

ETUDE DE HOULE POUR LA DETERMINATION DES DEBITS DE FRANCHISSEMENTS SUR LE LITTORAL DE PERROS ET LOUANNEC.



INFORMATIONS GENERALES SUR LE DOCUMENT

Contact	CASAGEC INGENIERIE 18 rue Maryse Bastié Z.A. de Maignon 64600 Anglet - FRANCE Tel : + 33 5 59 45 11 03 Web : http://www.casagec.fr
Titre du rapport	ETUDE DE HOULE POUR LA DETERMINATION DES DEBITS DE FRANCHISSEMENTS SUR LE LITTORAL DE PERROS ET LOUANNEC
Maître d'Ouvrage	Artélia
Auteur(s)	Julien BAILLS
Responsable du projet	Julien BAILLS – baills@casagec.fr
Rapport n°	CI-21023

SUIVI DU DOCUMENT

Rev	Date	Description	Rédigé par	Approuvé par
.				
00	28/07/2021	Rapport	JBS	DRY
01				
02				

TABLE DES MATIERES

1	Contexte.....	4
1.1	Contexte général	4
1.2	Plan de l'étude.....	4
2	Caractérisation des aléas naturels	5
2.1	Niveaux d'eau extrêmes	5
2.2	Etats de mer	9
2.3	Probabilité conjointe des événements extrêmes d'états de mer et de niveau marin	12
3	Outils et Modèle numériques	13
3.1	Modèle hydrodynamique TELEMAC2D-TOMAWAC	13
3.1.1	Emprise du modèle global.....	13
3.1.2	Calibration	13
3.2	Calculs des débits de Franchissements (Eurotop V2)	16
3.2.1	Formules de Franchissements (Eurotop V2)	16
3.2.2	Estimation des débits de franchissements pour les événements de tempête	17
4	Modélisation des scénarios de référence	22
4.1	Secteur 1 : Ploumanach	22
4.2	Secteur 2 : Trestraou – Trestrignel	23
4.3	Secteur 3 : Perros	24
4.4	Secteur 4 : Louannec	25

TABLE DES FIGURES

Figure 1. Position des 43 profils étudiés.	4
Figure 2. Période de retour des niveaux d'eau à Roscoff (Source : SHOM CETMEF 2012)	5
Figure 3. Carte de niveaux extrêmes de pleine mer « IGN69 » (Période de retour 10 ans) (Source : CETMEF 2012)	6
Figure 4. Carte de niveaux extrêmes de pleine mer « IGN69 » (Période de retour 20 ans) (Source : CETMEF 2012)	6
Figure 5. Carte de niveaux extrêmes de pleine mer « IGN69 » (Période de retour 50 ans) (Source : CETMEF 2012)	7
Figure 6. Carte de niveaux extrêmes de pleine mer « IGN69 » (Période de retour 100 ans) (Source : CETMEF 2012)	7
Figure 7. Localisation du point Bretagne_07 représentatif des données des états de mer du large	9
Figure 8. Rose des vagues	10
Figure 9. Diagramme bivarié (Tp, Hs).....	10
Figure 10. Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs - toutes directions (Source : BoBWA-X)....	11
Figure 11. Probabilité conjointe des événements extrêmes d'états de mer et de niveaux marins au niveau de Roscoff	12
Figure 12. Emprise du MNT maritime. L'échelle de couleur représente l'altitude (m NGF).	13
Figure 13. Validation de la marée astronomique (septembre 2020) au marégraphe de Roscoff)	14
Figure 14. Comparaison des résultats de modélisation et des mesures au marégraphe de Roscoff durant la tempête du 10/03/2008.	15
Figure 15. Comparaison des résultats de modélisation et des mesures au marégraphe de Roscoff durant la tempête du 03/03/2014.	16
Figure 16. Position des profils du secteur Ploumanach.	18
Figure 17. Position des profils du secteur Trestraou - Trestrignel.	19
Figure 18. Position des profils du secteur Perros.....	20
Figure 19. Position des profils du secteur Louannec.....	21

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Niveaux d'eau extrêmes à Roscoff et au droit de Perros pour différentes périodes de retour (Source Roscoff : CEREMA 2018)	7
Tableau 2. Résultats de l'analyse globale des houles (Source : BoBWA-X).....	11
Tableau 3. Pics de fortes houles historiques (de période de retour théorique supérieure à 10 ans) (Source : BoBWA-X).....	11
Tableau 4. Valeurs de coefficient de rugosité selon la nature de talus (Source : Eurotop II 2018)	17

1 CONTEXTE

1.1 CONTEXTE GENERAL

Les ouvrages littoraux permettent de protéger les zones à présence d'enjeux contre les submersions marines. La houle arrivant sur la zone côtière dissipe son énergie par le déferlement. Celui-ci provoque des franchissements des ouvrages par paquets de mer. Selon la morphologie de la plage et des ouvrages littoraux, ces débits peuvent être très importants et engendrer des inondations derrière les ouvrages.

Afin de permettre une cohérence entre le PPR et l'EDD, une étude de houle pour la détermination des débits de franchissements sur le littoral de Perros et Louannec a été mise en place.

43 profils sur les 2 communes ont été identifiés nécessitant une connaissance des débits de franchissements.

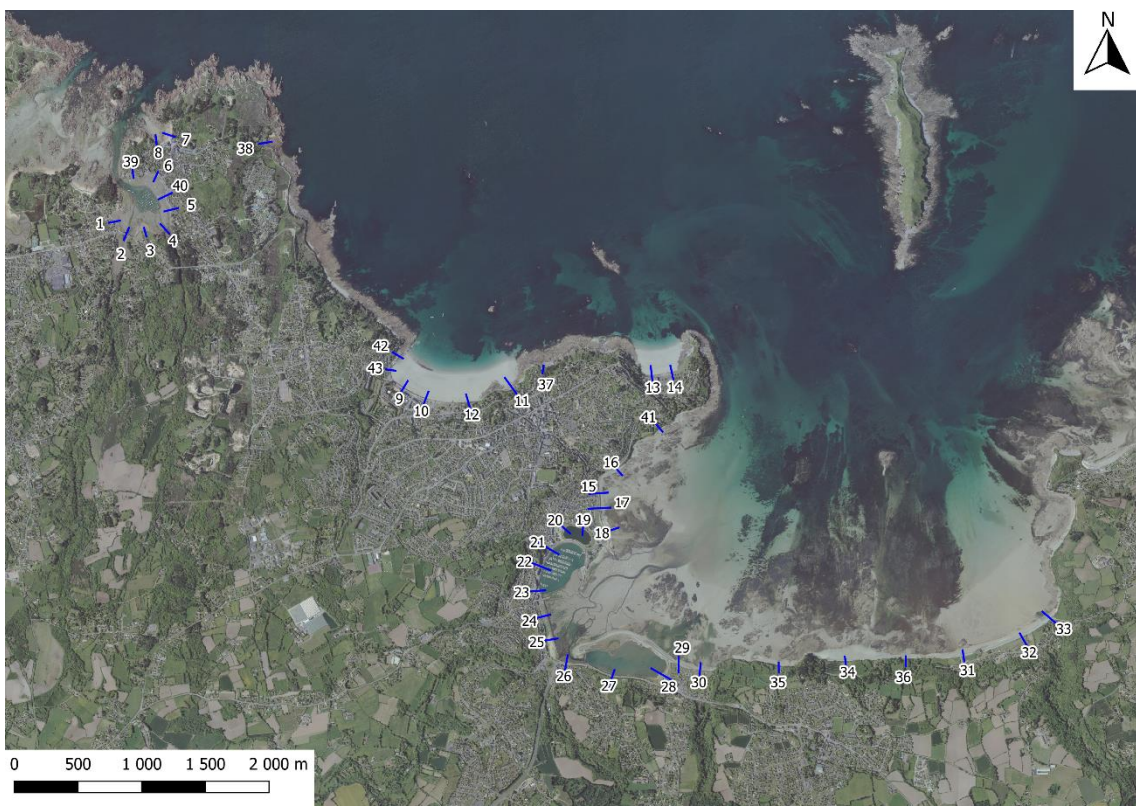


Figure 1. Position des 43 profils étudiés.

1.2 PLAN DE L'ETUDE

Les différentes étapes de la présente étude sont les suivantes :

- Analyse bibliographique et historique des houles et franchissements au niveau des zones d'étude ;
- Mise en place et adaptation du modèle numérique (raffinement du maillage au droit des secteurs étudiés) ;
- Calage du modèle ;
- Modélisation des scénarios de référence ;
- Détermination des sollicitations hydrauliques en pied d'ouvrage ;
- Calcul des franchissements (Eurotop V2).

2 CARACTERISATION DES ALEAS NATURELS

2.1 NIVEAUX D'EAU EXTREMES

Les niveaux d'eau extrêmes correspondent à la combinaison des niveaux de la marée astronomique et aux surcotes dépressionnaires. Le CETMEF a produit en 2018 une mise à jour de l'étude complète sur les statistiques des niveaux d'eau extrêmes sur la façade Manche et Atlantique du SHOM-CETMEF 2012. Pour le secteur de Roscoff, ces statistiques de niveaux d'eau extrêmes donnent les informations suivantes :

- Une hauteur de pleine mer de l'ordre de +5.16 m NGF (environ +9.92 m CM) pour un évènement décennal,
- Une hauteur de pleine mer de l'ordre de +5.36 m NGF (environ +10.12 m CM) pour un évènement centennal.

La Figure 2 présente les ajustements statistiques des niveaux d'eau extrêmes résultants de la méthodologie employée par le SHOM au niveau de Roscoff.

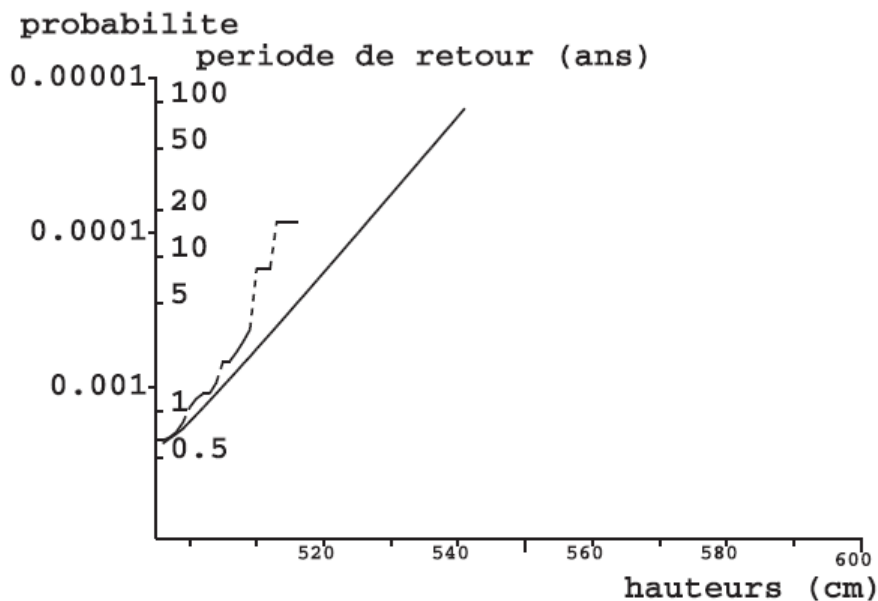


Figure 2. Période de retour des niveaux d'eau à Roscoff (Source : SHOM CETMEF 2012)

Grâce à l'analyse et à une interpolation de l'ensemble des points présentés ci-avant, des cartes de niveaux d'eau extrême ont pu être réalisées (SHOM-CETMEF 2012 - cf. Figure 3, Figure 4, Figure 5 et Figure 6). Le SHOM-CETMEF précise dans une note parue en 2013 qu'« Il est à ce jour conseillé de retenir aux points de mesure principaux les résultats du produit 2012, en retenant que l'estimation statistique est toujours associée à un intervalle de confiance, et, en dehors de ces points de mesure, le niveau marin maximal des produits de 2008 et de 2012 ». Après comparaison des cartes de niveaux extrêmes pour des périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans pour la zone d'étude du présent rapport, les données cartographiques retenues sont celles de 2012.

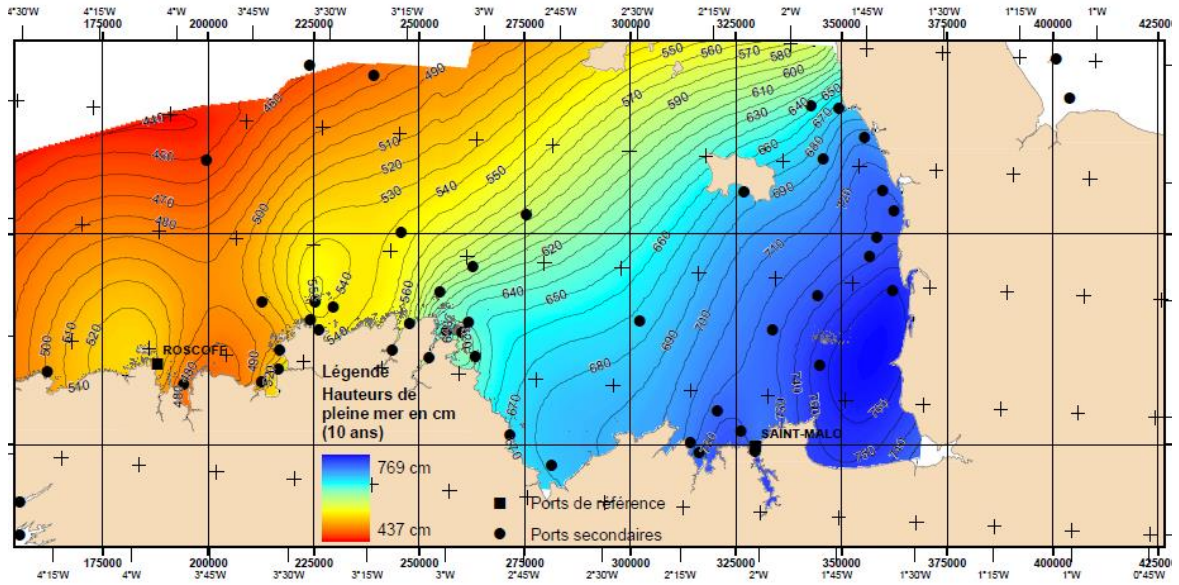


Figure 3. Carte de niveaux extrêmes de pleine mer « IGN69 » (Période de retour 10 ans) (Source : CETMEF 2012)

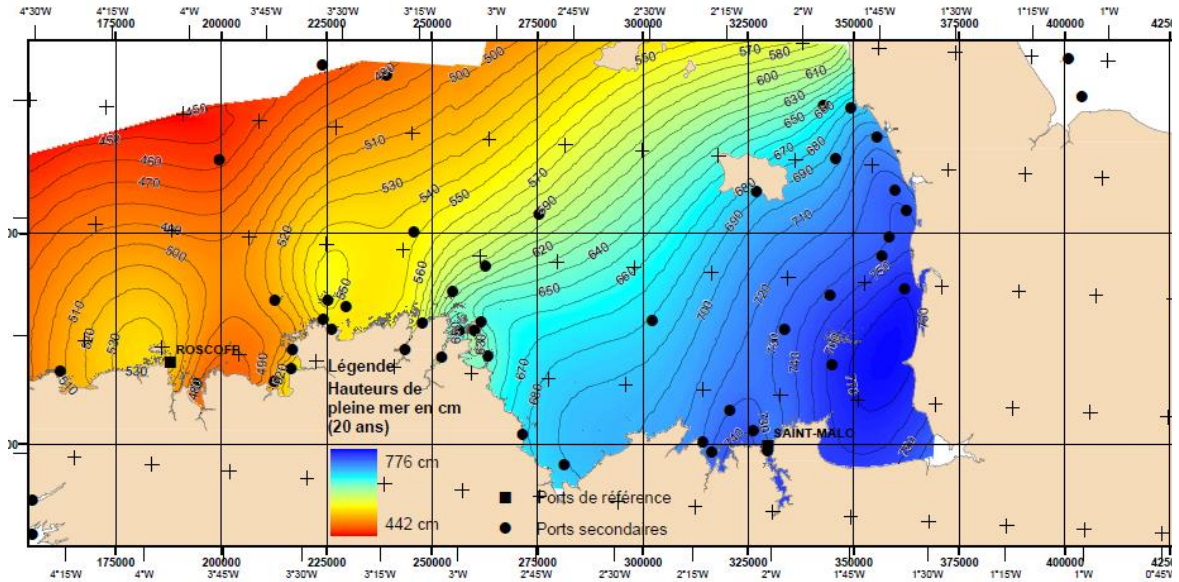


Figure 4. Carte de niveaux extrêmes de pleine mer « IGN69 » (Période de retour 20 ans) (Source : CETMEF 2012)

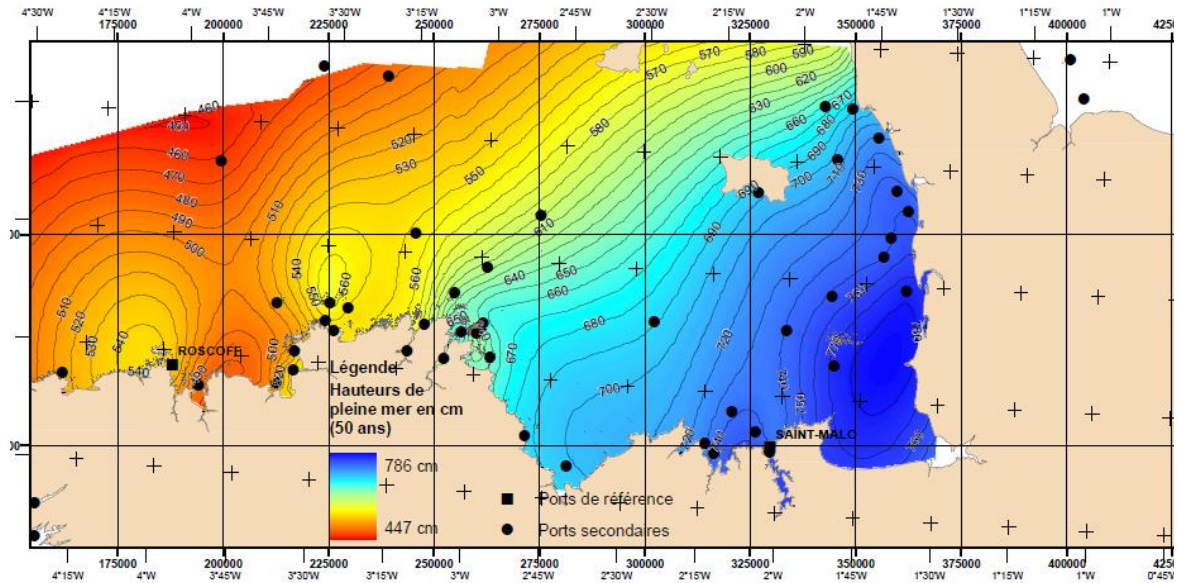


Figure 5. Carte de niveaux extrêmes de pleine mer « IGN69 » (Période de retour 50 ans) (Source : CETMEF 2012)

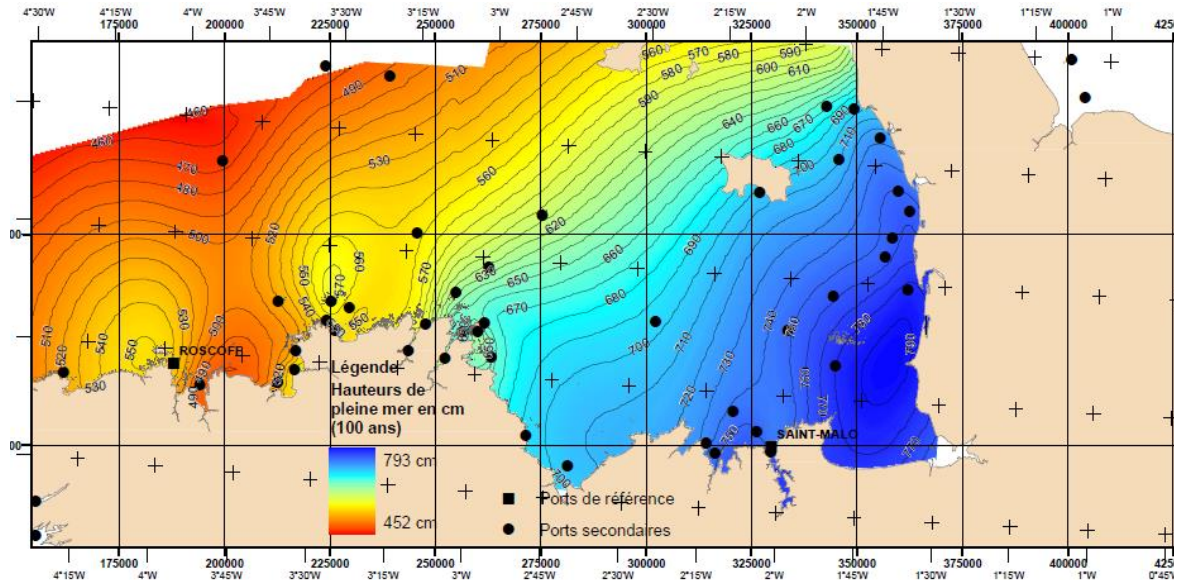


Figure 6. Carte de niveaux extrêmes de pleine mer « IGN69 » (Période de retour 100 ans) (Source : CETMEF 2012)

A partir des isocontours SHOM, les niveaux extrêmes au droit du secteur d'étude sont estimés. Ces résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous et sont comparés aux niveaux d'eau extrêmes donnés par le CEREMA au niveau de Roscoff (2018).

Tableau 1. Niveaux d'eau extrêmes à Roscoff et au droit de Perros pour différentes périodes de retour (Source Roscoff : CEREMA 2018)

Période de retour (an)	1 an	10 ans	50 ans	100 ans	200 ans	500 ans	1 000 ans
Niveau d'eau – Roscoff (m NGF)	-	5.16	5.30	5.36	5.41	5.48	5.52
Niveau d'eau – Perros (m NGF)	-	5.35	-	5.60	-	-	-

La fiche de niveaux extrêmes du SHOM au niveau de Roscoff donne la liste des 10 hauteurs de pleine mer maximales mesurées au niveau de l'observatoire entre 1973 et 2015 :

Hauteur (cm/ZH)	Hauteur (m/IGN69)	Date	Remarques
998	5.216	07/04/1985	Hauteur de PM le 06/04/1985 : 978 cm
991	5.146	03/03/2014	Hauteur de PM le 02/03/2014 : 986 cm
991	5.146	10/03/2008	Coeff à Brest : 106. Surcote de PM associée : 0.57m (surcote instantanée maximale : 0.78m à PM+7h)
988	5.116	01/02/2014	Hauteur de PM le 03/02/2014 : 979 cm
985	5.086	28/02/1979	
983	5.066	29/08/1992	Hauteur de PM le 30/08/1992 : 981 cm
983	5.066	30/03/2006	
983	5.066	11/03/2001	
982	5.056	08/10/2006	
981	5.046	06/10/1979	
980	5.036	03/01/2014	
979	5.026	26/09/1984	
979	5.026	18/03/1980	
978	5.016	20/02/2015	
978	5.016	23/12/1995	
978	5.016	01/03/2002	

Le tempête du 10 mars 2008 a une occurrence décennale en termes de niveau d'eau, si l'on se réfère aux données de niveaux d'eau extrêmes du SHOM.

Les niveaux d'eau extrêmes constituent un aléa majeur à prendre en compte, cependant, ils seront assimilés à des niveaux marins résultants de l'effet combinés de plusieurs processus physiques (voir les paragraphes suivants).

Les niveaux d'eau étudiés ici sont à prendre avec précaution dans le futur, en effet ces données seront influencées par les attendus du changement climatique à venir.

2.2 ETATS DE MER

Préambule :

L'analyse des états de mer au large est réalisée grâce à la base de données appelée BoBWA-X (base de données associant le BRGM et CNRM-GAME (Météo-France – CNRS)) construite à partir de simulations rétrospectives sur une période de 44 ans, du 01/01/58 au 31/08/2002, pour les façades Atlantique, Manche et Mer du Nord. Les données, pour cette étude, proviennent du point Bretagne_07 situé à 16 km au large de Roscoff (Figure 7) et à une profondeur de 94 m.



Figure 7. Localisation du point Bretagne_07 représentatif des données des états de mer du large

Analyse des données :

L'analyse des données au niveau du point Bretagne_07 donne les résultats de hauteur de houle, direction de pic et période de pic, suivants :

	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Mode
Hs (m)	0,22	12,92	2,30	1,91	1,41
Dp (°)	0	360	267	280	288
Tp (s)	2,5	-	11,0	11,0	12,3

Hs = hauteur significative ; Dp = direction pic de provenance des vagues (convention nautique) ; Tp = période pic

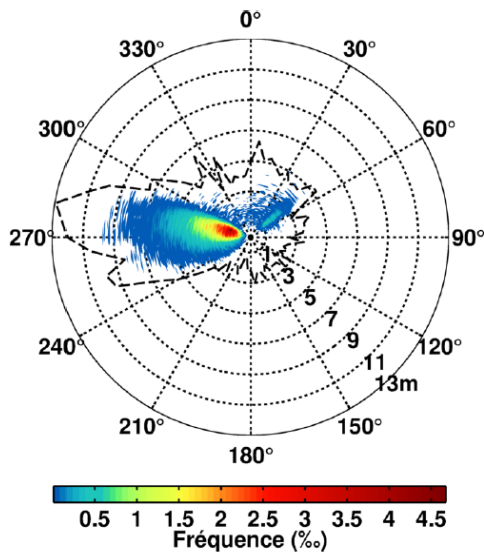


Figure 8. Rose des vagues

Rose des vagues : La valeur de Hs se lit sur l'axe radial. L'enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en pointillés. La fréquence d'occurrence des couples (Hs, Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min = 0,02‰) avec une discrétisation de 5° pour Dp et 5 cm pour Hs.

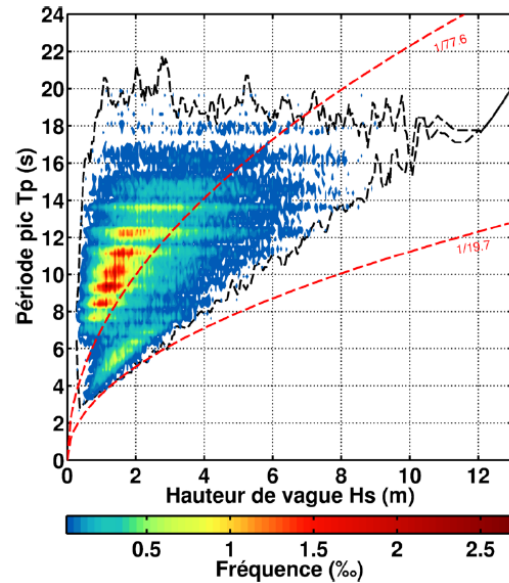


Figure 9. Diagramme bivarié (Tp, Hs)

Diagramme bivarié (Tp, Hs) : Même symbologie que pour la rose des vagues. Pour la fréquence d'occurrence, Tp est discrétisée toutes les 0,25 s et Hs tous les 5 cm. Sont représentées également par des lignes rouges en pointillés les limites de cambrure (pente) 1/19,6 et 1/77,6. La mer de vent se développe entre les deux limites ; les houles longues se développent au-delà de la limite 1/77,6.

La climatologie moyenne des états de mer du large peut être appréhendée à l'aide des Figures présentées ci-dessus. En synthèse, les informations à retenir sont les suivantes :

- Les directions principales de provenance sont de l'Ouest (N270) à l'Ouest-Nord-Ouest (N300).
- Les hauteurs significatives des vagues les plus hautes sont autour des 9m avec un maximum relevé à 12.92 m
- Les états de mer inférieurs à 2,0m ont généralement des périodes pics de l'ordre de 8 à 12s. Les états de mer plus forts voient leurs périodes augmenter avec communément des périodes comprises entre 12s et 18s. Plus rarement, certains états de mer ont des périodes longues pouvant atteindre les 20s.

Analyse des extrêmes de Hs :

L'analyse a consisté à ajuster une loi *Generalised Pareto Distribution* (GPD) pour les pics de tempête sélectionnés par la méthode *Peaks Over Threshold* (POT) :

$$P(H_s \leq x | H_s > u) = 1 - \left(1 + \frac{\xi(x-u)}{\sigma}\right)_+^{-\frac{1}{\xi}}, \text{ pour } x > u \text{ et où } s_+ = \max(s, 0).$$

u représente le seuil au-delà duquel on considère que la population de vagues est composée de valeurs extrêmes uniquement. Il est choisi à l'aide des propriétés asymptotiques de la loi GPD théorique et de tests statistiques (χ^2 et Kolmogorov-Smirnov) et sont respectivement les paramètres de forme et d'échelle de la loi GPD. Ils sont estimés à l'aide de la méthode des moments (MOM).

Analyse globale (toutes directions) :

L'analyse globale donne les résultats de Hs et paramètres suivants :

Tableau 2. Résultats de l'analyse globale des houles (Source : BoBWA-X)

Seuil u (m)	Estimation de ξ	Estimation de σ	Nombre d'évènements par an
7,80	-0,0323	1,0944	≈ 2,4
Période de retour (ans)	Valeur de retour (m)	Intervalle de confiance à 68% (m)	Intervalle de confiance à 95% (m)
1	8,75	[8,65 ; 8,86]	[8,55 ; 8,96]
10	11,11	[10,76 ; 11,46]	[10,43 ; 11,80]
20	11,79	[11,30 ; 12,28]	[10,82 ; 12,76]
50	12,66	[11,91 ; 13,41]	[11,20 ; 14,13]
100	13,30	[12,32 ; 14,29]	[11,37 ; 15,24]

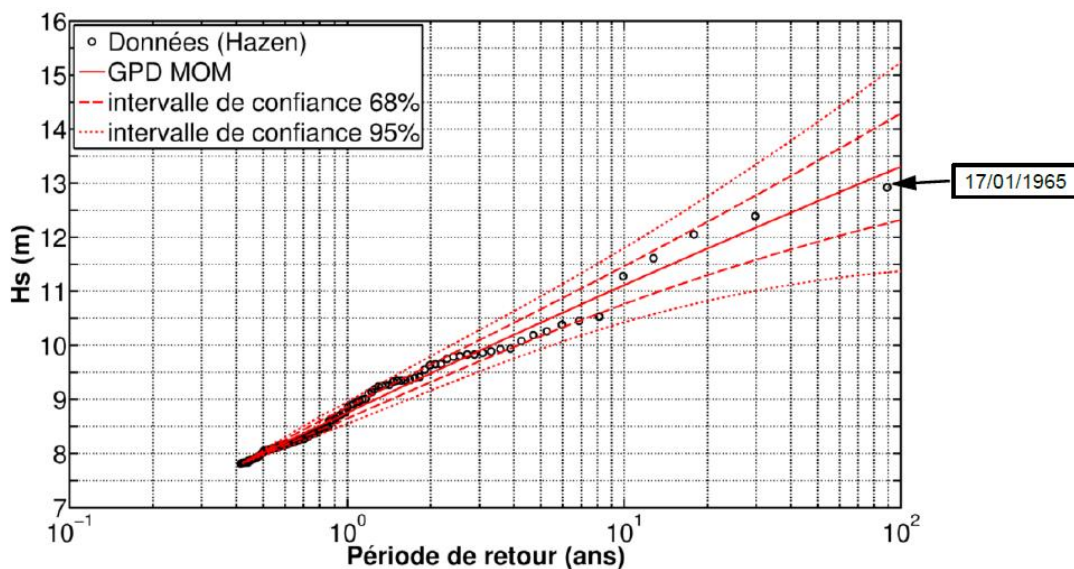


Figure 10. Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs - toutes directions (Source : BoBWA-X)

Tableau 3. Pics de fortes houles historiques (de période de retour théorique supérieure à 10 ans) (Source : BoBWA-X)

Pics de fortes houles historiques (de période de retour théorique supérieure à 10 ans)				
Date (jj/mm/aaaa)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Période de retour théorique pour Hs (ans)
17/01/1965	12,92	20,0	282	66
12/02/1990	12,39	17,9	277	37
15/12/1979	12,05	17,5	273	26
09/02/1988	11,61	18,2	281	17
25/01/1990	11,28	15,6	268	12

2.3 PROBABILITE CONJOINTE DES EVENEMENTS EXTREMES D'ETATS DE MER ET DE NIVEAU MARIN

Le DEFRA (Department for Environment Food and Rural Affairs) a développé une méthode permettant de caractériser la probabilité conjointe d'un événement incluant deux variables statistiques connaissant les périodes de retours de chaque variable ainsi que leur dépendance.

Le CETMEF a calculé les coefficients de corrélation entre les hauteurs de vagues et les niveaux d'eau pour le littoral de la Mer du Nord, la Manche et l'Atlantique. Au niveau de Roscoff (port de référence le plus proche du site d'étude), la dépendance est considérée comme faible pour le couple hauteur significative / niveau d'eau.

La Figure 11 présente les différents couples hauteur de vagues / niveau d'eau pour différentes périodes de retour. Les hauteurs de vagues correspondent aux hauteurs de vagues au niveau du point BoBWA-X Bretagne_07 et les niveaux d'eau sont ceux au niveau du marégraphe de Roscoff.

Une même période de retour peut correspondre à un niveau marin élevé associé à une faible houle ou à une forte houle associée à un niveau marin faible.

Les tempêtes les plus marquantes sur le territoire (1985, 2008 et 2014) ont été représentées sur le graphique.

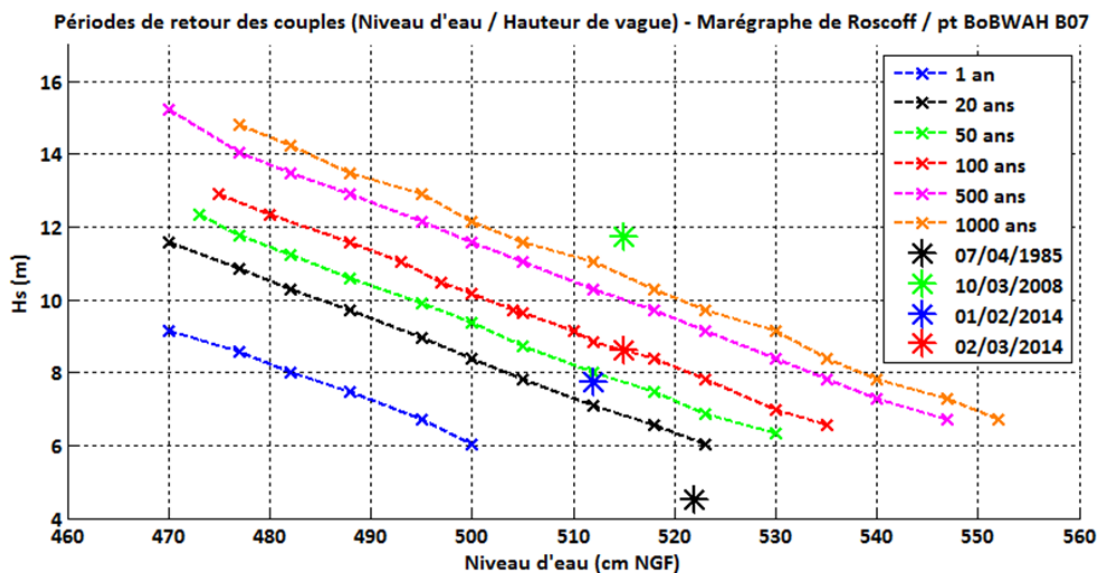


Figure 11. Probabilité conjointe des événements extrêmes d'états de mer et de niveaux marins au niveau de Roscoff

Au niveau de Roscoff, la Figure 11 indique que la tempête du 10 mars 2008 est la plus marquante en termes de niveau d'eau et de condition de houle.

3 OUTILS ET MODELE NUMERIQUES

3.1 MODELE HYDRODYNAMIQUE TELEMAC2D-TOMAWAC

3.1.1 Emprise du modèle global

Un modèle maritime (Telemac 2D - Tomawac) a été réalisé par CASAGEC sur le littoral de la Bretagne Nord. Ce modèle permet de représenter les phénomènes marins (marée et propagation des vagues) ainsi que les phénomènes de surcote de tempête (Surcote liée au vent, surcote liée au gradient de pression atmosphérique et surcote de déferlement).

L'emprise du modèle maritime est présentée en Figure 12, ci-dessous.

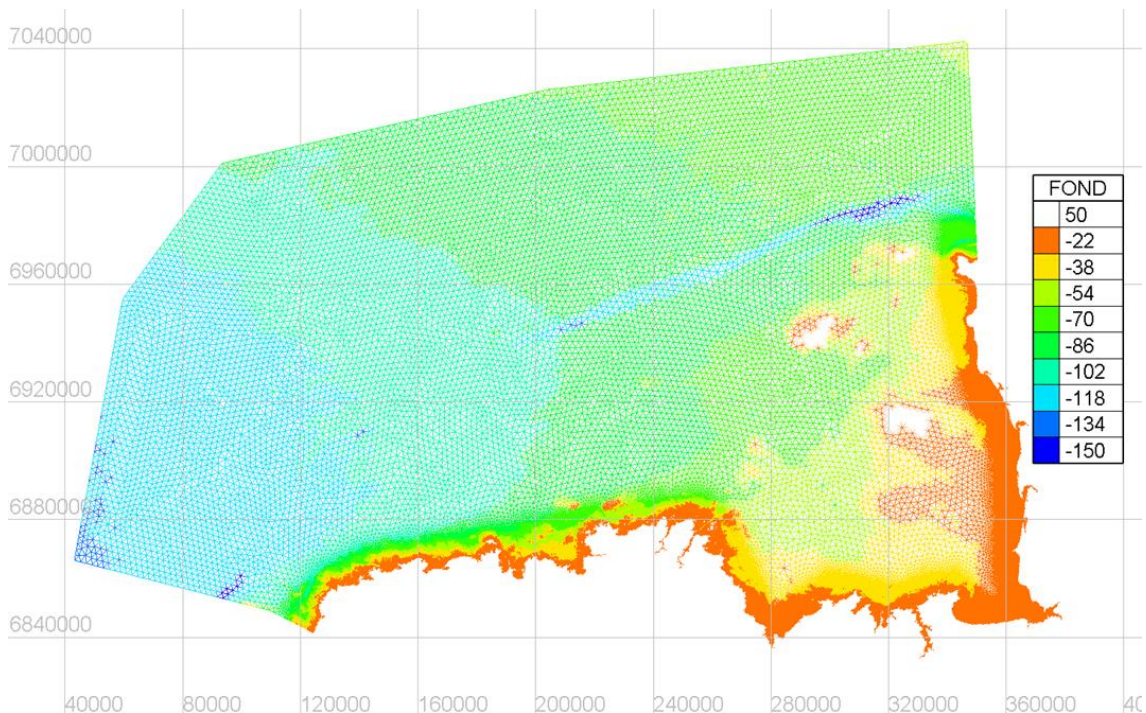


Figure 12. Emprise du MNT maritime. L'échelle de couleur représente l'altitude (m NGF).

Le modèle maritime est composé de 245 000 nœuds de calculs correspondant à 483 000 éléments triangulaires, le maillage ayant été raffiné au droit des secteurs d'études.

3.1.2 Calibration

3.1.2.1 Marée astronomique

Le modèle est tout d'abord calé sur les niveaux d'eau pour des événements « courants », c'est-à-dire, sans processus physiques (vent, vagues, ...) impactant le niveau de la mer.

Ce calage est réalisé par comparaison entre les prédictions fournies par le SHOM pour différents marégraphes de la zone d'étude et les résultats du modèle numérique.

Cette comparaison est faite sur 15 jours, du 02 au 16 Août 2019, de manière à couvrir une période de morte-eau et une période de vive-eau. Les résultats sont illustrés ci-dessous :

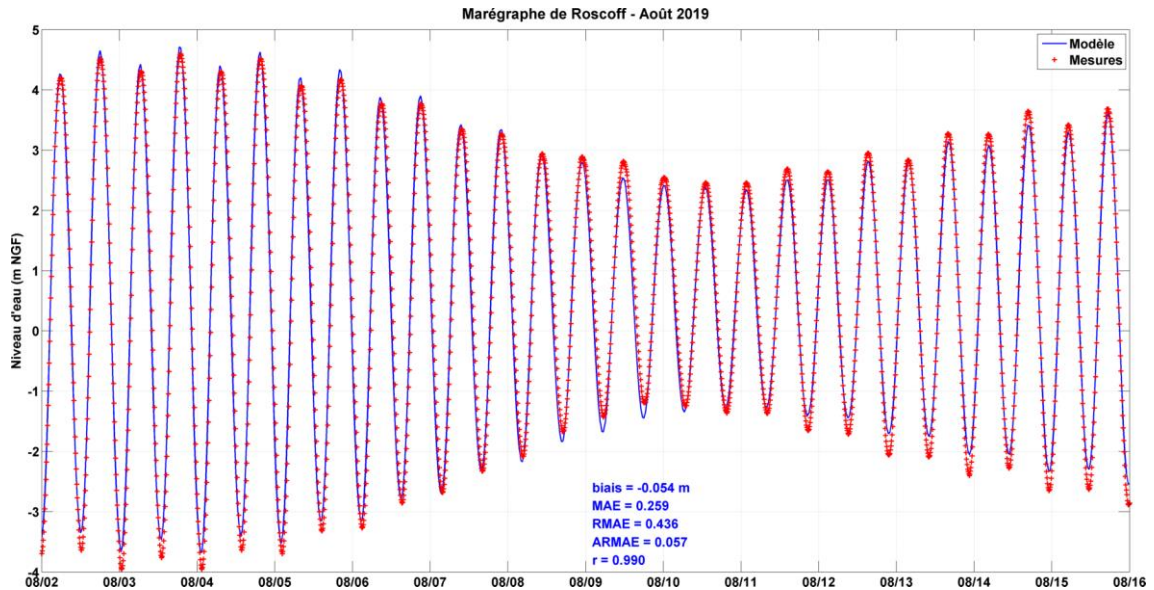


Figure 13. Validation de la marée astronomique (septembre 2020) au marégraphe de Roscoff)

Les résultats du modèle numérique sont très proches des prédictions du SHOM pour une marée astronomique (sans autre processus modifiant le plan d'eau) qu'elles soient en période de vive-eau ou de morte-eau comme l'indiquent les différents indices statistiques calculés.

3.1.2.2 Événement de tempête

Le calage du modèle numérique se fait dans un second temps sur un événement de tempête afin de vérifier que le modèle est capable de représenter les phénomènes de surcote (surcote atmosphérique et surcote de déferlement).

Pour ce faire, les tempêtes du 10 mars 2008 et 03 mars 2014 sont prises comme événement de comparaison.

a) Tempête Johanna 10 Mars 2008

Les données de vent ont été récupérées aux stations météo de Brest, Ploumanach et à la pointe de la Hague.

Les vagues ont été définies aux frontières du modèle grâce aux modèles Ifremer et aux données de la bouée Bretagne (Météo France). La marée astronomique (coefficient 100 à 96) est forcée aux frontières du modèle grâce au modèle global TPXO. L'ensemble de ces données permettent de simuler l'événement de tempête du 10 mars 2008 grâce à un couplage des modèles hydrodynamique (Telemac 2D) et de propagation de houle (Tomawac).

La figure suivante présente la comparaison entre les observations au marégraphe de Roscoff (courbe noire) et les résultats de modélisation (courbe rouge). La courbe bleue représente la marée astronomique sans perturbations atmosphériques.

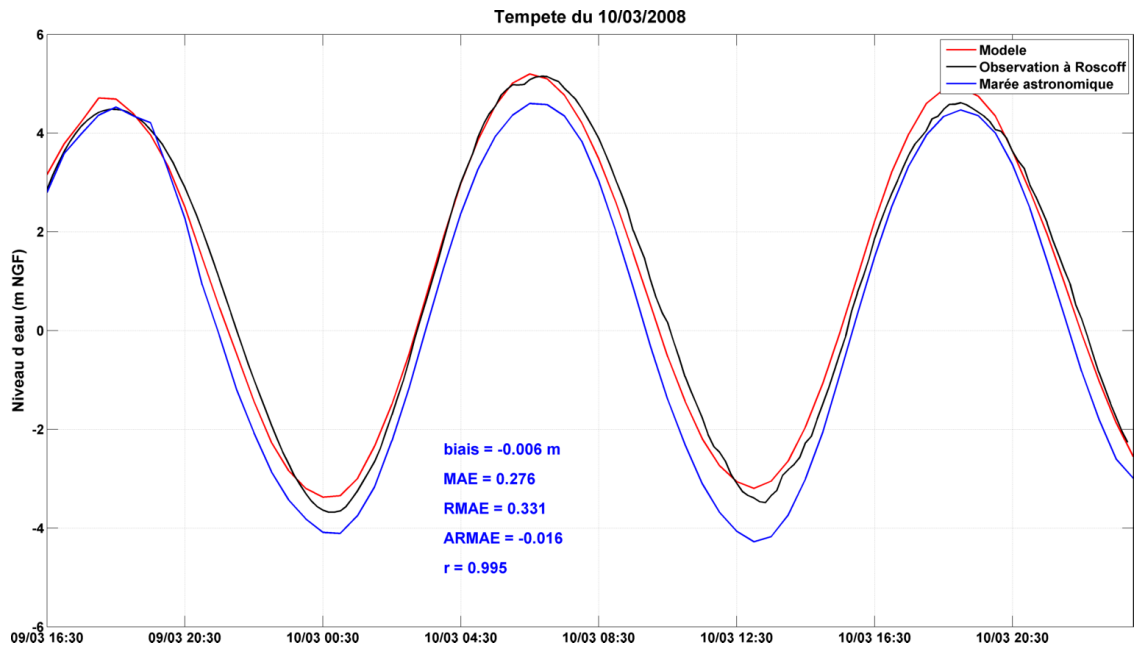


Figure 14. Comparaison des résultats de modélisation et des mesures au marégraphe de Roscoff durant la tempête du 10/03/2008.

Les résultats montrent que le modèle représente bien la surcote de tempête (surestimation de 4 cm à marée haute) qui est estimé à 57 cm lors du pic de marée haute. Cela donne une erreur relative d'environ 7%. Sur l'ensemble de la marée, les indices statistiques sont excellents.

Sur le reste de la simulation, des différences entre les enregistrements et le modèle sont visibles, notamment un léger déphasage temporel et une surestimation des pics de marée haute sur les marées précédentes et suivantes. Ces différences sont probablement causées par les forçages utilisés qui sont constants dans l'espace et estimés par rapport aux mesures disponibles.

b) Tempête Christine 03 Mars 2014

La tempête du 3 mars 2014 est survenue pendant les grandes marées (coefficient supérieur à 100, allant jusqu'à 114 le 2 et 3 mars 2014).

De façon similaire, la tempête Christine a été modélisée en ayant récupéré les données de houle, de vents et de pression atmosphérique.

La figure suivante présente la comparaison entre les observations au marégraphe de Roscoff (courbe noire) et les résultats de modélisation (courbe rouge). La courbe bleue représente la marée astronomique sans perturbations atmosphériques.

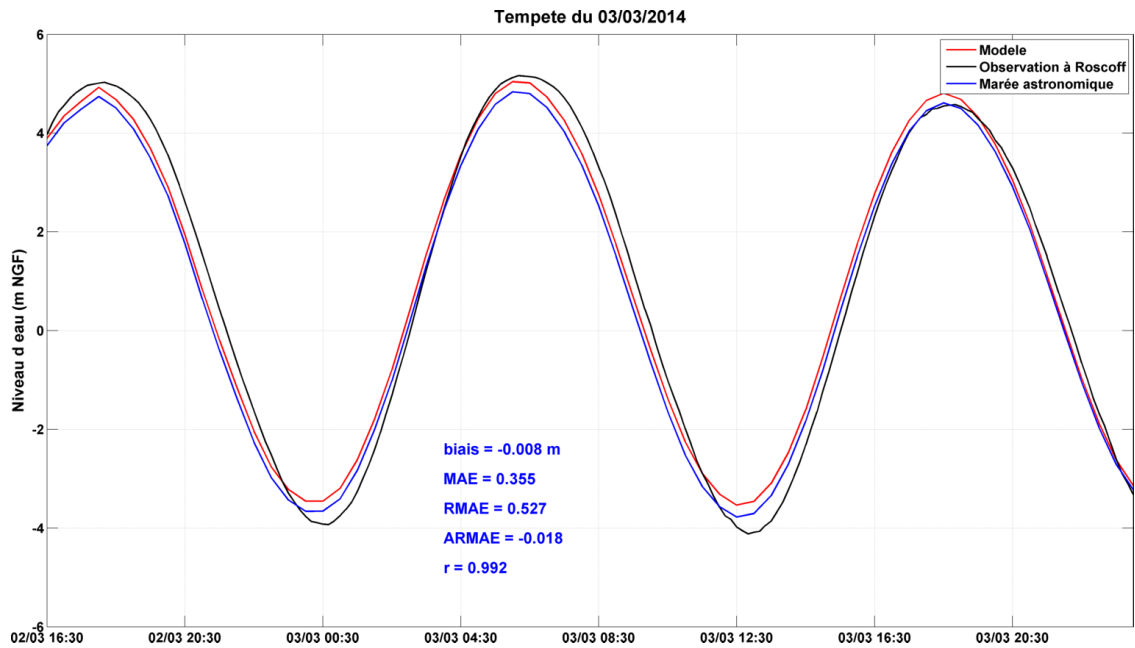


Figure 15. Comparaison des résultats de modélisation et des mesures au marégraphe de Roscoff durant la tempête du 03/03/2014.

Les résultats montrent que le modèle représente bien la surcote de tempête (sous-estimation de 8 cm à marée haute) qui est estimé à 29 cm lors du pic de marée haute. Cela donne une erreur relative d'environ 27%. Sur l'ensemble de la marée, les indices statistiques sont excellents.

Sur le reste de la simulation, des différences entre les enregistrements et le modèle sont visibles, notamment un léger déphasage temporel et une surestimation des pics de marée haute sur les marées précédentes et suivantes. Ces différences sont probablement causées par les forçages utilisés qui sont constants dans l'espace et estimés par rapport aux mesures disponibles.

3.2 CALCULS DES DEBITS DE FRANCHISSEMENTS (EUROTOP V2)

3.2.1 Formules de Franchissements (Eurotop V2)

Les débits de franchissements sont estimés pour les différents profils grâce aux formules de l'Eurotop V2 (2018).

Pour les digues en remblais de talus à pente douce, les débits de franchissements sont calculés avec les formules générales 5.10 et 5.11 suivantes :

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0,023 \cdot \gamma_b \cdot \xi_{m-1,0}}{\sqrt{\tan(\alpha)}} \cdot \exp\left(-2,7 \cdot \frac{R_c}{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0}} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_\xi}\right)^{1,3}$$

et avec un maximum défini par : $\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0,09 \exp\left(-1,5 \cdot \frac{R_c}{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_\xi}\right)^{1,3}$

Pour les digues en remblais de talus à pente verticale, les débits de franchissements moyens et maximaux sont calculés avec la formule 5.18 suivante :

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = a \exp\left(-\left(b \cdot \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^c\right)$$

$$a = 0.09 - 0.01(2 - \cot\alpha)^{2.1} \text{ pour } \cot\alpha < 2 \text{ et } a = 0.09 \text{ pour } \cot\alpha \geq 2$$

$$b = 1.5 + 0.42(2 - \cot\alpha)^{1.5}, \text{ avec pour maximum } b = 2.35 \text{ et } b = 1.5 \text{ pour } \cot\alpha \geq 2$$

Avec :

- α : pente du talus
- q : débit de franchissement moyenné sur le temps par mètre linéaire de crête (m³/s/m)
- R_c : Différence entre le niveau statique et le niveau de crête
- H_{m0} : hauteur de houle en pied d'ouvrage

Les coefficients $\gamma_f, \gamma_\beta, \gamma_*$ représentant respectivement les facteurs d'amortissements correspondant à l'influence de rugosité des revêtements des ouvrages, l'influence de l'angle d'incidence des vagues et l'influence de la géométrie des ouvrages. Les valeurs de ces paramètres sont définies selon les recommandations du manuel Eurotop II (cf tableau ci-dessous).

Tableau 4. Valeurs de coefficient de rugosité selon la nature de talus (Source : Eurotop II 2018)

Type of armour layer	γ_f
Smooth impermeable surface	1.00
Rocks (1 layer, impermeable core)	0.60
Rocks (1 layer, permeable core)	0.45
Rocks (2 layers, impermeable core)	0.55
Rocks (2 layers, permeable core)	0.40
Cubes (1 layer, flat positioning)	0.49
Cubes (2 layers, random positioning)	0.47
Antifers	0.50
HARO's	0.47
Tetrapods	0.38
Dolosse	0.43
Accropode™ I	0.46
Xbloc®; CORE-LOC®; Accropode™ II	0.44
Cubipods one layer	0.49
Cubipods two layers	0.47

3.2.2 Estimation des débits de franchissements pour les événements de tempête

Pour les deux événements de tempête Johanna (Mars 2008) et Christine (Mars 2014), les débits de franchissements ont été estimés au niveau des 43 profils décrivant le secteur d'étude.

Pour la suite du paragraphe, les différents profils seront regroupés en 4 secteurs géographiques :

- Ploumanach : Profils : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 38, 39, 40 ;
- Trestraou - Trestrignel : Profils : 9, 10, 11, 12, 13, 14, 37, 41, 42, 43 ;
- Perros : Profils : 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 ;
- Louanec : Profils : 31, 32, 33, 34, 35, 36.

3.2.2.1 Secteur 1 : Ploumanach

La figure ci-après présente les profils pour le secteur de Ploumanach.



Figure 16. Position des profils du secteur Ploumanach.

Pour les deux événements, les débits de franchissements maximaux sont obtenus à pleine mer. Le tableau ci-après donne pour chaque profil les débits de franchissements pour les deux événements de tempête modélisés.

Scénario	Débit de franchissement (l/s/ml)										
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P38	P39	P40
Johanna	0,00	0,00	0,00	SURVERSE	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
Christine	0,00	0,00	0,00	SURVERSE	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00

Ces secteurs sont relativement protégés de la houle (Hs de l'ordre de 10 à 70 cm). Seul le profil 7 présente de faibles franchissements pour Johanna notamment en raison d'une faible revanche de crête de l'ordre de 60 cm.

3.2.2.2 Secteur 2 : Trestraou - Trestrignel

La figure ci-après présente les profils pour le secteur de Trestraou - Trestrignel.



Figure 17. Position des profils du secteur Trestraou - Trestrignel.

Pour les deux événements, les débits de franchissements maximaux sont obtenus à pleine mer. Le tableau ci-après donne pour chaque profil les débits de franchissements pour les deux événements de tempête modélisés.

Scénario	Débit de franchissement (l/s/ml)									
	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P37	P41	P42	P43
Johanna	1,36	6,33	PAS D'EAU	PAS D'EAU	5,81	3,97	PAS D'EAU	0,00	60,12	63,47
Christine	0,27	2,24	PAS D'EAU	PAS D'EAU	1,45	1,13	PAS D'EAU	0,00	30,56	15,91

Ce secteur est beaucoup plus exposé aux houles (Hs de l'ordre de 2 à 3m) ; par conséquent, les débits de franchissements peuvent alors être assez importants notamment sur les profils 42 et 43 où la route du centre nautique est relativement basse.

3.2.2.3 Secteur 3 : Perros

La figure ci-après présente les profils pour le secteur de Perros.



Figure 18. Position des profils du secteur Perros.

Pour les deux événements, les débits de franchissements maximaux sont obtenus à pleine mer. Les tableaux ci-après donnent pour chaque profil les débits de franchissements pour les deux événements de tempête modélisés.

	Débit de franchissement (l/s/ml)							
Scénario	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22
Johanna	0,00	0,00	0,01	0,01	SURVERSE	SURVERSE	0,00	0,00
Christine	0,00	0,00	0,00	0,00	SURVERSE	SURVERSE	0,00	0,00
	Débit de franchissement (l/s/ml)							
Scénario	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30
Johanna	0,00	78,90	70,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Christine	0,00	19,65	16,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ce secteur reste relativement protégé de la houle (Hs de l'ordre de 10 à 100cm), d'où les débits de franchissements quasi nuls sauf pour les profils 24 et 25 (esplanade de la Douane) qui présentent des revanches de crête de quelques centimètres.

3.2.2.4 Secteur 4 : Louannec

La figure ci-après présente les profils pour le secteur de Louannec.



Figure 19. Position des profils du secteur Louannec.

Pour les deux événements, les débits de franchissements maximaux sont obtenus à pleine mer. Le tableau ci-après donne pour chaque profil les débits de franchissements pour les deux événements de tempête modélisés.

Scénario	Débit de franchissement (l/s/ml)					
	P31	P32	P33	P34	P35	P36
Johanna	0,00	206,40	PAS D'EAU	PAS D'EAU	PAS D'EAU	PAS D'EAU
Christine	PAS D'EAU	94,65	PAS D'EAU	PAS D'EAU	PAS D'EAU	PAS D'EAU

Ce secteur est un peu plus exposé aux houles que le secteur précédent (Hs de l'ordre de 1,50 à 2,50m). Le profil 32 présente des franchissements importants mais ceux-ci ne sont pas dangereux car il n'y a pas d'enjeu en arrière direct de l'ouvrage et de plus le terrain à l'arrière remonte. Les autres profils ne présentent pas de franchissements car les pieds d'ouvrages sont hauts (et sont hors d'eau pour les deux événements de tempête).

4 MODELISATION DES SCENARIOS DE REFERENCE

L'analyse des événements tempétueux historiques a montré que la tempête Johanna du 10 mars 2008 est la plus marquante en termes de niveau d'eau et de condition de houle et donc de franchissements.

Quatre scénarios de référence ont été définis puis modélisés :

- Scénario 1 : Tempête Johanna +20cm (prise en compte du changement climatique) ;
- Scénario 2 : Tempête Johanna +60cm (prise en compte du changement climatique) ;
- Scénario 3 : Niveau 6,05 m NGF avec Vent et houle de Johanna ;
- Scénario 4 : Niveau 6,45 m NGF avec Vent et houle de Johanna ;

Les niveaux 6,05 et 6,45 ont été définis en partant du niveau marin centennal de 5,60 m NGF et en ajoutant 25cm d'incertitude et 20 ou 60cm pour la prise en compte du changement climatique.

Les 4 scénarios ont été modélisés avec le modèle couplé Telemac2D – Tomawac. Pour chaque profil et chaque scénario, les houles et niveaux d'eau en pied d'ouvrage sont récupérés afin de calculer les débits de franchissements.

Les résultats de franchissements sont présentés en conservant la sectorisation utilisée précédemment.

4.1 SECTEUR 1 : PLOUMANACH

Pour les quatre scénarios, les débits de franchissements maximaux sont obtenus à pleine mer. Le tableau ci-après donne pour chaque profil les débits de franchissements pour les quatre événements de tempête modélisés.

Scénario	Débit de franchissement (l/s/ml)			
	1	2	3	4
<i>P1</i>	0,41	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE
<i>P2</i>	0,00	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE
<i>P3</i>	0,00	0,05	0,03	SURVERSE
<i>P4</i>	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE
<i>P5</i>	0,00	0,00	0,00	SURVERSE
<i>P6</i>	0,00	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE
<i>P7</i>	4,15	31,05	39,09	SURVERSE
<i>P8</i>	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>P38</i>	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>P39</i>	0,00	0,00	0,00	8,16
<i>P40</i>	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE

Ces profils en raison de leur faible exposition à la houle sont assez peu sensibles aux franchissements par paquets de mer mais plus au phénomène de surverse.

4.2 SECTEUR 2 : TRESTRAOU – TRESTRIGNEL

Pour les quatre scénarios, les débits de franchissements maximaux sont obtenus à pleine mer. Le tableau ci-après donne pour chaque profil les débits de franchissements pour les quatre événements de tempête modélisés.

Scénario	Débit de franchissement (l/s/ml)			
	1	2	3	4
P9	7,37	55,54	49,36	188,70
P10	19,12	83,19	76,94	225,64
P11	PAS D'EAU	PAS D'EAU	PAS D'EAU	PAS D'EAU
P12	PAS D'EAU	PAS D'EAU	PAS D'EAU	PAS D'EAU
P13	19,67	115,24	103,62	310,92
P14	14,60	91,91	82,71	221,40
P37	PAS D'EAU	PAS D'EAU	PAS D'EAU	PAS D'EAU
P41	0,00	0,00	0,00	0,00
P42	116,11	295,39	291,29	SURVERSE
P43	122,23	316,59	305,65	SURVERSE

Ce secteur est beaucoup plus exposé aux houles ; par conséquent, les débits de franchissements peuvent alors être forts au niveau des ouvrages des plages de Trestraou (P9, P10, P42 et P43) et Trestrignel (P13 et P14).

Au niveau de la plage de Trestrignel (profils 13 et 14), ces débits importants ont lieu au niveau du chemin piétonnier de front de mer présentant peu d'enjeux. Le terrain à l'arrière est pour sa part relativement haut.

Au niveau de la plage de Trestraou (profils 9 et 10), pour les scénarios extrêmes, des franchissements importants sont estimés sur le front de mer à cause des fortes houles impactant le secteur.

4.3 SECTEUR 3 : PERROS

Pour les quatre scénarios, les débits de franchissements maximaux sont obtenus à pleine mer. Le tableau ci-après donne pour chaque profil les débits de franchissements pour les quatre événements de tempête modélisés.

Scénario	Débit de franchissement (l/s/ml)			
	1	2	3	4
P15	0,01	0,38	0,27	5,78
P16	0,00	0,00	0,00	0,00
P17	0,05	2,38	1,74	32,31
P18	0,04	2,65	1,87	44,67
P19	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE
P20	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE
P21	0,00	0,00	0,00	SURVERSE
P22	0,00	0,00	0,00	SURVERSE
P23	0,01	7,97	4,18	SURVERSE
P24	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE
P25	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE
P26	0,00	6,01	3,44	SURVERSE
P27	0,00	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE
P28	0,00	SURVERSE	SURVERSE	SURVERSE
P29	0,00	0,03	0,02	0,38
P30	0,00	0,04	0,03	0,61

Les profils du boulevard de la mer (profils 15, 17, 18) présentent pour les scénarios les plus extrêmes des débits de franchissements relativement forts en raison des faibles revanches de crête de l'ordre de 50cm à 1m.

Les profils de Perros (petit bassin, grand bassin et esplanade de la Douane) sont relativement bas et sont plutôt soumis au risque de surverse.

Au niveau du camping Digue du Lenn (profils 29 et 30), les franchissements sont relativement faibles en lien avec l'altitude de la crête de l'ouvrage relativement élevée (supérieure à 7,50 m NGF).

4.4 SECTEUR 4 : LOUANNEC

Pour les quatre scénarios, les débits de franchissements maximaux sont obtenus à pleine mer. Le tableau ci-après donne pour chaque profil les débits de franchissements pour les quatre événements de tempête modélisés.

Scénario	Débit de franchissement (l/s/ml)			
	1	2	3	4
<i>P31</i>	0,00	0,02	0,01	5,20
<i>P32</i>	309,15	523,98	512,26	SURVERSE
<i>P33</i>	PAS D'EAU	PAS D'EAU	PAS D'EAU	0,00
<i>P34</i>	PAS D'EAU	PAS D'EAU	PAS D'EAU	PAS D'EAU
<i>P35</i>	PAS D'EAU	PAS D'EAU	PAS D'EAU	PAS D'EAU
<i>P36</i>	PAS D'EAU	PAS D'EAU	PAS D'EAU	0,00

Ce secteur malgré sa forte exposition est très peu sensible aux franchissements par paquets de mer. Les profils sont relativement hauts et même pour des niveaux extrêmes, l'eau n'atteint pas forcément le pied des ouvrages.

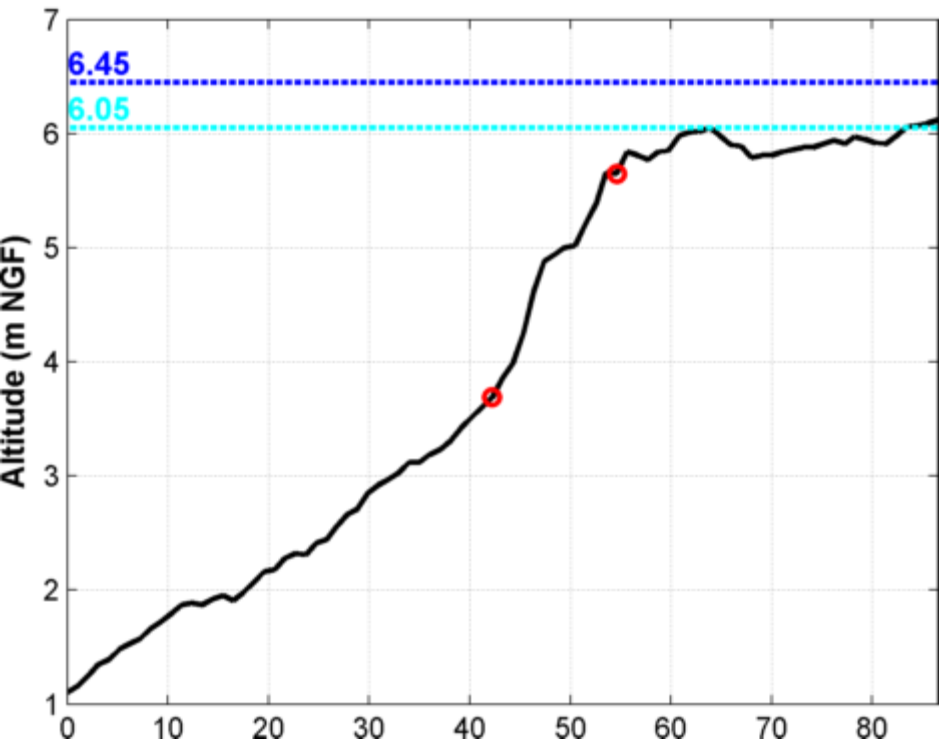
Le profil 32 présente des franchissements importants mais ceux-ci ne sont pas dangereux du fait le terrain à l'arrière remonte.

ANNEXES

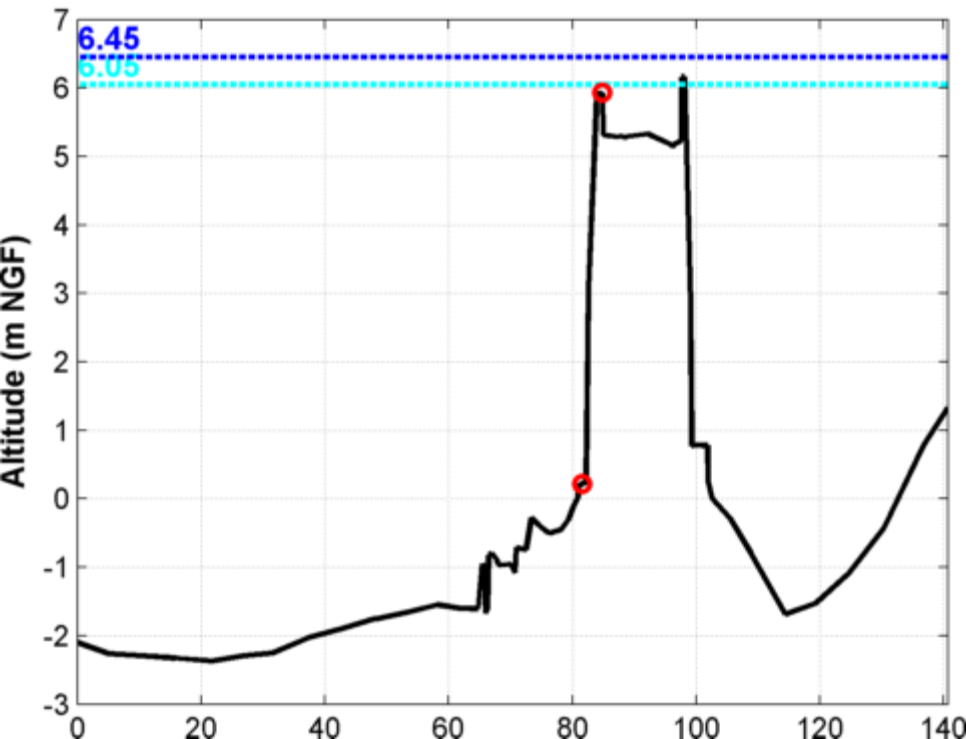
En Annexe de ce rapport, un Dossier Profils présente toutes les coupes des profils avec comme indication les pieds et crêtes d'ouvrages considérés.

De plus, les séries temporelles des débits de franchissements (en l/s/ml) pour les différents scénarios et profils sont fournies dans un fichier excel et en images. Dans le fichier excel des hydrogrammes, des valeurs aberrantes de 999 sont écrites pour indiquer la surverse.

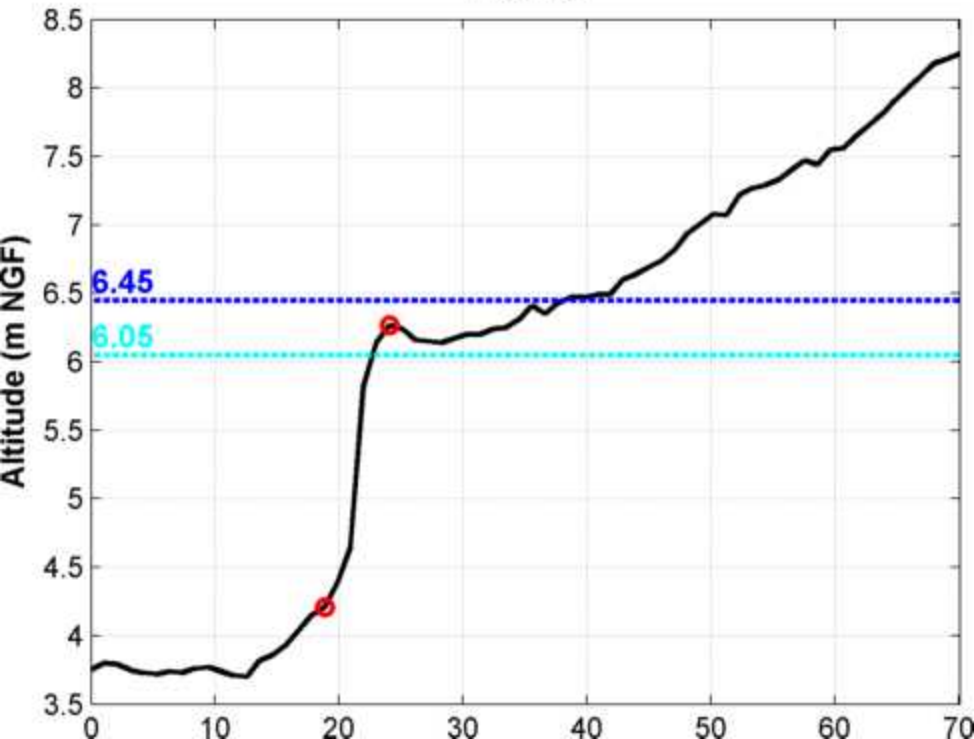
Profil 1



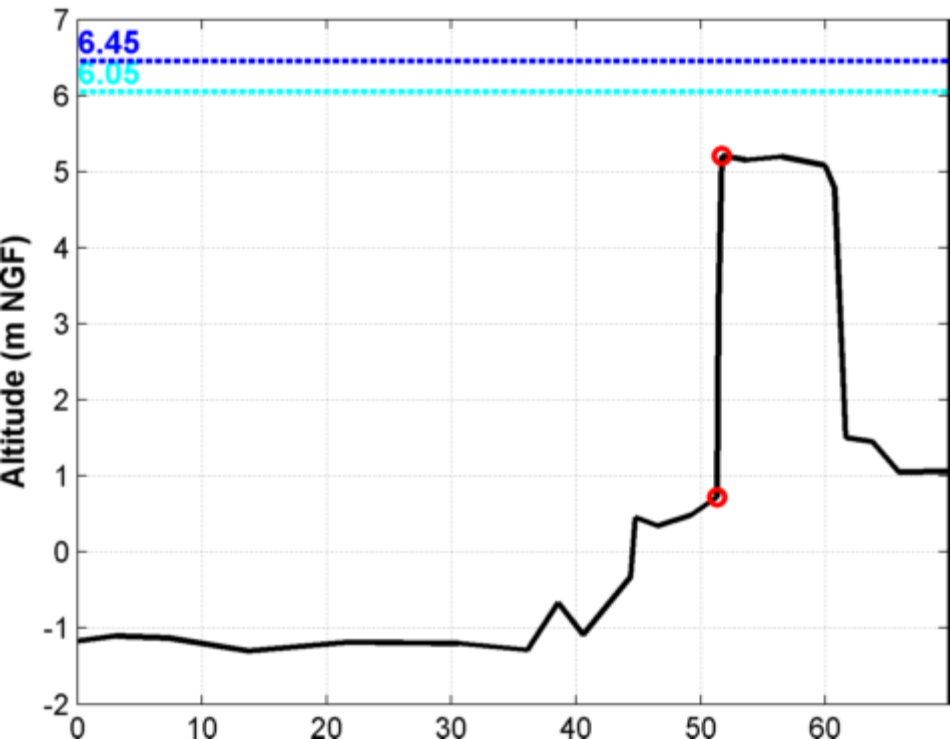
Profil 2



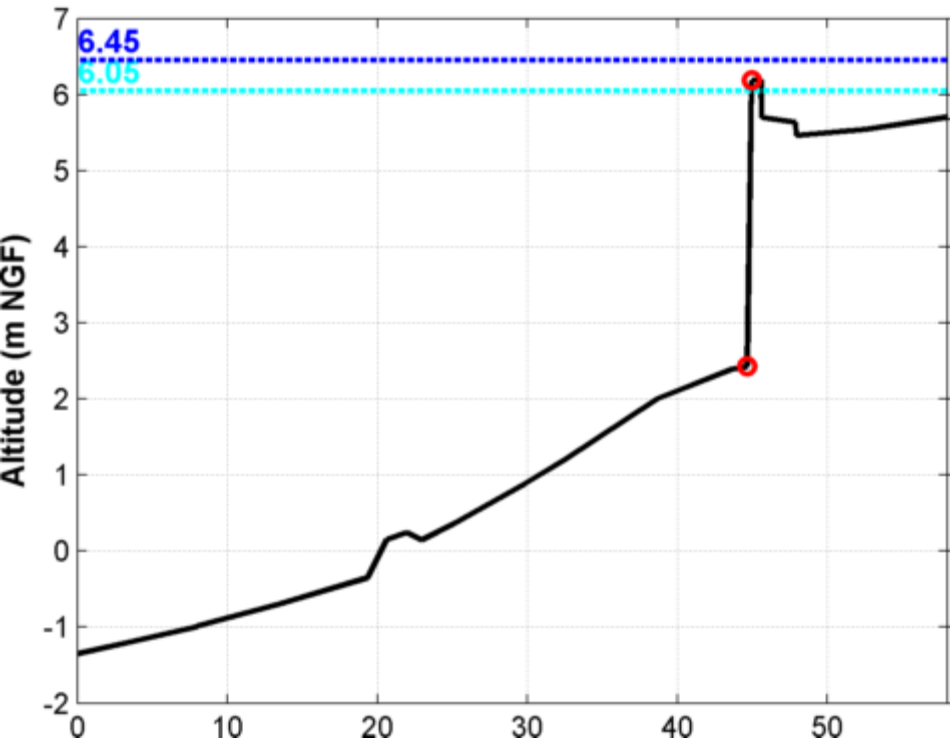
Profil 3



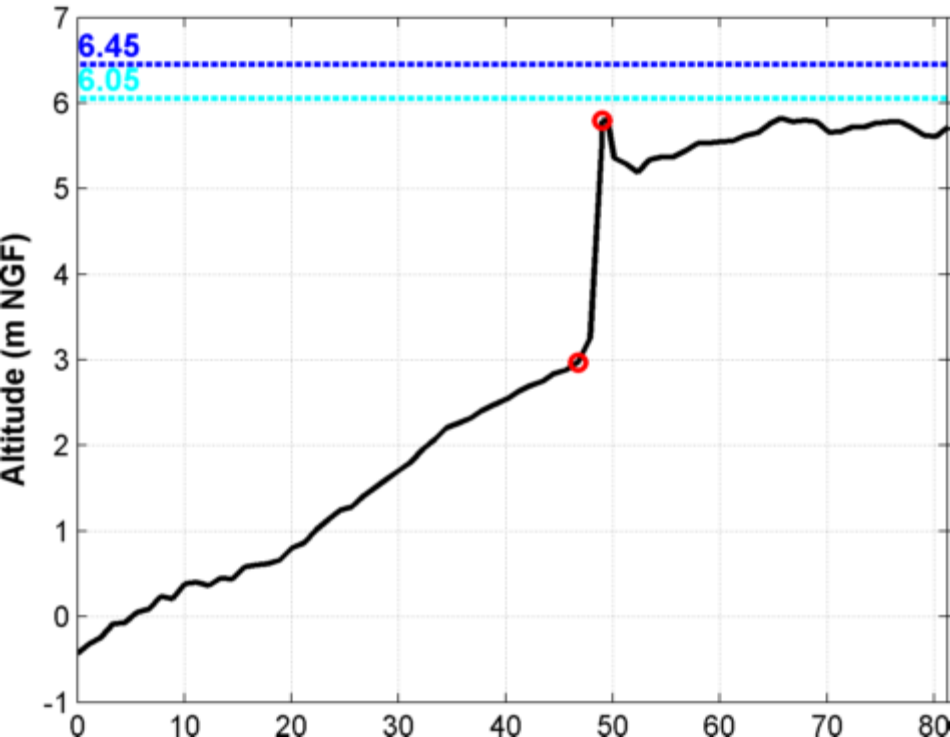
Profil 4



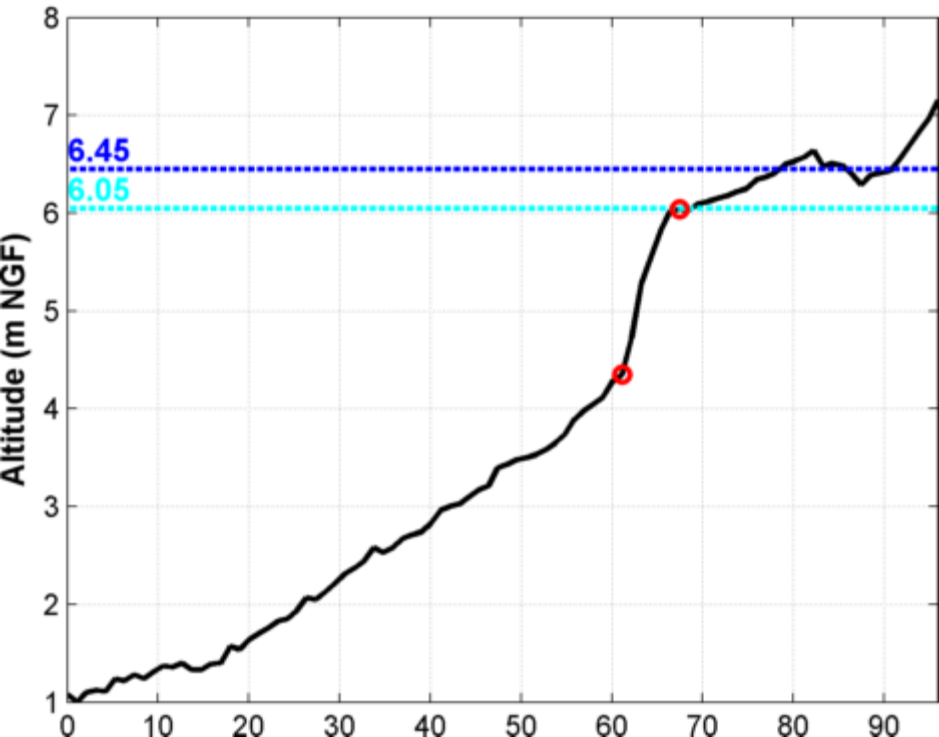
Profil 5



Profil 6

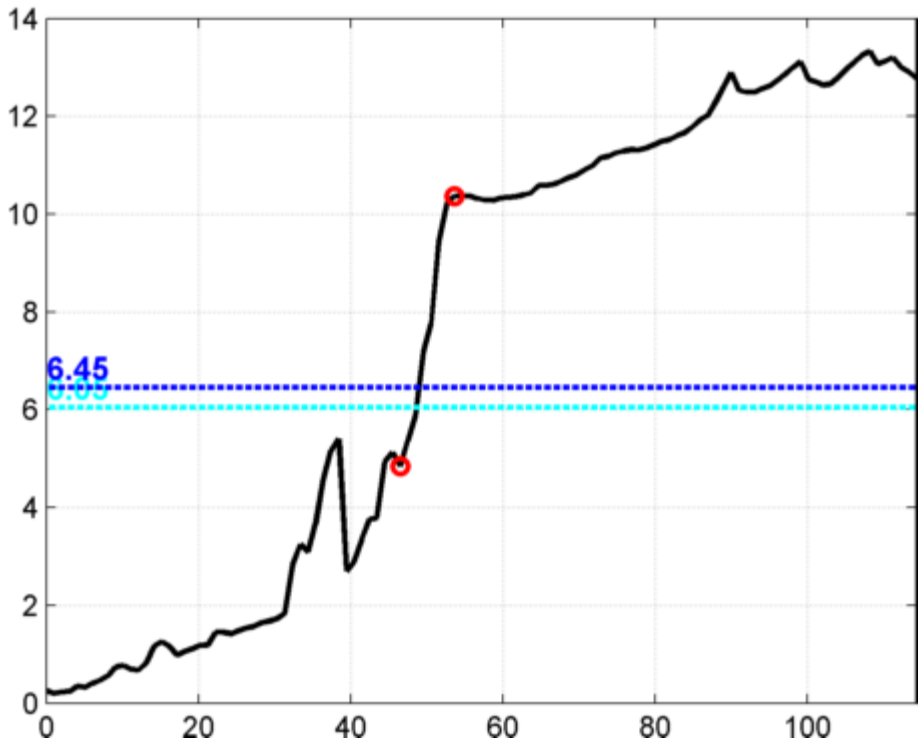


Profil 7

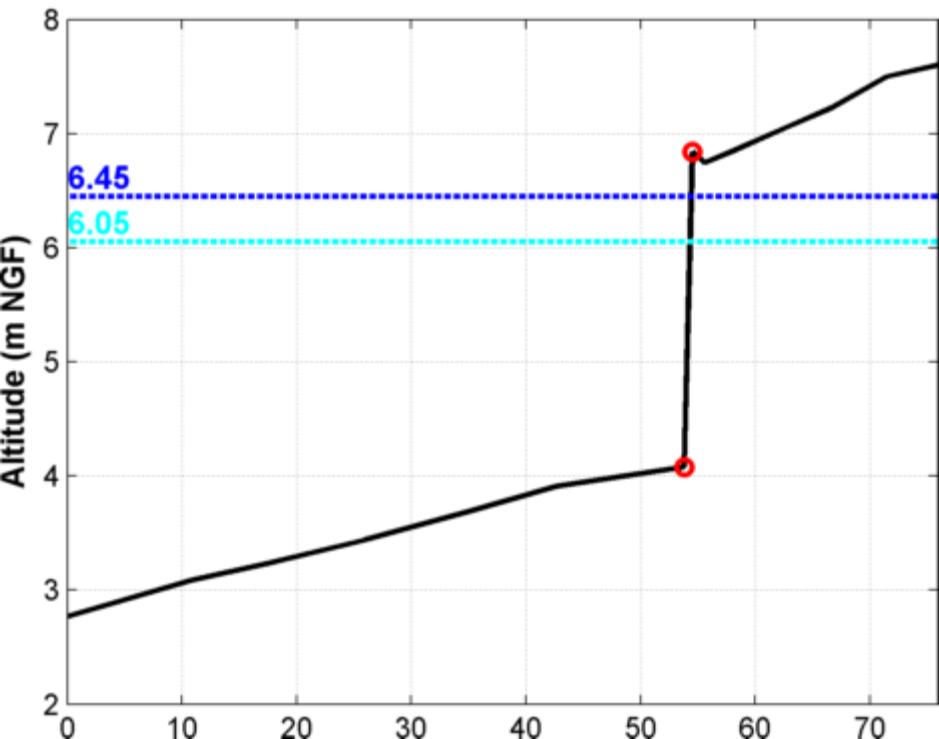


Profil 8

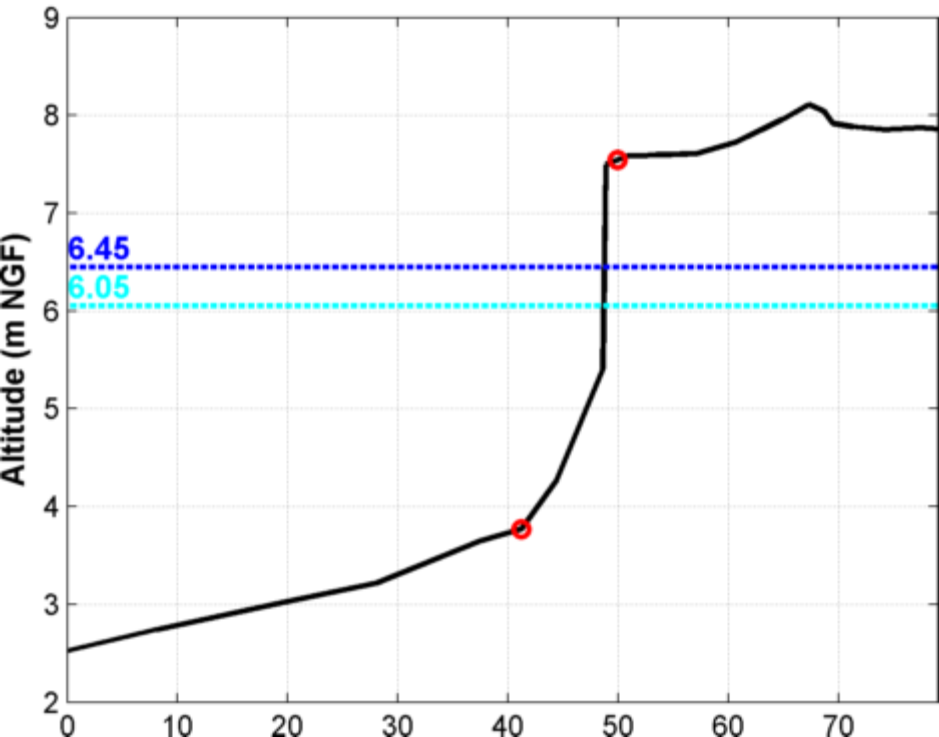
Altitude (m NGF)



Profil 9

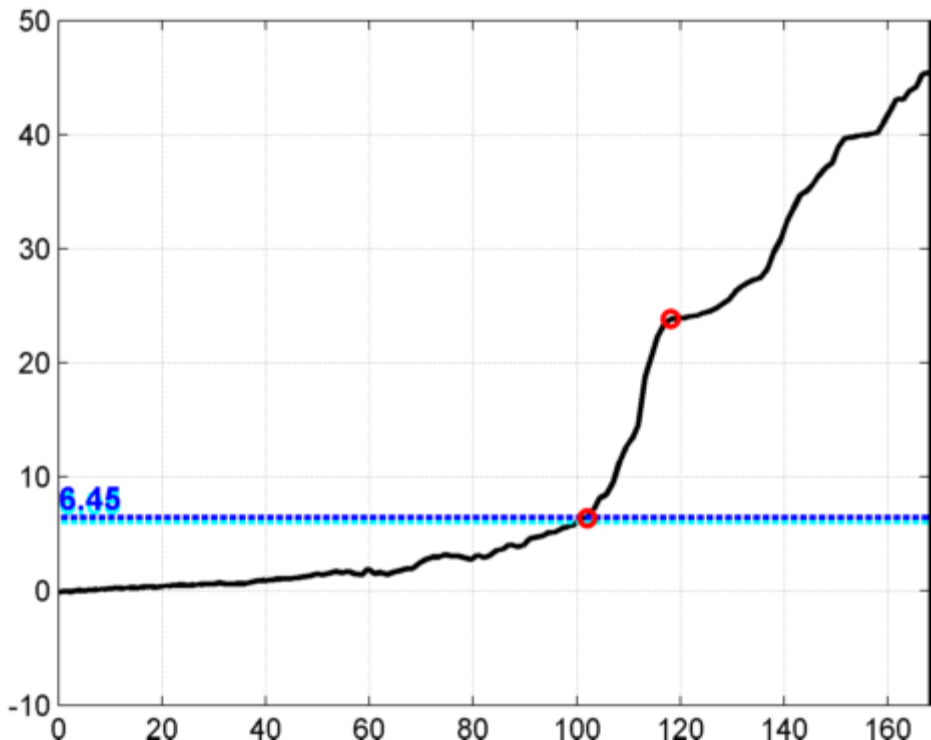


Profil 10

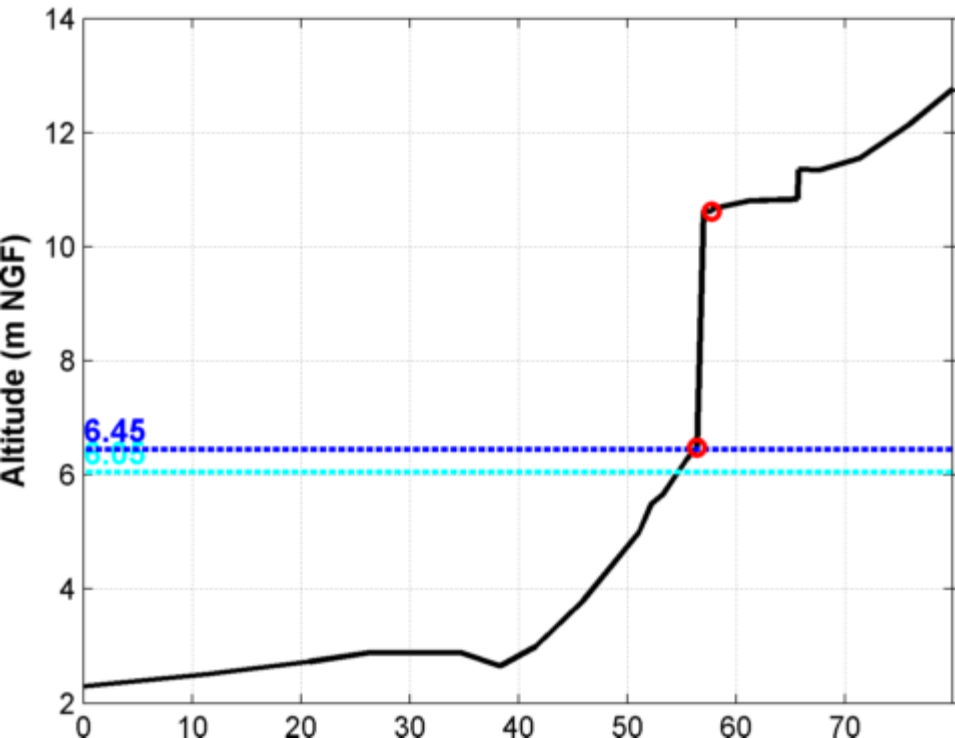


Profil 11

Altitude (m NGF)

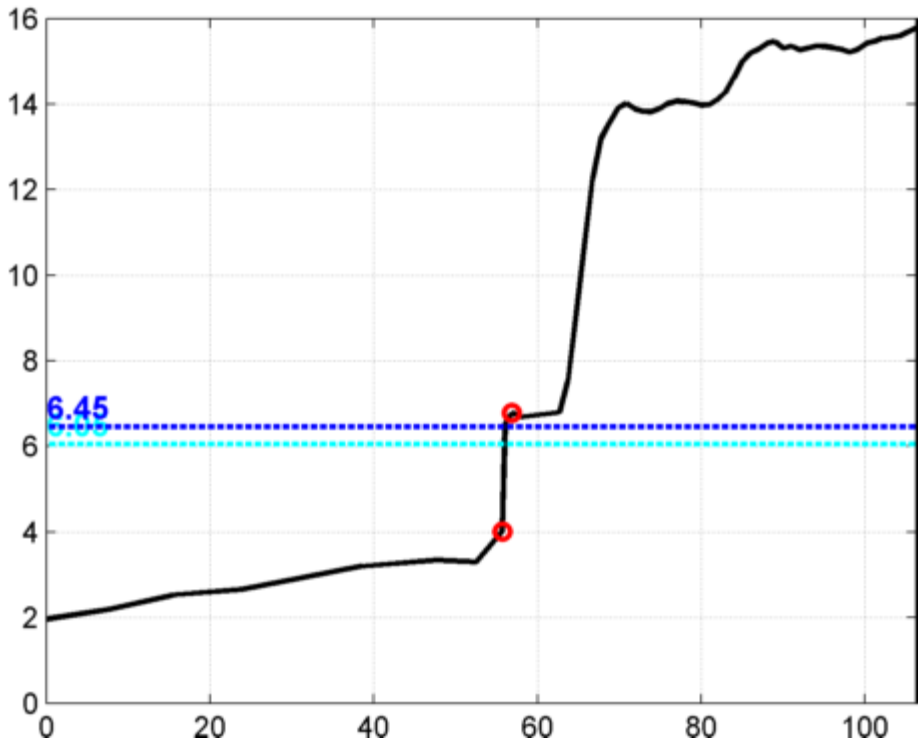


Profil 12

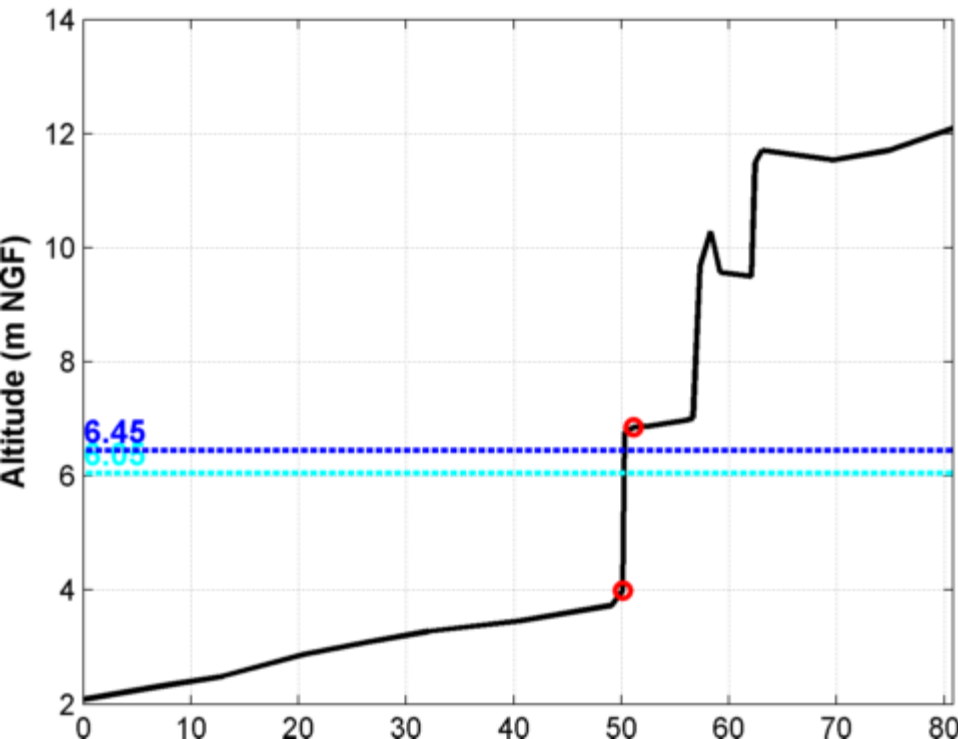


Profil 13

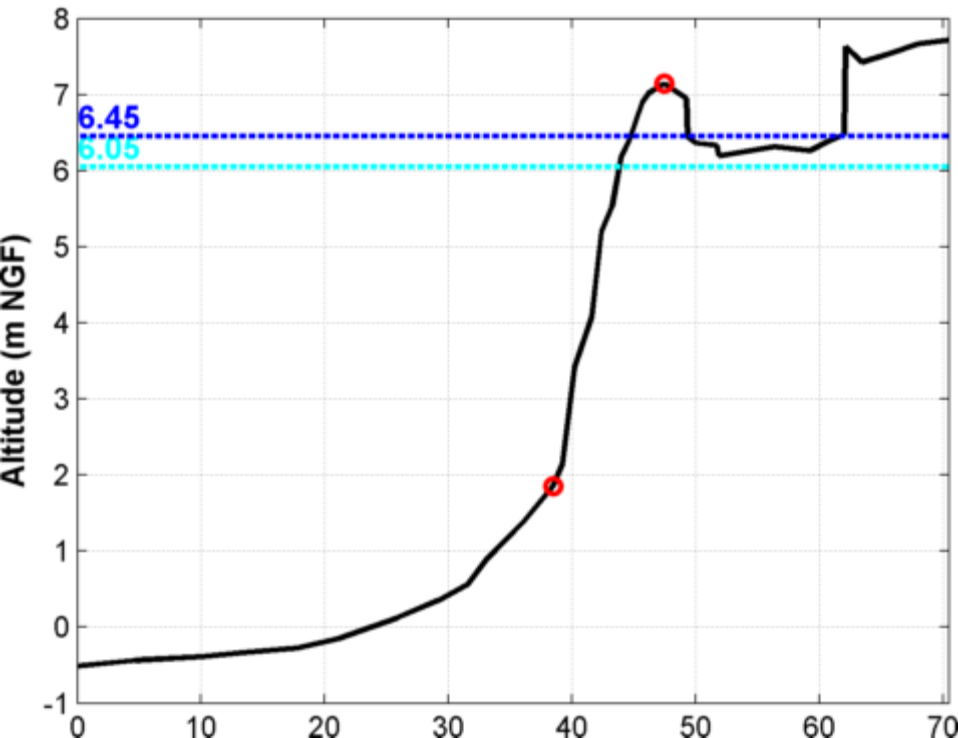
Altitude (m NGF)



Profil 14

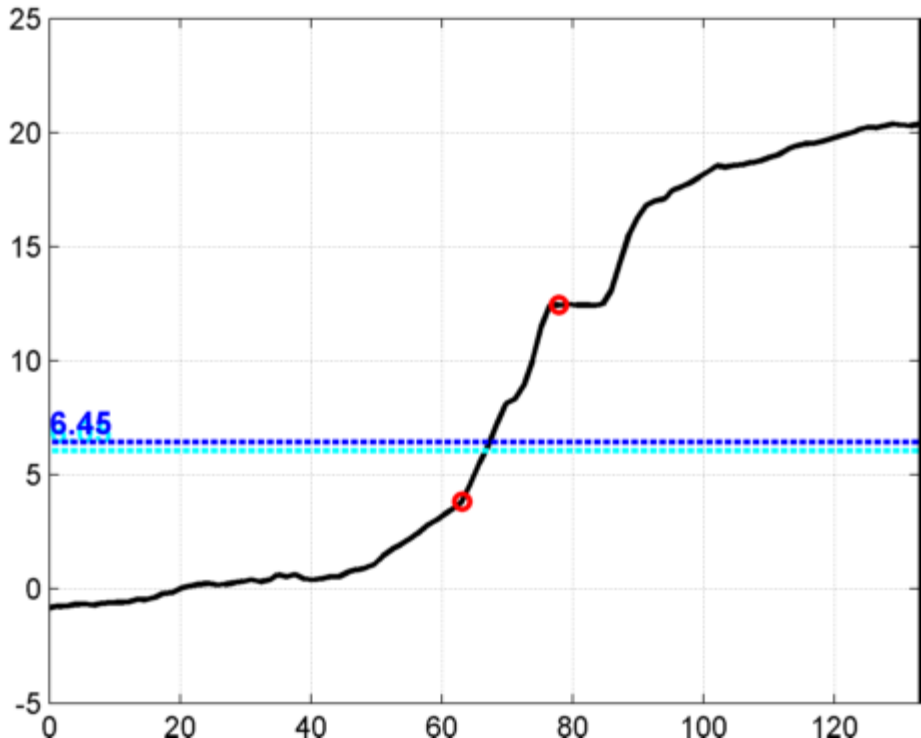


Profil 15

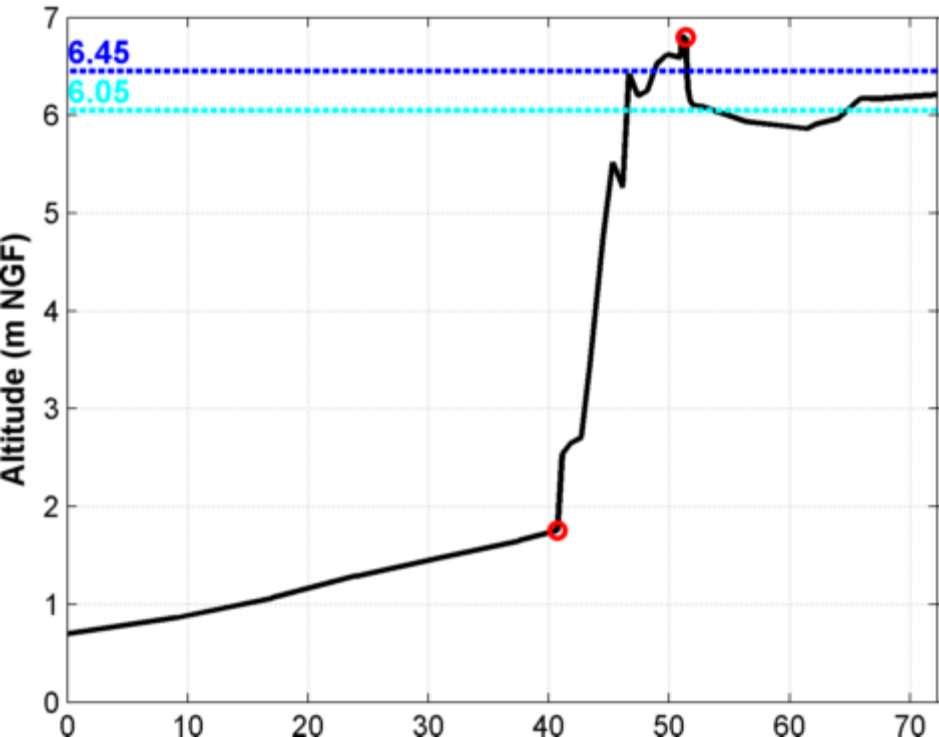


Profil 16

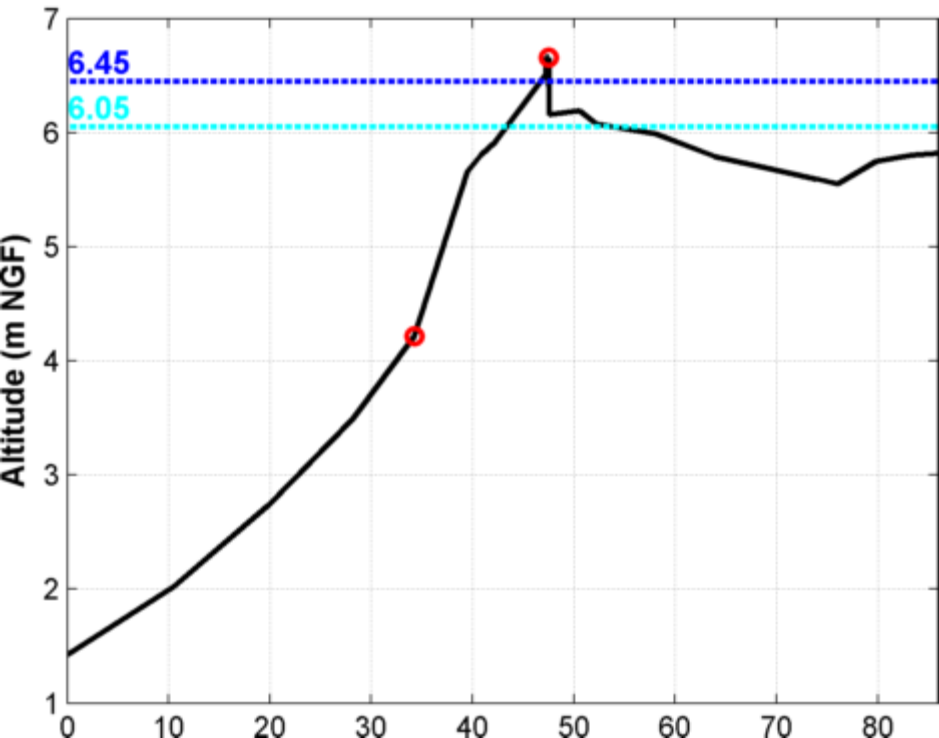
Altitude (m NGF)



Profil 17

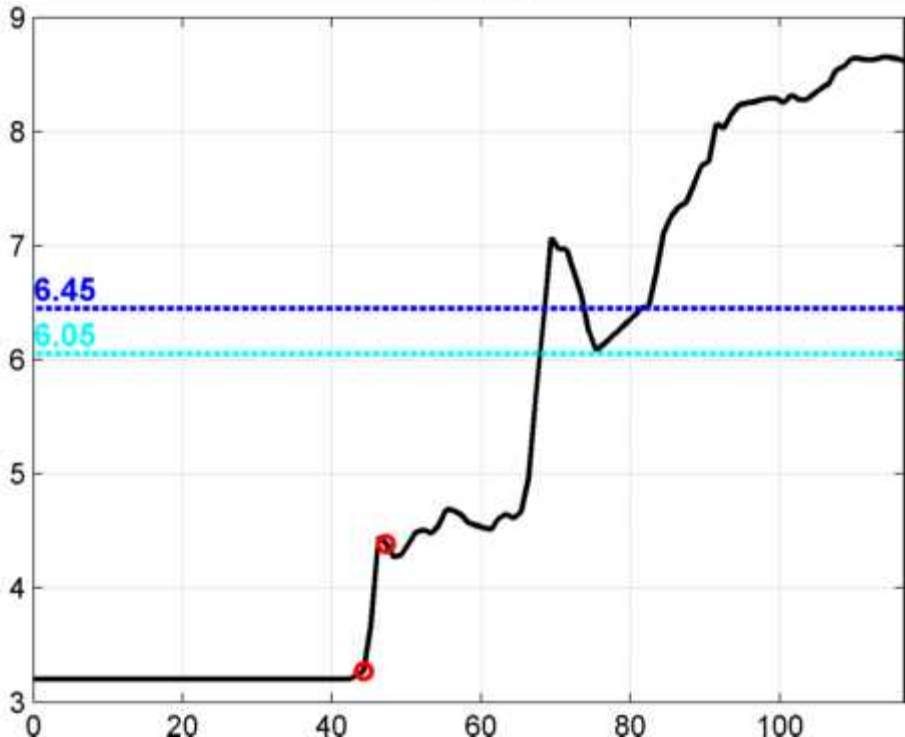


Profil 18

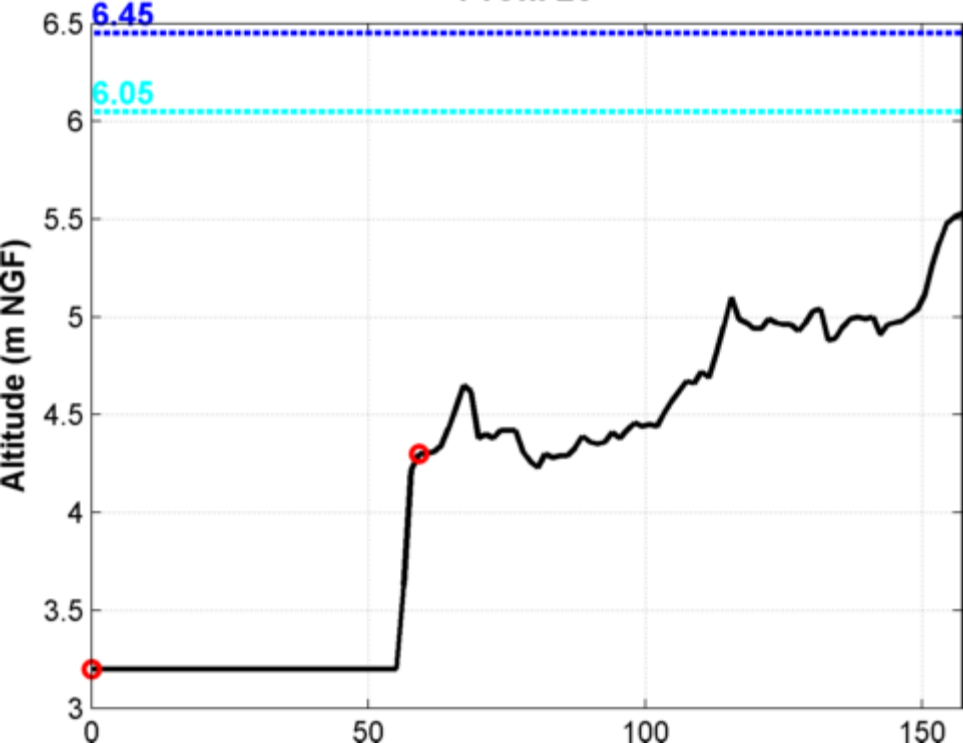


Profil 19

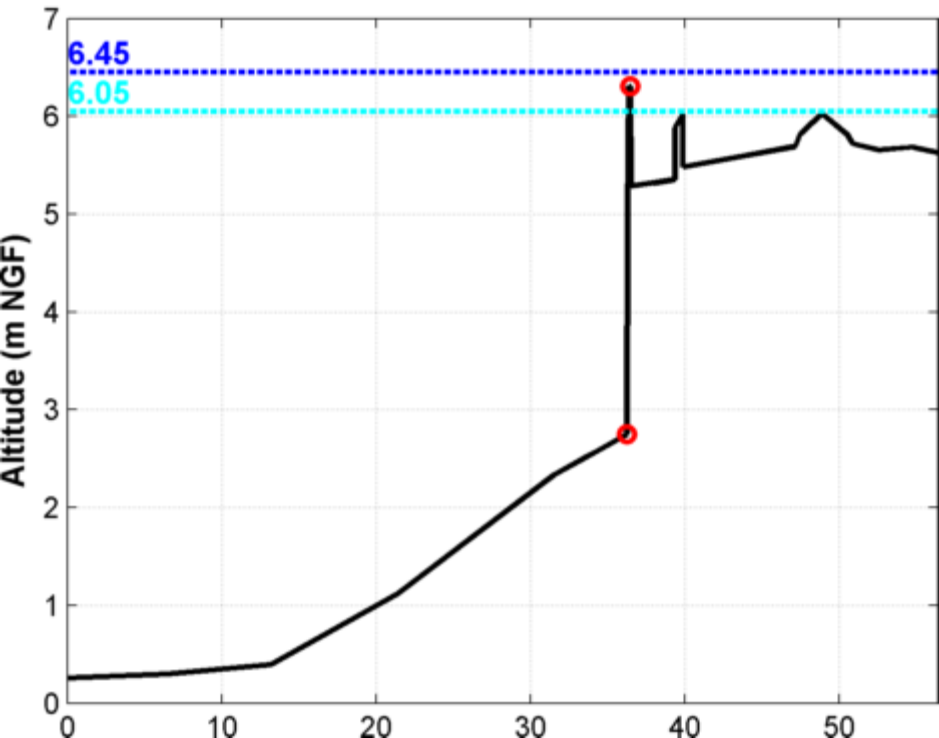
Altitude (m NGF)



Profil 20

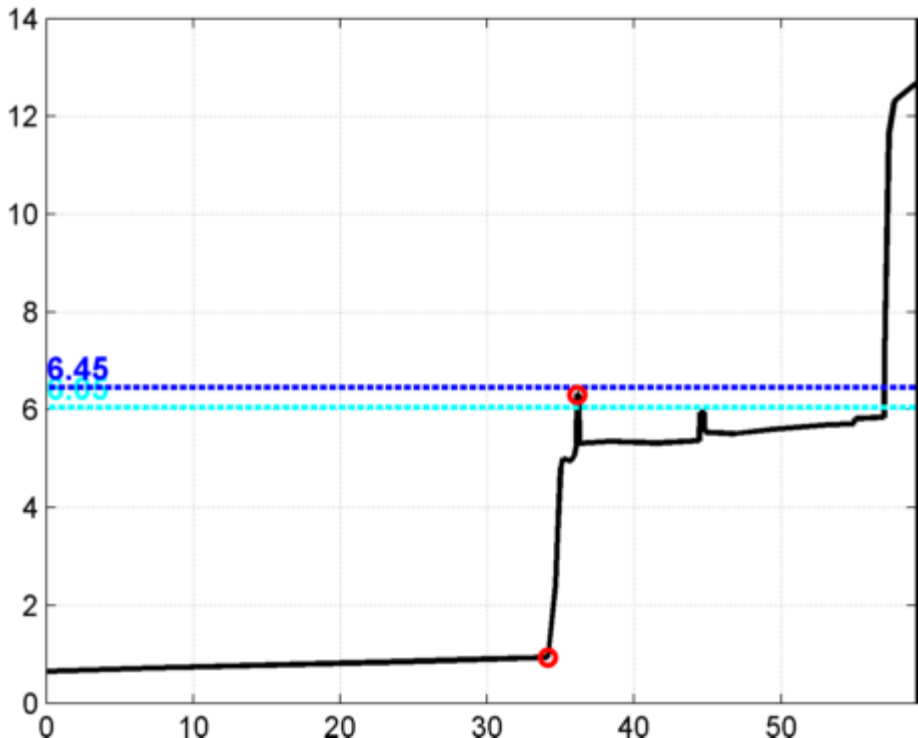


Profil 21

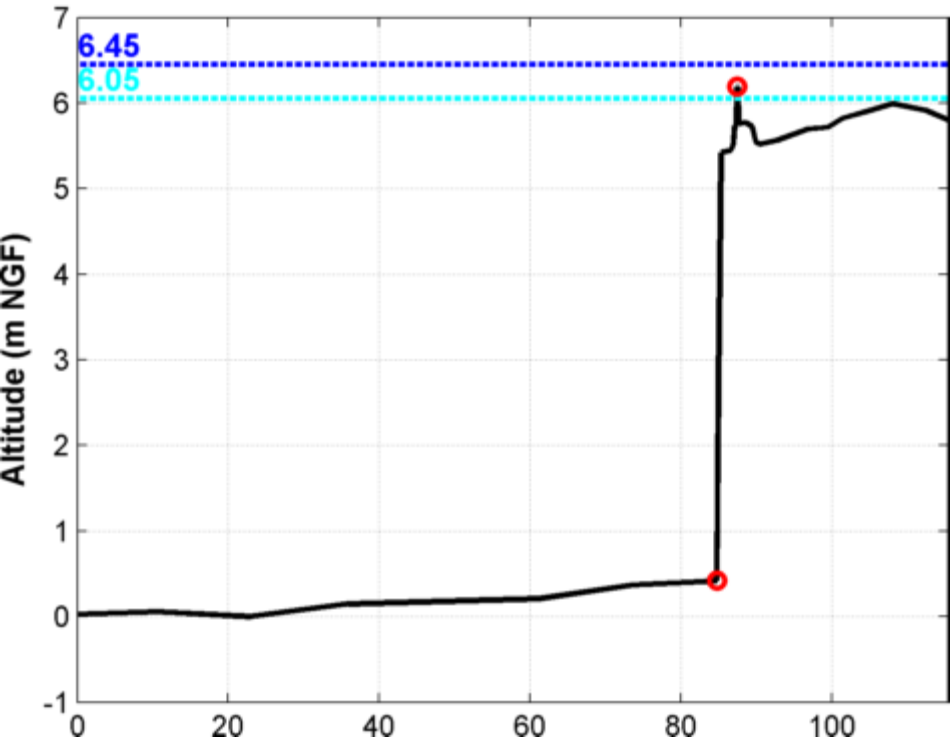


Profil 22

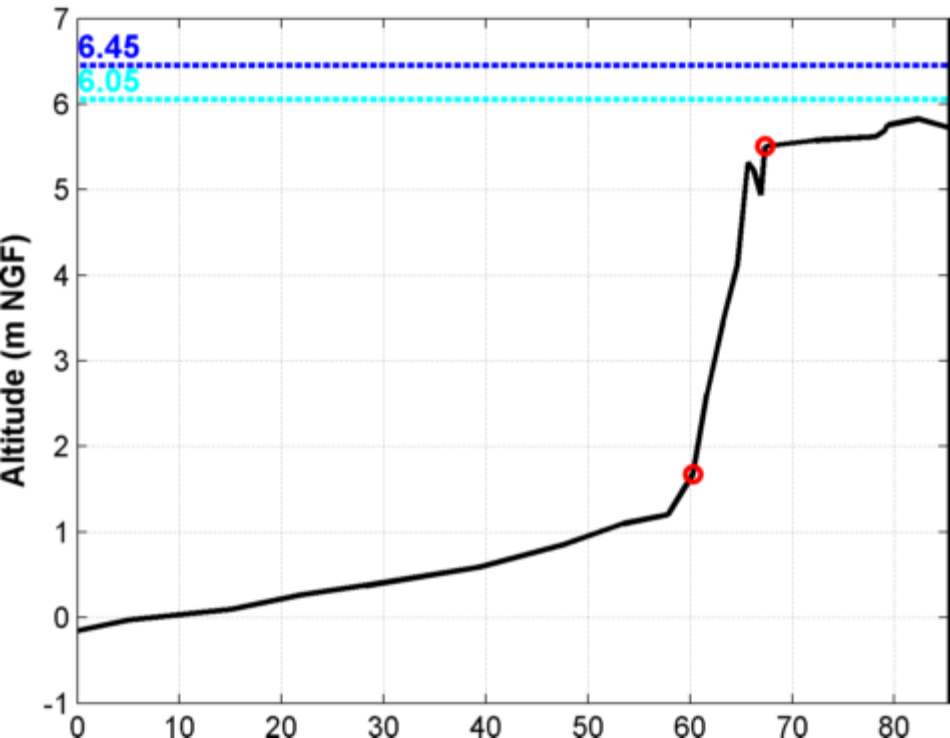
Altitude (m NGF)



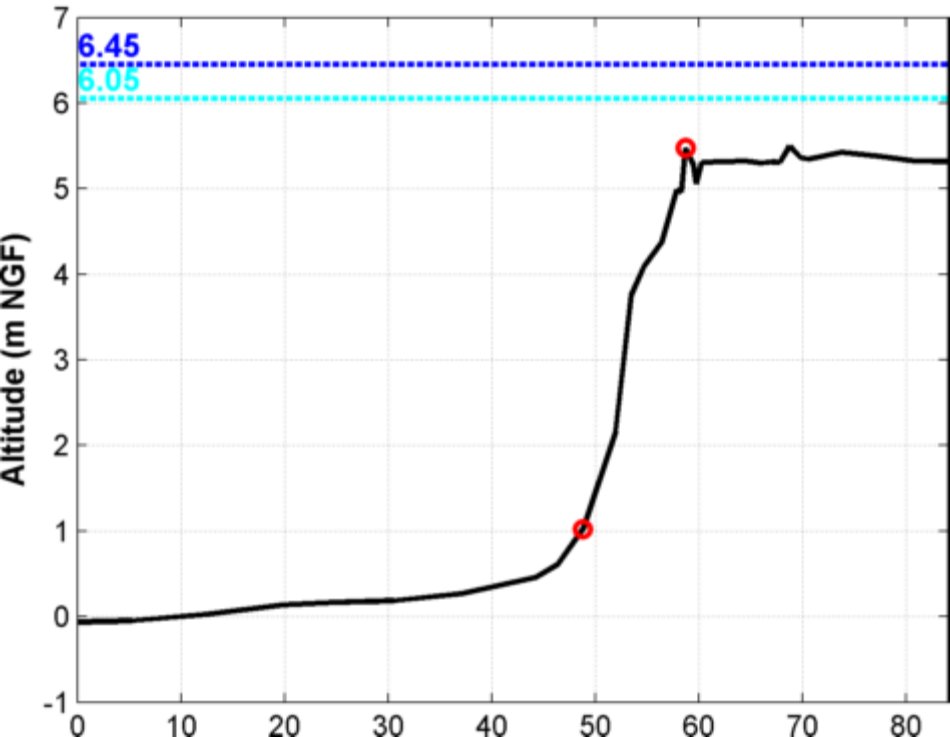
Profil 23



Profil 24

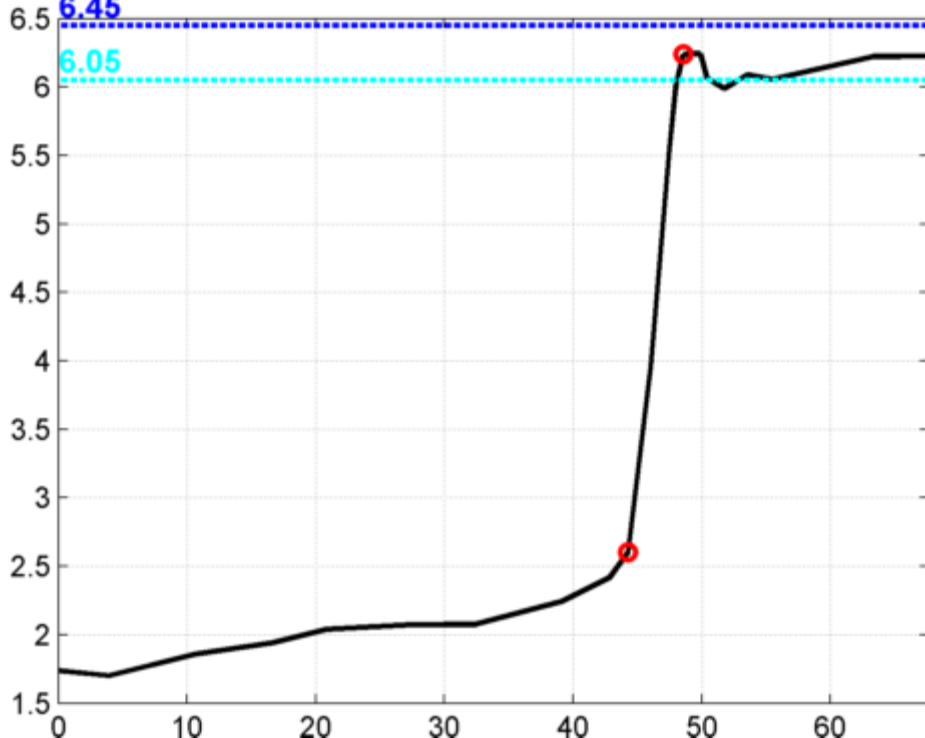


Profil 25



Profil 26

Altitude (m NGF)

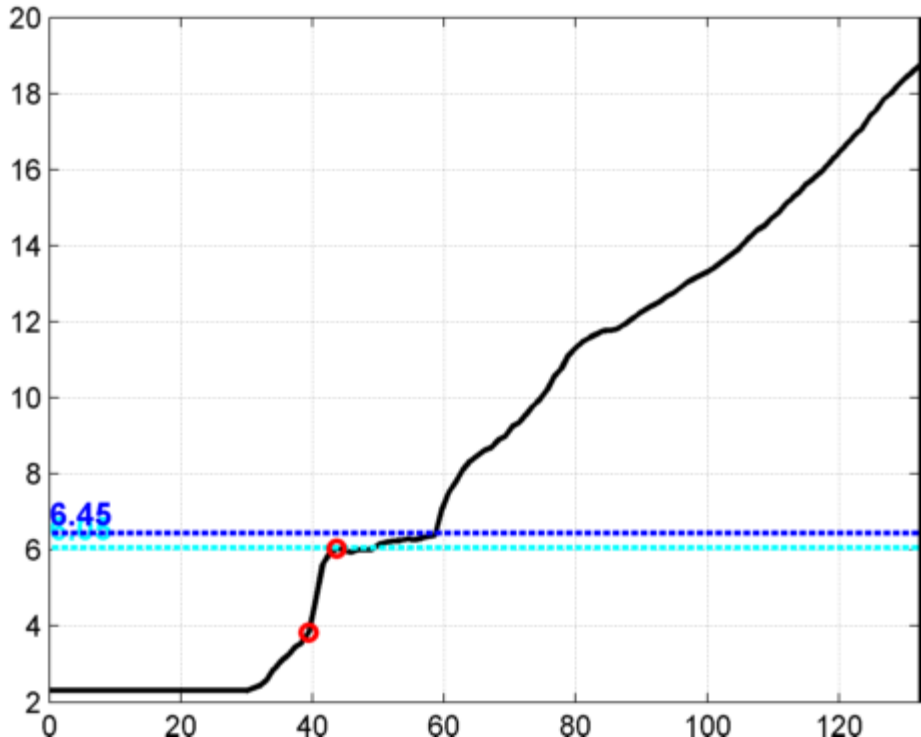


6.45

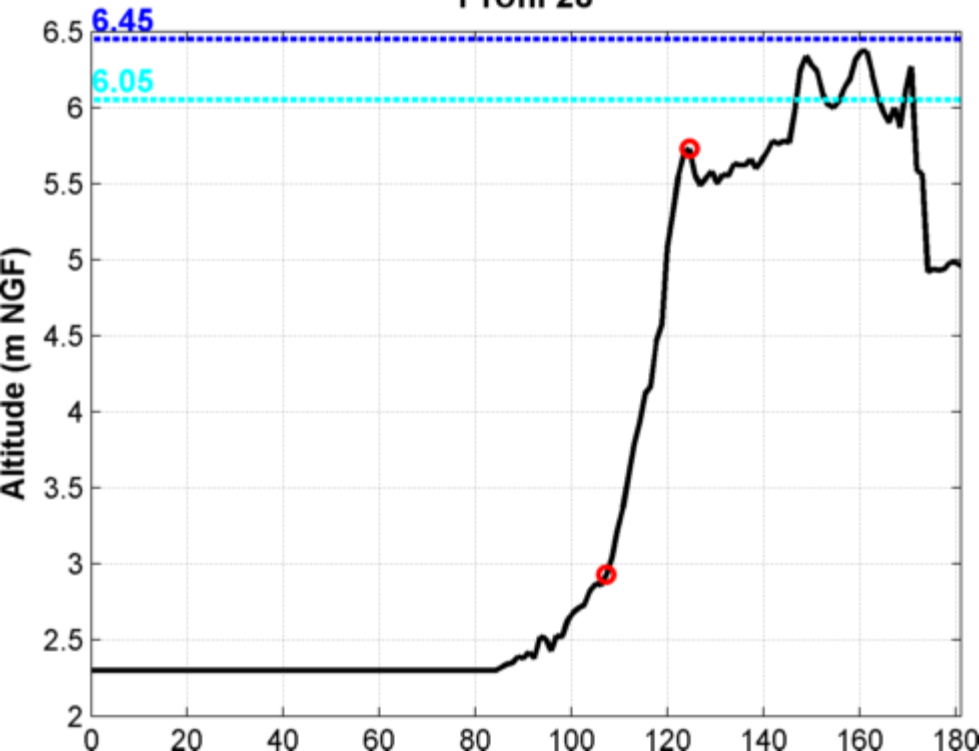
6.05

Profil 27

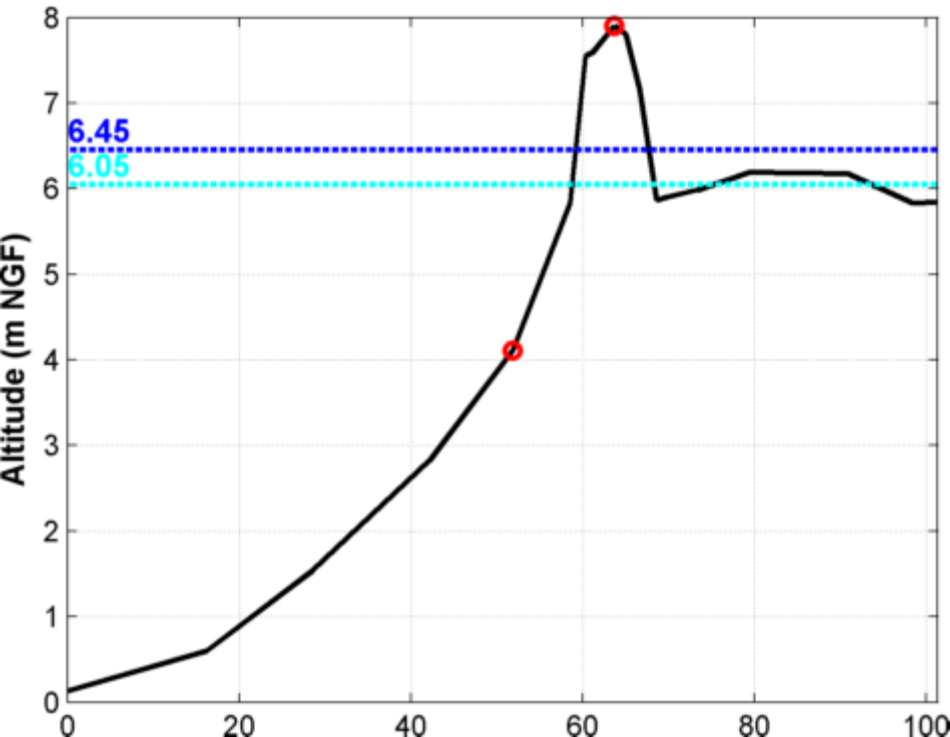
Altitude (m NGF)



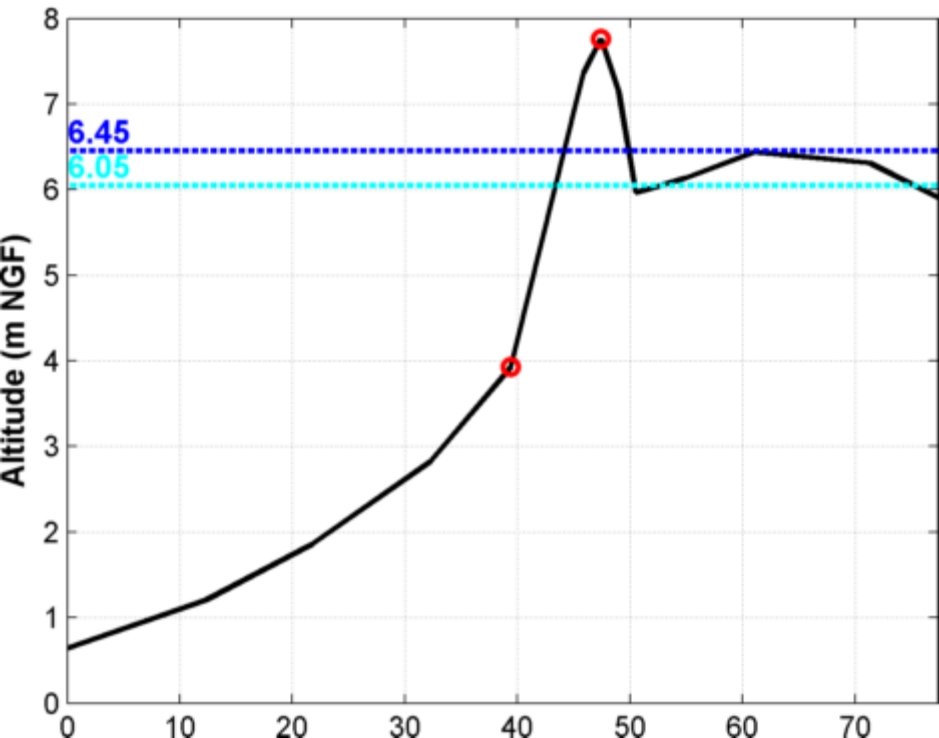
Profil 28



Profil 29

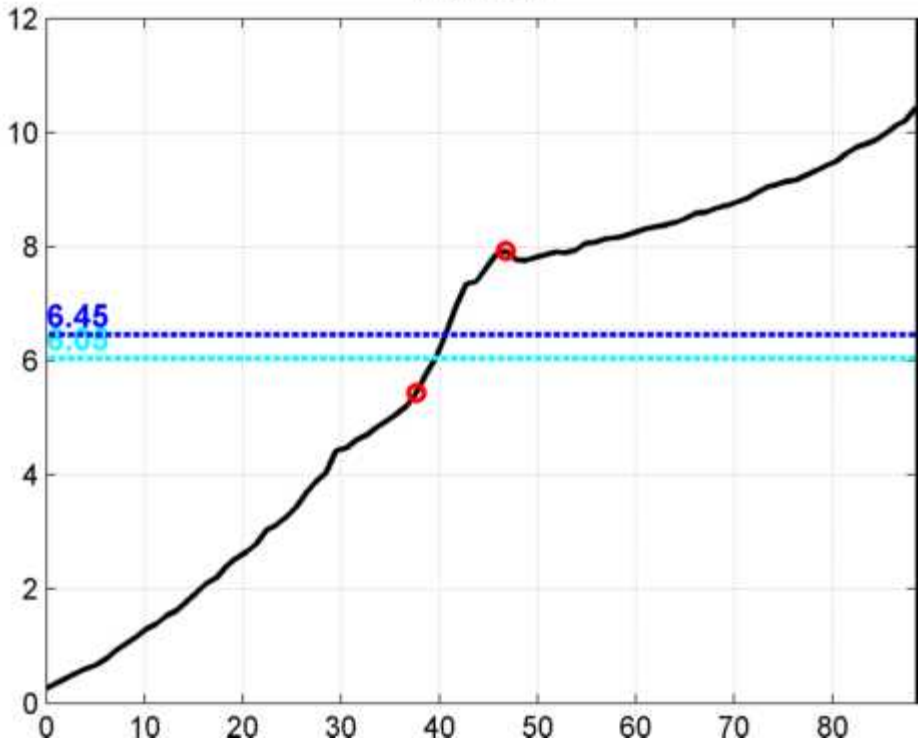


Profil 30



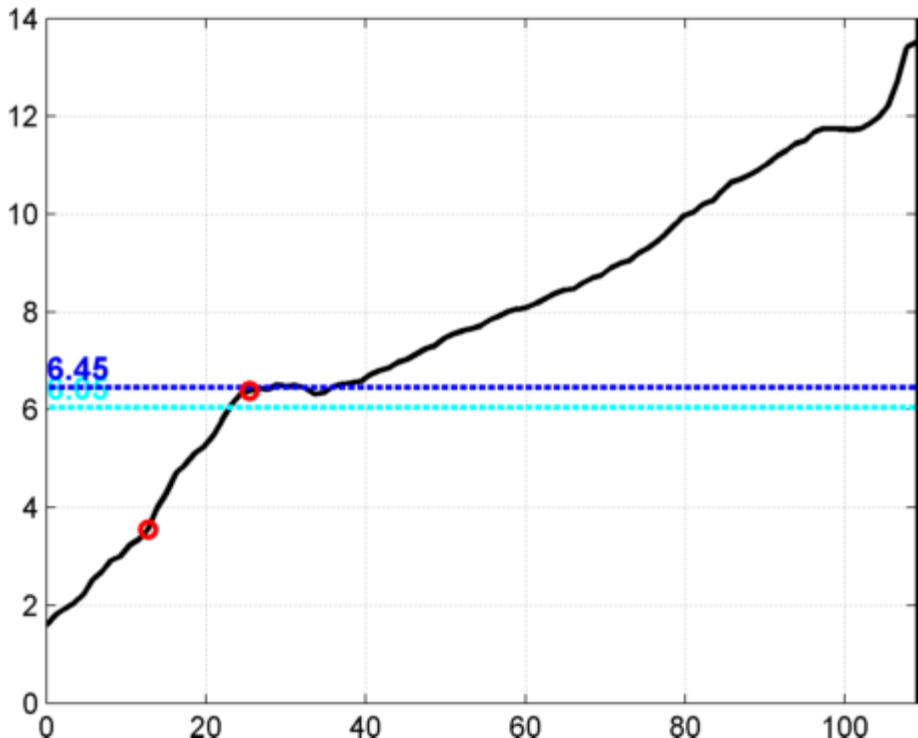
Profil 31

Altitude (m NGF)



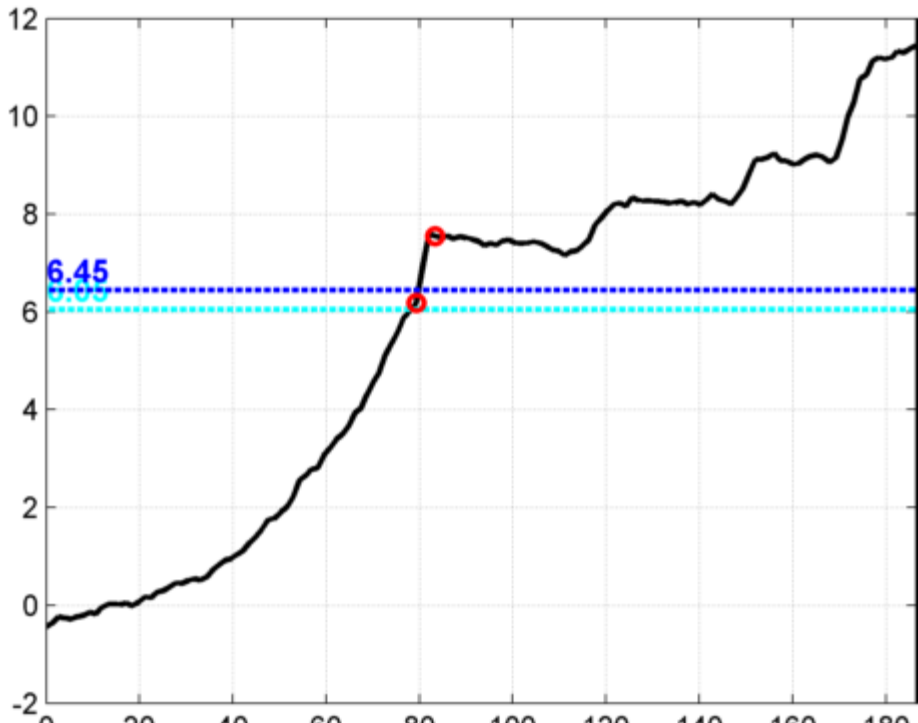
Profil 32

Altitude (m NGF)

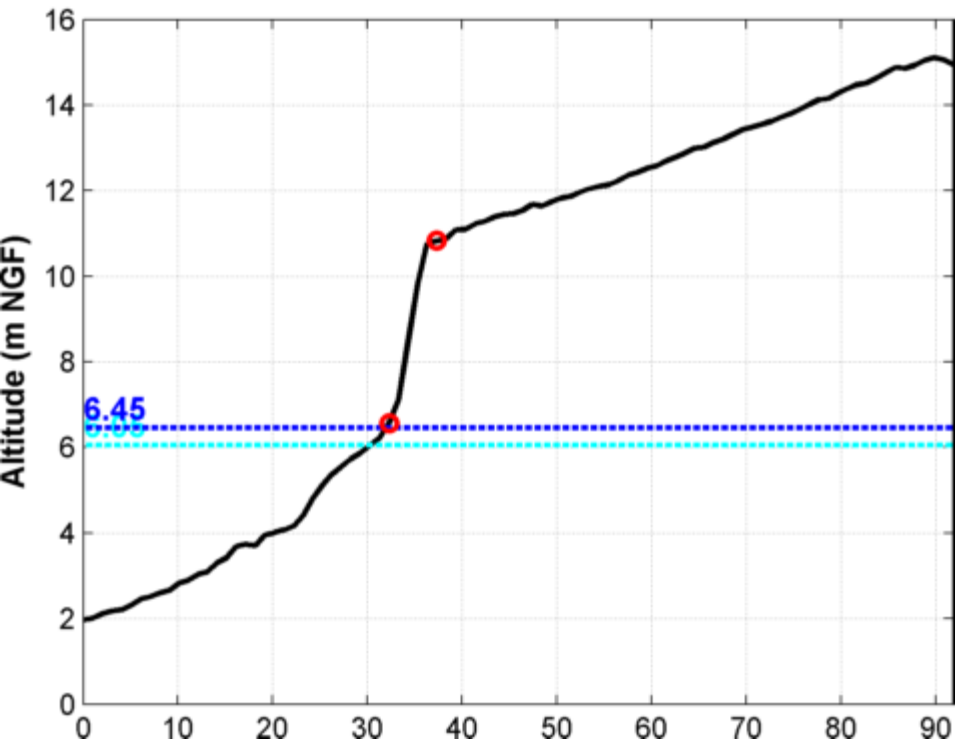


Profil 33

Altitude (m NGF)

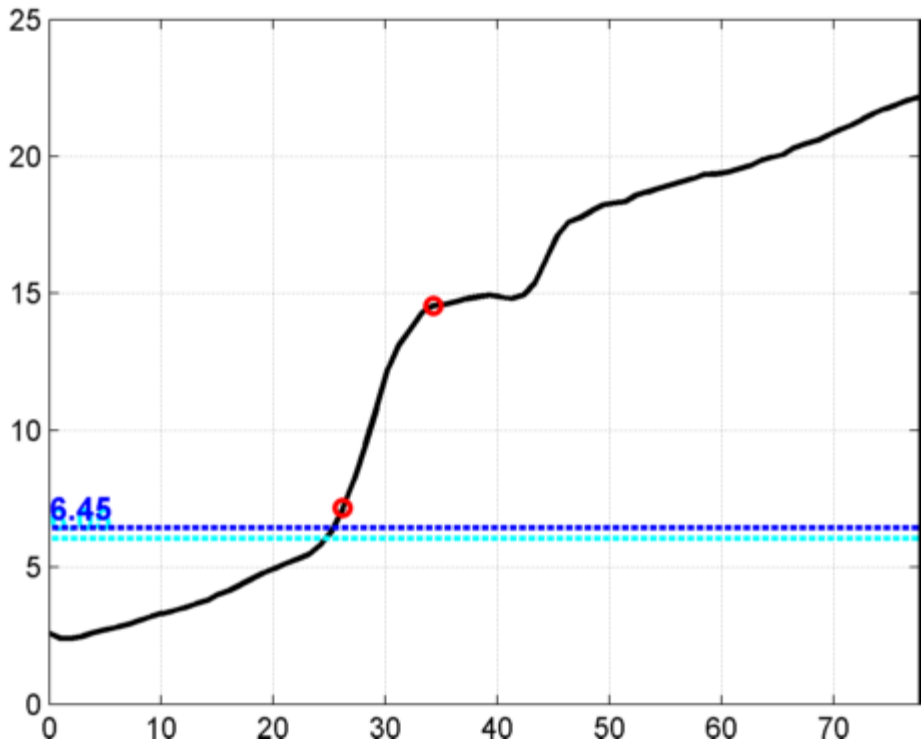


Profil 34

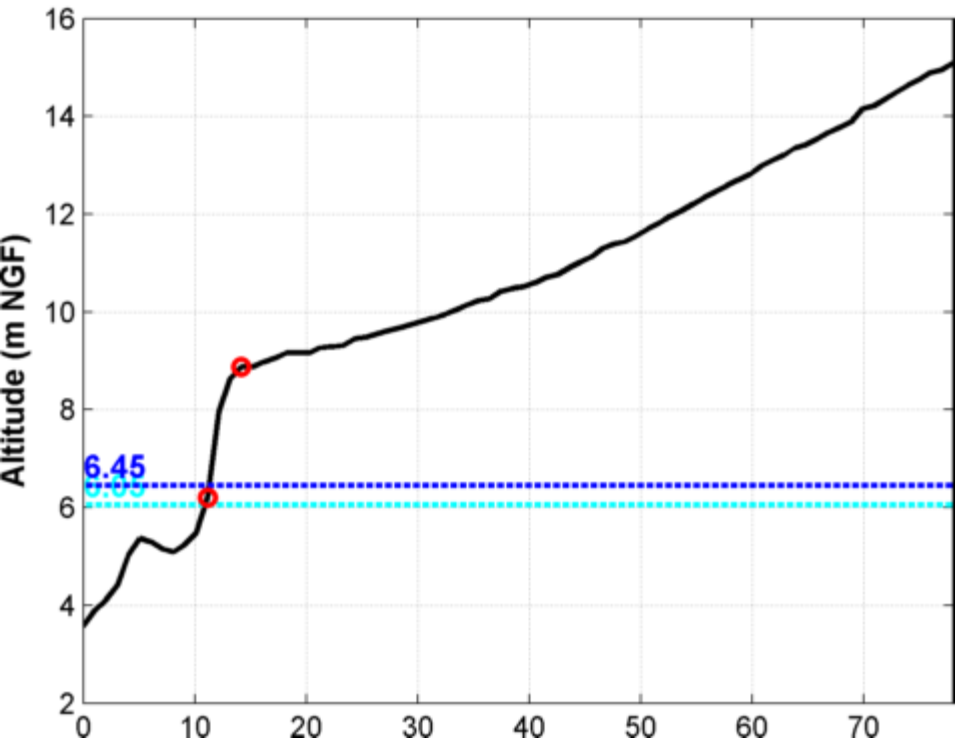


Profil 35

Altitude (m NGF)

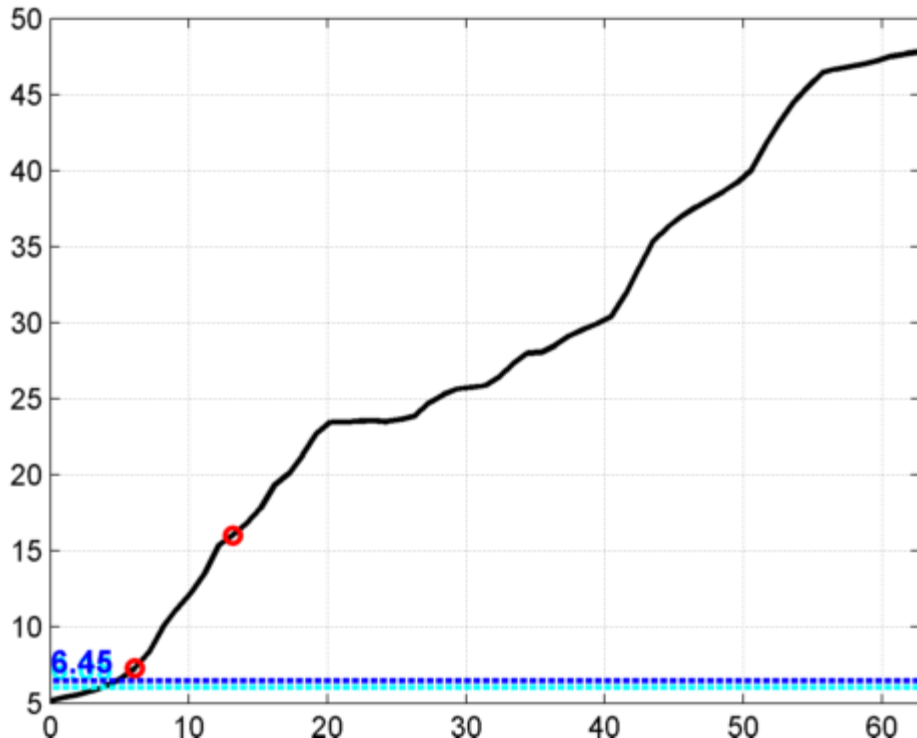


Profil 36



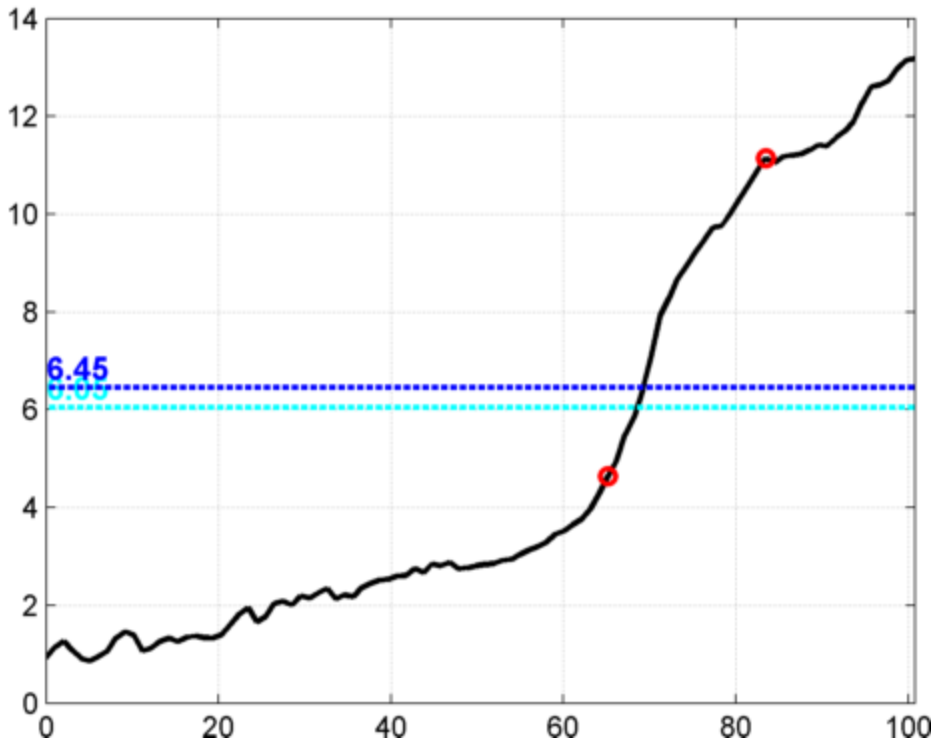
Profil 37

Altitude (m NGF)

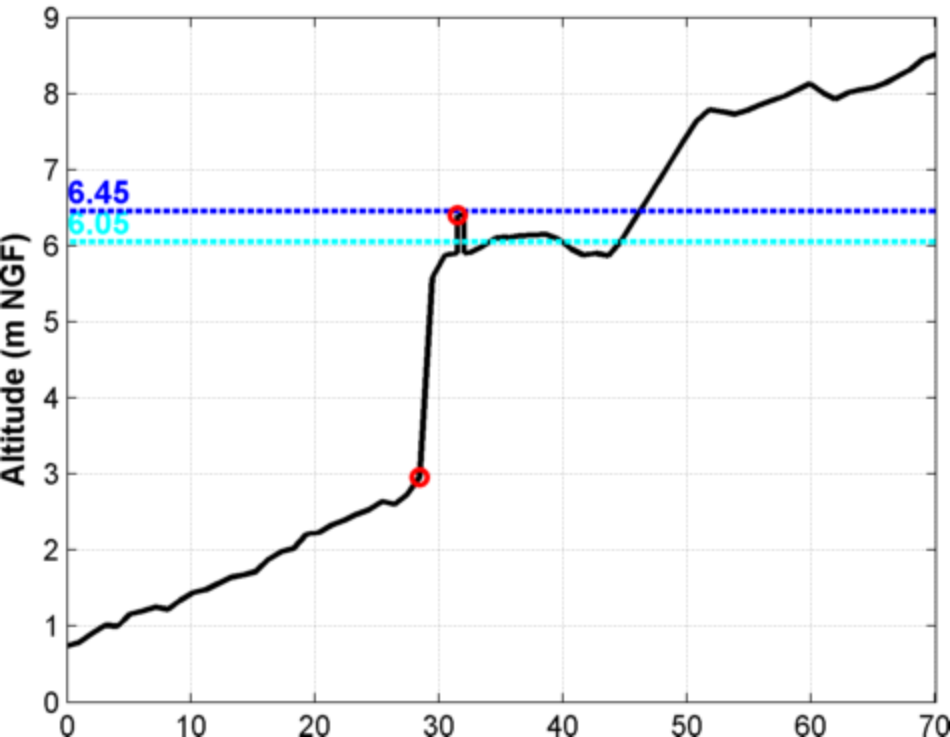


Profil 38

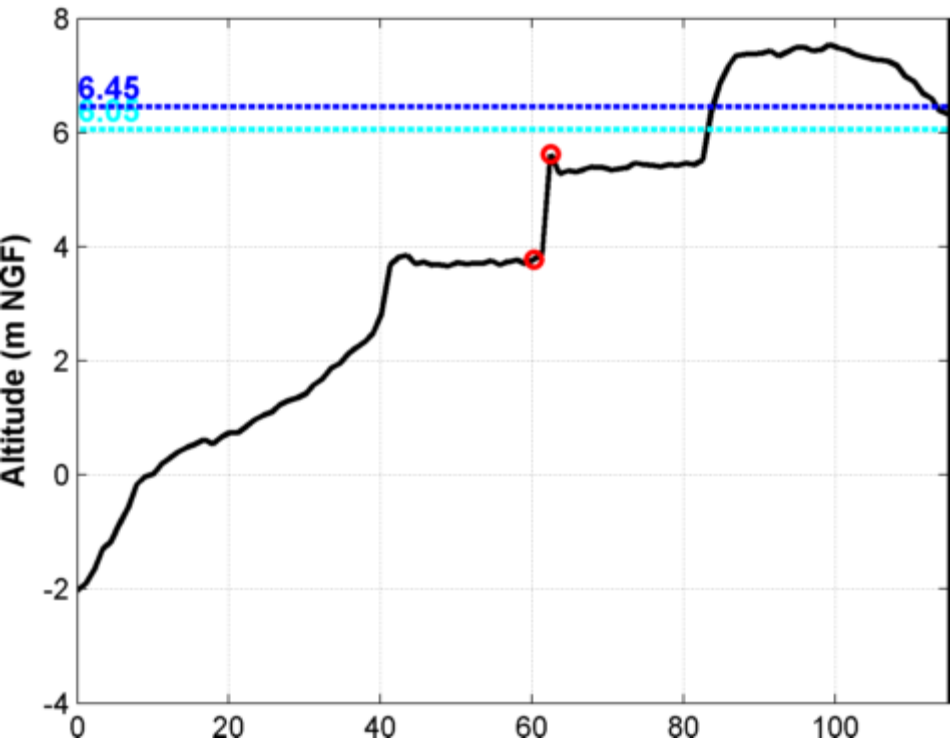
Altitude (m NGF)



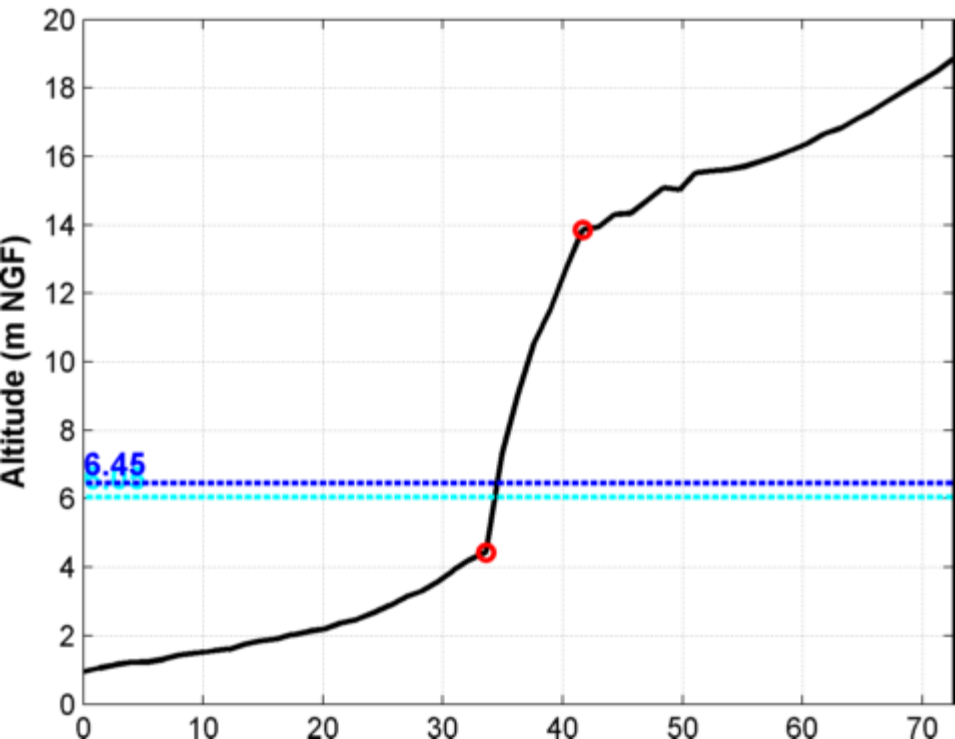
Profil 39



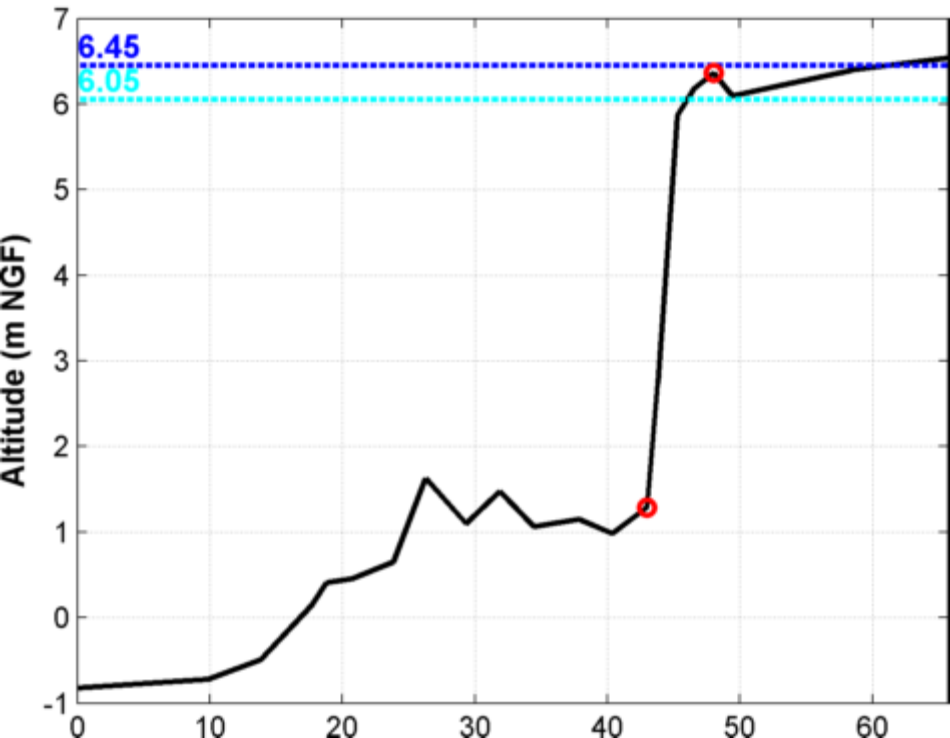
Profil 40



Profil 41



Profil 42



Profil 43

Altitude (m NGF)

