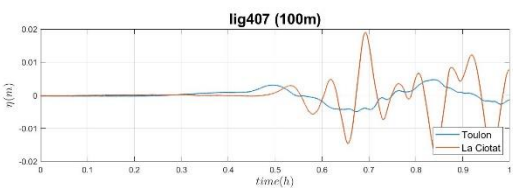
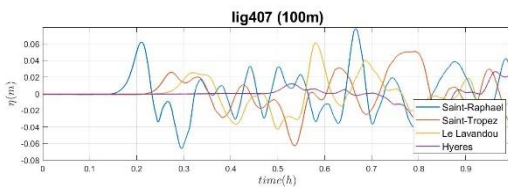
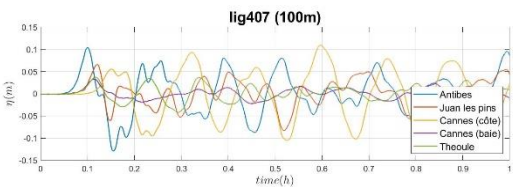
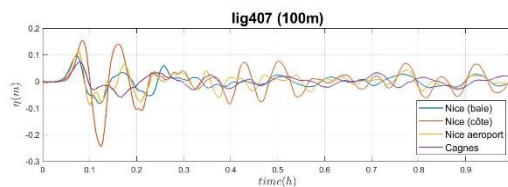
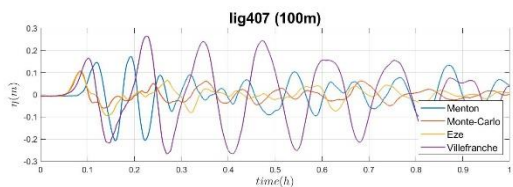


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



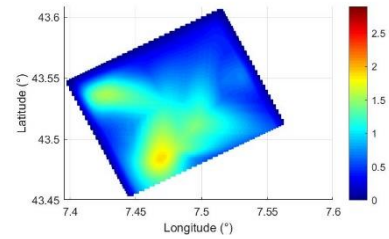
Scénario : lig408

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.48 ; 43.53 Azimut (°N) : 243
 Profondeur (km) : 11 Pendage (°) : 41
 Longueur (km) : 15 Rake (°) : 74
 Largeur (km) : 12 Magnitude : 6.5

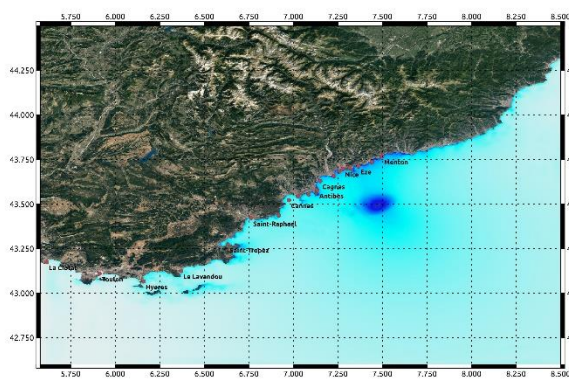
Glissement :

Glissement max (m) : 3.65

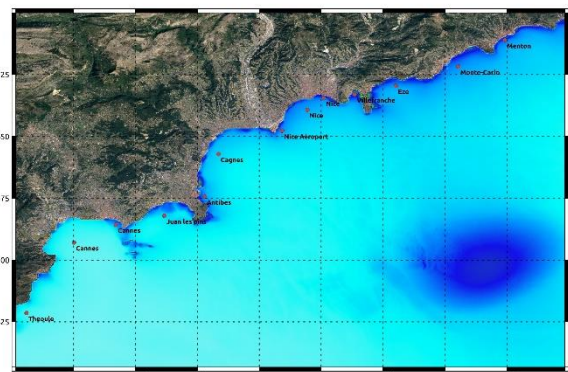


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

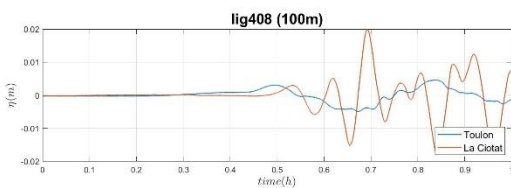
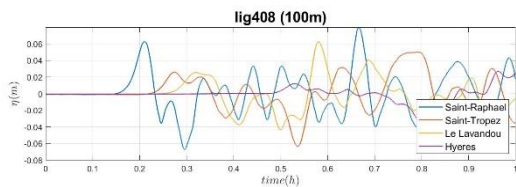
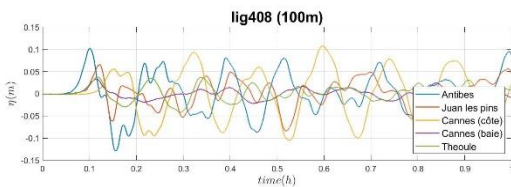
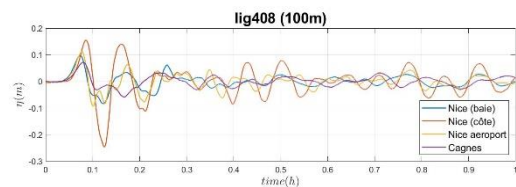
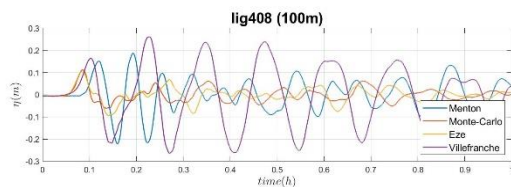


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



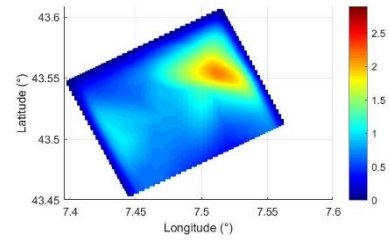
Scénario : lig409

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.48 ; 43.53 Azimut (°N) : 243
 Profondeur (km) : 11 Pendage (°) : 41
 Longueur (km) : 15 Rake (°) : 74
 Largeur (km) : 12 Magnitude : 6.5

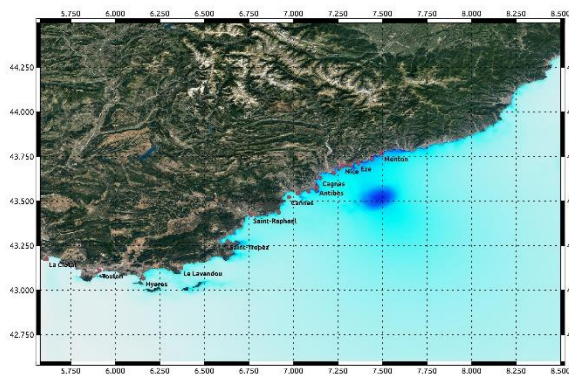
Glissement :

Glissement max (m) : 4.45

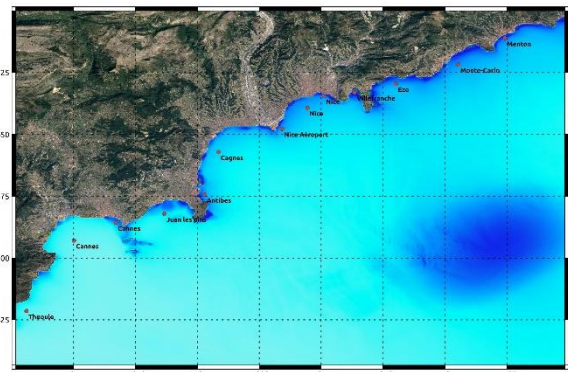


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

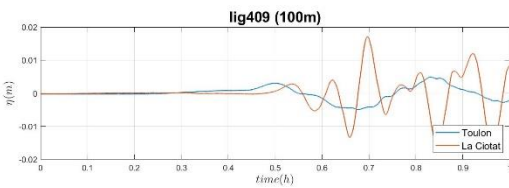
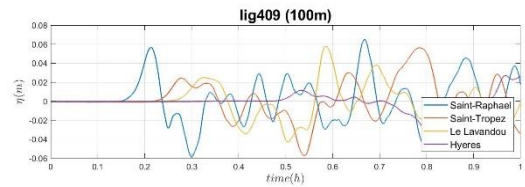
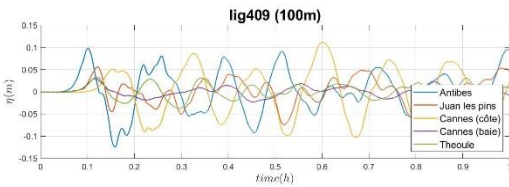
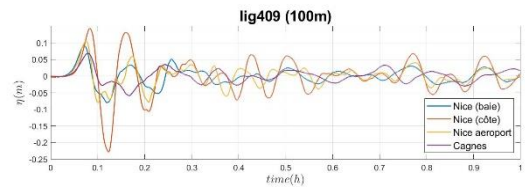
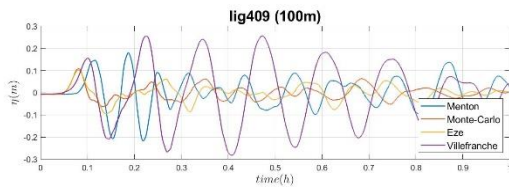


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :



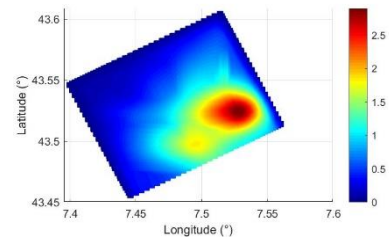
Scénario : lig410

Géométrie :

Épicentre (lon ; lat) : 7.48 ; 43.53 Azimut (°N) : 243
 Profondeur (km) : 11 Pendage (°) : 41
 Longueur (km) : 15 Rake (°) : 74
 Largeur (km) : 12 Magnitude : 6.5

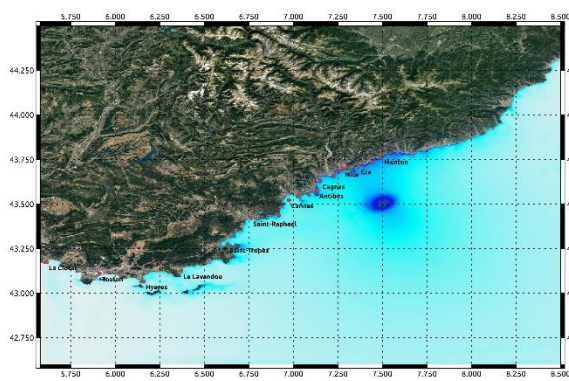
Glissement :

Glissement max (m) : 4.68

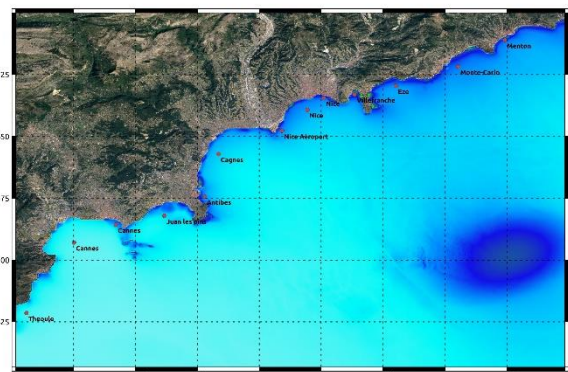


Cartes d'élévation maximale du plan d'eau :

Grille à 100 m

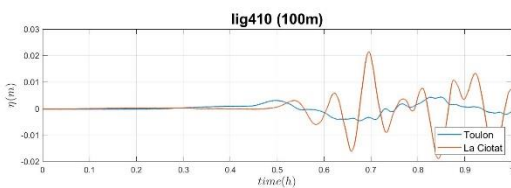
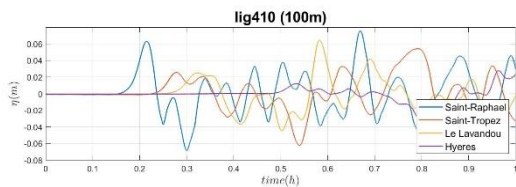
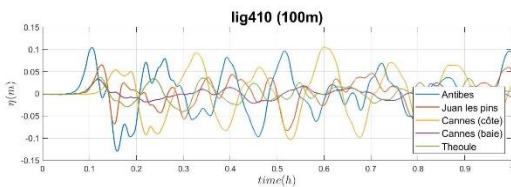
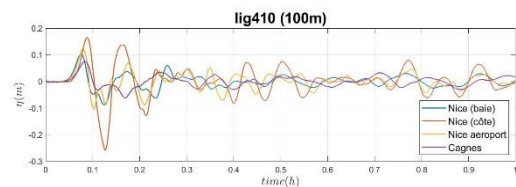
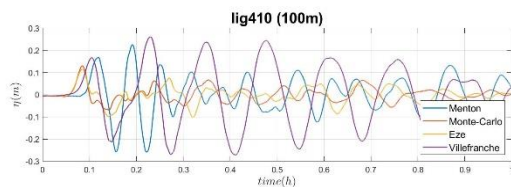


Grille à 100 m (zoom)



Élévation maximale (m) : 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10 .

Séries temporelles :





Géosciences pour une Terre durable

brgm

**Centre scientifique et technique
Direction Risques et Prévention**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France
Tel. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr

Direction régionale Provence-Alpes-Côte d'Azur

117 avenue de Luminy
BP168
13276 – Marseille Cedex 9 – France
Tél. : 04 91 17 74 77