



## Dossier d'environnement final de la zone de potentiel éolien en mer de « Fécamp Grand Large »

### Volet « Dynamique sédimentaire »

*Lot 4 – référence T4.HDYN1\_RAP*

**Auteurs :** Carla Labarthe, Laurent Leballeur, MÉRIL MÉRINDOL, Elodie Marchès, Nona Favé, André Lusven.

**Référence :** convention Shom/DGEC n°96/2024, relative à la réalisation des études de reconnaissance environnementale de site en vue des appels d'offres pour l'implantation d'éoliennes en mer au large des côtes françaises.

## Suivi des révisions

REVISIONS	DATE	COMMENTAIRE
B1	03/11/2025	1 <sup>ère</sup> version du rapport.
B2	12/12/2025	Version révisée suite à la relecture du CEREMA
A2	16/12/2025	Validation version B2 par Cerema, passage en versionA2

## Table des matières

Table des figures .....	5
Liste des tableaux .....	11
1. Introduction.....	12
2. Etat de la connaissance de la zone d'étude .....	13
2.1 Localisation .....	13
2.2 Bathymétrie .....	14
2.3 Paramètres sédimentaires .....	16
2.3.1 Faciès sédimentaire .....	16
2.3.2 Répartition des types de nature des fonds.....	18
2.3.3 Structures géologiques particulières.....	20
2.3.4 Epaisseur sédimentaire .....	22
2.4 Paramètres hydrodynamiques.....	23
2.4.1 Niveau d'eau.....	23
2.4.2 La réanalyse HYWAT : marée, surcote, courant, vague.....	23
2.4.3 Analyse des conditions hydrodynamiques aux points du maillage du modèle .. .....	23
2.4.3.1 Courant.....	23
2.4.3.2 Vague.....	25
2.5 Apports fluviaux .....	28
3. Analyse de la mise en mouvement des sédiments et évaluation du transport solide	30
3.1 Méthodologie .....	30
3.2 Définition des tailles de grains représentatives de la zone FGL.....	30
3.3 Calcul des seuils critiques de mise en mouvement des sédiments.....	31
3.4 Calcul des types de transport.....	33
3.5 Résultats .....	34
3.5.1 Statistique de mise en mouvement des sédiments .....	34
3.5.1.1 Analyse du temps de mobilité des sédiments par charriage ou suspension selon Wu & Lin (2014) .....	34

3.5.1.2	Analyse du temps de mobilité des sédiments sous l'effet combiné des vagues et courants selon Soulsby (1997).....	35
3.5.2	Evaluation du transport solide.....	37
4.	Analyse des morphologies sédimentaires potentiellement dynamiques .....	39
4.1	Données bathymétriques .....	39
4.2	Incertitudes des levés bathymétriques.....	42
4.3	Résultats .....	43
5.	Conclusion.....	47
6.	Bibliographie .....	48
7.	Annexes .....	49
7.1	Point P1 (Ouest).....	49
7.2	Point P2 (Centre).....	65
7.3	Point P3 (Est).....	81

## Table des figures

<b>Figure 1.</b> Carte de la zone d'étude avec l'emprise de la zone EMR FGL.....	13
<b>Figure 2.</b> Carte bathymétrique 2023-2024 pour la zone Fécamp Grand Large et localisation des points de calculs P1, P2 et P3 (maillage HYWAT) sélectionnés pour l'extraction des données hydrodynamiques.....	15
<b>Figure 3.</b> Carte de localisation des échantillons sédimentaires prélevés dans la zone EMR FGL. La détermination des faciès sédimentaires est détaillée dans le <b>Tableau 1</b> .....	16
<b>Figure 4.</b> Diagramme ternaire Silts + Argiles = Vase ( <i>Mud</i> ) – Sable ( <i>Sand</i> ) – Gravier ( <i>Gravel</i> ) avec les 59 prélèvements sédimentaires (points noirs) prélevés dans la zone EMR FGL. L'orientation des tirets sur les axes indique le sens de lecture des proportions sédimentaires (%). .....	17
<b>Figure 5.</b> Carte de nature des fonds de la zone EMR Fécamp Grand Large réalisée à partir des levés S202303300 et S202400600. La partie « sans données » en gris, correspond à la nouvelle emprise non traitée au moment du rendu de ce livrable. ....	19
<b>Figure 6.</b> Répartition des types de sédiments de la boîte B de la zone EMR Fécamp Grand Large à partir de la carte de nature de fond présentée <b>Figure 5</b> . S : sables ; SG : sables et graviers ; GS : graviers et sables ; G : graviers ; GC : graviers et cailloutis ; CG : cailloutis et graviers ; C : cailloutis ; R : roches. ....	20
<b>Figure 7.</b> Carte de localisation des structures sédimentaires et géologiques dans la zone EMR FGL. ....	21
<b>Figure 8.</b> Carte d'épaisseur sédimentaire de la zone EMR FGL.....	22
<b>Figure 9.</b> Carte des courants maximum (haut) et moyens (bas) modélisés sur la période 1979-2024 avec le rejeu HYWAT. Les trois points du maillage HYWAT sélectionnés sont représentés par des points noirs.....	24
<b>Figure 10.</b> Distributions mensuelles des hauteurs significatives des vagues ( $H_s$ ) au point P2 du maillage du modèle situé au centre de la zone FGL). Les extrémités des boîtes correspondent au 1 <sup>er</sup> et 3 <sup>ème</sup> quartile de la distribution mensuelle. Les segments inférieurs et supérieurs correspondent respectivement aux valeurs $H_s$ minimales et maximales du mois. Les traits orange sont les valeurs médianes mensuelles et les triangles verts les moyennes mensuelles.....	25
<b>Figure 11.</b> Distribution des $H_s$ en fonction de $D_m$ au point P2 du maillage du modèle (centre de la zone FGL). Les secteurs directionnels couvrent chacun un intervalle de 22.5 °. La rose considère l'ensemble des états de mer sur la période 1979-2024 (rejeu HYWAT). ....	26
<b>Figure 12.</b> Carte des hauteurs significatives maximum (haut) et moyens (bas) modélisés sur la période 1979-2024 avec le rejeu HYWAT. Les points du maillage HYWAT sélectionnés sont représentés par des points noirs. ....	27
<b>Figure 13.</b> Champ de concentration en matière en suspension des eaux de surface, interpolé à partir de mesures effectuées début septembre 1994 aux stations FLUX-MANCHE II (d'après Velegrakis et al., 1999, River, 2013, modifiée Mérindol, 2025).....	29
<b>Figure 14.</b> Diamètres médians ( $D_{50}$ ) des grains mesurés dans les 59 échantillons sédimentaires prélevés dans la zone d'étude EMR FGL. Les couleurs indiquent les classes sédimentologiques des échantillons (faciès). ....	31
<b>Figure 15.</b> Paramètres critiques de Shields et Soulsby ( $\theta_{cr}$ ) en fonction du diamètre de grain adimensionnel ( $D^*$ ), extrait de Soulsby (1997). ....	32

- Figure 16.** Proportion de temps (en %) sur la période 1980-2024 durant laquelle le seuil critique de la contrainte en charriage ou en suspension est dépassé, en fonction du  $D_{50}$  (échelle log) pour chaque point du rejeu HYWAT (point P1, P2 et P3). ..... 34
- Figure 17.** Proportion de temps (%) sur la période 1980-2024 durant laquelle le paramètre de Shields ( $\theta$ ) dépasse le seuil critique ( $\theta_{cr}$ ) de mise en mouvement, en fonction du  $D_{50}$  (échelle log) pour chaque point du rejeu HYWAT (P1, P2 et P3), selon l'action des vagues seules (triangles), du courant seul (croix) ou de la combinaison des deux (cercles). ..... 36
- Figure 18.** Pourcentage de temps de mobilité du taux de transport sédimentaire selon les intervalles d'ordre de grandeur considérés, soit une échelle exponentielle (à partir de  $10^{-13}$ ) **a.** Point 1 (Ouest), **b.** Point 2 (Centre) et **c.** Point 3 (Est). ..... 38
- Figure 19.** Bathymétries historiques de 1975 à 1982 dans la zone d'étude FGL, divisée en quatre sous-zones (**O** : Ouest, **CN** : Centre Nord, **CS** : Centre Sud et **E** : Est). Les points indiquent la localisation des sondes. .... 40
- Figure 20.** Bathymétries récente 2023-2024 (MNT) dans la zone d'étude FGL, divisée en quatre sous-zones (**O** : Ouest, **CN** : Centre Nord, **CS** : Centre Sud et **E** : Est). ..... 41
- Figure 21.** Histogramme des différentiels bathymétriques sur la zone FGL. Les barres bleues représentent l'ensemble des valeurs de différentiel obtenues sur la zone d'étude. La bande grise hachurée correspond à l'intervalle d'incertitude non considéré ( $[-2, 2]$  m). La ligne orange indique la médiane calculée uniquement sur les valeurs excédant cet intervalle. .... 44
- Figure 22.** Différentiel bathymétrique dans la zone d'étude FGL. Les variations bathymétriques sont représentées par des cercles colorés selon l'intervalle considéré. Les valeurs comprises dans l'intervalle d'incertitude  $[-2 \text{ m} ; 2 \text{ m}]$  sont en transparence car elles correspondent aux incertitudes des levées bathymétriques. Le MNT récent [2023-2024] a été ajouté en fond de carte. .... 46
- Figure 23.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014). .... 49
- Figure 24.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014). .... 49
- Figure 25.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014). .... 50
- Figure 26.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014). .... 50
- Figure 27.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014). .... 51
- Figure 28.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014). .... 51

- Figure 29.** Séries temporelles extraites au Point P1 (Ouest), sur la période 1980–2024. **a.** Hauteur significative des vagues, **b.** Période pic, **c.** Vitesse orbitale, **d.** Direction moyenne des vagues (en degrés et points cardinaux)..... 52
- Figure 30.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ). 53
- Figure 31.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ). 54
- Figure 32.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ). 55
- Figure 33.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ). 56
- Figure 34.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ). 57
- Figure 35.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ). 58
- Figure 36.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Transport par charriage ( $q_b$ ), **c.** Transport en suspension ( $q_s$ ), **d.** Transport total ( $q_{\text{total}}$ )..... 59
- Figure 37.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Transport par charriage ( $q_b$ ), **c.** Transport en suspension ( $q_s$ ), **d.** Transport total ( $q_{\text{total}}$ )..... 60
- Figure 38.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Transport par charriage ( $q_b$ ), **c.** Transport en suspension ( $q_s$ ), **d.** Transport total ( $q_{\text{total}}$ )..... 61
- Figure 39.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Transport par charriage ( $q_b$ ), **c.** Transport en suspension ( $q_s$ ), **d.** Transport total ( $q_{\text{total}}$ )..... 62
- Figure 40.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Transport par charriage ( $q_b$ ), **c.** Transport en suspension ( $q_s$ ), **d.** Transport total ( $q_{\text{total}}$ )..... 63
- Figure 41.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Transport par charriage ( $q_b$ ), **c.** Transport en suspension ( $q_s$ ), **d.** Transport total ( $q_{\text{total}}$ )..... 64
- Figure 42.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 65

- Figure 43.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 65
- Figure 44.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 66
- Figure 45.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 66
- Figure 46.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 67
- Figure 47.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 67
- Figure 48.** Séries temporelles extraites au Point P2 (Centre), sur la période 1980–2024. **a.** Hauteur significative des vagues, **b.** Période pic, **c.** Vitesse orbitale, **d.** Direction moyenne des vagues (en degrés et points cardinaux)..... 68
- Figure 49.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ). 69
- Figure 50.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ). 70
- Figure 51.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ). 71
- Figure 52.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ). 72
- Figure 53.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ). 73
- Figure 54.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ). 74
- Figure 55.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Transport par charriage ( $q_b$ ), **c.** Transport en suspension ( $q_s$ ), **d.** Transport total ( $q_{\text{total}}$ )..... 75
- Figure 56.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Transport par charriage ( $q_b$ ), **c.** Transport en suspension ( $q_s$ ), **d.** Transport total ( $q_{\text{total}}$ )..... 76

- Figure 57.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135$  mm au Point P2 (Centre). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{total}$ )..... 77
- Figure 58.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730$  mm au Point P2 (Centre). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{total}$ )..... 78
- Figure 59.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970$  mm au Point P2 (Centre). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{total}$ )..... 79
- Figure 60.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377$  mm au Point P2 (Centre). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{total}$ )..... 80
- Figure 61.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824$  mm au Point P3 (Est). a. Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), b. Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 81
- Figure 62.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P3 (Est). a. Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), b. Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 81
- Figure 63.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135$  mm au Point P3 (Est). a. Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), b. Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 82
- Figure 64.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730$  mm au Point P3 (Est). a. Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), b. Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 82
- Figure 65.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970$  mm au Point P3 (Est). a. Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), b. Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 83
- Figure 66.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377$  mm au Point P3 (Est). a. Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), b. Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 83
- Figure 67.** Séries temporelles extraites au Point P3 (Est), sur la période 1980–2024. a. Hauteur significative des vagues, b. Période pic, c. Vitesse orbitale, d. Direction moyenne des vagues (en degrés et points cardinaux)..... 84
- Figure 68.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824$  mm au Point P3 (Est). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Paramètre de Shields total ( $\theta_{vague} + \theta_{courant}$ ), c. Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{vague}$ ), d. Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{courant}$ ). 85
- Figure 69.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P3 (Est). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Paramètre de Shields total ( $\theta_{vague} + \theta_{courant}$ ), c. Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{vague}$ ), d. Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{courant}$ ). 86
- Figure 70.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135$  mm au Point P3 (Est). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Paramètre de Shields total ( $\theta_{vague} + \theta_{courant}$ ), c. Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{vague}$ ), d. Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{courant}$ ). 87

- Figure 71.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730$  mm au Point P3 (Est). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ). 88
- Figure 72.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970$  mm au Point P3 (Est). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ). 89
- Figure 73.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377$  mm au Point P3 (Est). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ). 90
- Figure 74.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824$  mm au Point P3 (Est). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Transport par charriage ( $q_b$ ), **c.** Transport en suspension ( $q_s$ ), **d.** Transport total ( $q_{\text{total}}$ )..... 91
- Figure 75.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P3 (Est). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Transport par charriage ( $q_b$ ), **c.** Transport en suspension ( $q_s$ ), **d.** Transport total ( $q_{\text{total}}$ )..... 92
- Figure 76.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135$  mm au Point P3 (Est). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Transport par charriage ( $q_b$ ), **c.** Transport en suspension ( $q_s$ ), **d.** Transport total ( $q_{\text{total}}$ )..... 93
- Figure 77.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730$  mm au Point P3 (Est). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Transport par charriage ( $q_b$ ), **c.** Transport en suspension ( $q_s$ ), **d.** Transport total ( $q_{\text{total}}$ )..... 94
- Figure 78.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970$  mm au Point P3 (Est). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Transport par charriage ( $q_b$ ), **c.** Transport en suspension ( $q_s$ ), **d.** Transport total ( $q_{\text{total}}$ )..... 95
- Figure 79.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377$  mm au Point P3 (Est). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Transport par charriage ( $q_b$ ), **c.** Transport en suspension ( $q_s$ ), **d.** Transport total ( $q_{\text{total}}$ )..... 96

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.</b> Classification sédimentologique utilisée dans la zone d'étude Fécamp Grand Large et photos d'échantillons secs.....	18
<b>Tableau 2.</b> Contraintes critiques de cisaillement ( $\theta_{cr}$ ) selon Shields (1936) et Soulsby (1997), et tailles de grains adimensionnelles ( $D^*$ ), en fonction des six $D_{50}$ sélectionnés pour la zone FGL.....	33
<b>Tableau 3.</b> Paramètres techniques des cinq levés bathymétriques effectués entre 1975 et 2023-2024.....	42
<b>Tableau 4.</b> Synthèse des incertitudes verticales et horizontales – Les valeurs des incertitudes représentent l'addition des incertitudes des deux levés.....	43

## 1. Introduction

Ce rapport présente les résultats de l'analyse des conditions de mise en mouvement des sédiments marins et l'analyse de l'évolution morphologique des fonds marins et des structures sédimentaires observées dans la zone d'étude EMR Fécamp Grand Large (FGL). Cette zone, identifiée pour l'installation de futurs parcs éoliens, se situe au large de la commune de Fécamp, dans le département de la Seine-Maritime (région Normandie) et au nord d'un parc éolien en mer déjà en service : *Le Parc éolien en mer de Fécamp*.

La présente étude s'appuie sur une simulation numérique à haute résolution d'états de mer, de courants et de niveaux d'eau sur une période de 45 ans (1980 à 2024), ainsi que sur des données sédimentologiques collectées dans cette zone.

Le rapport traite de « **l'analyse des conditions de mise en mouvement des sédiments** » et du type de transport sédimentaire avec :

- Une recherche bibliographique et un rappel des conditions météo-océaniques présentées dans le lot 1 « état initial de la connaissance », concernant les caractéristiques des principaux forçages à l'origine de la dynamique sédimentaire propre au site d'étude (courants, états de mer, apports solides) ;
- En fonction des différentes classes granulométriques sédimentaires identifiées sur la zone d'étude, les statistiques de mise en mouvement des sédiments calculées à partir des forçages hydrodynamiques (courants et états de mer) ;
- Des indications sur les contributions respectives du courant et des états de mer au transport total sont ensuite déduites, ainsi que le mode de transport dominant (charriage ou suspension) en fonction de la granulométrie et des conditions hydrodynamiques.

Il est également abordé « **l'analyse des morphologies sédimentaires potentiellement dynamiques** ». L'objectif est d'identifier et de caractériser les morphologies sédimentaires potentiellement dynamiques, telles que des dunes ou des bancs sableux, et d'évaluer leur évolution passée à partir des données disponibles.

L'analyse repose notamment sur :

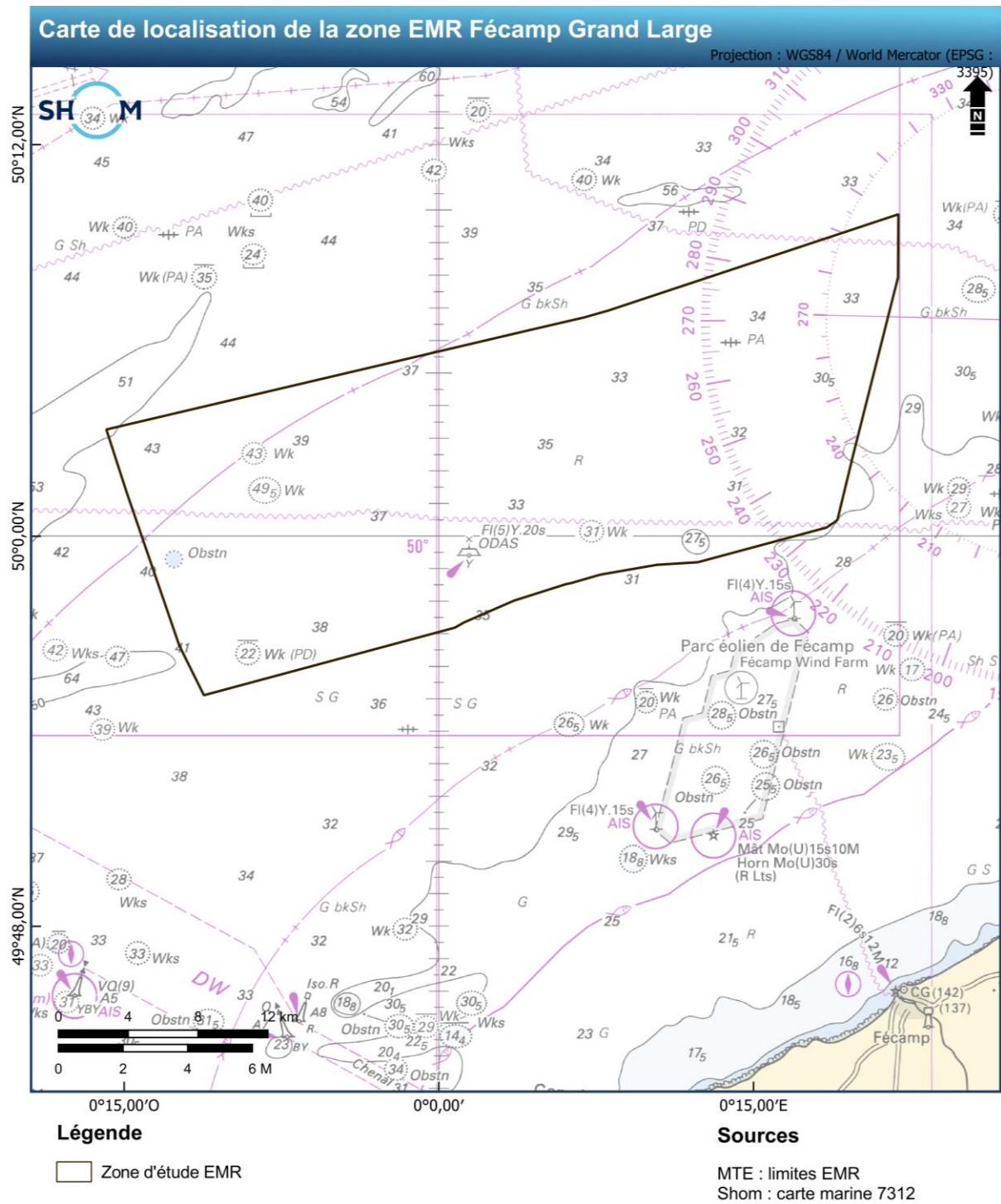
- L'exploitation des données bathymétriques historiques, issues principalement des bases de données du Shom ;
- L'observation de tendances évolutives à l'aide de différentiels bathymétriques ;
- L'identification de l'évolution dans le temps de structures morphologiques significatives.

La première partie de ce rapport concerne l'état des connaissances de la zone d'étude FGL, traitant les types de sédiments, les apports fluviaux, la dynamique de marée, la bathymétrie, les structures géologiques et les conditions océaniques (états de mer, courants et niveaux d'eau). Dans une seconde partie, le rapport présente l'étude statistique des conditions de mise en mouvement des sédiments, en détaillant la méthodologie appliquée, la définition des classes granulométriques représentatives de la zone d'étude, le calcul des seuils critiques de mobilité, ainsi que l'évaluation des modes de transport sédimentaire et de leur intensité. Enfin, une troisième partie se concentre sur les morphologies sédimentaires potentiellement dynamiques, avec l'exploitation des données bathymétriques historiques et l'étude des différentiels bathymétriques pour caractériser les structures morphologiques évolutives. Chaque section s'accompagne d'une synthèse des résultats.

## 2. Etat de la connaissance de la zone d'étude

### 2.1 Localisation

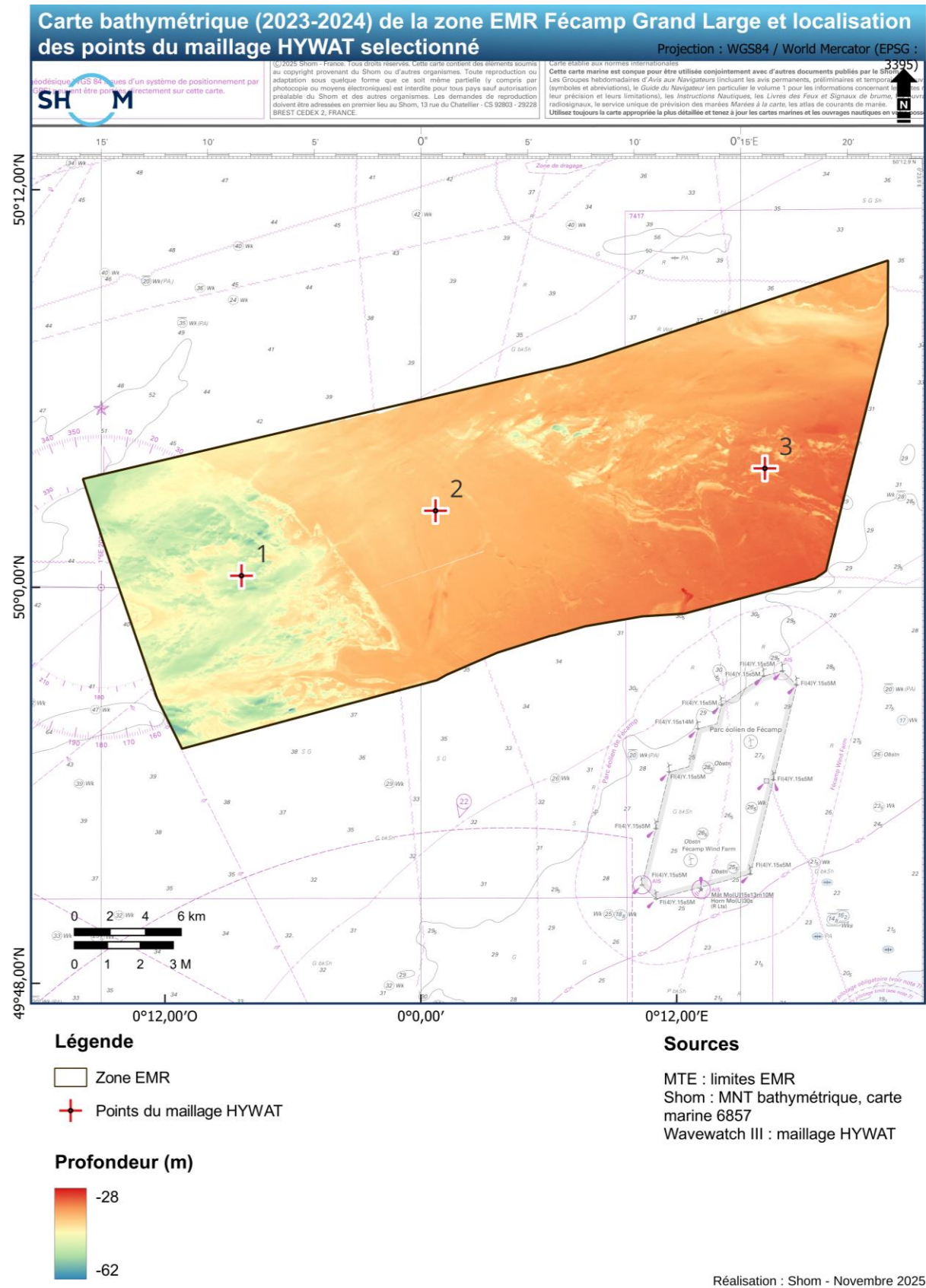
La zone EMR FGL est située au centre de la Manche, au large de la ville de Fécamp et au Nord du parc éolien déjà existant de Fécamp (**Figure 1**).



**Figure 1.** Carte de la zone d'étude avec l'emprise de la zone EMR FGL.

## 2.2 Bathymétrie

La zone d'étude présente des profondeurs comprises entre 28 m et 62 m par rapport au Zéro Hydrographique (ZH). La bathymétrie présente un gradient de profondeur est/ouest, avec des profondeurs plus faibles à l'est (28 m au minimum) et une zone plus profonde à l'ouest (jusqu'à 62 m). La morphologie correspond à un gradient de pente orienté sud-est / nord-ouest (**Figure 2** et **Figure 7**) (T1.B3\_RAP\_A3, Shom 2024). Les zones les plus accidentées où se situent les pentes les plus fortes, c'est-à-dire à l'ouest et à l'est de la zone d'étude, peuvent excéder 10° sur une distance d'environ 500 m. Le reste de la zone a des pentes très faibles (0° à 2°).

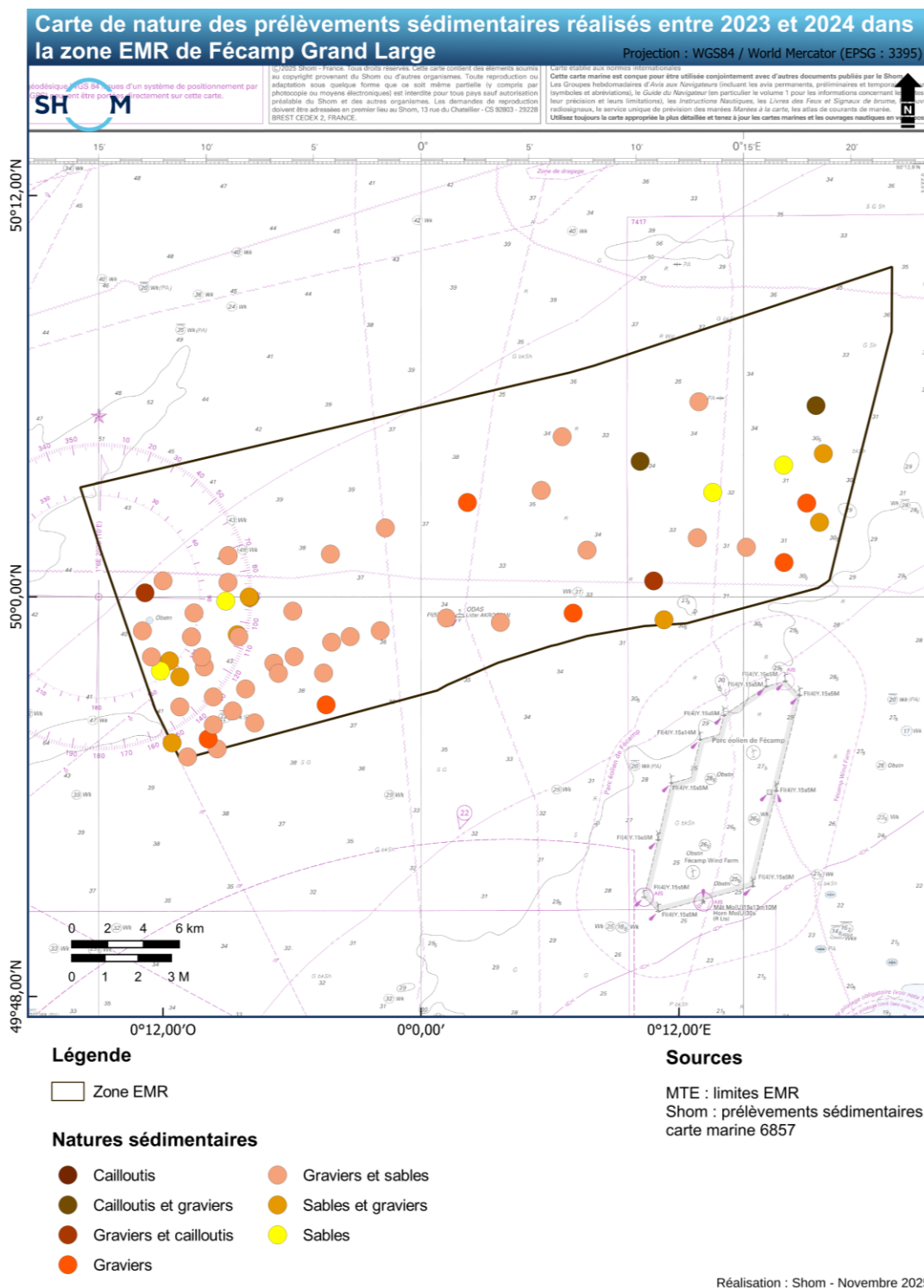


**Figure 2.** Carte bathymétrique 2023-2024 pour la zone Fécamp Grand Large et localisation des points de calculs P1, P2 et P3 (maillage HYWAT) sélectionnés pour l'extraction des données hydrodynamiques.

## 2.3 Paramètres sédimentaires

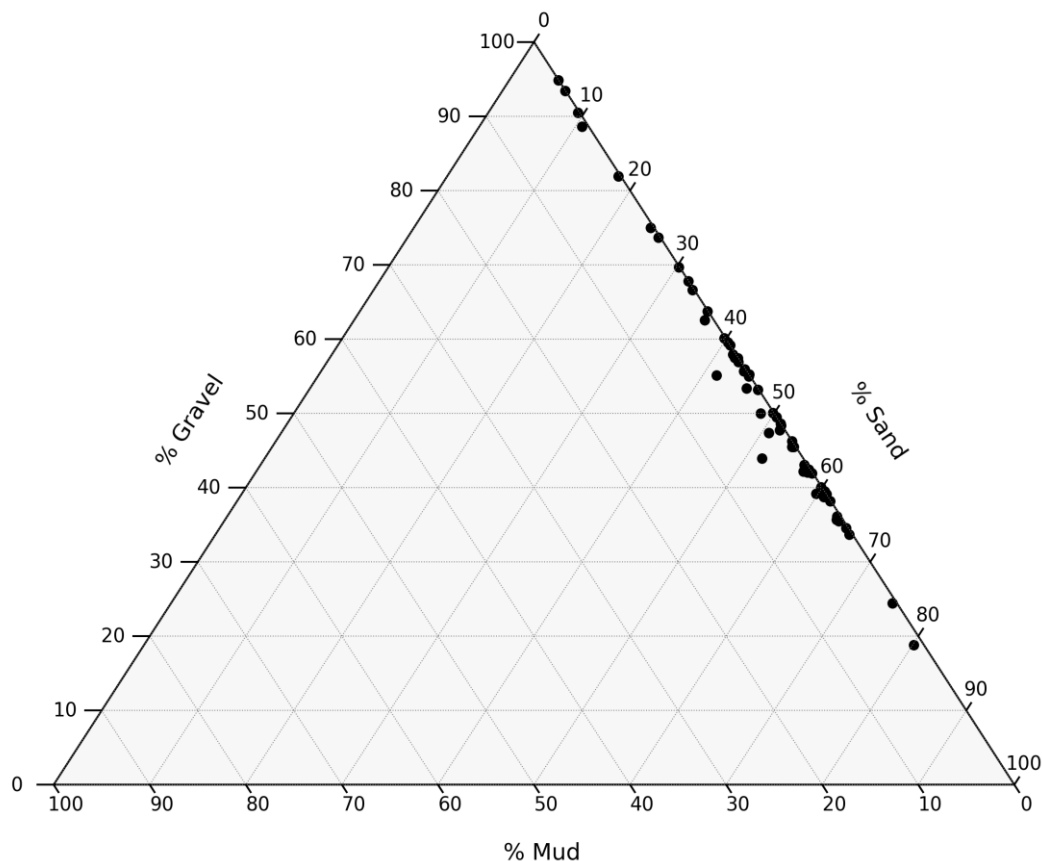
### 2.3.1 Faciès sédimentaire

Les bâtiments du Shom BH2 *Borda* et *Laplace* ont réalisé 127 prélèvements sédimentaires à l'aide d'une benne Shipeck au cours des levés effectués en 2023 et 2024 dans la région de FGL. Parmi eux, 59 se situent dans la zone EMR et sont localisés dans la **Figure 3**.



**Figure 3.** Carte de localisation des échantillons sédimentaires prélevés dans la zone EMR FGL. La détermination des faciès sédimentaires est détaillée dans le **Tableau 1**.

Le diagramme ternaire (**Figure 4**) présente la distribution granulométrique des 59 échantillons prélevés lors de la campagne en mer dans la zone Fécamp Grand Large (**Figure 3**) qui ont été considérés dans cette étude. Il permet de visualiser les faciès sédimentaires définis par les proportions relatives de sable, de gravier et de vase (fraction fine composée d'argile et de silt). Il met en évidence une prédominance de sédiments grossiers dans la zone d'étude et que les échantillons sont principalement constitués d'un mélange de graviers (~% 50) et de sables (~% 50) (**Figure 4**). Ces proportions sédimentaires témoignent d'un environnement dominé par les apports de sables à graviers. Le sédiment est ainsi considéré comme non cohésif, en raison de la proportion négligeable de vase (silts + argiles) mesurée dans les échantillons : inférieur à 4 % pour l'ensemble des échantillons (**Figure 4**).










**Figure 4.** Diagramme ternaire Silts + Argiles = Vase (*Mud*) – Sable (*Sand*) – Gravier (*Gravel*) avec les 59 prélèvements sédimentaires (points noirs) prélevés dans la zone EMR FGL. L'orientation des tirets sur les axes indique le sens de lecture des proportions sédimentaires (%).

Pour rappel, la classification sédimentologique des échantillons prélevés dans la zone d'étude repose sur sept nature granulométriques synthétisées dans le **Tableau 1**. Chaque faciès est caractérisé en fonction des proportions (en %) de vase (V), sable fin (SF), sable (S), gravier (G) et cailloutis (C) définis en fonction de la taille des particules (T), répartie comme suit :

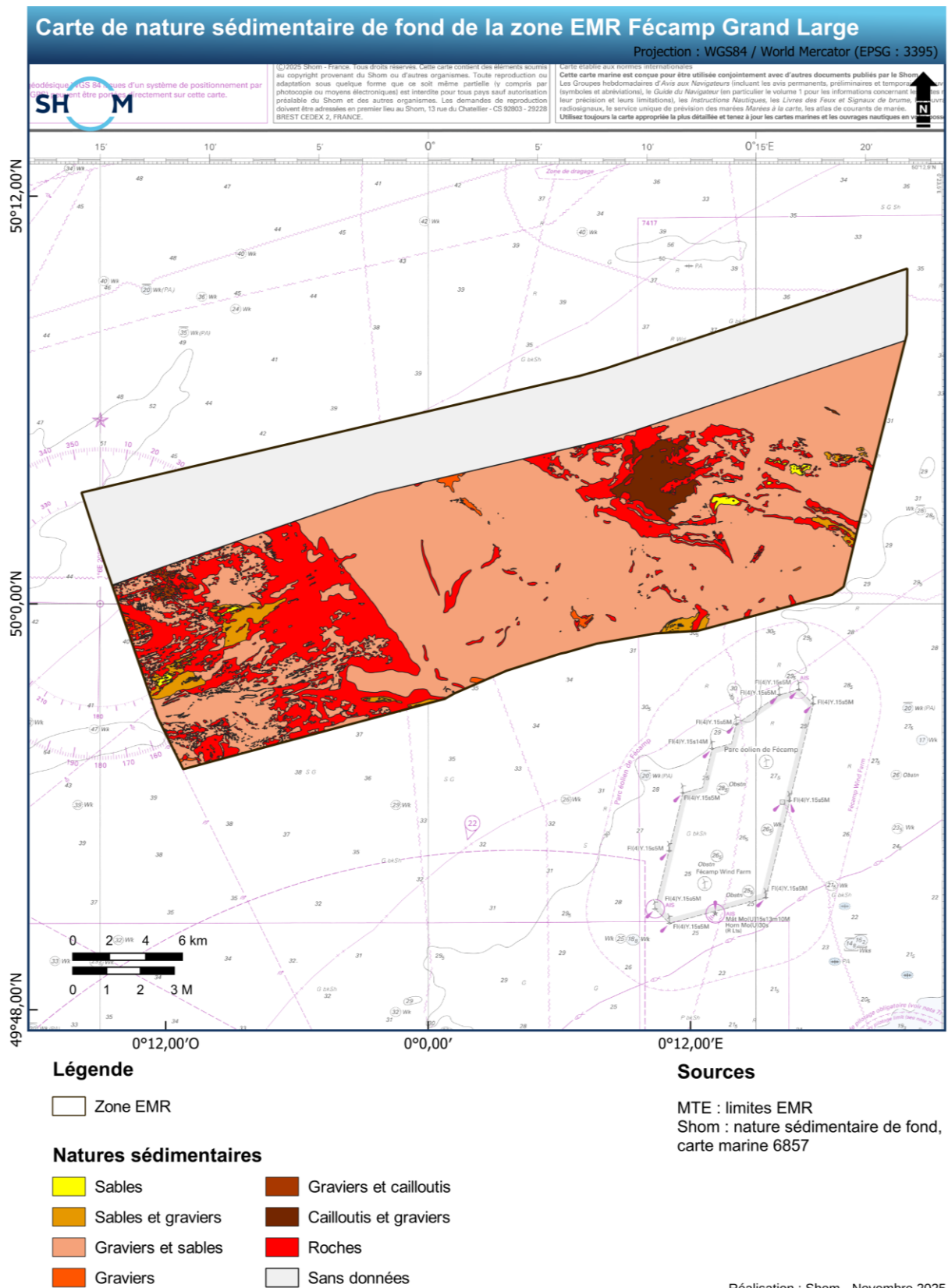
- $T \geq 20 \text{ mm}$  : Cailloutis ;
- $20 \text{ mm} > T \geq 2 \text{ mm}$  : Graviers ;
- $2 \text{ mm} > T \geq 0,25 \text{ mm}$  : Sables ;
- $0,25 \text{ mm} > T \geq 0,05 \text{ mm}$  : Sables Fins ;
- $T < 0,05 \text{ mm}$  : Vases.

**Tableau 1.** Classification sédimentologique utilisée dans la zone d'étude Fécamp Grand Large et photos d'échantillons secs.

Type de sédiment	Code	Critères granulométriques	Légende	Exemple de photo
Sables	S	$50 < S < 65\%$ et $C + G < 35\%$ et $V < 5\%$		
Sables et graviers	SG	$50 < S < 65\%$ et $C + G > 35\%$ et $V < 5\%$		
Graviers et sables	GS	$50 < G < 65\%$ et $S + SF < 35\%$ et $C < 15\%$ et $V < 5\%$		
Graviers	G	$50 < G < 65\%$ et $S + SF < 35\%$ et $C < 15\%$ et $V < 5\%$		
Graviers et cailloutis	GC	$50 < G < 65\%$ et $S + SF < 35\%$ et $C > 15\%$ et $V < 5\%$		
Cailloutis et graviers	CG	$50 < C < 65\%$ et $S + SF < 35\%$ et $G > 15\%$ et $V < 5\%$		
Cailloutis	C	$50 < C < 65\%$ et $S + SF < 35\%$ et $G < 15\%$ et $V < 5\%$		

### 2.3.2 Répartition des types de nature des fonds

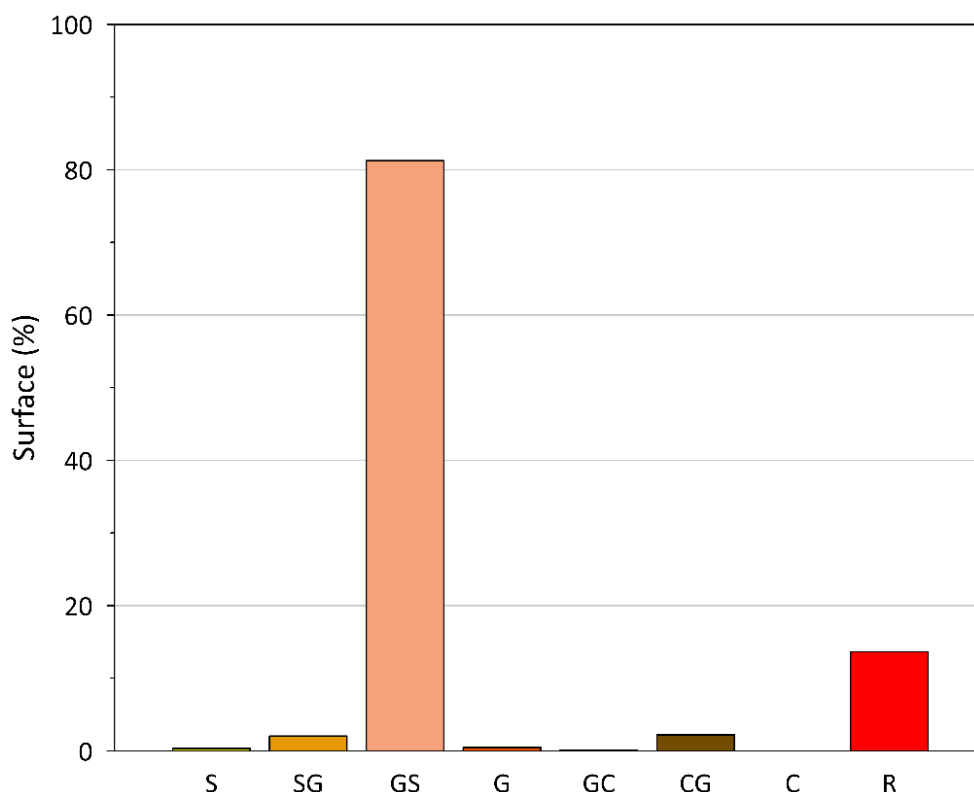
Une densité élevée de prélèvements sédimentaires permet de caractériser à haute résolution les variations horizontales des compositions sédimentaires de surface dans la zone d'étude, et ainsi établir une carte de nature des fonds à très fine échelle (**Figure 5**).



**Figure 5.** Carte de nature des fonds de la zone EMR Fécamp Grand Large réalisée à partir des levés S202303300 et S202400600. La partie « sans données » en gris, correspond à la nouvelle emprise non traitée au moment du rendu de ce livrable.

La combinaison et l'interprétation des données acquises lors des levés réalisés en 2023 et 2024 (imagerie, bathymétrie et prélèvements sédimentaires), mettent en évidence les variations sédimentaires à haute résolution. L'ensemble de ces données a permis de confirmer la présence de plusieurs types de sédiments dans ce secteur d'étude : sables, sables et graviers, graviers et sables, graviers, graviers et cailloutis, cailloutis et graviers. La carte de nature sédimentaire des fonds est présentée dans la **Figure 5**. La zone centrale est homogène, dominée par le faciès graviers-sables, tandis que les zones situées à l'ouest et à l'est, plus hétérogènes, regroupent divers faciès, allant des sables aux roches (**Figure 5**). Les sédiments meubles se déposent à la fois au-dessus d'un socle rocheux mais aussi autour des zones où il affleure (**Figure 8**).

L'analyse de la répartition des différents types de sédiments dans la zone EMR FGL (**Figure 6**) révèle une prédominance des graviers et sables (GS), qui représente 81 % de la surface totale du fond marin. Le socle est sub-affleurant à affleurant sur 14 % de cette surface (R). Les sables et graviers (SG) et cailloutis et graviers (CG) représentent chacun 2 % de la surface du fond. Les autres types de sédiments (S, G, GC et C) sont peu représentés avec seulement 1 % de la surface de la zone d'étude (T4.S4\_Sédimentologie\_RAP, Shom 2025).



**Figure 6.** Répartition des types de sédiments de la boîte B de la zone EMR Fécamp Grand Large à partir de la carte de nature de fond présentée **Figure 5**. S : sables ; SG : sables et graviers ; GS : graviers et sables ; G : graviers ; GC : graviers et cailloutis ; CG : cailloutis et graviers ; C : cailloutis ; R : roches.

### 2.3.3 Structures géologiques particulières

Cette partie vise à rappeler les conclusions du rapport T4.S4\_Sédimentologie\_RAP, Shom 2025 sur les structures sédimentaires et géologiques observées dans la zone EMR FGL. La carte présentée dans la **Figure 7** synthétise les différentes observations. L'analyse de la bathymétrie de la zone EMR met en évidence la présence de plusieurs centaines de dépressions circulaires (de taille plurimétriques (2 à 5 m), se situant principalement au nord-est des blocs rocheux), des structures rocheuses longitudinales et une petite zone de dunes au sud-est de la zone (cf. agrandissement **Figure 7**).

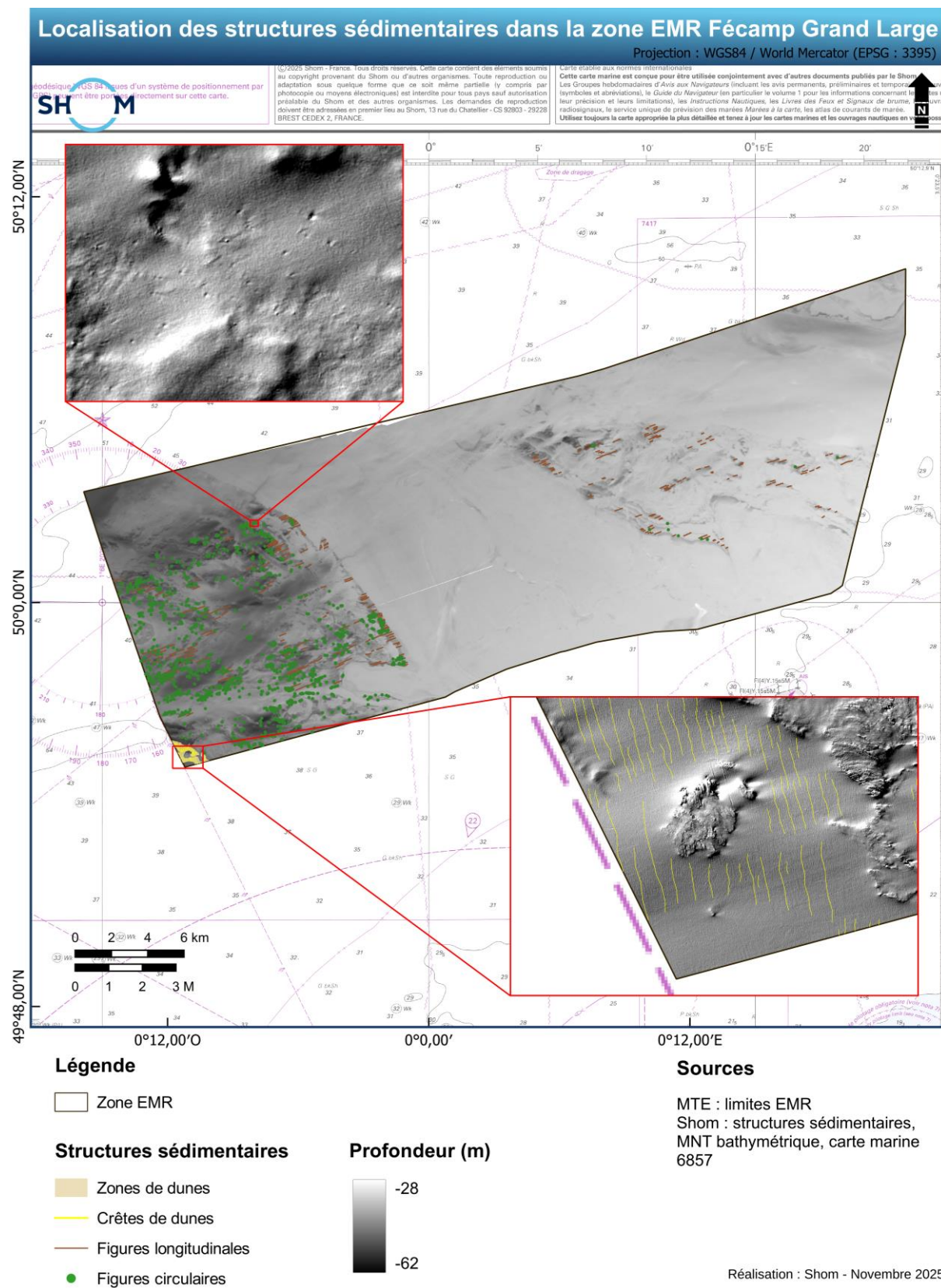
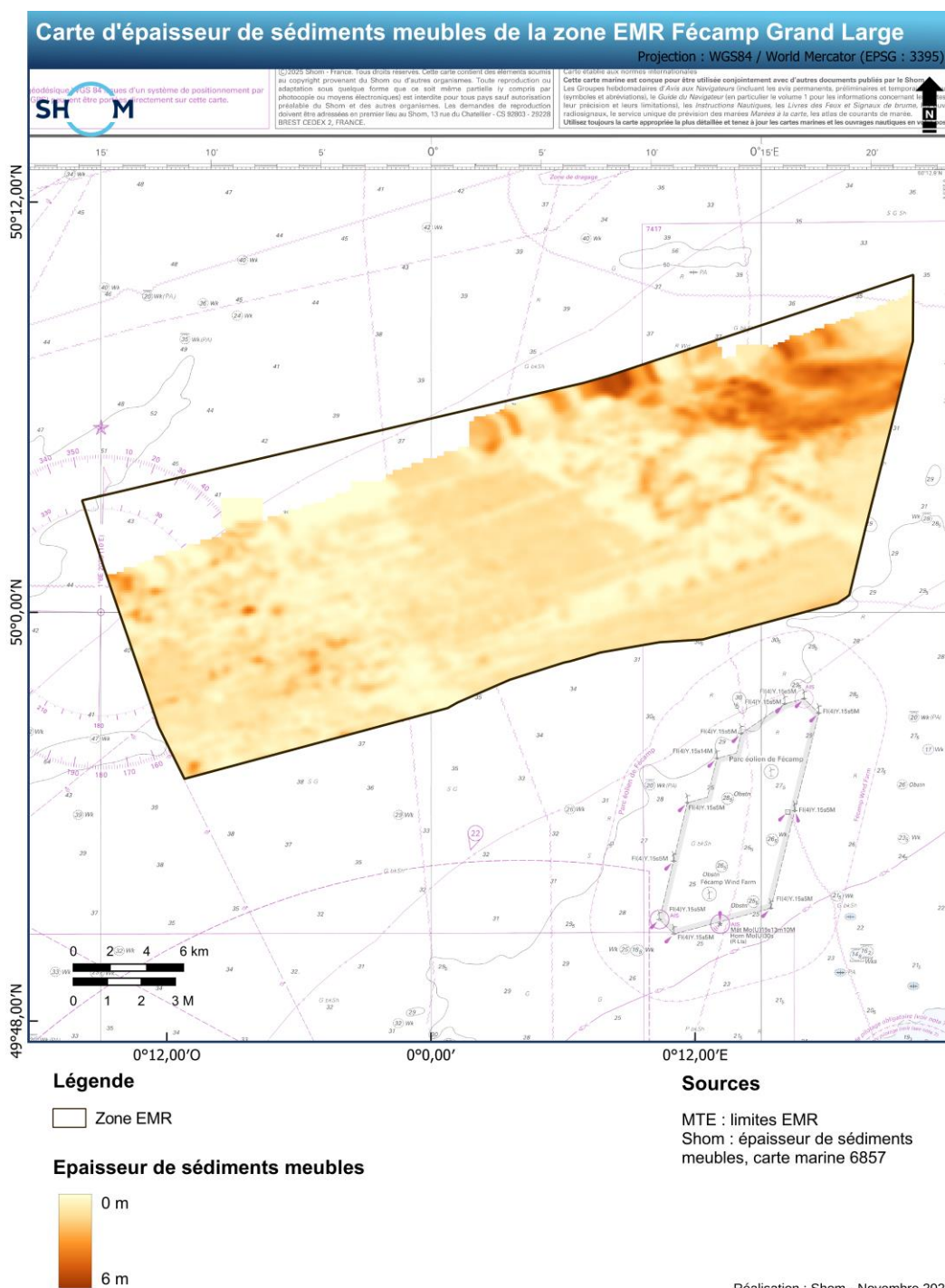


Figure 7. Carte de localisation des structures sédimentaires et géologiques dans la zone EMR FGL.

### 2.3.4 Epaisseur sédimentaire

L'épaisseur de la couverture sédimentaire post-tectonique varie de 0 et 5 m dans l'ensemble de la zone d'étude (**Figure 8**). Ces faibles épaisseurs reflètent la présence d'un socle rocheux peu profond, qui affleure ou sub-affleure dans plusieurs zones. Les zones où les épaisseurs sont significatives, i.e. entre 3 et 5 m, se concentrent à l'extrémité nord-est et, de manière très localisée, à l'ouest de la zone d'étude (**Figure 8**). Cette répartition pourrait s'expliquer par un remplissage sédimentaire associé à un enfoncement localisé du socle ou par des zones érodées par des paléo-chenaux formés à bas niveau marin lors du dernier maximum glaciaire (e.g. Auffret et Alduc, 1982 ; Gupta et al., 2007).



**Figure 8.** Carte d'épaisseur sédimentaire de la zone EMR FGL.

## 2.4 Paramètres hydrodynamiques

### 2.4.1 Niveau d'eau

Selon le rapport T1.M3\_RAP, Shom 2024 au large du plateau continental, l'océan est soumis au régime des marées de l'Atlantique Nord. L'onde de marée vient de l'océan Atlantique et poursuit un mouvement du Sud vers le Nord. En Manche Est, la marée est de type essentiellement semi-diurne, où les ondes M2 (influence lunaire de période 12h24) et S2 (influence solaire de période 12h) sont prédominantes. La marée sur les côtes de France présente ainsi chaque jour deux pleines mers et deux basses mers qui se succèdent avec un intervalle moyen de 6 heures 13 minutes. La propagation de l'onde de marée, dans La Manche est accompagnée d'une forte augmentation du marnage (l'amplitude verticale du mouvement de la marée) qui atteint en moyenne 9 m dans la Baie du Mont Saint-Michel, et 7 m à Dieppe.

### 2.4.2 La réanalyse HYWAT : marée, surcote, courant, vague

Le produit numérique dénommé HYWAT pour « HYdrodynamics and WAves hindcast » consiste en des rejeux de modèles numériques de marées, surcotes, courants et vagues (1979-2024) sur la façade atlantique française, forcé par la réanalyse atmosphérique ERA5. Il est accessible librement sur le site de diffusion du Shom : [Rejeux climatologiques 1979-2022 de marées, surcotes et vagues sur la façade Atlantique.](#)

Les configurations atlantiques françaises des modèles HYCOM et Wavewatch III(R) développées dans le cadre du projet HOMONIM (Historique Observation MODélisation des Niveaux Marins, Jourdan *et al.*, 2020) ont été utilisées :

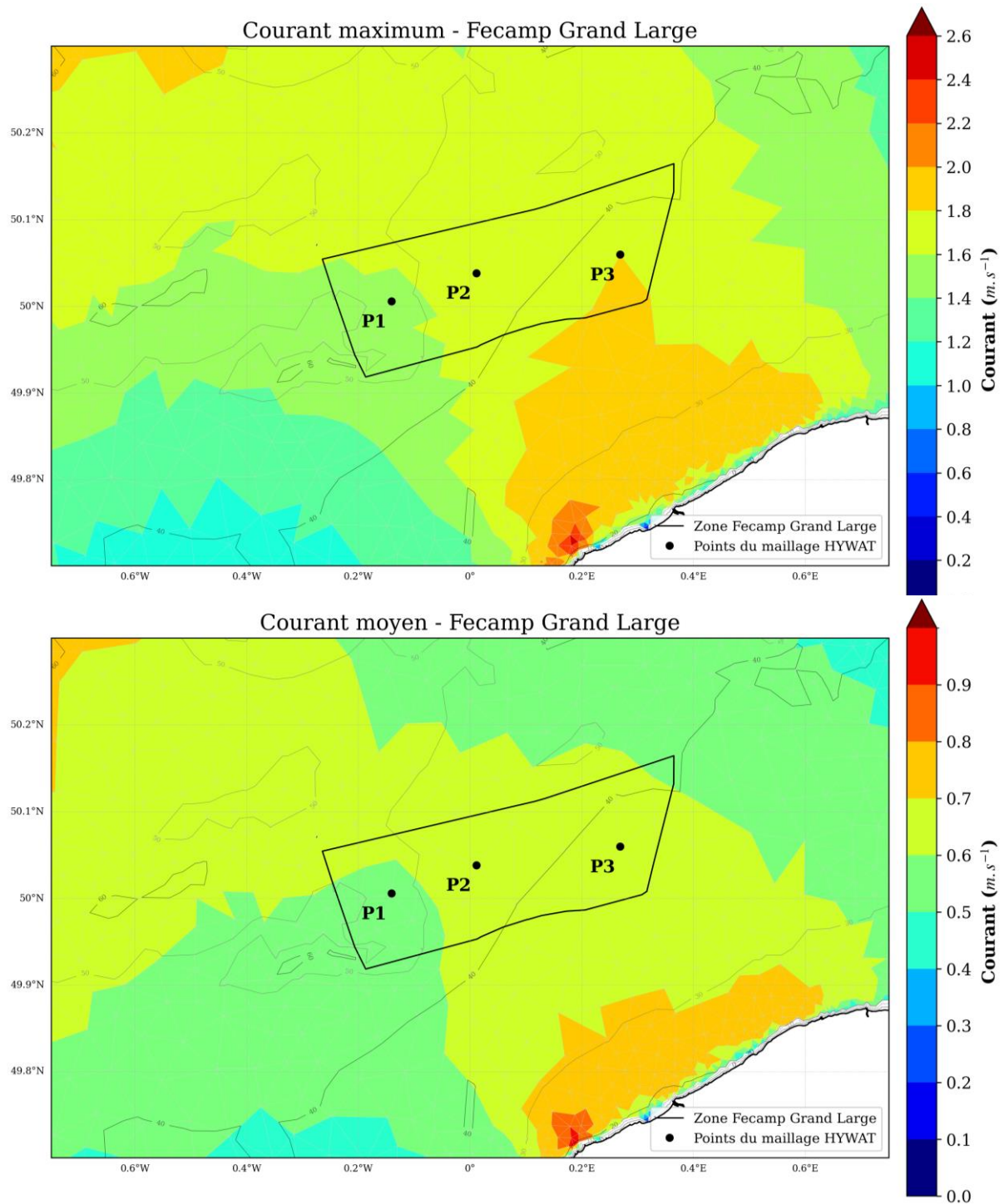
- Un modèle numérique spectral à haute résolution (WAVEWATCH III®) a été utilisé pour simuler les états de mer (Michaud *et al.*, 2024). Une validation à partir de données acquises par satellites et bouées a permis de montrer de très bons résultats pour les hauteurs, périodes et directions moyennes, malgré une légère sous-estimation des hauteurs significatives les plus fortes.
- Le modèle de courant HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) est un modèle numérique d'évolution de l'océan (courant, marée, surcote).

Trois nœuds du maillage HYWAT ont été sélectionnés pour l'extraction des données relatives aux états de mer, aux courants et au niveau de l'eau, correspondant aux trois points identifiés sur la **Figure 2** : **P1 à l'ouest** (nœud n° 72389 du maillage HYWAT), **P2 au centre** (nœud n° 72386 du maillage HYWAT) et **P3 à l'est** (nœud n° 73241 du maillage HYWAT). Leur choix tient compte du régime de vagues, des courants, de la nature du fond, de la bathymétrie et de la localisation des prélèvements sédimentaires. Cette démarche vise à considérer l'ensemble de la variabilité spatiale de ces paramètres, notamment en ce qui concerne la granularité, la bathymétrie et les courants pour la zone EMR FGL.

### 2.4.3 Analyse des conditions hydrodynamiques aux points du maillage du modèle

#### 2.4.3.1 Courant

La **Figure 9** montre les courants barotropes (uniformes sur la colonne d'eau) moyens et maximaux sur l'ensemble de la période rejouée (1979-2024). Les courants dans la zone d'étude pour l'implantation du parc sont compris entre 0.5 m/s et 0.7 m/s (**Figure 9.b**). Les courants maximaux atteignent 2 m/s dans la partie Est de la zone (**Figure 9.a**). Un gradient croissant des courants est observé de l'ouest vers l'est.



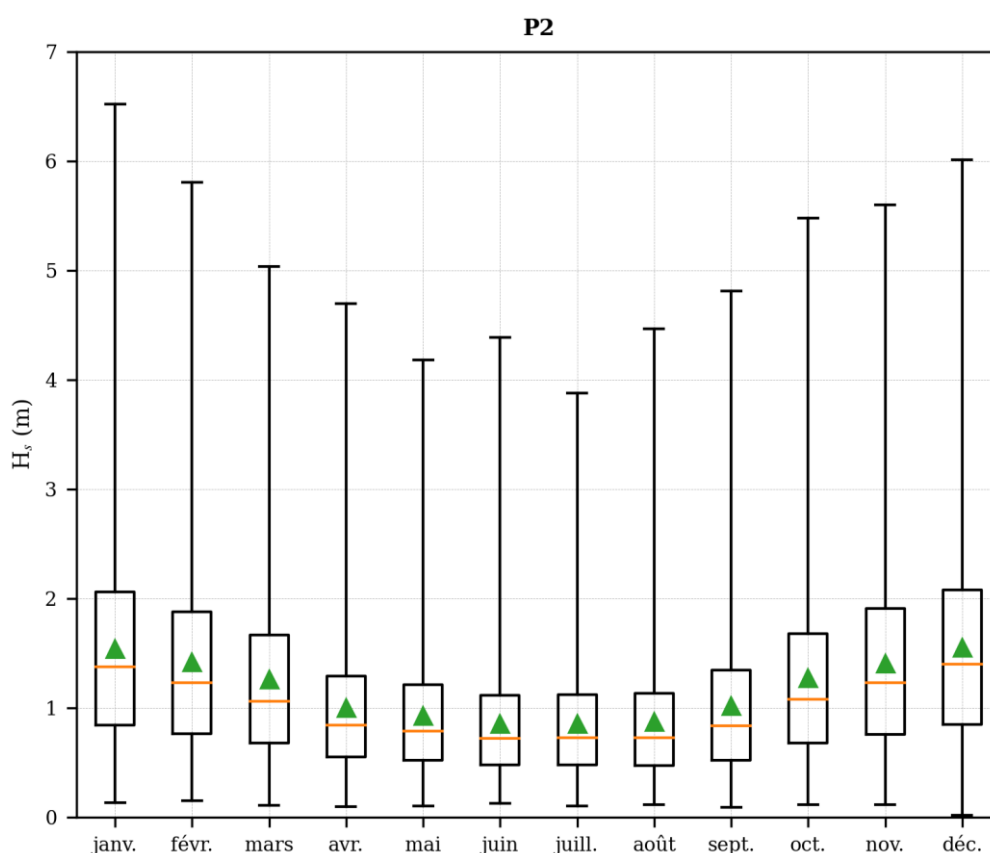
**Figure 9.** Carte des courants maximum (haut) et moyens (bas) modélisés sur la période 1979-2024 avec le rejeu HYWAT. Les trois points du maillage HYWAT sélectionnés sont représentés par des points noirs.

### 2.4.3.2 Vague

Seules les analyses effectuées au point P2 sont présentées dans cette section, les résultats obtenus pour les points P1 et P3 étant similaires et menant aux mêmes conclusions.

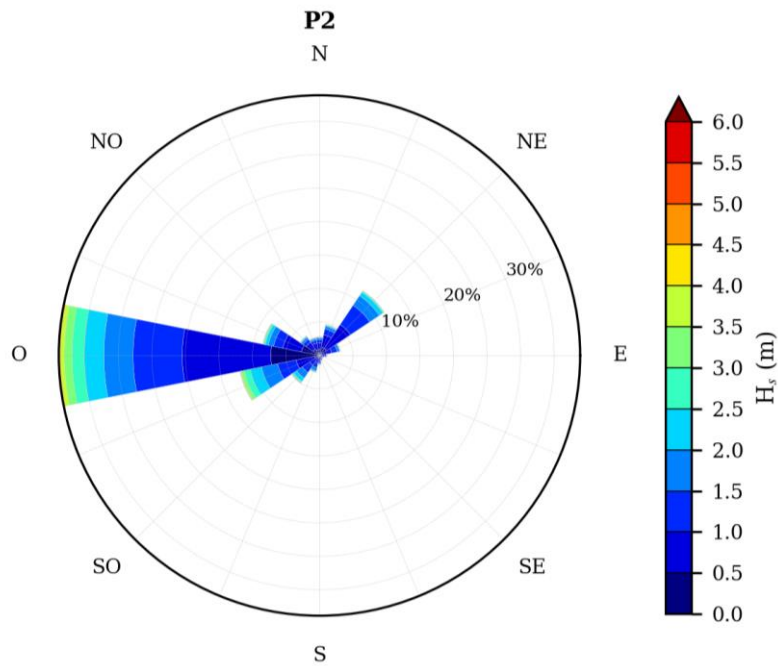
En raison de sa localisation, la zone est relativement protégée des importantes houles provenant de l'Atlantique, ainsi que des houles de la mer du Nord. Les états de mer sur la zone sont principalement dus au vent local (T1.H\_RAP, Shom 2024).

La plupart des états de mer sont caractérisés par des hauteurs significatives comprises entre 0.5 m et 2 m (environ 90 %). La **Figure 10** illustre les statistiques mensuelles relatives à la hauteur significative des vagues ( $H_s$ ) au point n°2. Elle met en évidence la variabilité saisonnière qui module la distribution des  $H_s$  au cours de l'année. Les moyennes et médianes mensuelles sont voisines de 0.5 m de mai à septembre au sein de la zone d'étude, et comprises entre 1 m et 1.5 m environ d'octobre à mars. Par ailleurs, les valeurs maximales ne dépassent pas 5 m d'avril à septembre et peuvent atteindre des valeurs supérieures à 5 m d'octobre à mars.



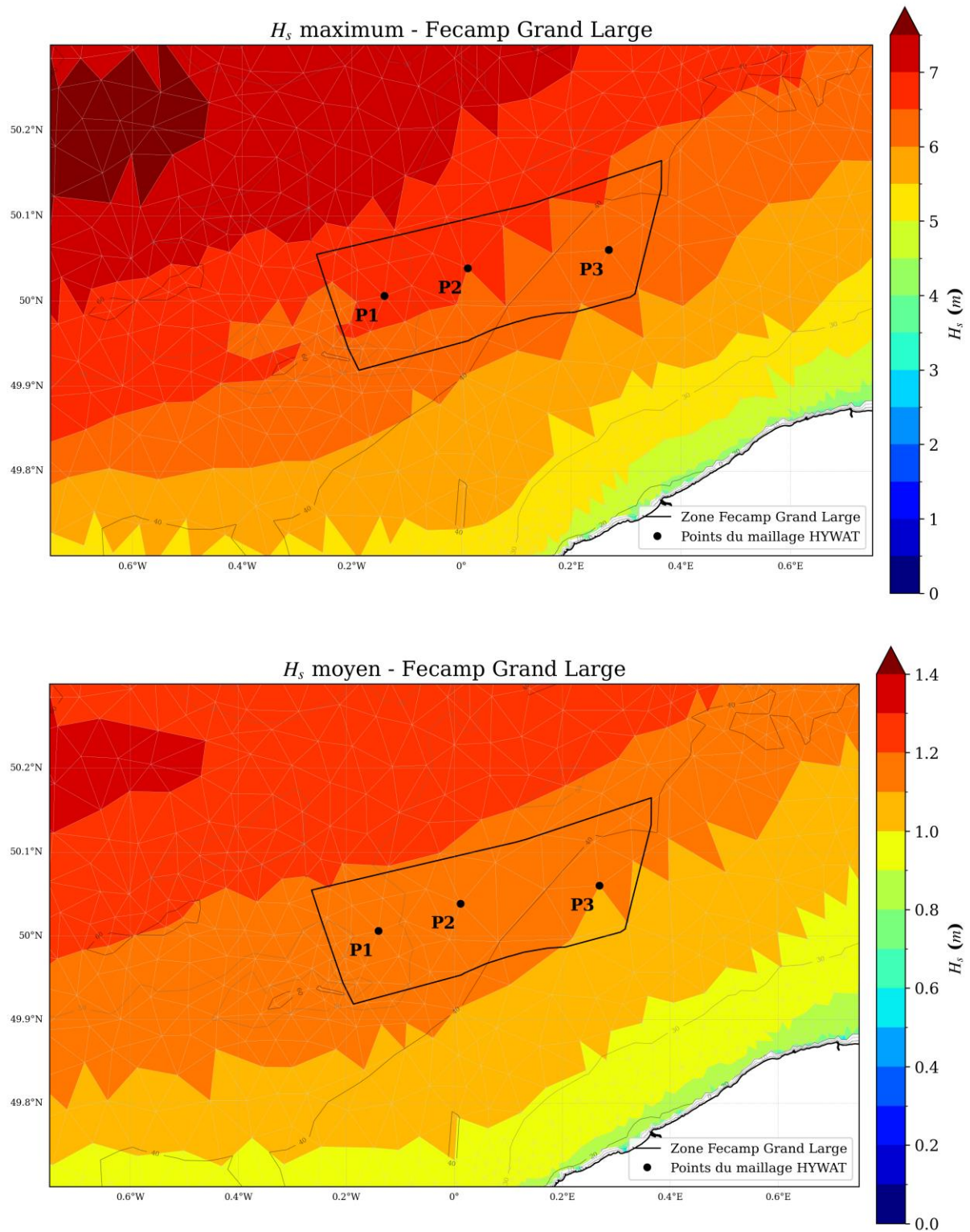
**Figure 10.** Distributions mensuelles des hauteur significatives des vagues ( $H_s$ ) au point P2 du maillage du modèle situé au centre de la zone FGL). Les extrémités des boîtes correspondent au 1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> quartile de la distribution mensuelle. Les segments inférieurs et supérieurs correspondent respectivement aux valeurs  $H_s$  minimales et maximales du mois. Les traits orange sont les valeurs médianes mensuelles et les triangles verts les moyennes mensuelles.

La **Figure 11** illustre la distribution des hauteurs significatives de vagues  $H_s$  en fonction de leur direction moyenne de provenance ( $D_m$ ) pour le point P2. La rose de vagues considère les états de mer sur la totalité de la période rejouée (1979-2024). La rose de vagues (**Figure 11**) montre que les vagues proviennent majoritairement du secteur ouest soit sur plus de 30 % du temps, à sud-ouest (< 10%). Les périodes moyennes sont généralement comprises entre 2 et 8 secondes (non illustré sur la figure).



**Figure 11.** Distribution des  $H_s$  en fonction de  $D_m$  au point P2 du maillage du modèle (centre de la zone FGL). Les secteurs directionnels couvrent chacun un intervalle de  $22.5^\circ$ . La rose considère l'ensemble des états de mer sur la période 1979-2024 (rejeu HYWAT).

La **Figure 12** montre les hauteurs significatives moyennes et maximales des vagues sur l'ensemble de la période rejouée (1979-2024). La hauteur significative moyenne des vagues dans la zone d'étude pour l'implantation du parc est comprise 1.0 m et 1.2 m (**Figure 12 .b**). Les hauteurs significatives maximales atteignent 7 m sur la partie nord de la zone (**Figure 12 .a**, points P1 et P2). Un faible gradient croissant des hauteurs significatives est observé du sud-est vers le nord-ouest, en s'éloignant de la côte. Les variations de la hauteur significative, de la période de pic, de la vitesse orbitale et de la direction des vagues sur l'ensemble de la période étudiée sont illustrées en **Annexes (Figure 29, Figure 48 et Figure 67)**.



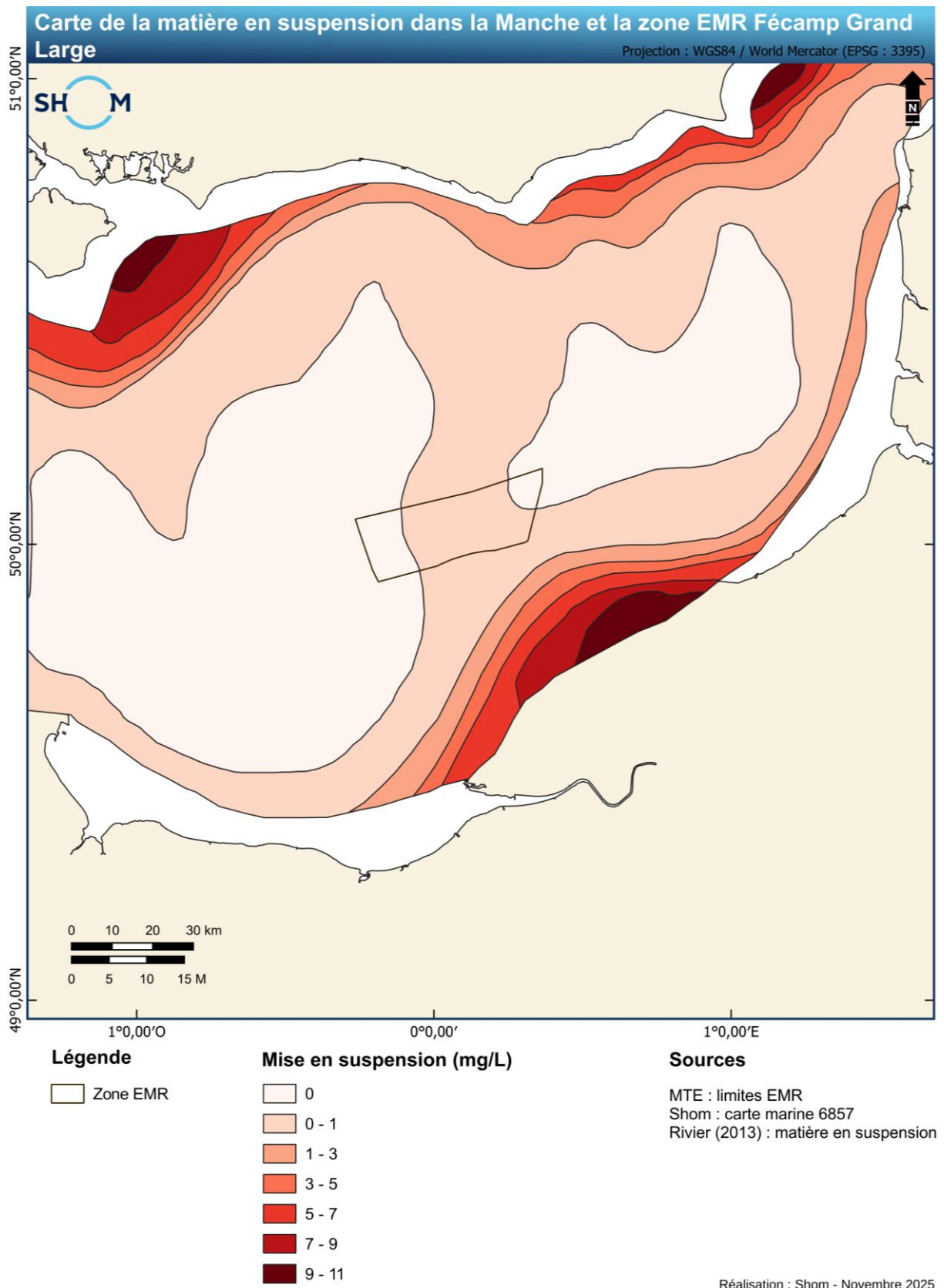
**Figure 12.** Carte des hauteurs significatives maximum (haut) et moyens (bas) modélisés sur la période 1979-2024 avec le rejeu HYWAT. Les points du maillage HYWAT sélectionnés sont représentés par des points noirs.

## 2.5 Apports fluviaux

Dans le cadre des programmes FLUXMANCHE I et II, des mesures directes de la concentration de MES sur la verticale ont été réalisées à grande échelle, notamment au large, en diverses stations réparties dans le détroit du Pas de Calais (FLUXMANCHE I), le long du transect Presqu'île du Cotentin–île de Wight (FLUXMANCHE II), ainsi qu'en Manche centrale et orientale (Lafite *et al.*, 1992 ; Velegrakis *et al.*, 1996 ; Ismaïli *et al.*, 1999 ; Velegrakis *et al.*, 1999, Rivier, 2013).

La **Figure 13** illustre le champ de concentration en matière en suspension des eaux de surface, interpolé à partir de mesures effectuées début septembre 1994 aux stations FLUXMANCHE II. La distribution spatiale de la matière en suspension (MES) dans la Manche orientale présente un gradient négatif marqué de la côte vers le large (**Figure 13**). Les concentrations révèlent des valeurs maximales comprises entre 0 et 1 mg/L dans la zone d'étude FGL (Velegrakis *et al.*, 1999 ; Rivier, 2013). Cette répartition spatiale témoigne de l'influence des apports terrigènes d'origine fluviale tel qu'en Baie de Seine. Dans la zone du parc éolien en mer de FGL, les faibles concentrations en MES, reflètent globalement une influence atténuée des apports fluviaux dans la zone EMR FGL. En effet, les zones côtières sont soumises aux apports sédimentaires des fleuves ainsi qu'aux processus de remise en suspension dans les eaux peu profondes, qui constituent les principales sources de matière particulaire.

Le gradient négatif de concentration côte–large s'explique par la dilution progressive des panaches fluviaux et par la sédimentation des particules à mesure de l'éloignement des sources continentales. Dans la zone du parc éolien en mer FGL, les faibles concentrations en MES traduisent une influence limitée des apports fluviaux. Toutefois, une variabilité saisonnière peut influencer la répartition et la diffusion du panache fluvial, avec des concentrations plus élevées en hiver qu'en été (Rivier, 2013). Par ailleurs, les différences observées entre les années de mesure confirment l'existence d'une variabilité interannuelle des concentrations en MES (Rivier, 2013).



**Figure 13.** Champ de concentration en matière en suspension des eaux de surface, interpolé à partir de mesures effectuées début septembre 1994 aux stations FLUX-MANCHE II (d'après Velegrakis et al., 1999, River, 2013, modifiée Mérindol, 2025).

### 3. Analyse de la mise en mouvement des sédiments et évaluation du transport solide

#### 3.1 Méthodologie

La mise en mouvement des sédiments est le résultat d'une interaction complexe entre différents forçages hydrodynamiques — courants, niveau d'eau, vagues —, la bathymétrie locale, ainsi que les propriétés granulométriques des particules (Le Hir, 2008 ; Rivier, 2013). La mobilisation des sédiments se produit lorsque la contrainte de cisaillement exercée par l'écoulement sur le fond dépasse une valeur critique ( $\theta_{cr}$ ), généralement exprimée à l'aide du paramètre de Shields (1936). Ce paramètre adimensionnel représente le rapport entre la contrainte hydrodynamique au fond et les forces gravitaires retenant les particules sur le fond. Lorsqu'il dépasse une valeur seuil, les sédiments peuvent être mis en mouvement (Shields, 1936 ; Soulsby, 1997 ; Le Hir, 2008).

Les travaux de Soulsby (1997) constituent une référence majeure pour l'évaluation de la mise en mouvement des sédiments sous l'influence distincte des vagues et des courants, ainsi qu'en considérant leur effet combiné (e.g. Le Hir, 2008 ; Rivier, 2013). Cette approche permet de mieux comprendre la contribution relative de chaque forçage à l'initiation du mouvement sédimentaire.

Dans cette étude, afin de caractériser le transport des sédiments sur la période 1980–2024, nous avons utilisé la formulation de Wu & Lin (2014). Ces auteurs distinguent notamment les deux modes principaux de transport : le charriage et la suspension. Le charriage correspond au déplacement des particules à proximité du fond, par roulement, glissement ou saltation, et domine pour les sédiments grossiers dans des régimes de courant modérés. La suspension concerne quant à elle les particules plus fines maintenues en suspension dans la colonne d'eau et advectées par l'écoulement. Dans la présente étude, nous appliquons leur méthodologie pour caractériser les types dominants de transport sédimentaire sur la période 1980–2024. Le transport solide total est calculé comme la somme des contributions respectives par charriage et suspension, évaluées indépendamment pour chaque classe granulométrique en fonction des conditions hydrodynamiques combinées de vague et de courant, considérées de façon instantanée à une fréquence horaire, avec une profondeur évoluant au gré des marées. Cette démarche permet de quantifier ces contributions et d'identifier le mode de transport dominant.

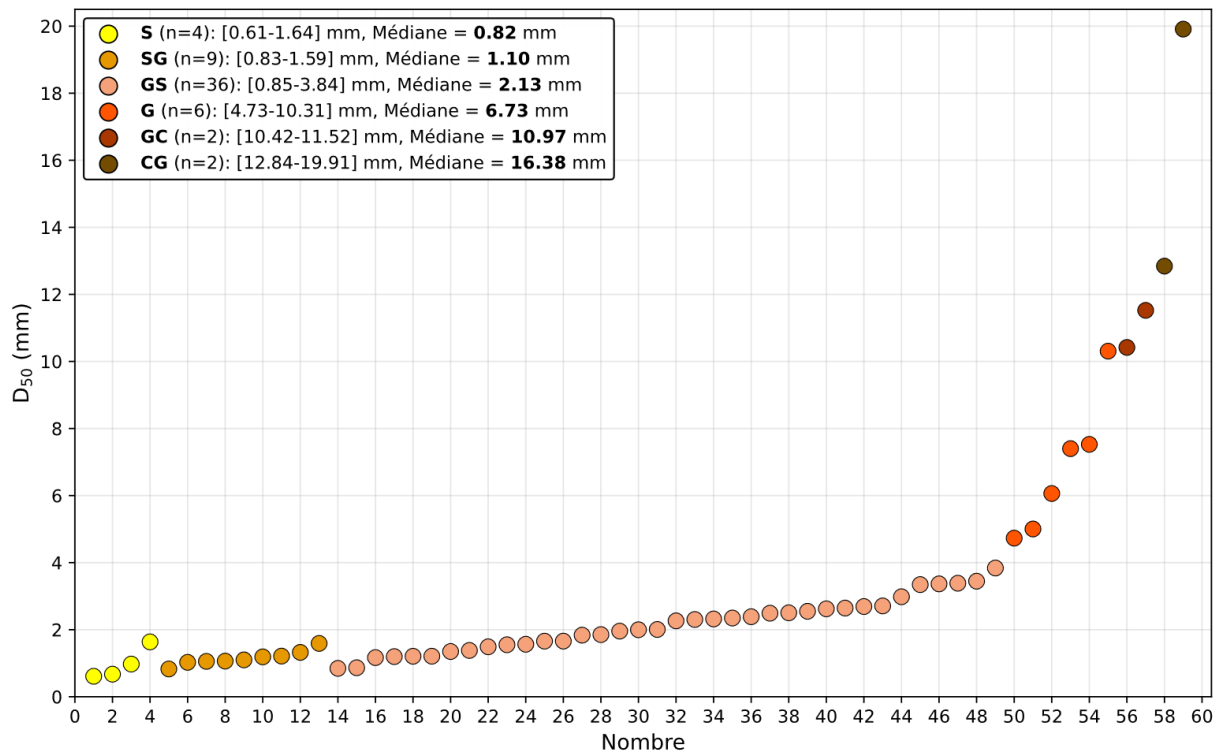
Les calculs et les visuels présentés dans ce chapitre ont été réalisés à l'aide d'un script Python développé spécifiquement pour ce travail. Ce script permet l'importation des données, l'application des formules et la création des figures.

#### 3.2 Définition des tailles de grains représentatives de la zone FGL

Pour cette étude, les valeurs de  $D_{50}$  (Diamètre médian) sont obtenues à partir de l'analyse de l'ensemble des échantillons sédimentaires (**Figure 3**). Pour la zone d'étude FGL, six classes sédimentologiques sont représentées (S, SG, GS, G, GC et CG ; les abréviations et le détail des critères de la classification sont définis dans le **Tableau 1**). Pour chaque classe, le nombre d'échantillons et l'intervalle de tailles observé [ $D_{50}$  min –  $D_{50}$  max] sont indiqués, ainsi que la médiane de l'intervalle (**Figure 14**).

Cette approche permet de visualiser la distribution granulométrique et d'identifier une valeur médiane représentative pour chaque faciès. Les classes fines (S et SG) présentent des  $D_{50}$  inférieurs à 2 mm, tandis que les classes plus grossières (G, GC et CG) dépassent 6 mm, avec une dispersion plus marquée pour les sédiments grossiers. Le faciès le plus représenté est très largement GS, avec 36 occurrences sur un total de 59. Cette répartition illustre la variabilité granulométrique de la zone FGL et fournit des valeurs médianes pour la caractérisation des différents types de sédiments dans la suite de cette étude afin de calculer les statistiques

relatives à la mise en mouvement des sédiments, ainsi que pour la caractérisation des modes de transport charriage et suspension en fonction des différents forçages hydrodynamiques observés dans la zone d'étude.



**Figure 14.** Diamètres médians ( $D_{50}$ ) des grains mesurés dans les 59 échantillons sédimentaires prélevés dans la zone d'étude EMR FGL. Les couleurs indiquent les classes sédimentologiques des échantillons (faciès).

Les tailles médianes retenues pour représenter chaque faciès sont les suivantes (**Figure 14**) :

- **S** :  $D_{50} = 0.82$  mm
- **SG** :  $D_{50} = 1.10$  mm
- **GS** :  $D_{50} = 2.13$  mm
- **G** :  $D_{50} = 6.73$  mm
- **GC** :  $D_{50} = 10.97$  mm
- **CG** :  $D_{50} = 16.38$  mm

### 3.3 Calcul des seuils critiques de mise en mouvement des sédiments

En fonction des différentes classes granulométriques des sédiments présentes sur la zone d'étude, caractérisées par les six diamètres médians ( $D_{50}$ ) définis pour la zone FGL, les paramètres de mobilité adimensionnels ( $\theta_{cr}$ ), ont été déterminés afin d'établir par la suite les statistiques de mise en mouvement des sédiments.

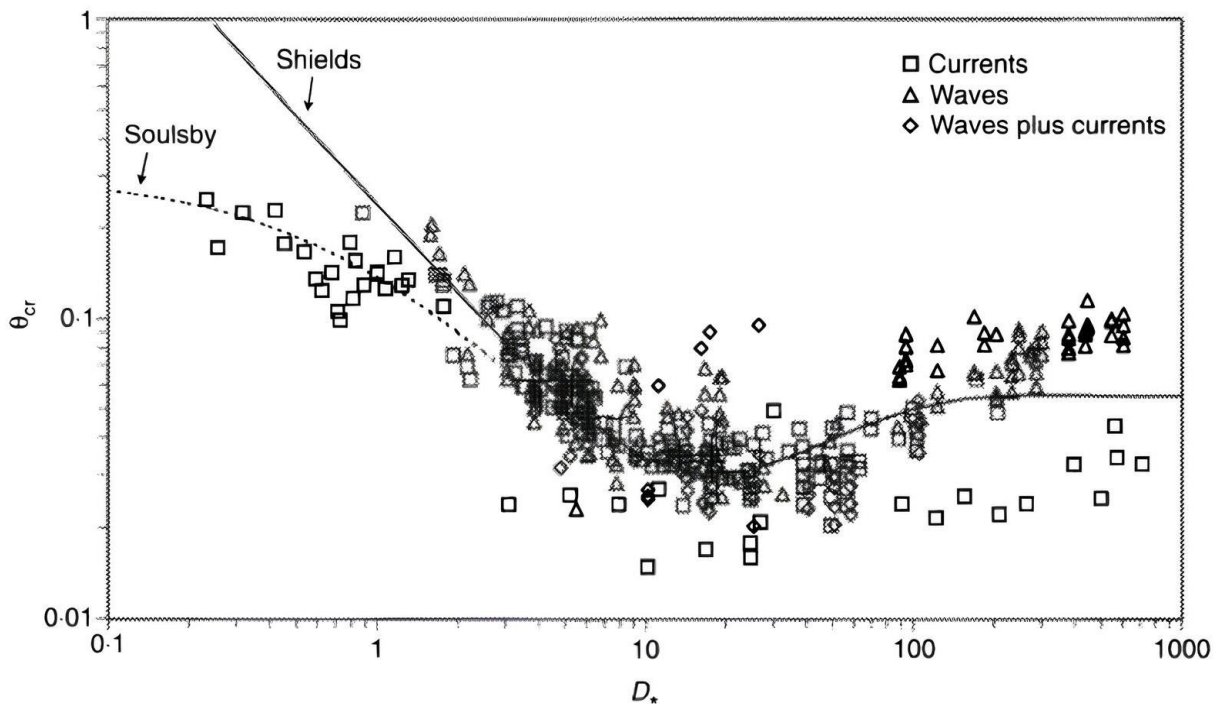
Les formulations de Shields (1936) et Soulsby (1997) sont largement utilisées en sédimentologie pour estimer les seuils de mobilité des sédiments, comme illustré à la **Figure 15**. Cette figure présente la relation entre le paramètre de mobilité de Shields et Soulsby ( $\theta_{cr}$ , **Eq. 1**) et la taille de grain adimensionnelle ( $D^*$ , **Eq. 2**), extraite de Soulsby (1997).

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_s - \rho)d} \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec,  $\tau_{cr}$  : contrainte de cisaillement critique sur le fond ( $N/m^2$ ),  $g$  : constante d'accélération gravitationnelle ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $\rho_s$  : masse volumique des sédiments ( $kg/m^3$ ),  $\rho$  : Masse volumique du fluide ( $kg/m^3$ ),  $d$  : diamètre des grains (m).

$$D^* = d \left[ \frac{g (s - 1)}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Avec,  $g$  : constante d'accélération gravitationnelle ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ),  $s$  : densité relative ( $s = \rho_s / \rho$ ) et  $\nu$  : viscosité cinématique du fluide ( $m^2/s$ ),  $d$  : diamètre des grains (m).



**Figure 15.** Paramètres critiques de Shields et Soulsby ( $\theta_{cr}$ ) en fonction du diamètre de grain adimensionnel ( $D^*$ ), extrait de Soulsby (1997).

Le **Tableau 2** présente les diamètres médians ( $D_{50}$ ) retenus pour cette étude, ainsi que les tailles de grains adimensionnelles ( $D^*$ ), nécessaires pour le calcul des paramètres de mobilité selon les formulations de Shields (1936) et Soulsby (1997).

Les paramètres de mobilité ( $\theta_{cr}$ ) ont ainsi été calculés à partir de ces deux méthodes. La méthode de Soulsby a été retenue pour les  $D_{50}$  les plus faibles (0.824, 1.099 et 2.135 mm), correspondant à des sables, tandis que la méthode de Shields a été utilisée pour les grains plus grossiers (6.730 mm, 10.970 mm et 16.377 mm). En effet, la **Figure 15** montre que la méthode de Soulsby fournit des estimations plus fiables pour les sédiments fins, tandis que la formule de Shields est plus adaptée pour les sédiments grossiers.

**Tableau 2.** Contraintes critiques de cisaillement ( $\theta_{cr}$ ) selon Shields (1936) et Soulsby (1997), et tailles de grains adimensionnelles ( $D^*$ ), en fonction des six  $D_{50}$  sélectionnés pour la zone FGL.

$D_{50}$ (mm)	$D^*$	$\theta_{cr}$ (Shields)	$\theta_{cr}$ (Soulsby)
0.82	20.568	0.031	0.030
1.10	27.432	0.034	0.032
2.13	53.292	0.041	0.041
6.73	167.989	0.055	0.055
10.97	273.825	0.055	0.056
16.38	408.790	0.055	0.056

### 3.4 Calcul des types de transport

Dans la présente étude, nous appliquons la méthodologie développée par Wu and Lin (2014) pour caractériser les types de transport sédimentaire sur la période 1980-2024. Le transport solide total ( $q_{total}$ ) est estimé comme la somme des contributions respectives du charriage ( $q_b$ ) et de la suspension ( $q_s$ ), évaluées pour chaque classe granulométrique en fonction des conditions hydrodynamiques combinées des vagues et du courant.

Dans ce rapport, seules les équations relatives à la **suspension** ( $q_s$ ) et au **charriage** ( $q_b$ ) sont présentées, respectivement par les équations (Eq.3) et (Eq.4). Les formulations intègrent l'asymétrie des vagues à travers le calcul des contributions *onshore* et *offshore*, toutefois, dans le cadre de la présente étude, cette asymétrie s'avère négligeable dans la zone FGL située au large. Pour une présentation complète des équations, des hypothèses de modélisation et des paramètres utilisés, le lecteur est invité à consulter l'article original de Wu et Lin (2014).

$$q_s = 0.0000262 \sqrt{(s-1)gd_k^3} \left[ \left( \frac{\tau_{suspension}}{\tau_{cri}} - 1 \right) \frac{U_c}{\omega_{sk}} \right]^{1.74} \quad (\text{Eq. 3})$$

Avec,  $s$  : densité relative ( $s = \rho_s / \rho$ ) (-),  $g$  : constante d'accélération gravitationnelle (9,81  $m/s^2$ ),  $d_k$  : diamètre des particules (m),  $k$  : varie de 1 à 3 et représente les trois classes granulométriques considérées,  $\tau_{suspension}$  : contrainte de cisaillement pour le transport en suspension ( $N/m^2$ ),  $\tau_{cri}$  : contrainte critique de mise en mouvement ( $N/m^2$ ),  $U_c$  : vitesse moyenne du courant barotrope (m/s),  $\omega_{sk}$  : vitesse de chute (ou de sédimentation) des particules (m/s).

$$q_b = 0.0053 \sqrt{(s-1)gd_k^3} \left( \frac{\tau_{charriage}}{\tau_{cri}} - 1 \right)^{2.2} \quad (\text{Eq. 4})$$

Avec,  $s$  : densité relative ( $s = \rho_s / \rho$ ) (-),  $g$  : constante d'accélération gravitationnelle (9,81  $m/s^2$ ),  $d_k$  : diamètre des particules (m),  $k$  : varie de 1 à 3 et représente les trois classes granulométriques considérées,  $\tau_{charriage}$  : contrainte de cisaillement pour le transport par charriage ( $N/m^2$ ),  $\tau_{cri}$  : contrainte critique de mise en mouvement ( $N/m^2$ ).

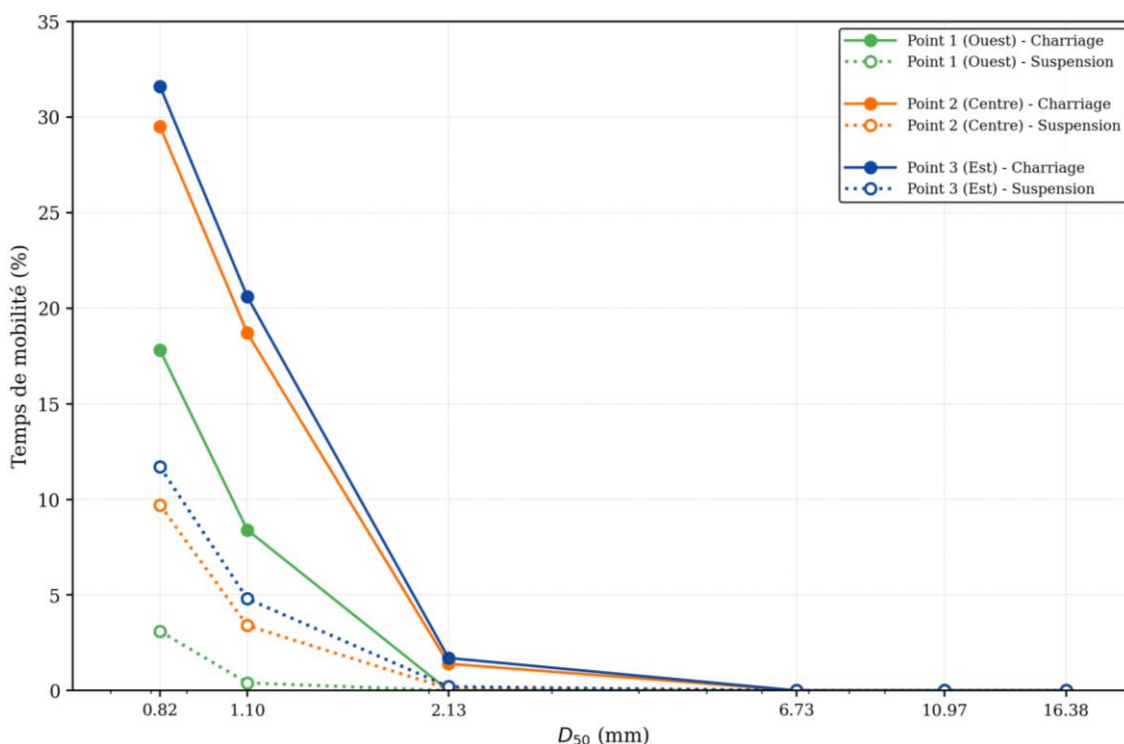
### 3.5 Résultats

#### 3.5.1 Statistique de mise en mouvement des sédiments

Cette section présente l'analyse de la mise en mouvement des sédiments pour la zone d'étude à l'aide de figures de synthèse (**Figure 16**, **Figure 17**) et le taux de transport (**Figure 18**). Les résultats sont obtenus à partir de différentes méthodologies : le calcul des contraintes instantanées est réalisé selon Wu & Lin (2014) pour l'évaluation de la contribution du charriage et de la suspension, et selon Soulsby (1997) pour l'évaluation de l'effet des vagues, des courants et des deux combinés.

##### 3.5.1.1 Analyse du temps de mobilité des sédiments par charriage ou suspension selon Wu & Lin (2014)

Cette sous-section détaille le temps de dépassement des seuils critiques des contraintes en charriage et en suspension pour différentes classes granulométriques ( $D_{50}$ ). Les résultats sont synthétisés sur la **Figure 16**. Le détail des analyses est disponible dans la section **Annexes (Point P1 (Ouest): Figure 23 à Figure 28 ; Point P2 (Centre): Figure 42 à Figure 47 ; Point P3 (Est) : Figure 61 à Figure 66)**.



**Figure 16.** Proportion de temps (en %) sur la période 1980-2024 durant laquelle le seuil critique de la contrainte en charriage ou en suspension est dépassé, en fonction du  $D_{50}$  (échelle log) pour chaque point du rejeu HYWAT (point P1, P2 et P3).

Les résultats présentés sur la **Figure 16** montrent une diminution nette du temps de mobilité des sédiments avec l'augmentation du diamètre médian. Les fractions les plus fines ( $D_{50} = 0,82$  mm (sables) et  $D_{50} = 1,10$  mm (sables et graviers)) sont les seules à pouvoir être mobilisées sur des durées significatives, tandis que les contraintes associées aux sédiments de taille supérieure ( $\geq 2$  mm) n'atteignent que très rarement les seuils critiques de remobilisation. Lorsqu'il se produit, le transport sédimentaire s'effectue quasi exclusivement par charriage, la suspension étant possible uniquement pour les classes granulométriques les plus faibles, et ce de manière très limitée.

Ainsi, aux points P2 et P3, le transport par charriage de classes inférieures à 2 mm se produit 18 à 32 % du temps. Cependant, elles demeurent faiblement représentées au sein de la zone d'étude (environ 1%, **Figure 6**). Les sédiments de taille supérieure à 2 mm n'atteignent que très rarement les seuils critiques associés au charriage ou à la suspension. Pour la zone FGL, le type de sédiment le plus représenté est le GS ( $D_{50} = 2.13$  mm). Pour ce faciès, les temps de mobilisation sont très faibles : quelques pourcents (1 à 3 %) pour le charriage et non significatifs pour la suspension (< 1%), et ce, quel que soit le point considéré. En cohérence avec la nature des fonds observée, ceci indique une tendance assez nette à une mobilité très faible à non significative sur la zone, d'autant plus marquée pour les sédiments les plus grossiers majoritairement présents.

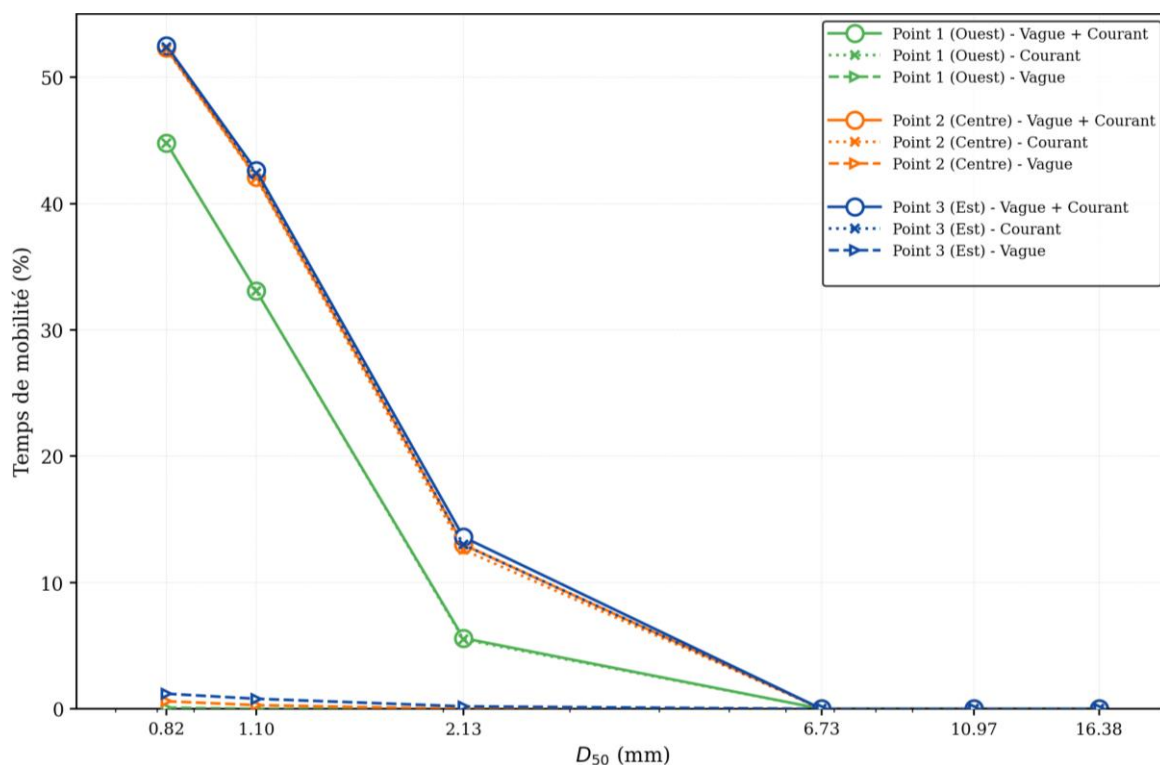
Sur le plan spatial, le point P3 (Est) présente les temps de dépassement les plus élevés, suivi du point P2 (Centre), puis du point P1 (Ouest). Ce gradient reflète à la fois une exposition hydrodynamique plus marquée à l'est de la zone d'étude avec des courants plus forts et une profondeur moindre, favorisant localement le déclenchement plus fréquent du transport. Ainsi, seuls les sédiments fins, toutefois très peu présents sur la zone, sont susceptibles d'être remobilisés sur la zone considérée, et ce principalement dans les secteurs soumis aux conditions les plus énergétiques.

### **3.5.1.2 Analyse du temps de mobilité des sédiments sous l'effet combiné des vagues et courants selon Soulsby (1997)**

Cette sous-section présente l'estimation des temps de mobilisation des sédiments en considérant l'action des vagues, des courants et de leurs effets combinés. Le détail des analyses est disponible dans la section **Annexes (Point P1 (Ouest) : Figure 30 à Figure 35 ; Point P2 (Centre) : Figure 49 à Figure 54 ; Point P3 (Est) : Figure 68 à Figure 73)**.

Les calculs sont réalisés pour les six classes granulométriques représentatives de la zone d'étude et tiennent compte de l'effet des vagues et du courant. Les résultats de la **Figure 17** indiquent que le courant exerce un rôle déterminant pour dépasser le seuil critique de mise en mouvement, tandis que les vagues ne contribuent que marginalement à la mobilisation sédimentaire, essentiellement sur des épisodes énergétiques tempétueux et pour les tailles de grain les plus fines. En effet, la contribution du courant seul est quasiment identique à l'action combinée des vagues et des courants pour toutes les classes granulométriques analysées et quel que soit le point considéré.

Pour les sédiments les plus fins ( $D_{50} = 0.82$  mm et  $D_{50} = 1.10$  mm), la proportion de temps durant laquelle  $\theta > \theta_{cr}$  atteint environ 45 à 52 % aux points P2 (Centre) et 3 (Est), tandis qu'elle demeure plus faible au point P1 (Ouest), avec des valeurs de l'ordre de 32 à 45 %. Toutefois, la présence très faible de ces types de sédiments sur la zone d'étude doit être prise en compte dans l'interprétation de ces résultats (**Figure 6**). D'après la carte de nature des fonds (**Figure 5**), ces fractions peuvent néanmoins être localement présentes, piégées dans certaines dépressions à l'est et à l'ouest de la zone d'étude, où le fond présente une topographie plus accidentée et irrégulière (**Figure 7**). Aussi, le secteur à l'ouest de la zone d'étude se caractérise par des conditions hydrodynamiques moins intenses, pouvant favoriser le piégeage des sédiments, notamment lors de périodes de faible hydrodynamisme. En cas d'apport extérieur comme par exemple les panaches hivernaux en MES de Seine (voir **Figure 13**), des dépôts temporaires de sédiments fins pourraient se former localement, e.g., en période de morte-eau. Les temps de mobilité relativement élevés calculés pour les MES (60  $\mu$ m) indiquent cependant qu'elles sont susceptibles d'être rapidement remobilisées lors de la période de vive-eau suivante par exemple.



**Figure 17.** Proportion de temps (%) sur la période 1980-2024 durant laquelle le paramètre de Shields ( $\theta$ ) dépasse le seuil critique ( $\theta_{cr}$ ) de mise en mouvement, en fonction du  $D_{50}$  (échelle log) pour chaque point du rejeu HYWAT (P1, P2 et P3), selon l'action des vagues seules (triangles), du courant seul (croix) ou de la combinaison des deux (cercles).

En considérant un  $D_{50} = 2,13$  mm, correspondant au type de sédiment le plus représenté sur la zone d'étude (plus de 80%), la mobilité diminue fortement. Les temps de mobilité ne dépassent pas 12 à 15 % aux points P2 (Centre) et P3 (Est) et restent inférieures à 5 % au point P1 à l'Ouest. Ces pourcentages de temps coïncident avec des périodes de vive-eau et de forts coefficients de marée, potentiellement combinés à des conditions de vagues intenses (**Figure 17**). Au-delà de  $D_{50} = 6,73$  mm, les sédiments ne sont plus mobilisés, quelle que soit la combinaison de forçages.

Sur le plan spatial, les temps de mobilité les plus élevés sont observés au point Est (point P3), suivi du point P2 (Centre), tandis que le point P1 (Ouest) présente des conditions légèrement moins favorables à la mobilisation. Ce gradient reflète des courants plus forts à l'est et au centre, associée à une profondeur plus faible, renforçant la capacité de dépassement des seuils critiques de mise en mouvement. Ainsi, les sédiments les plus fins sont les plus à même d'être remobilisés, principalement sous l'effet du courant, éventuellement amplifié par les vagues de façon épisodique. Cependant, ces sédiments ne sont que très peu présents et de façon très isolée sur la zone d'étude.

De manière générale, l'analyse montre une absence de mobilité significative des sédiments les plus présents (notamment GS) sur le fonds marin la zone d'étude FGL. Cependant les sédiments les plus fins (notamment S et SG) peuvent être amenés à transiter sur la zone, voire à se déposer localement par piégeage dans des dépressions et/ou lors de faibles conditions hydrodynamiques. L'analyse met en évidence que cette présence ne serait toutefois qu'éphémère et que ces sédiments les plus fins pourraient être remobilisés relativement rapidement dans des conditions de fort coefficient de marée et/ou d'événements extrêmes (tempête).

### 3.5.2 Evaluation du transport solide

Cette section présente l'analyse des transports sédimentaires sur la période 1980–2024 pour les trois points du rejeu HYWAT sélectionnés. Le détail des analyses est disponible dans la section **Annexes (Point P1 (Ouest): Figure 36 à Figure 41 ; Point P2 (Centre): Figure 55 à Figure 60 ; Point P3 (Est): Figure 74 à Figure 79)**.

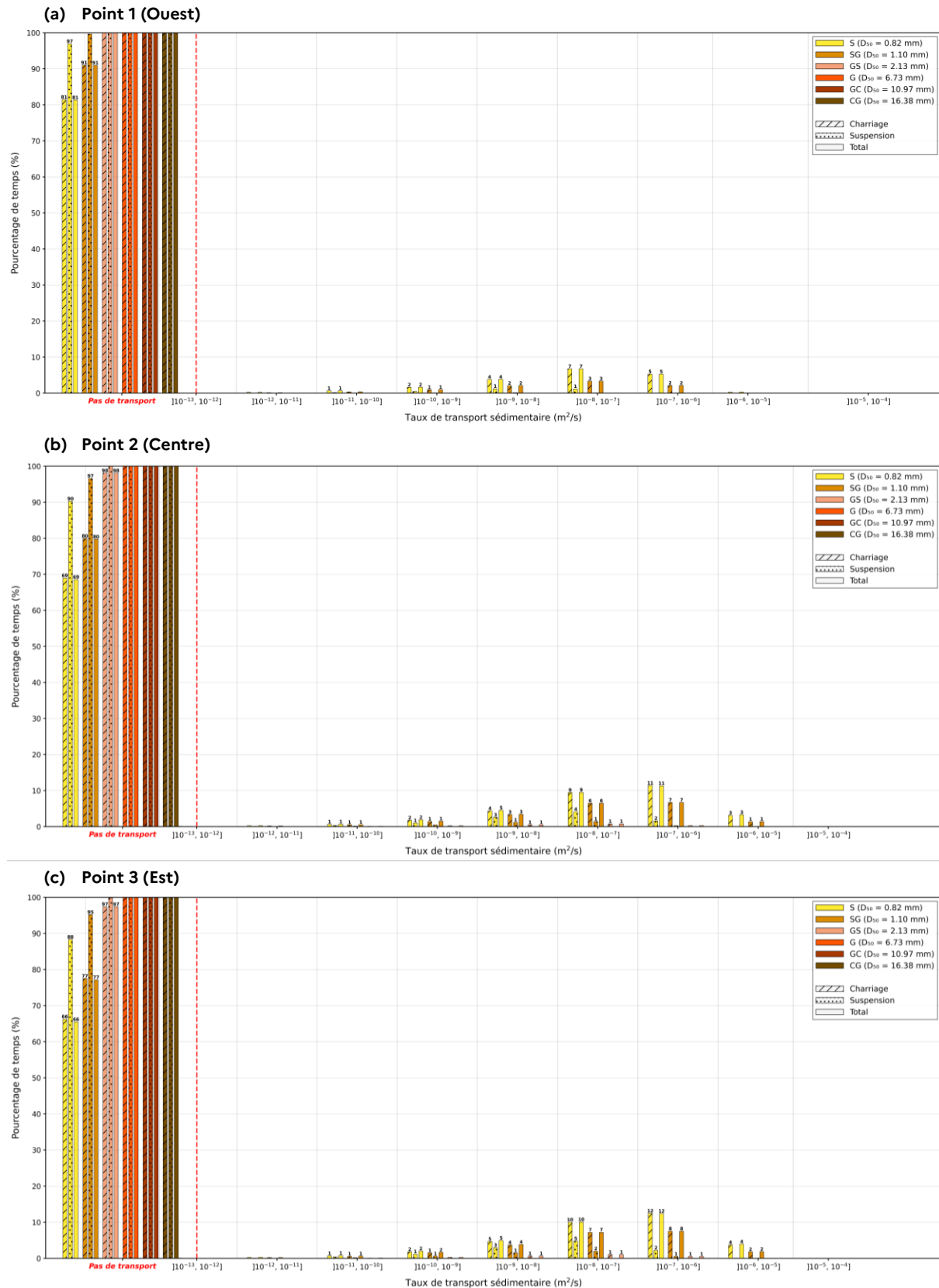
Pour rappel, l'objectif est d'évaluer le transport total ( $q_{\text{total}}$ ) sous l'influence conjointe des vagues et du courant, et en fonction de la taille des particules. L'approche adoptée permet de distinguer les contributions respectives du transport par charriage ( $q_b$ ) et du transport en suspension ( $q_s$ ) au transport total. Il est rappelé que les taux de transport calculés correspondent à des flux volumétriques : ils expriment un volume de grains ( $\text{m}^3$ ) transporté par unité de temps (s) et par unité de longueur horizontale ( $\text{m}^{-1}$ ).

Les taux de transport sédimentaire ont été calculés selon la formule de Wu et Lin (2014) pour les six classes granulométriques considérées, allant des sables (S,  $D_{50} = 0,82$  mm) aux cailloutis graveleux (CG,  $D_{50} = 16,38$  mm), et aux trois points d'observation (P1 : **Figure 18.a**, P2 : **Figure 18.b** et P3 : **Figure 18.c**). Cette figure présente la répartition du pourcentage de temps sans transport (partie gauche du graphique, à gauche de la ligne rouge en pointillé) et du pourcentage de temps avec transport (partie droite du graphique, à droite de la ligne rouge en pointillé). Pour ce faible pourcentage du temps où le transport est possible, la figure permet d'identifier les gammes de transport les plus fréquentes pour chaque faciès considéré. Les taux de transport sont représentés sous forme d'intervalles de valeurs exponentielles, en considérant que le transport débute à  $10^{-13}$ . L'amplitude des valeurs, couvrant une large gamme d'ordres de grandeur (de  $10^{-13}$  à  $10^{-5}$ ).

Les trois points considérés (P1, P2 et P3) présentent une répartition temporelle similaire en termes de transport. Comme indiqué aux paragraphes précédents, on retrouve bien une prédominance du transport par charriage, la suspension n'apportant qu'une contribution négligeable pour l'ensemble des classes granulométriques. Les fractions les plus grossières (G, GC, CG) ne montrent aucun transport significatif sur l'ensemble de la période d'observation aux trois points étudiés, en cohérence avec les analyses précédentes et induit par les seuils critiques de mise en mouvement élevés pour ces types de sédiments (**Annexes (Point P1 (Ouest): Figure 23 à Figure 28 ; Point P2 (Centre): Figure 42 à Figure 47 ; Point P3 (Est): Figure 61 à Figure 66)**).

Pour le type GS, majoritairement représenté dans la zone d'étude (81 % de la surface du fond marin), le transport aux points P2 et P3 est possible uniquement durant 2 à 3 % du temps. Il est alors associé à des taux très faibles de l'ordre de  $10^{-8}$  à  $10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ . Ces quantités infimes potentiellement transportées sur des périodes de temps très courtes et isolées traduisent des conditions hydrodynamiques globalement insuffisantes pour mettre en mouvement ce type de sédiment majoritairement présent sur la zone.

Les sédiments S et SG, faiblement représentés dans la zone d'étude FGL (1 à 2 % de la surface), montrent les capacités de transport les plus élevées. L'absence de transport est observée 81 % du temps au point P1, et respectivement 69 % et 81 % du temps aux points P2 et P3. Lorsque le transport est effectif, ces fractions présentent les taux les plus significatifs, dans l'intervalle  $]10^{-7} \text{ à } 10^{-6}] \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , soit un ordre de grandeur supérieur au faciès GS.

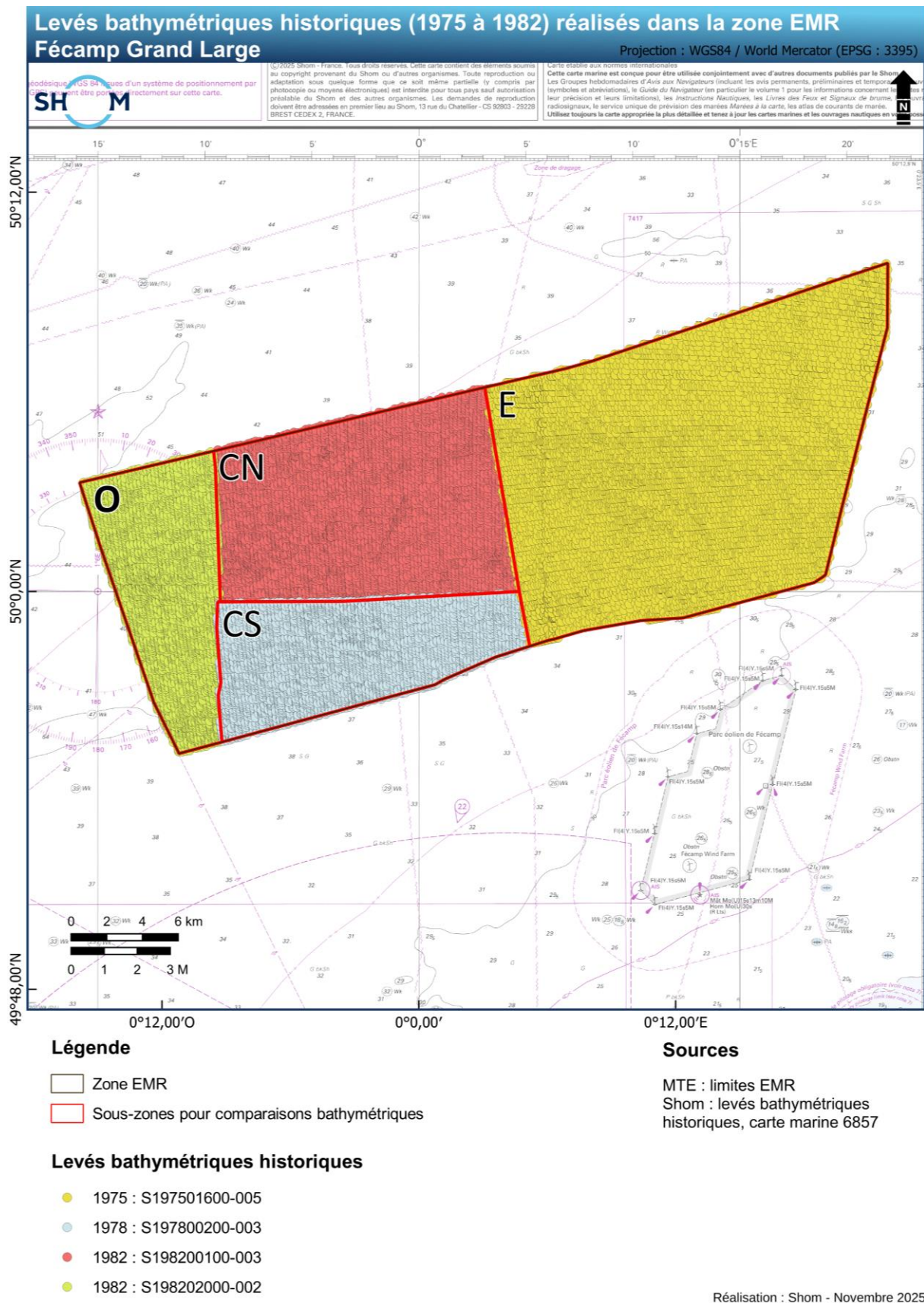


**Figure 18.** Pourcentage de temps de mobilité du taux de transport sédimentaire selon les intervalles d'ordre de grandeur considérés, soit une échelle exponentielle (à partir de  $10^{-13}$ ) a. Point 1 (Ouest), b. Point 2 (Centre) et c. Point 3 (Est).

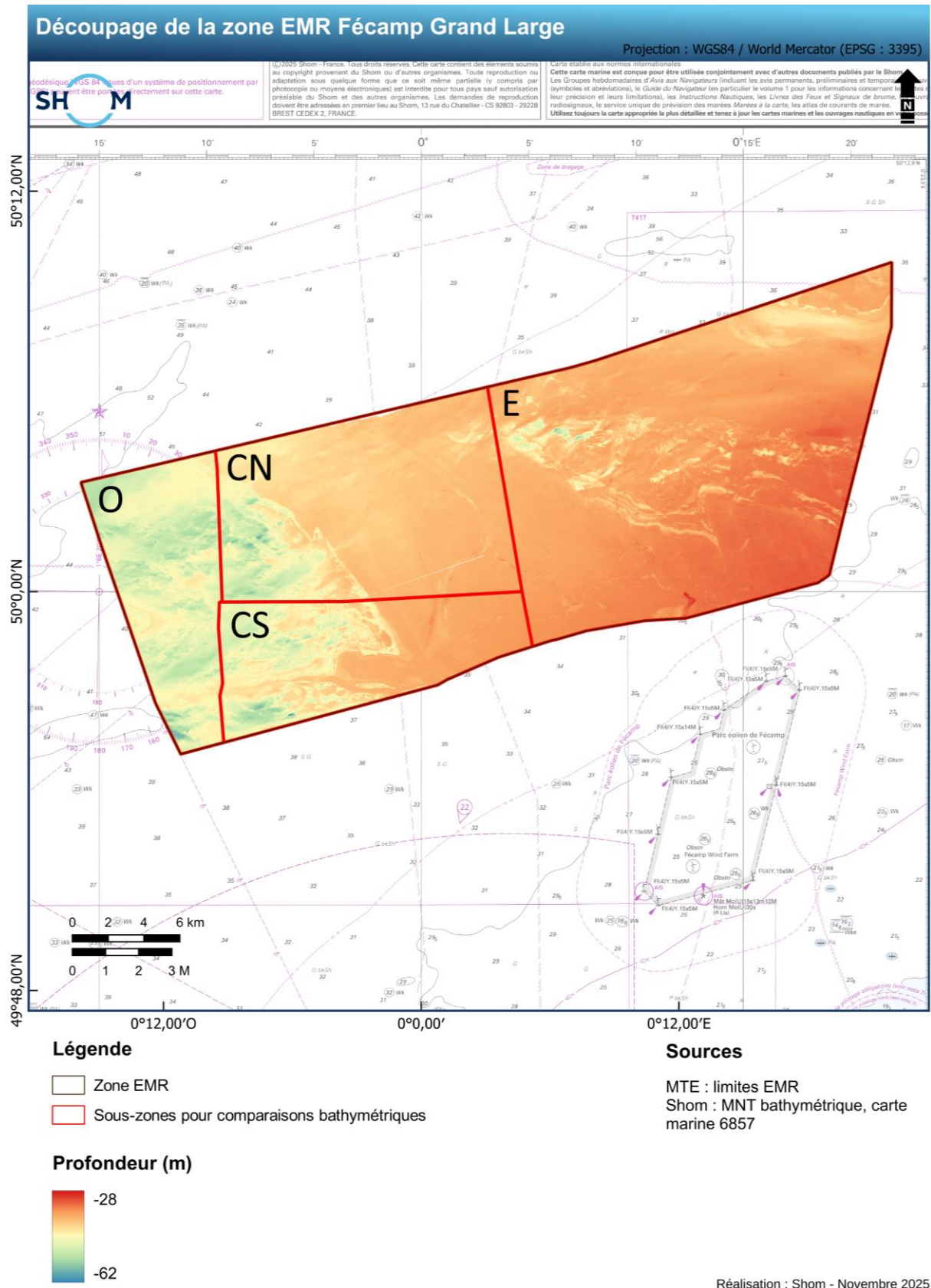
## 4. Analyse des morphologies sédimentaires potentiellement dynamiques

### 4.1 *Données bathymétriques*

La présente analyse concerne quatre bathymétries anciennes (1975, 1978 et 1982, **Figure 19**) et une bathymétrie récente (2023-2024, **Figure 20**) acquises dans l'emprise de la zone d'étude FGL. Le nommage des bathymétries historiques reprend la référence du lot dans la Base de Données Bathymétrique du Shom (BDDBS) avec « S » pour le levé Shom, suivi de l'année d'enregistrement et du numéro d'ordre du levé dans l'année d'enregistrement. Malgré cette subdivision spatiale des levés historiques (**Figure 19**), la proximité temporelle relative des acquisitions (1975, 1978 et 1982) et l'homogénéité des tendances observées entre les sous-zones permettent de traiter conjointement les résultats de manière globale.



**Figure 19.** Bathymétries historiques de 1975 à 1982 dans la zone d'étude FGL, divisée en quatre sous-zones (O : Ouest, CN : Centre Nord, CS : Centre Sud et E : Est). Les points indiquent la localisation des sondes.



**Figure 20.** Bathymétries récente 2023-2024 (MNT) dans la zone d'étude FGL, divisée en quatre sous-zones (O : Ouest, CN : Centre Nord, CS : Centre Sud et E : Est).

Les principales caractéristiques des campagnes bathymétriques considérées pour cette étude sont résumées dans le **Tableau 3** ci-dessous.

**Tableau 3.** Paramètres techniques des cinq levés bathymétriques effectués entre 1975 et 2023-2024.

Nom du levé	Année du levé	Type de donnée	Résolution horizontale (m)	Matériel utilisé	Modèle du sondeur	Nom des porteurs
S197501600-005	1975	Ponctuel	~ 200	Sondeur monofaisceau	Sondeur DESO 10	BH L'Astrolabe + EPC Esperance + LDV La DECOUVERTE
S197800200-003	1978	Ponctuel	~ 150	Sondeur monofaisceau	Sondeur DESO 10	EPC Esperance
S198202000-002	1982	Ponctuel	~ 150	Sondeur monofaisceau	Sondeur DESO 10	BH (Bâtiment Hydrographique) L'Astrolabe + EPC Esperance
S198200100-003	1982	Ponctuel	~ 150	Sondeur monofaisceau	Sondeur DESO 10	BH (Bâtiment Hydrographique) L'Astrolabe + EPC Esperance
S202400600-001	2023-2024	Modèle numérique de terrain (MNT)	~ 1	Sondeur multifaisceaux	Sondeur multifaisceaux Simrad EM710	BH2c Laplace + BHO Beautemps-Beaupré

## 4.2 Incertitudes des levés bathymétriques

Afin de déterminer s'il y a eu une évolution bathymétrique significative sur la période d'environ 50 ans séparant les levés anciens du levé récent, les variations verticales ont été évaluées point par point.

Les sondes anciennes, acquises au sondeur monofaisceau et matérialisées par des entités ponctuelles, sont superposées au MNT récent. Ce MNT a été calculé à partir d'une densité de sondes beaucoup plus importante acquises au sondeur multifaisceaux, et est représentatif de l'état actuel. Par conséquent, il est utilisé comme référence pour évaluer une différence ( $Z_{\text{récent}} - Z_{\text{anciens}}$ ). Pour cette étude, la référence est le MNT bathymétrique de 2024.

Seules les variations de profondeur dépassant le seuil d'incertitude verticale cumulée des levés sont considérées comme significatives. Ainsi, afin d'évaluer la fiabilité des écarts observés entre les levés et de distinguer les évolutions réelles du fond marin des artefacts de mesure, il est nécessaire d'identifier et d'essayer de quantifier les principales sources d'incertitude associées aux levés bathymétriques. Ces incertitudes peuvent être regroupées selon les catégories suivantes :

- **Incertainces liées aux mouvements des bateaux** : bien que les centrales inertielles et le GPS aient amélioré la précision depuis les années 1990, les effets résiduels de roulis, tangage et cap entraînent des décalages verticaux d'environ 10 à 50 cm, notamment entre fauchées successives.
- **Incertainces liées à l'acquisition et à la représentation des données** : les levés ponctuels, sont biaisés et peu représentatifs. Les erreurs de marée (souvent dérivées de ports

éloignés) peuvent atteindre 0,5 à 1 m, et les imprécisions de positionnement ou de transcription cartographique ajoutent d'autres biais.

- **Erreurs sur les réductions de sonde** : les levés récents (par ex. SMF 2020) ont souvent été réduits à partir de la marée prédite sans correction des surcotes/décotes liées à la pression atmosphérique, au vent ou à la température, générant des écarts pouvant atteindre 60 à 90 cm, soit une incertitude totale pouvant aller jusqu'à 1 m.
- **Biais liés à la comparaison mono/multifaisceau** : la comparaison entre des levés anciens réalisés au sondeur monofaisceau et des levés récents effectués au sondeur multifaisceaux peut induire un biais vertical de plusieurs centimètres. En effet, le faisceau acoustique multifaisceau pénètre légèrement dans les sédiments, d'autant plus que ceux-ci sont fins, tandis que le monofaisceau enregistre généralement la réflexion sur la surface du fond quel que soit le type de sédiment. Cette différence de comportement acoustique peut donc créer une incertitude verticale entre les deux types de levés considérés de l'ordre d'une dizaine de centimètres.
- **Incertitudes sur les références verticales** : les anciens levés utilisent des zéros hydrographiques différents, parfois non documentés. Leur homogénéisation au 0 NGF-IGN69 introduit une incertitude de l'ordre de 10 à 50 cm.
- **Incertitudes liées au positionnement horizontal** : les levés anciens peuvent présenter une incertitude horizontale d'environ 50 m. Dans les zones caractérisées par un fort gradient bathymétrique, comme les zones avec des pentes, un décalage horizontal de cette amplitude peut engendrer des écarts significatifs dans les valeurs de profondeur mesurées verticalement.

Les incertitudes associées à chaque différentiel ont été estimées en cumulant les incertitudes verticales de chaque levé considéré. Un seuil de détection de  $\pm 2$  m a ainsi été estimé en prenant en compte les catégories d'incertitudes listées ci-dessus (**Tableau 4**). Donc, seules les variations bathymétriques dont la valeur excède ce seuil ( $> \pm 2$  m) sont considérées comme des évolutions morphologiques significatives.

**Tableau 4.** Synthèse des incertitudes verticales et horizontales – Les valeurs des incertitudes représentent l'addition des incertitudes des deux levés.

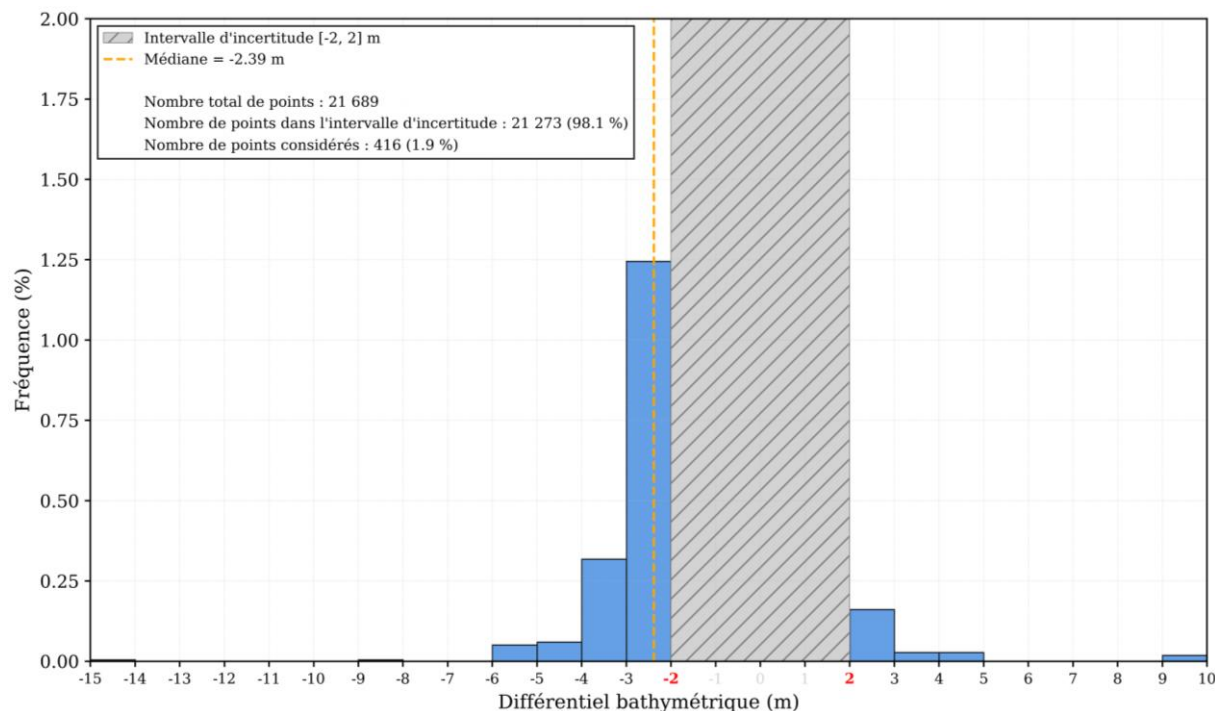
Levés comparés	Années des levés (Levé récent – Levé ancien)	Incertitude horizontale totale (m)	Incertitude verticale totale (m)
S202400600 - S197501600-005	[2023-2024] - 1975	$\pm 65$	$\pm 2$
S202400600 - S197800200-003	[2023-2024] - 1978	$\pm 40$	$\pm 2$
S202400600 - S198202000-002	[2023-2024] - 1982	$\pm 40$	$\pm 2$
S202400600 - S198200100-003	[2023-2024] - 1982	$\pm 50$	$\pm 2$

### 4.3 Résultats

L'analyse du différentiel bathymétrique entre le levé récent (2023-2024) et les levés antérieurs (O : 1982, CN : 1982, CS : 1978 et E : 1975), en considérant une incertitude de l'ordre de  $\pm 2$  m (voir section 4.2), met en évidence des variations localisées, notamment au sein des zones de dépression ou dans les zones les plus profondes (à l'ouest de la zone d'étude (O) et à l'ouest des zones CN et CS), là où la bathymétrie est accidentée.

Les différences bathymétriques présentent une médiane d'environ -2,39 m (**Figure 21**). La prédominance des variations négatives sur la verticale dans la zone étudiée (notamment à l'est et à l'ouest, dans les zones accidentées **Figure 22**) suggère une tendance générale à la perte de

sédiments (**Figure 21** et **Figure 22**). Cette évolution peut être attribuée à des processus d'érosion, notamment le transport des faciès S, SG (voir légèrement GS) mobilisés lors d'événements énergétiques. Aussi, le potentiel effondrement de structures karstiques souterraines constitue une hypothèse alternative susceptible d'expliquer la formation de dépressions (e.g., Cunningham *et al.*, 2024). Ces processus se déroulant sur des périodes temporelles étendues, un nombre plus important de levés bathymétriques dans la zone serait requis pour valider cette hypothèse.



**Figure 21.** Histogramme des différentiels bathymétriques sur la zone FGL. Les barres bleues représentent l'ensemble des valeurs de différentiel obtenues sur la zone d'étude. La bande grise hachurée correspond à l'intervalle d'incertitude non considéré  $[-2, 2]$  m. La ligne orange indique la médiane calculée uniquement sur les valeurs excédant cet intervalle.

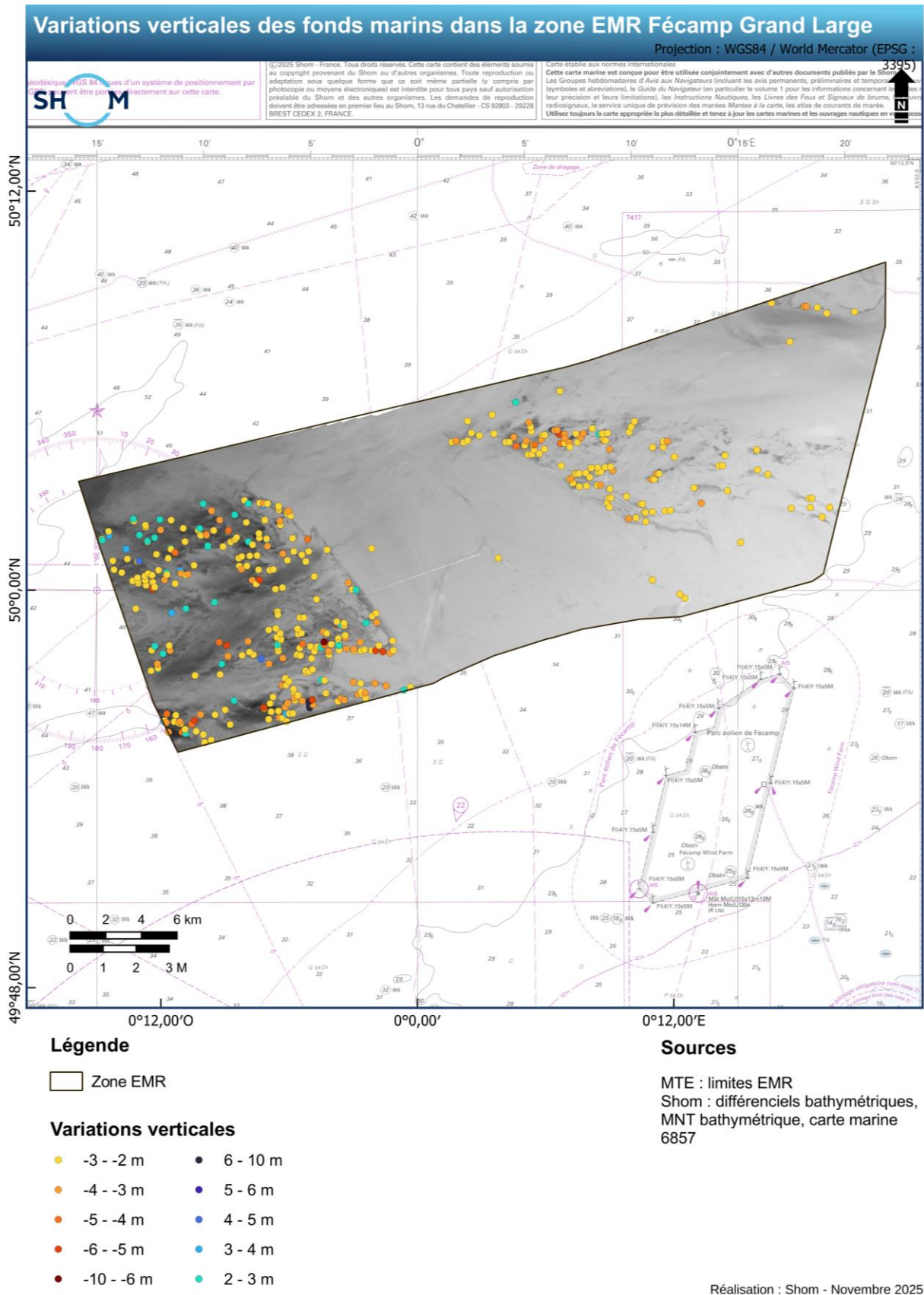
Les différences positives peuvent être interprétées comme le résultat d'une accumulation progressive de sédiments, qui tendent à se piéger préférentiellement dans les zones topographiquement basses où les conditions hydrodynamiques sont plus faibles, notamment dans la partie ouest et à l'est, dans les secteurs accidentés (**Figure 22**).

De plus, une petite zone située au sud-ouest présente des formations dunaires (**Figure 7**). Ces différences pourraient également traduire le déplacement de certains placages sédimentaires sableux susceptibles d'avoir migré, comme le suggère l'analyse précédente. Toutefois, il n'est pas possible de déterminer à ce stade s'il s'agit d'un apport extérieur ou simplement d'une remobilisation de sédiments déjà présents à proximité. Pour pouvoir valider l'hypothèse sur l'influence d'éventuels apports extérieurs dans les processus d'engraissement, il serait nécessaire d'avoir le budget sédimentaire de la zone, c'est-à-dire le bilan entre engraissement et érosion. Un budget positif indiquerait un apport sédimentaire externe, un budget nul traduirait un système en équilibre ou dominé par des échanges internes, tandis qu'un budget négatif signalerait une exportation nette de sédiments en dehors de la zone d'étude. La carte d'épaisseur des fonds révèle globalement de faibles accumulations sédimentaires, à l'exception d'une zone localisée au nord-est, où l'épaisseur atteint un maximum d'environ 6 m (**Figure 8**).

Les sédiments piégés pourraient également être remobilisés lors d'événements hydrodynamiques intenses. Par ailleurs, les écarts les plus importants observés sur la carte des différentiels (**Figure 22**) peuvent également résulter d'erreurs de positionnement horizontal

entre les levés, notamment dans les secteurs où le gradient bathymétrique est marqué. En effet, un léger décalage latéral entre deux acquisitions successives peut conduire à comparer des points de topographie distincts : par exemple, un point haut détecté lors du levé monofaisceau peut ne pas coïncider spatialement avec le même point haut relevé lors du levé multifaisceaux (SMF). Ce décalage horizontal, accentué dans les zones de forte pente, peut alors générer artificiellement des différentiels bathymétriques élevés, pouvant atteindre ici des valeurs isolées comprises entre -14 et -15 m d'une part, et entre +9 et +10 m d'autre part (**Figure 21**). Ces anomalies sont notamment localisées à l'ouest, dans la zone présentant des dépressions circulaires, et à l'est du site (**Figure 7** et **Figure 22**).

En raison de l'absence de données bathymétriques suffisantes, il reste difficile de formuler des conclusions. Il convient également de souligner l'écart temporel important entre les données disponibles : en effet, les bathymétries historiques les plus anciennes datent de 1975 et 1982, tandis que la bathymétrie la plus récente a été réalisée en 2023/2024 dans le cadre du présent projet EMR pour la zone Fécamp Grand Large.



**Figure 22.** Différentiel bathymétrique dans la zone d'étude FGL. Les variations bathymétriques sont représentées par des cercles colorés selon l'intervalle considéré. Les valeurs comprises dans l'intervalle d'incertitude [-2 m ; 2 m] sont en transparence car elles correspondent aux incertitudes des levés bathymétriques. Le MNT récent [2023-2024] a été ajouté en fond de carte.

## 5. Conclusion

L'étude menée sur la zone de Fécamp Grand Large met en évidence une dynamique sédimentaire globalement stable, caractérisée par une faible mobilité des sédiments et des taux de transport associés de très faible intensité.

Les courants constituent le principal forçage de mise en mouvement des sédiments, tandis que l'effet des vagues demeure épisodique et négligeable à l'échelle de la zone. Le léger gradient hydrodynamique, marqué par des vitesses de courant plus élevées à l'est qu'à l'ouest, contrôle la variabilité spatiale du transport sédimentaire : les taux de transport augmentent progressivement de l'ouest (P1) vers l'est (P3), en lien avec la diminution de la profondeur et l'intensification des courants.

La granulométrie des sédiments a une influence majeure sur la mobilité. Les sédiments grossiers (GS, G, GC et CG) constituent la fraction dominante à la surface de la zone d'étude, la classe GS étant la plus représentée. Ces sédiments ne présentent toutefois pas de potentiel significatif de mobilisation. À l'inverse, les sédiments plus fins (S et SG), représentant uniquement ~3 % de la zone d'étude, présentent une mobilité significative, bien que localisée. Ces sédiments fins peuvent être remobilisés ponctuellement sous forme de placages temporaires lors d'événements énergétiques.

Concernant le type de transport, le charriage constitue le mode de transport dominant, le transport en suspension étant négligeable pour la plupart des types de sédiments considérés. Les taux de transport calculés confirment une dynamique sédimentaire faible, dépendante de la taille des particules.

L'analyse de la comparaison bathymétrique entre les levés récents (2023–2024) et anciens (1975, 1978 et 1982) révèle des variations locales, principalement dans les zones dépressionnaires circulaires à l'ouest et dans les zones accidentées à l'est. Ces variations, majoritairement négatives, pourraient être expliquées par des phénomènes d'érosion ou d'effondrement karstique, sans conclusion définitive en raison des incertitudes verticales ( $\pm 2$  m).

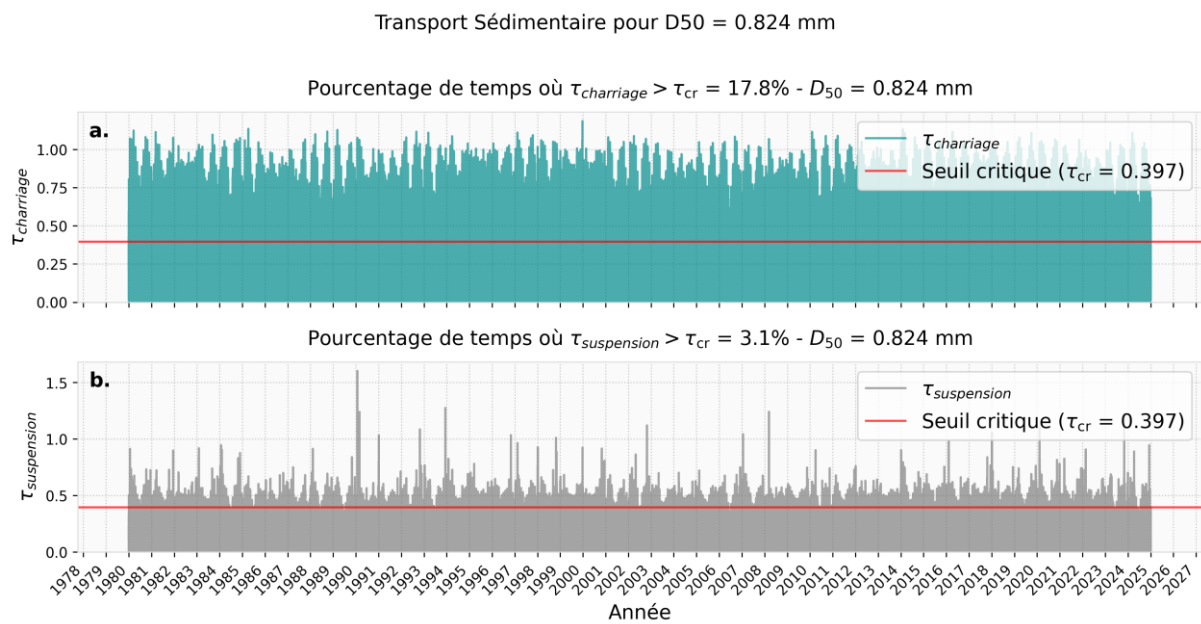
En conclusion, la zone de Fécamp Grand Large est caractérisée par un forçage dominé par les courants de marée. Les sédiments grossiers (G, GC, CG, GS) sont très peu mobilisables, tandis que les fractions fines (S, SG), rares et dispersées, ne présentent qu'une mobilité limitée sous l'action d'événements énergétiques.

## 6. Bibliographie

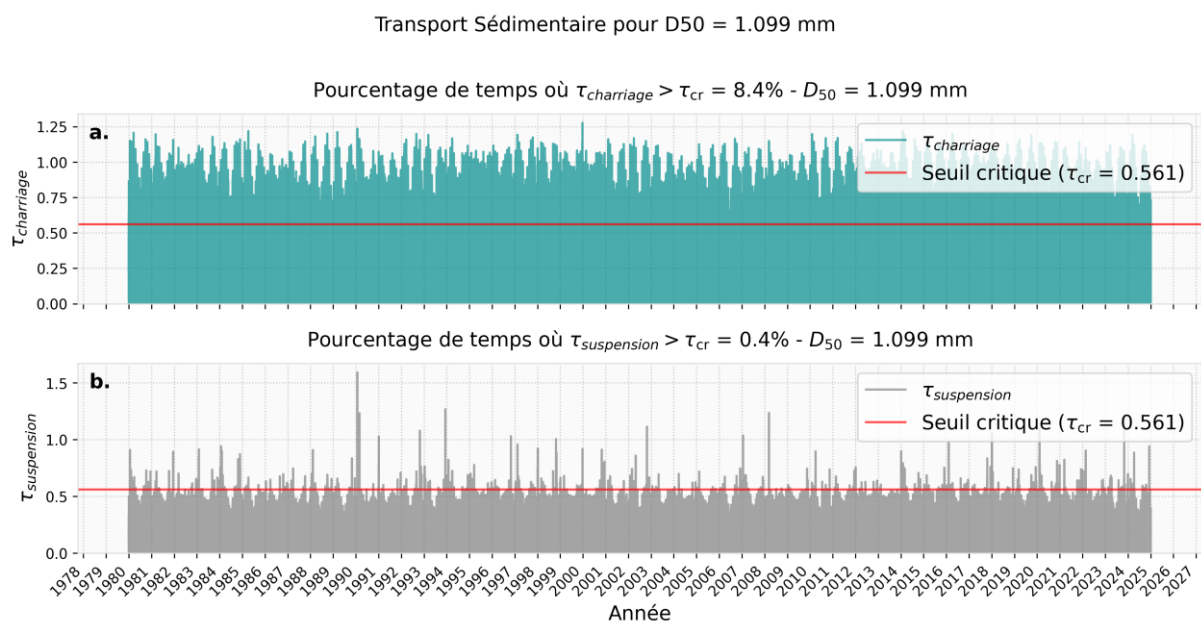
- Auffret, J. P., & Alduc, D. (1977).** Ensembles sédimentaires et formes d'érosion du Quaternaire sous-marin de la Manche orientale. *Quaternaire*, 14(4), 71-75.
- Cunningham, K. J., Westcott, R. L., Norgard, S., Robinson, E., Dowsett, H. J., & Robinson, M. M. (2024).** Formation of vertical columnar seismic structures and seafloor depressions by groundwater discharge in the drowned Miami Terrace platform and overlying deep-water carbonates, southeastern Florida. *Marine Geology*, 478, 107413.
- Gupta, S., Collier, J. S., Palmer-Felgate, A., & Potter, G. (2007).** Catastrophic flooding origin of shelf valley systems in the English Channel. *Nature*, 448(7151), 342-345.
- Ismâïli, M., Serve, L., Gadel, F., Lafite, R., Texier, H., 1999.** Biogeochemical markers of organic matter along the Wight-Cherbourg transect (central English Channel). *Oceanologica Acta* 22 (4), 397 – 412.
- Jourdan, D., Paradis, D., Pasquet, A., Michaud, H., Baraille, R., & Biscara, L. (2020).** La phase-3 du projet HOMONIM : définition et contenu. Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2020.087>.
- Lafite, R., Shimwell, S., Nash, L., Dupont, J., Huault, M., Grochowski, N., Lamboy, M., Collins, M., 1992.** Sub-Task S1: Suspended material fluxes through the Strait of Dover. FLUXMANCHE Second Annual Progress Report, MAST OO53, 85–88.
- Le Hir, P. (2008).** Aide-mémoire de dynamique sédimentaire. Paris : Éditions Dunod.
- Michaud H., Seyfried L., Pasquet A., Leckler F., Lopez G., Leballeur L., Brosse F., Krien Y., Pezerat M., Faidherbe T., 2024.** *HYWAT : 45 ans de rejeux de marée, surcote et états de mer à haute résolution sur les côtes françaises atlantiques. Application aux risques de submersion côtière à Saint Malo.* XVIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Anglet, 25 juin 2024.
- Rivier A., 2013.** Thèse, Dynamique des matières en suspension minérales des eaux de surface de la Manche observée par satellite et modélisée numériquement.
- Shom (2024),** DECI - Rapport Bathymétrie, T1.B3\_RAP\_A3.
- Shom (2024),** DECI - Rapport Houle, T1.H\_RAP.
- Shom (2024),** DECI - Rapport Marée, T1.M3\_RAP.
- Shom (2025),** DEF - Rapport Sédimentologie, T4.S4\_Sédimentologie\_RAP.
- Shields, A. (1936).** Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. California Institute of Technology, Pasadena, CA, Report No. 167, translated from German.
- Soulsby, R.L. (1998).** Dynamics of marine sands. Technical Report. Thomas Telford.
- Soulsby, R., & Richards, S. (1997).** Bedload transport in mixed sediments in coastal engineering. HR Wallingford Report SR 987.
- Velegrakis, A., Bishop, C., Lafite, R., Oikonomou, E., Lecouturier, M., Collins, M., 1996.** Sub-Task S3: Investigation of meso-and macro-scale sediment transport, Hydrodynamics Biogeochemical Processes and Fluxes in the Channel. FLUX- MANCHE II Final report, MAST II, MAS2CT940089, 128–143.
- Velegrakis, A. F., Michel, D., Collins, M. B., Lafite, R., Oikonomou, E. K., Dupont, J. P., Huault, M. F., Lecouturier, M., Salomon, J. C., Bishop, C., 1999.** Sources, sinks and resuspension of suspended particulate matter in the eastern English Channel. *Continental Shelf Research* 19 (15-16), 1933–1957.
- Wu, W., & Lin, C. (2014).** Nonuniform sediment transport under non-breaking waves and currents. *Coastal Engineering*, 90, 1–12. DOI:[10.1016/j.coastaleng.2014.04.006](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.04.006).

## 7. Annexes

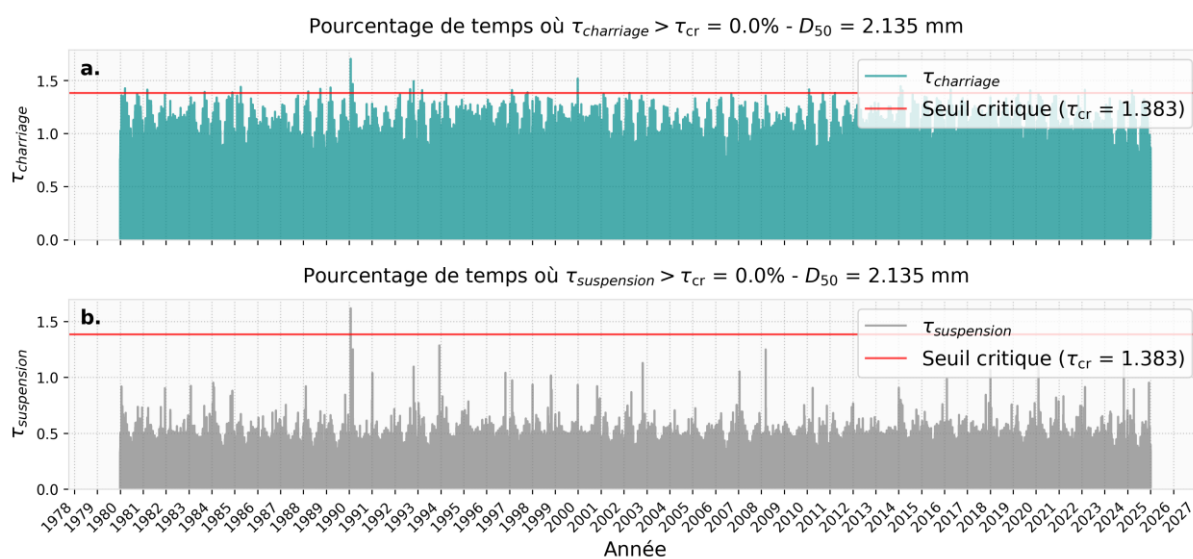
### 7.1 Point P1 (Ouest)



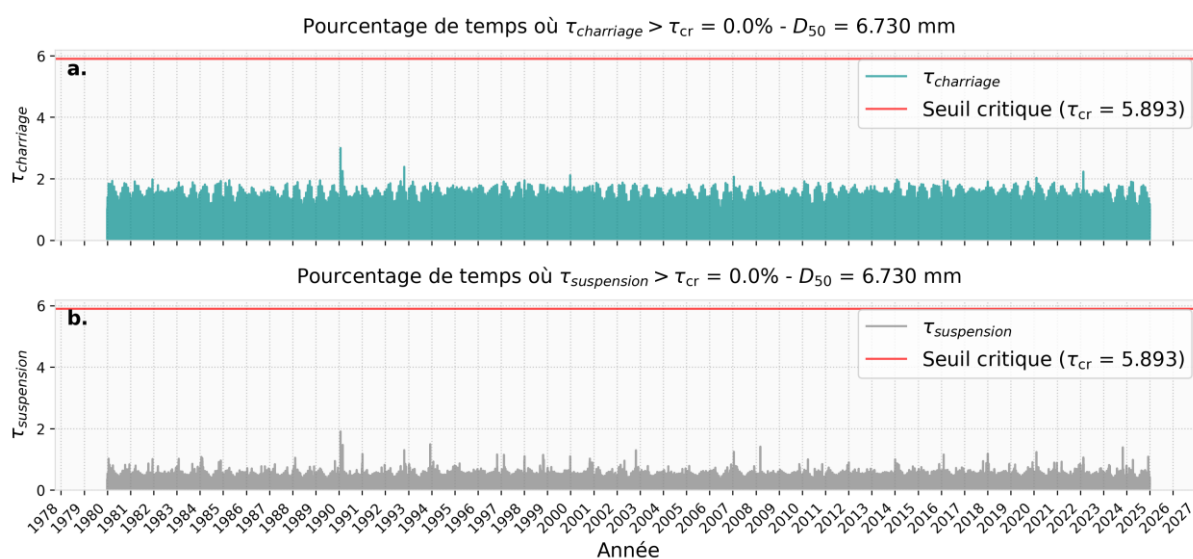
**Figure 23.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).



**Figure 24.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

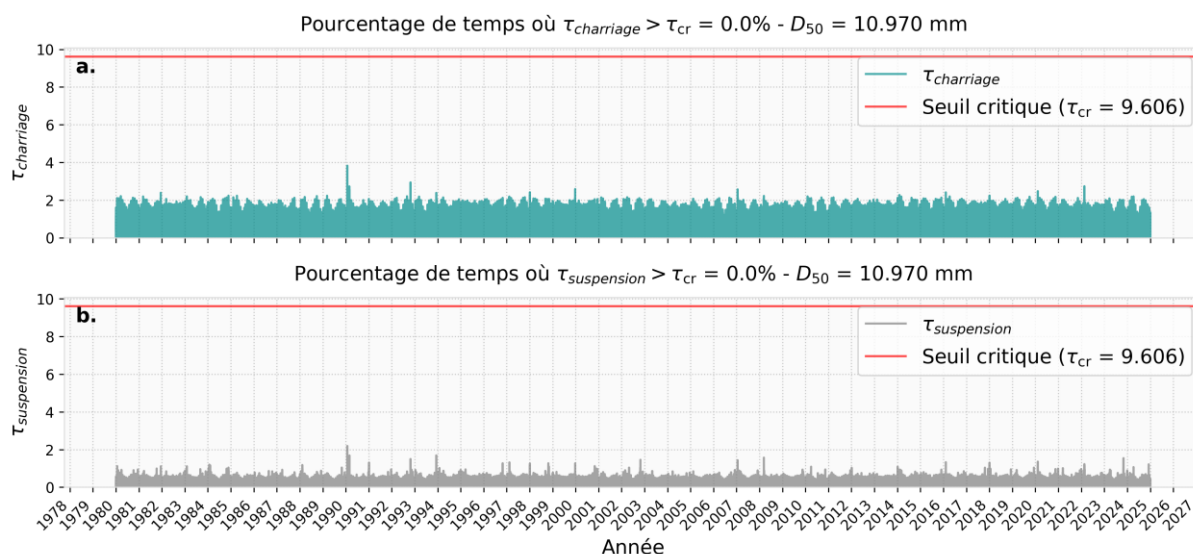
Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 2.135$  mm

**Figure 25.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 6.730$  mm

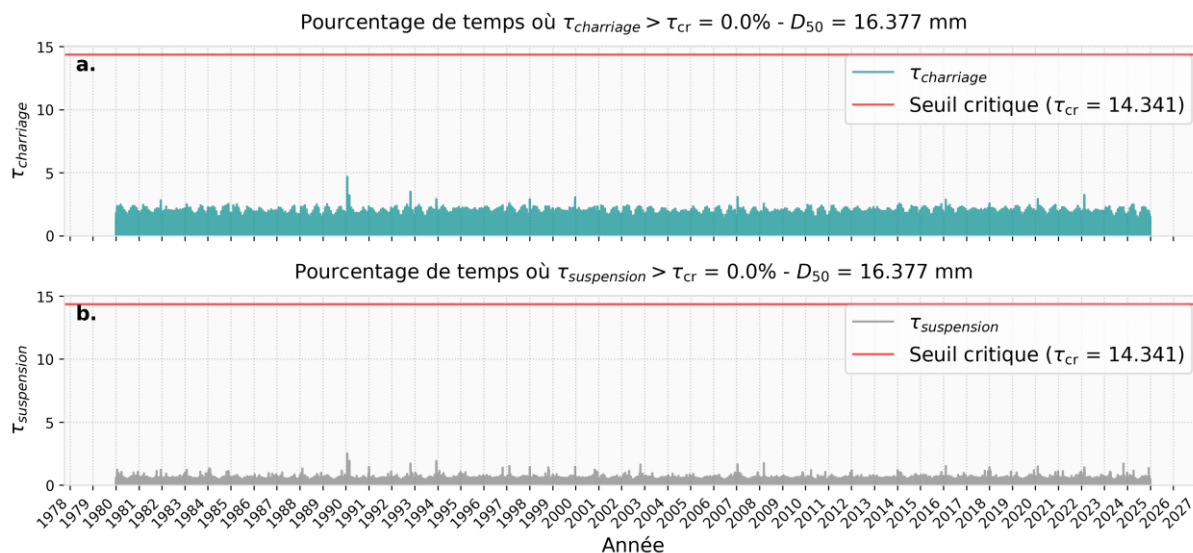
**Figure 26.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 10.970 \text{ mm}$

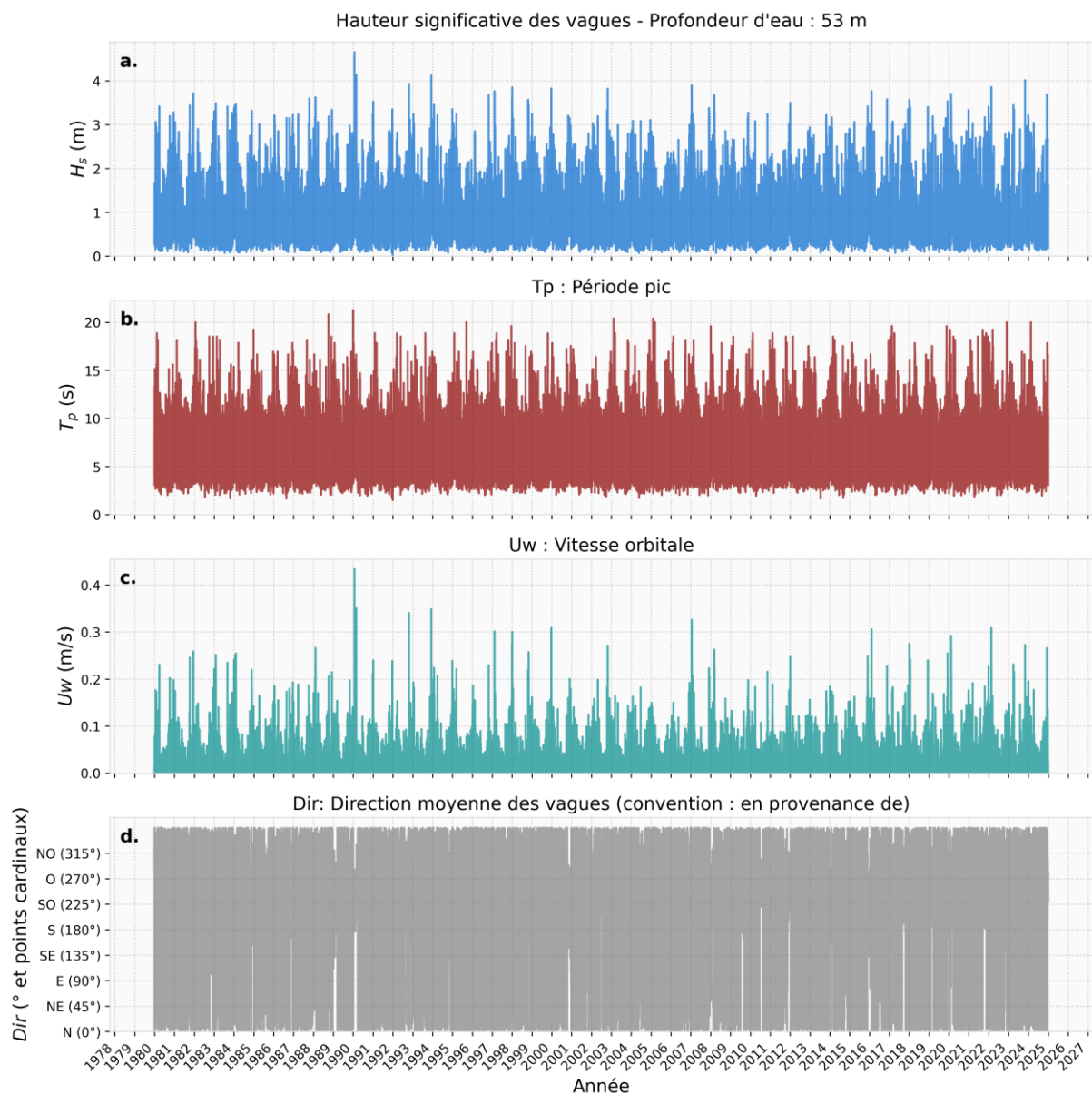


**Figure 27.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970 \text{ mm}$  au Point P1 (Ouest). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 16.377 \text{ mm}$



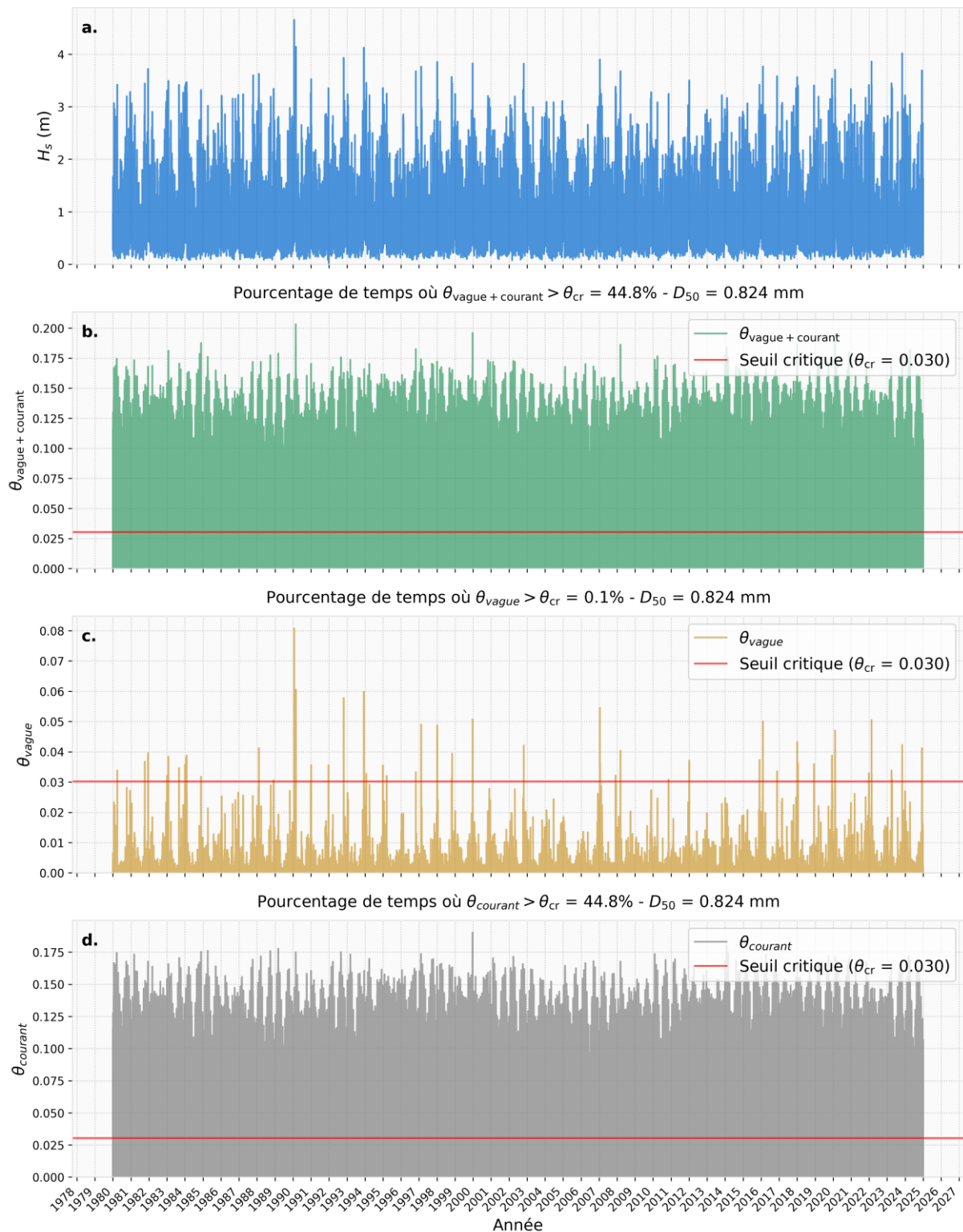
**Figure 28.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377 \text{ mm}$  au Point P1 (Ouest). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).



**Figure 29.** Séries temporelles extraites au Point P1 (Ouest), sur la période 1980–2024. **a.** Hauteur significative des vagues, **b.** Période pic, **c.** Vitesse orbitale, **d.** Direction moyenne des vagues (en degrés et points cardinaux).

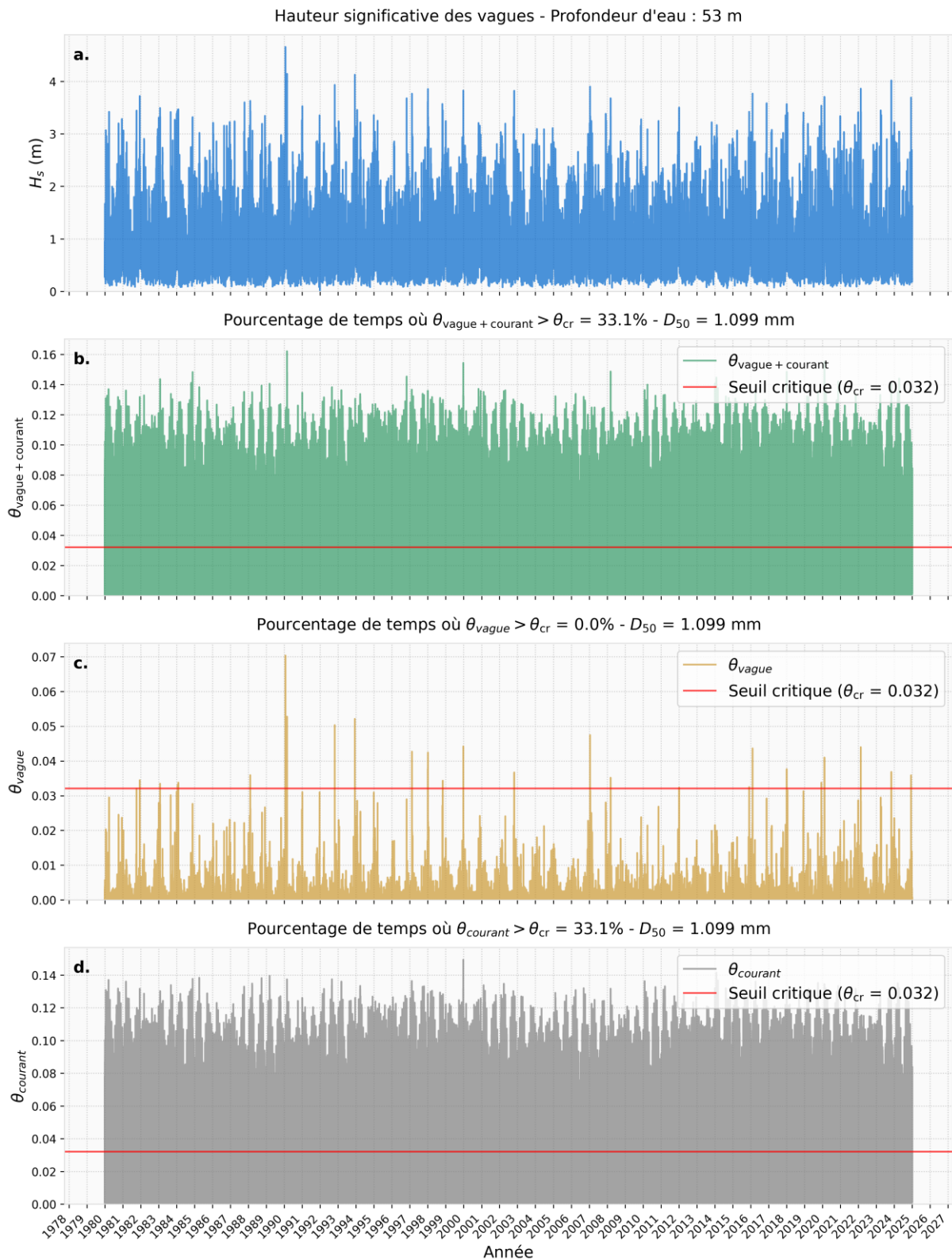
Analyse pour  $D_{50} = 0.824$  mm

Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 53 m

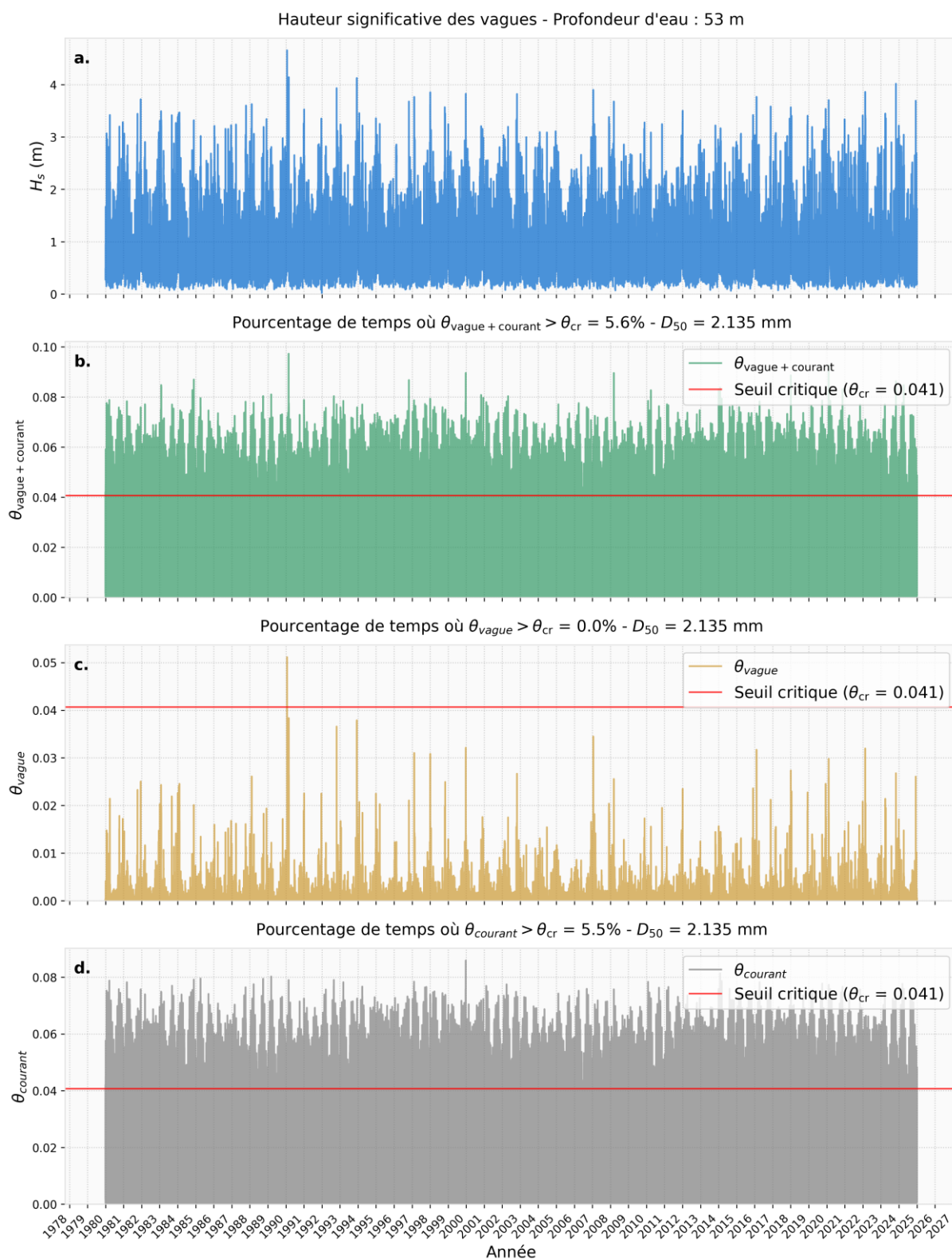


**Figure 30.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ).

Analyse pour  $D_{50} = 1.099$  mm



**Figure 31.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ).

Analyse pour  $D_{50} = 2.135$  mm

**Figure 32.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ).

Analyse pour  $D_{50} = 6.730 \text{ mm}$



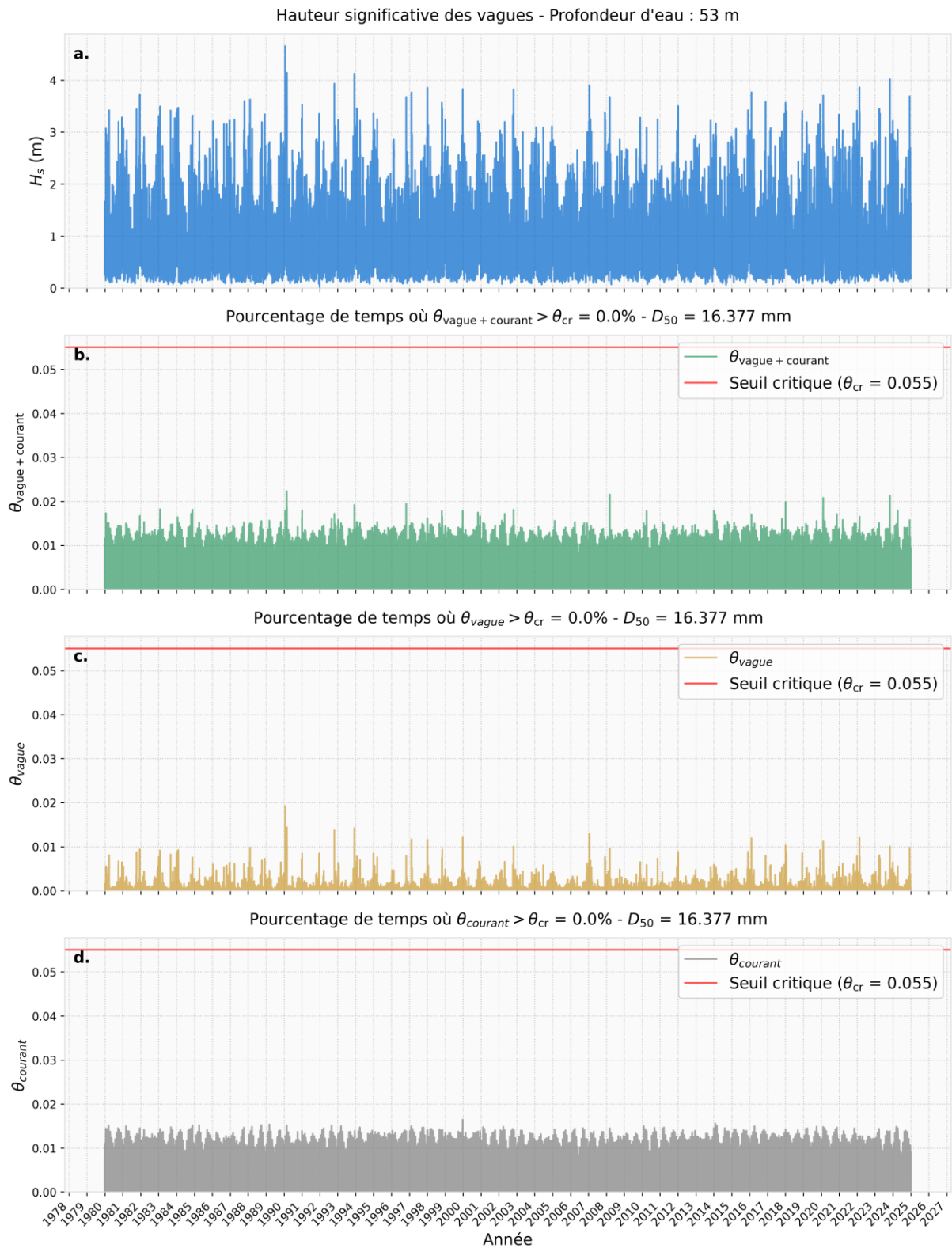
**Figure 33.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730 \text{ mm}$  au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ).

Analyse pour  $D_{50} = 10.970$  mm

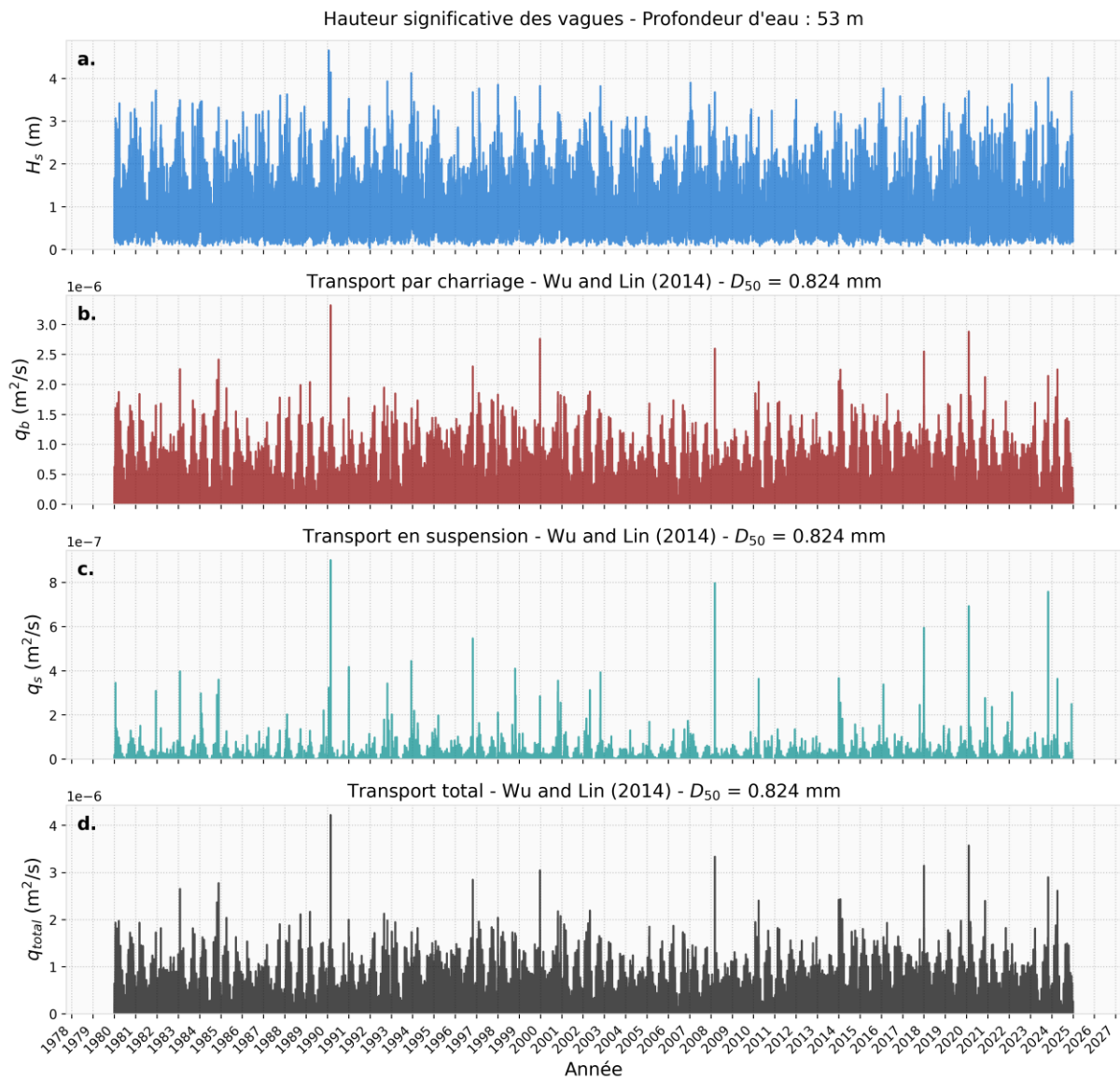


**Figure 34.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{vague + courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{vague}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{courant}$ ).

Analyse pour  $D_{50} = 16.377$  mm



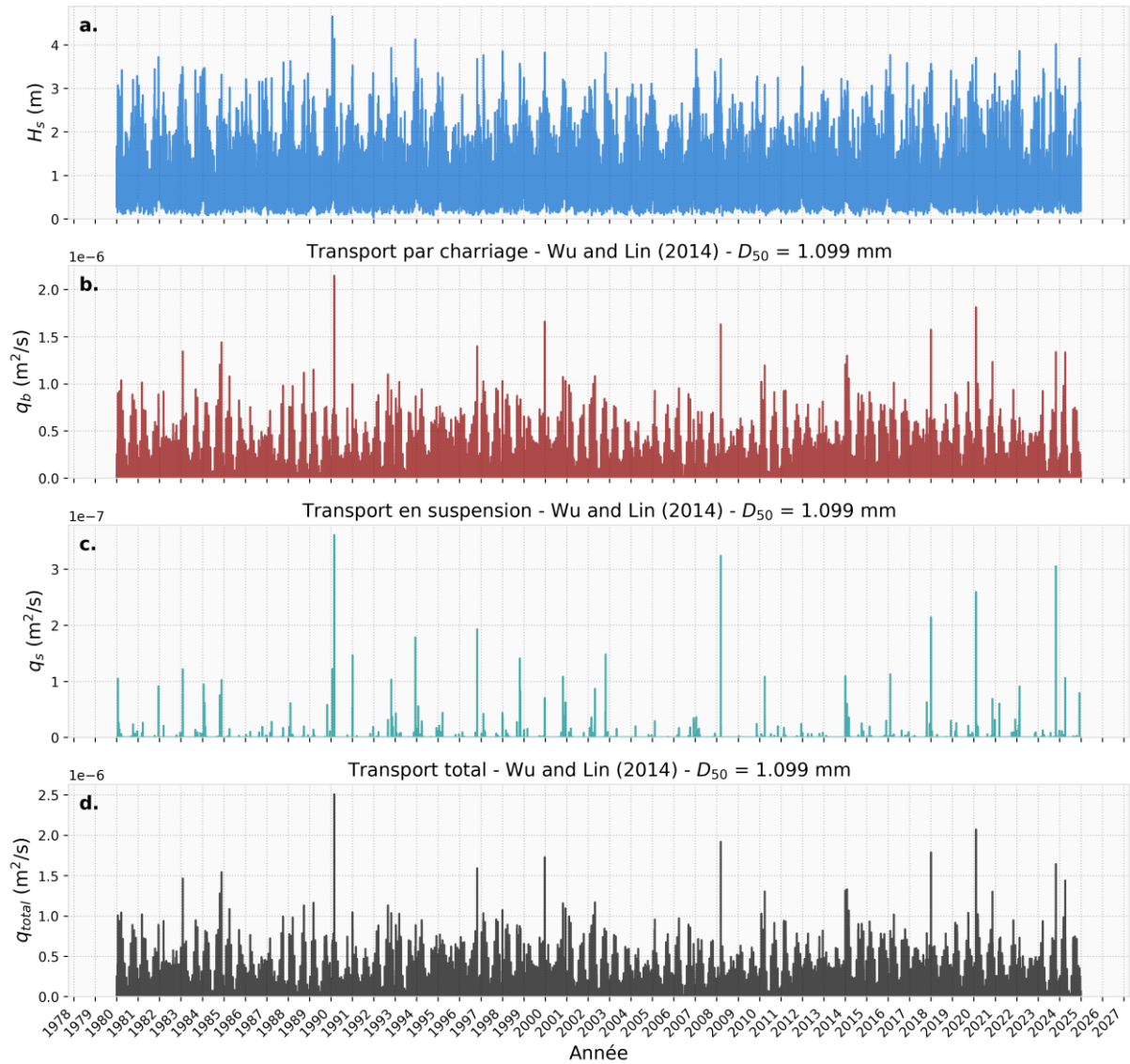
**Figure 35.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377$  mm au Point P1 (Ouest). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 0.824$  mm

**Figure 36.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824$  mm au Point P1 (Ouest). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{total}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 1.099$  mm

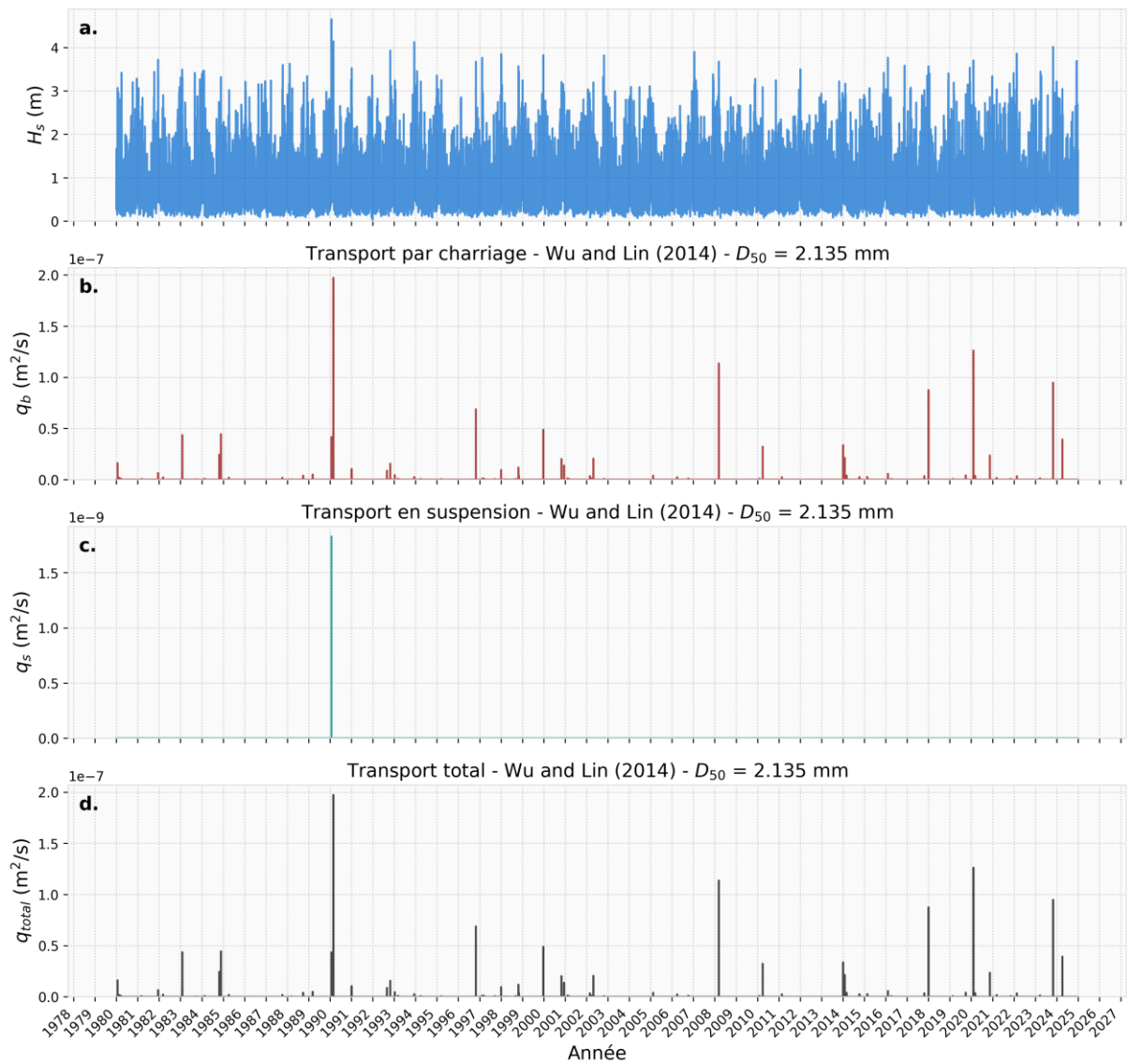
Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 53 m



**Figure 37.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P1 (Ouest). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{total}$ ).

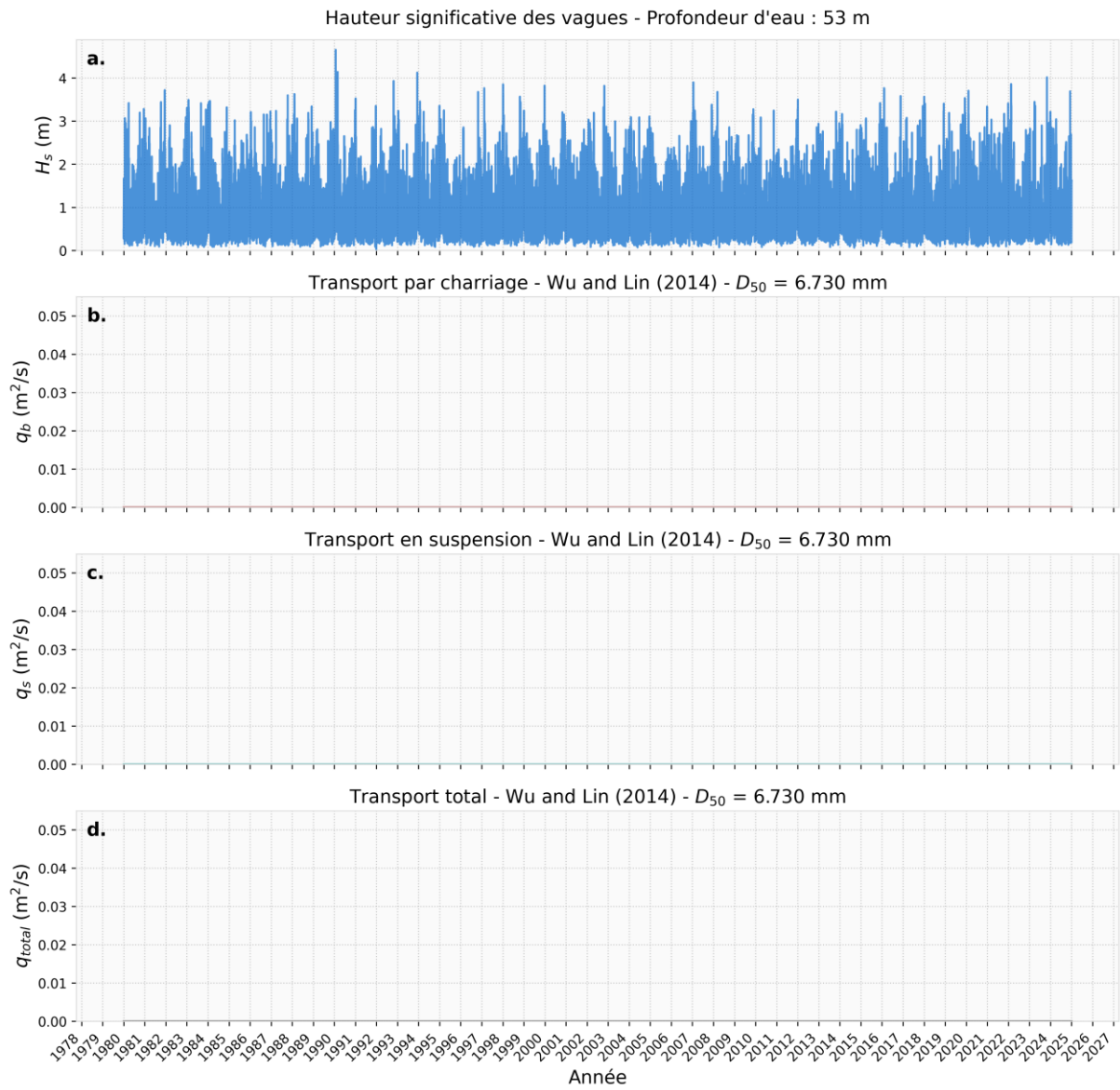
Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 2.135 \text{ mm}$

Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 53 m

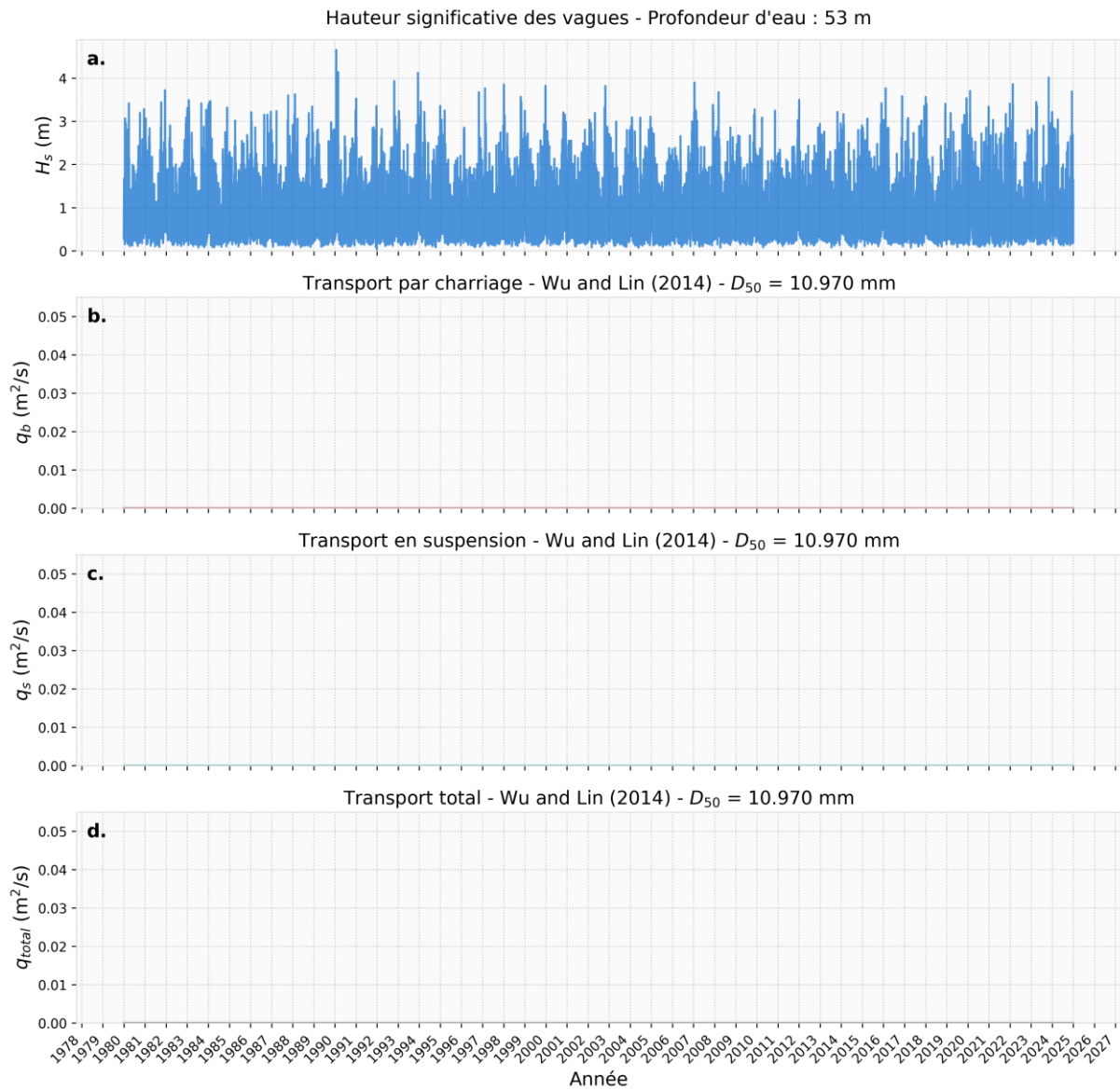


**Figure 38.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135 \text{ mm}$  au Point P1 (Ouest). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{\text{total}}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 6.730 \text{ mm}$



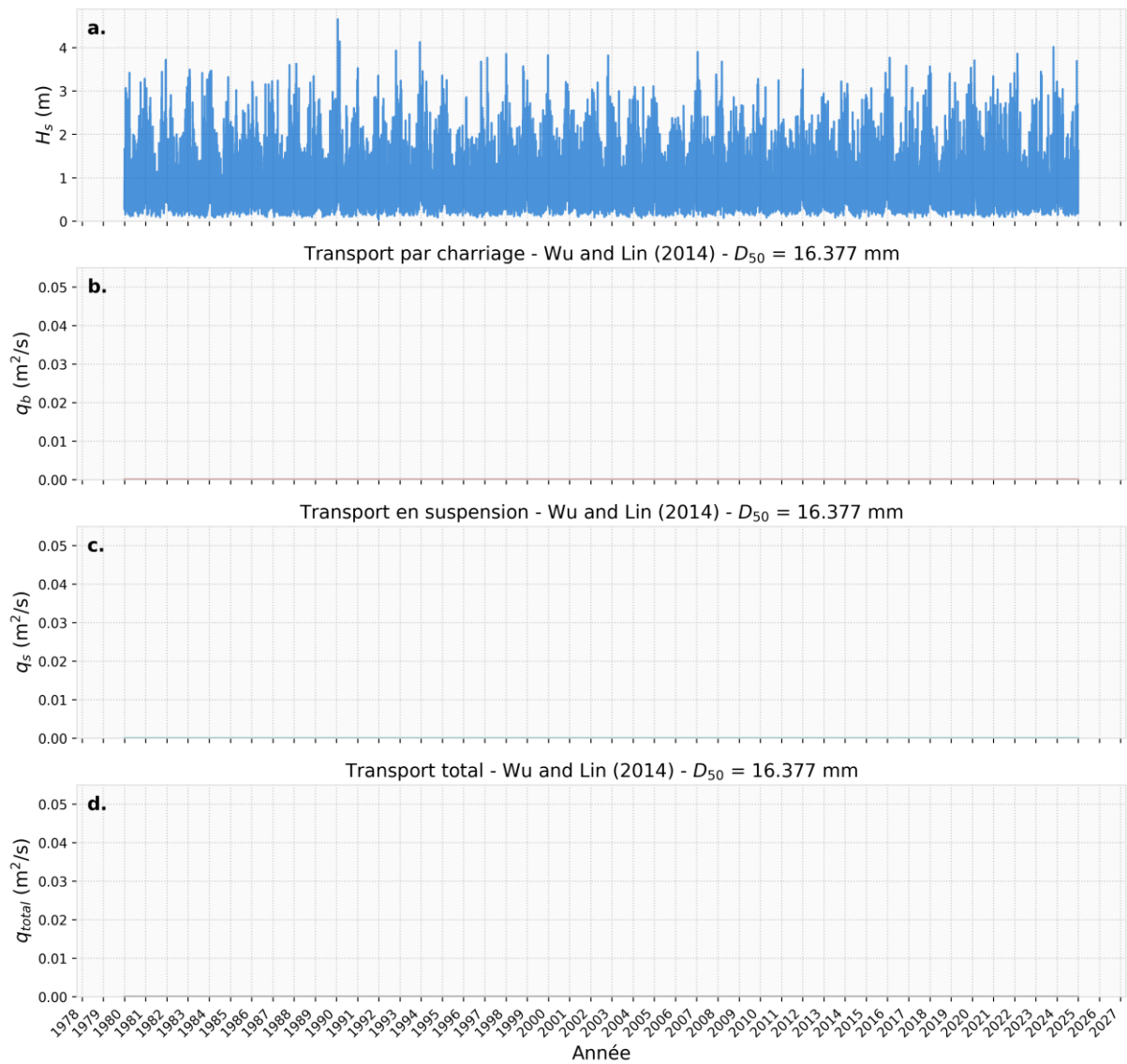
**Figure 39.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730 \text{ mm}$  au Point P1 (Ouest). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{total}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 10.970$  mm

**Figure 40.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970$  mm au Point P1 (Ouest). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{total}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 16.377 \text{ mm}$

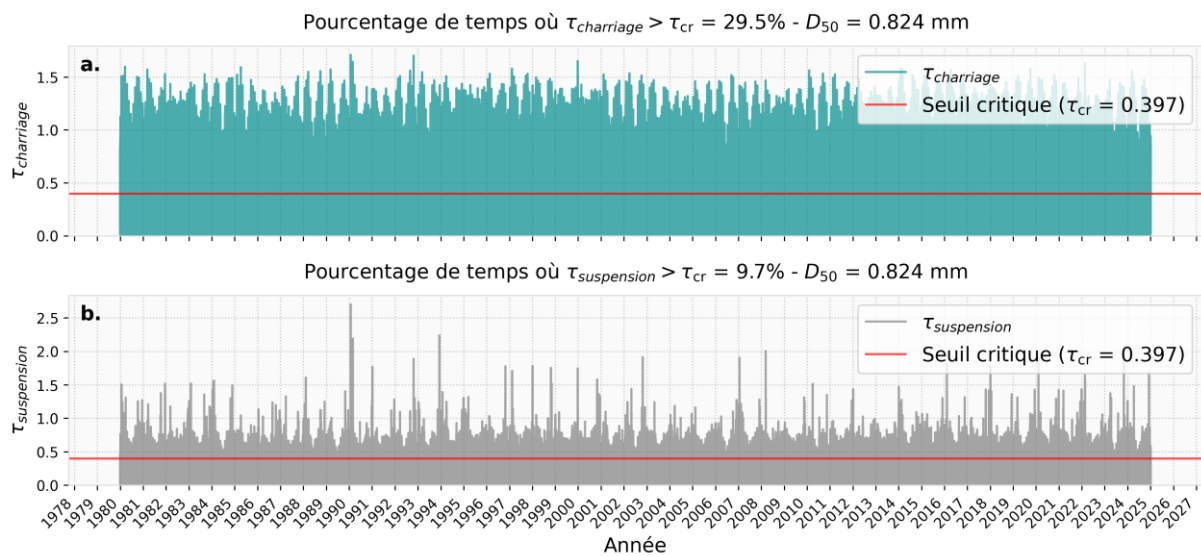
Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 53 m



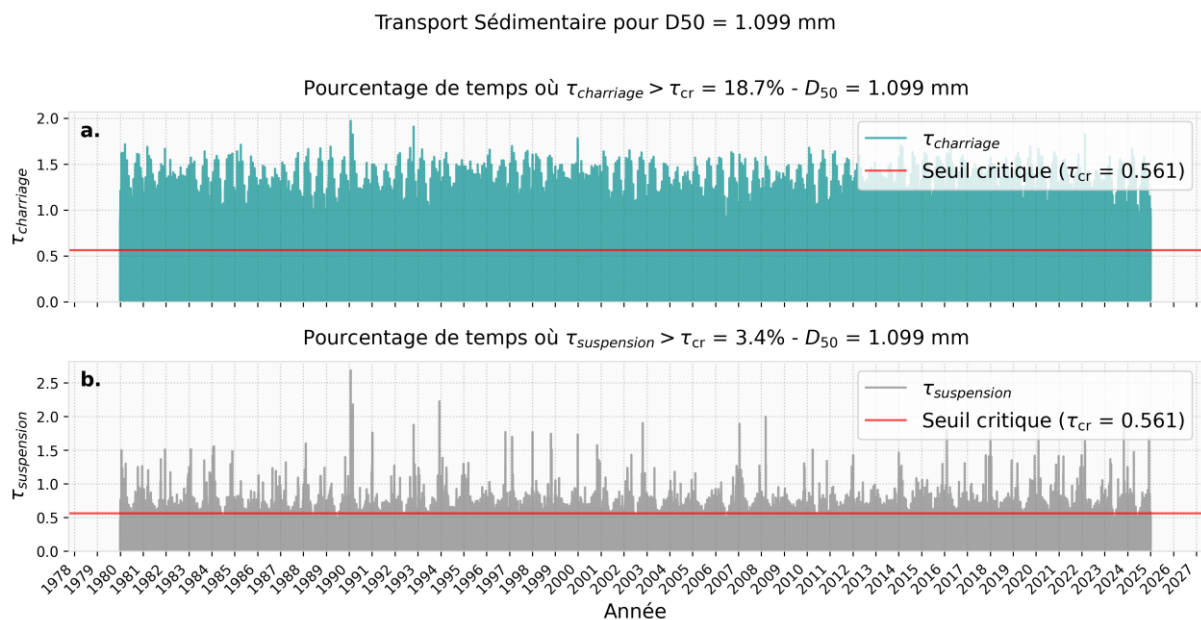
**Figure 41.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377 \text{ mm}$  au Point P1 (Ouest). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{\text{total}}$ ).

## 7.2 Point P2 (Centre)

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 0.824$  mm

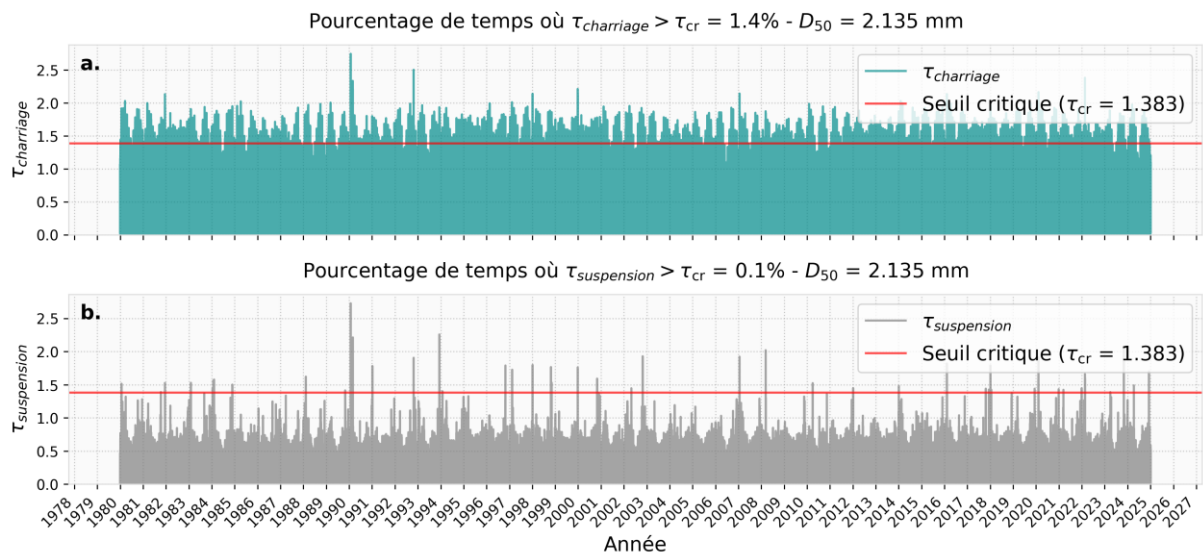


**Figure 42.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).



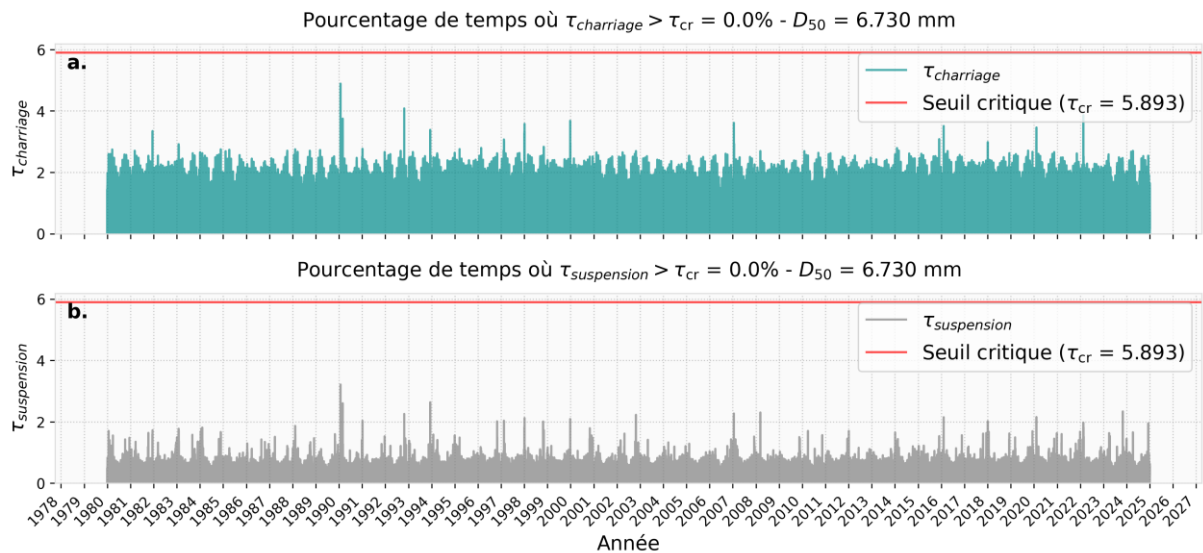
**Figure 43.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 2.135$  mm

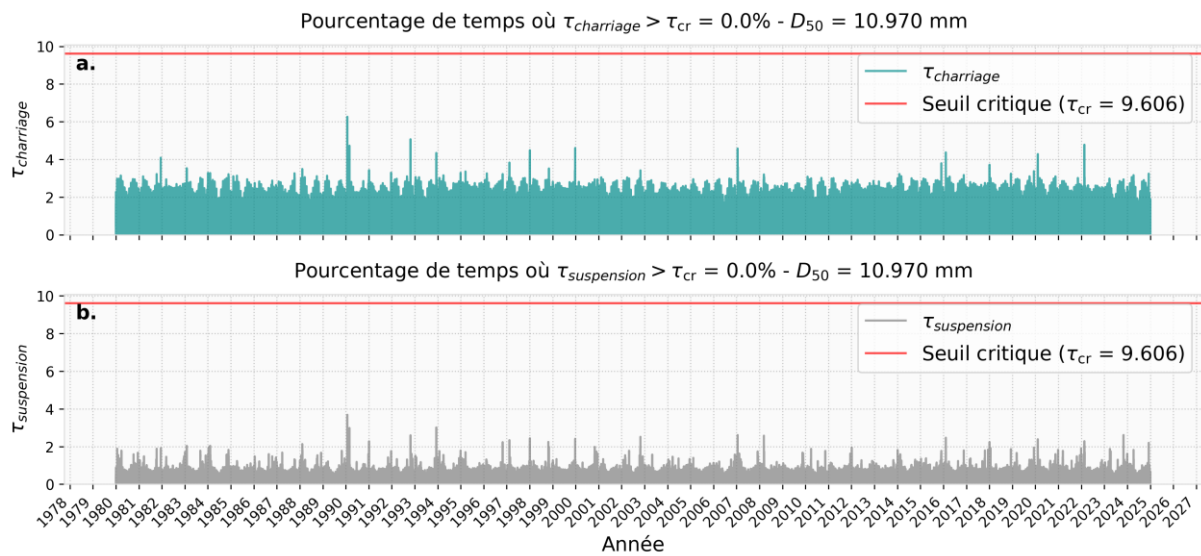


**Figure 44.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

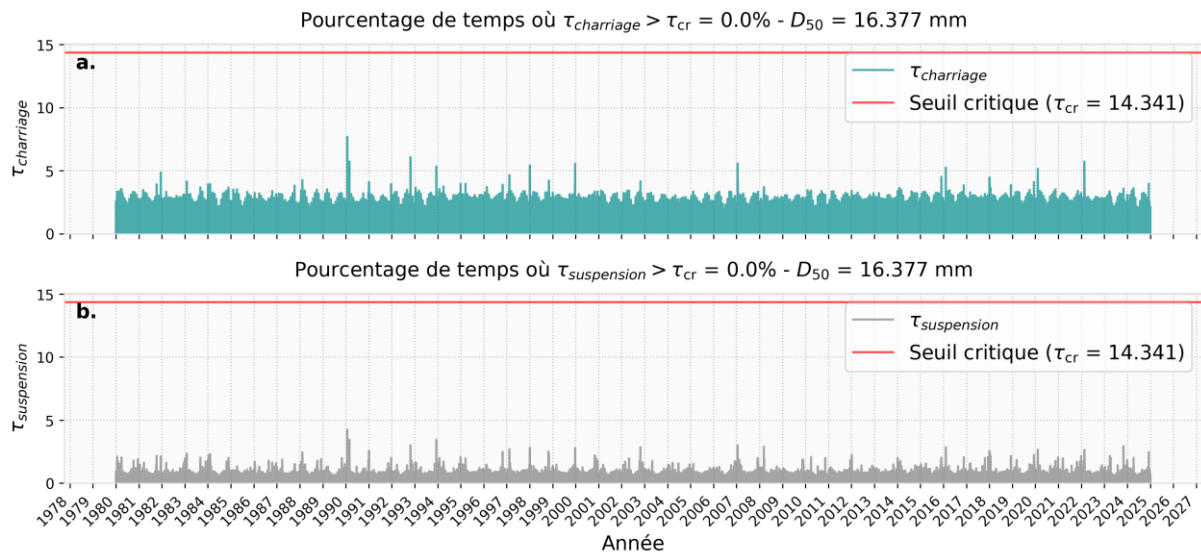
Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 6.730$  mm



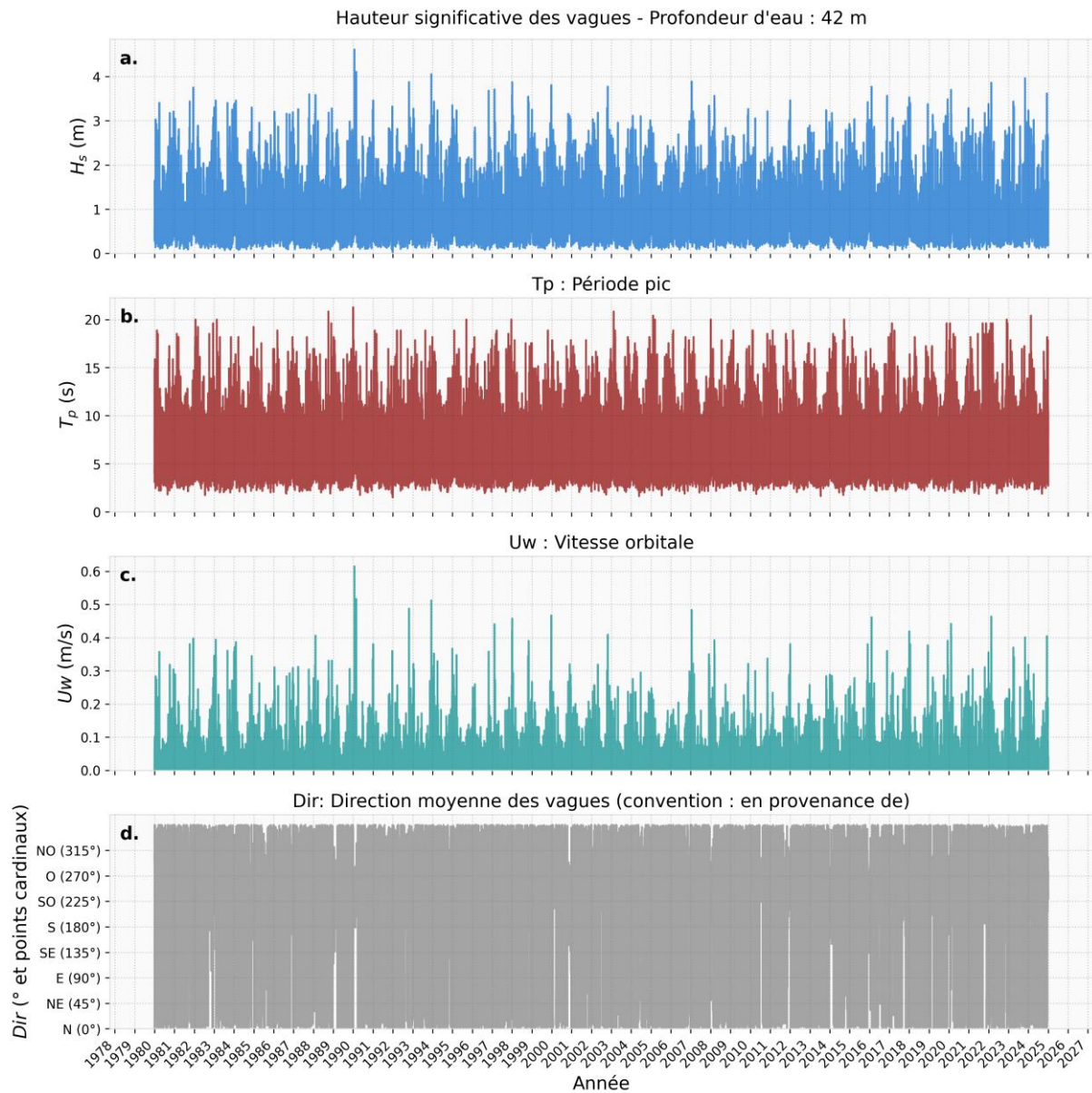
**Figure 45.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 10.970$  mm

**Figure 46.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

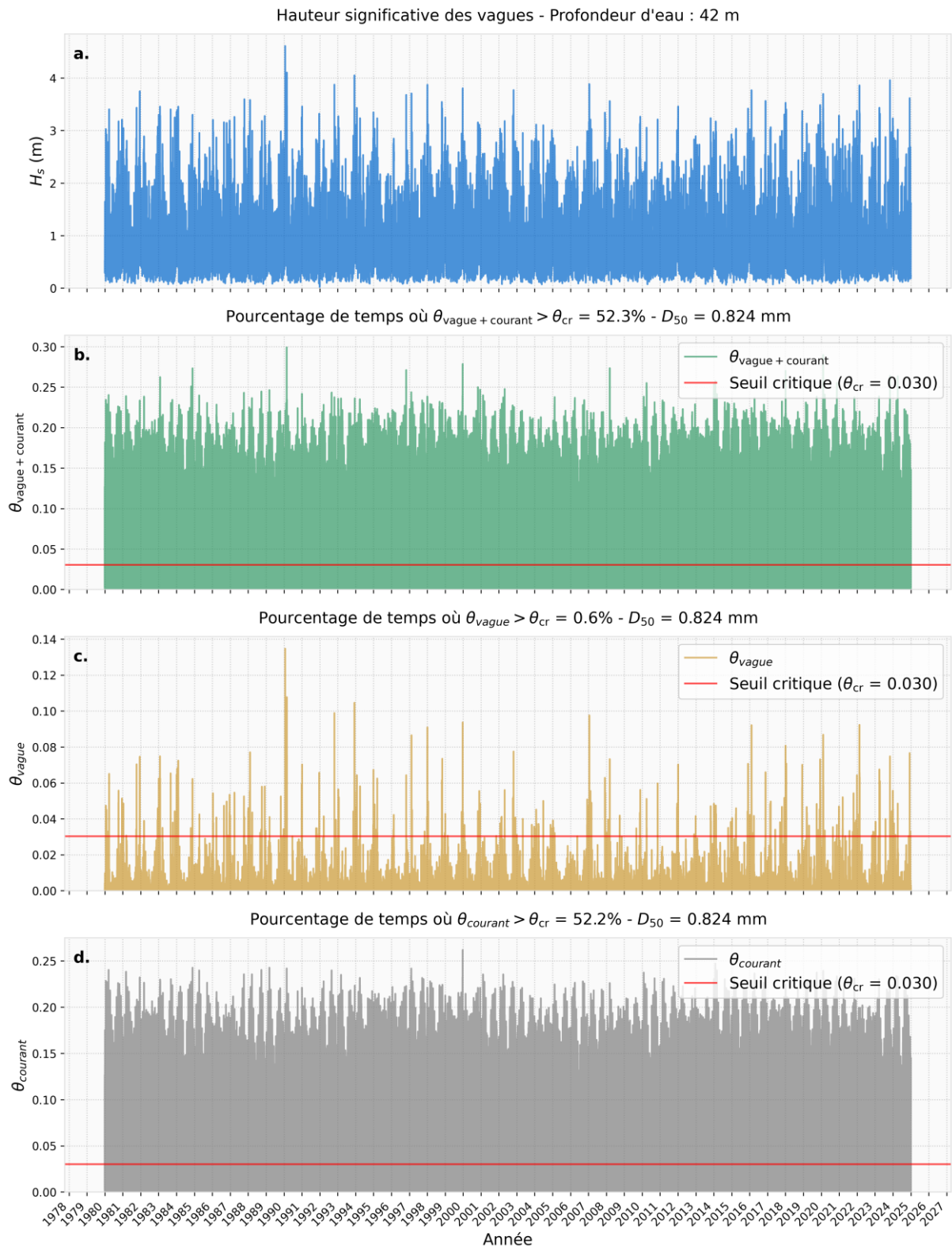
Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 16.377$  mm

**Figure 47.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).



**Figure 48.** Séries temporelles extraites au Point P2 (Centre), sur la période 1980–2024. **a.** Hauteur significative des vagues, **b.** Période pic, **c.** Vitesse orbitale, **d.** Direction moyenne des vagues (en degrés et points cardinaux).

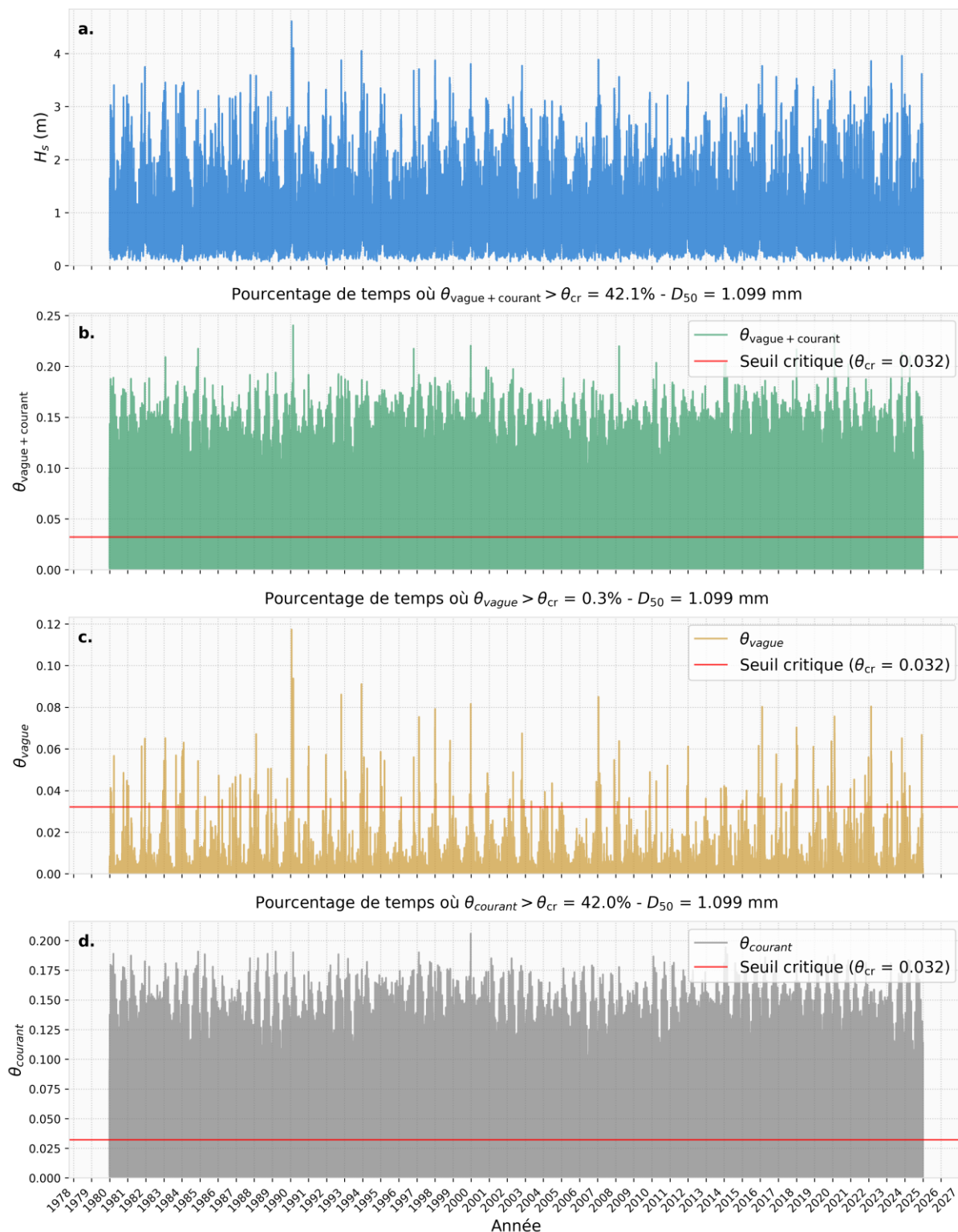
Analyse pour  $D_{50} = 0.824 \text{ mm}$



**Figure 49.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824 \text{ mm}$  au Point P2 (Centre). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ).

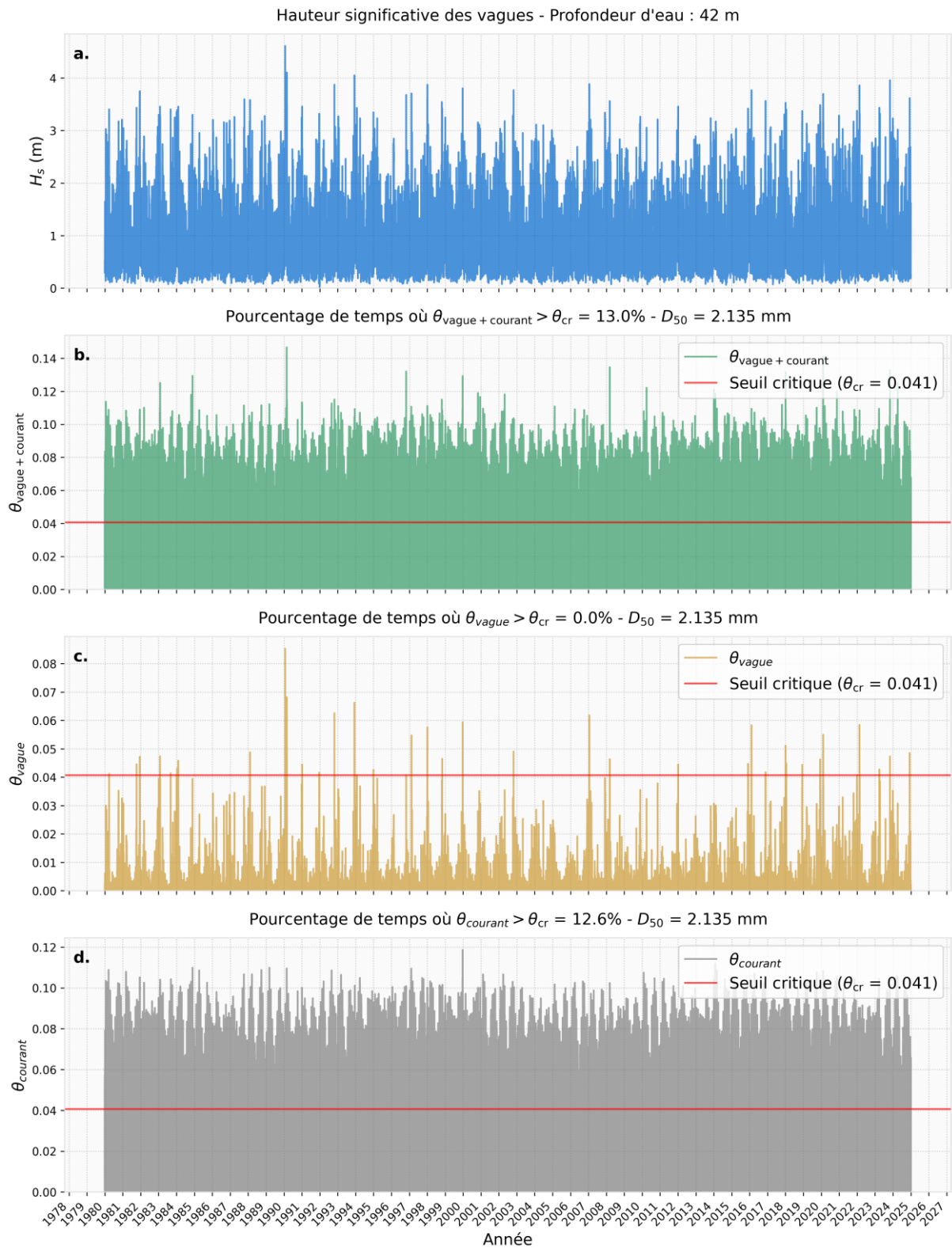
Analyse pour  $D_{50} = 1.099$  mm

Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 42 m

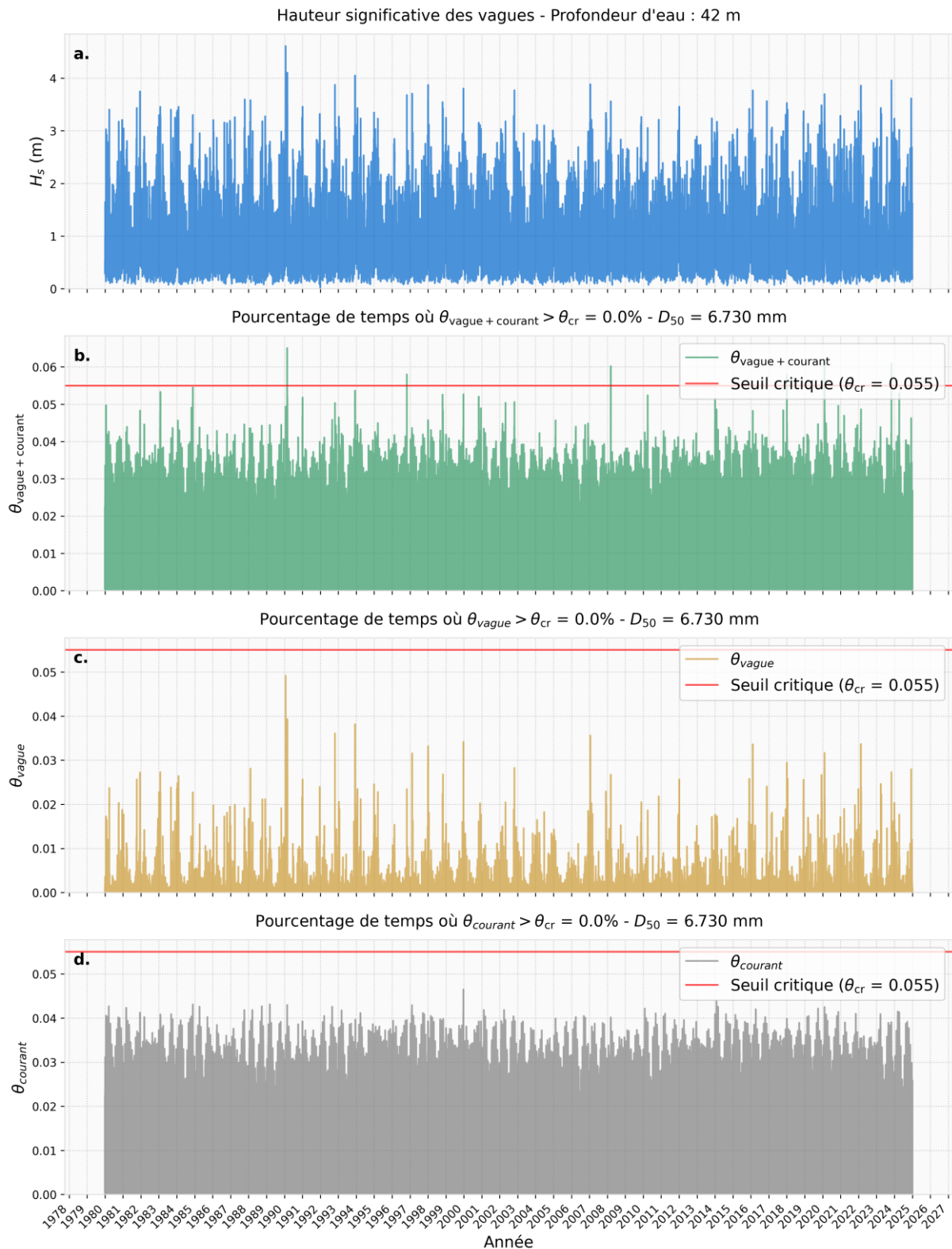


**Figure 50.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ).

Analyse pour  $D_{50} = 2.135$  mm

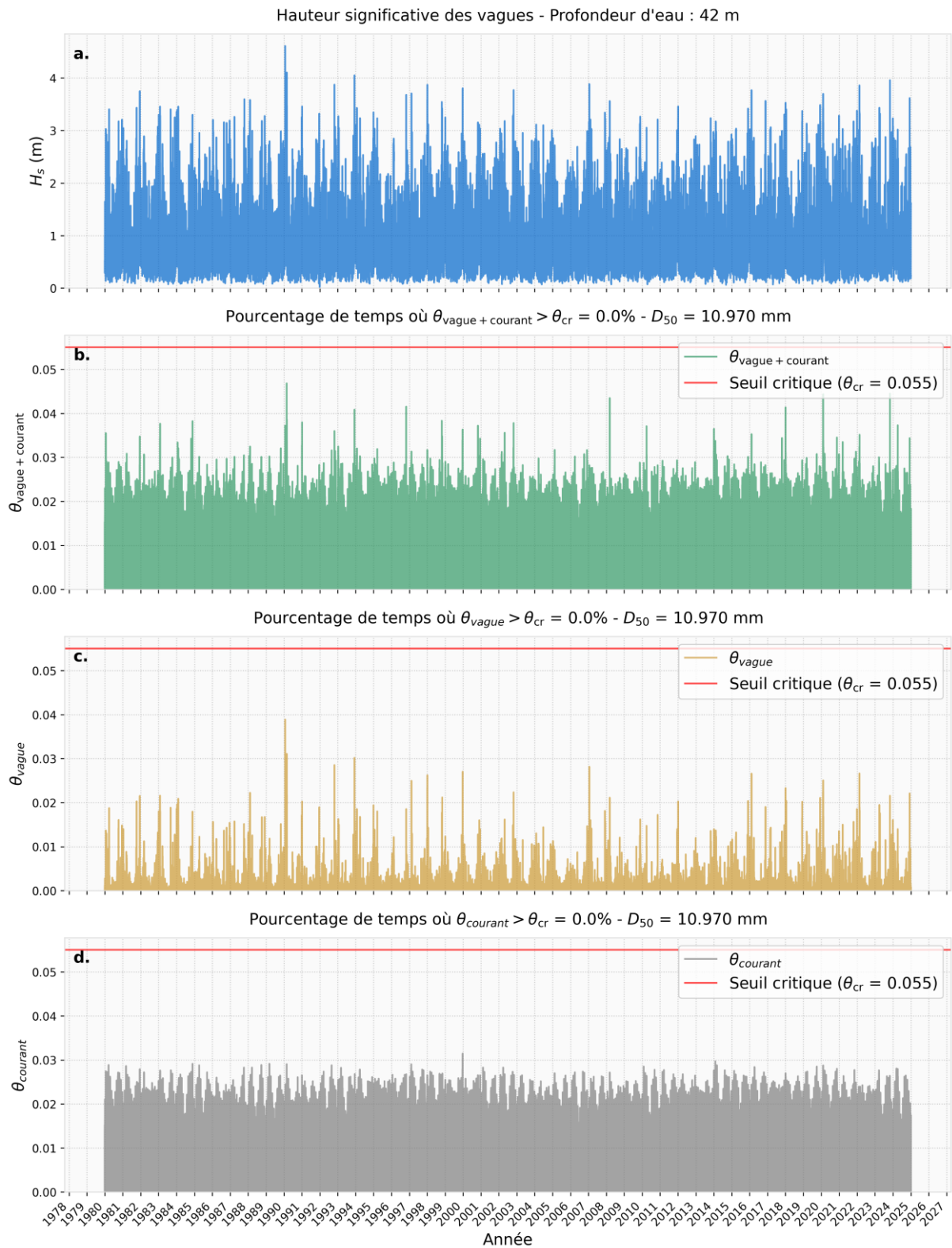


**Figure 51.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{vague + courant}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{vague}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{courant}$ ).

Analyse pour  $D_{50} = 6.730$  mm

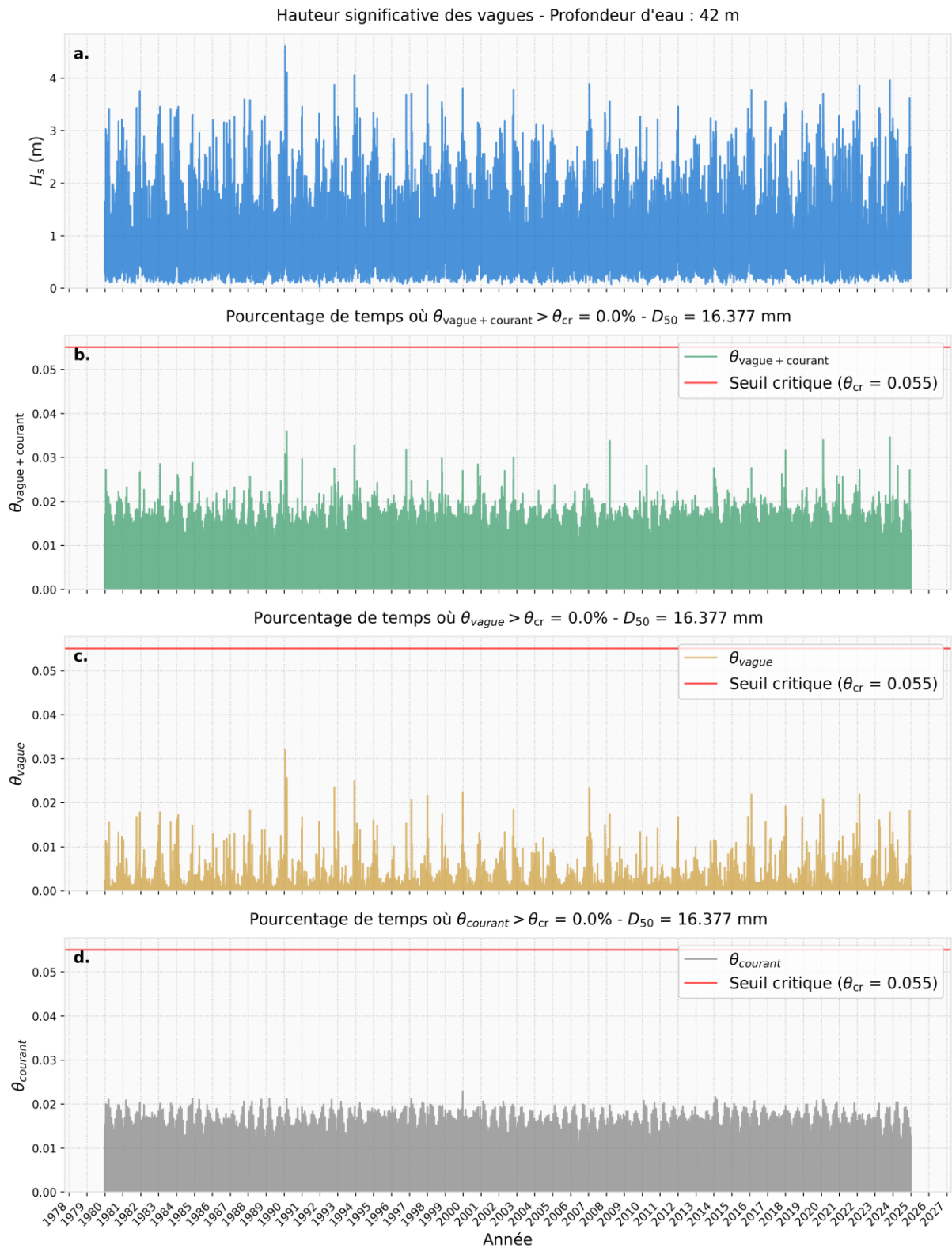
**Figure 52.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ).

Analyse pour  $D_{50} = 10.970$  mm



**Figure 53.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ).

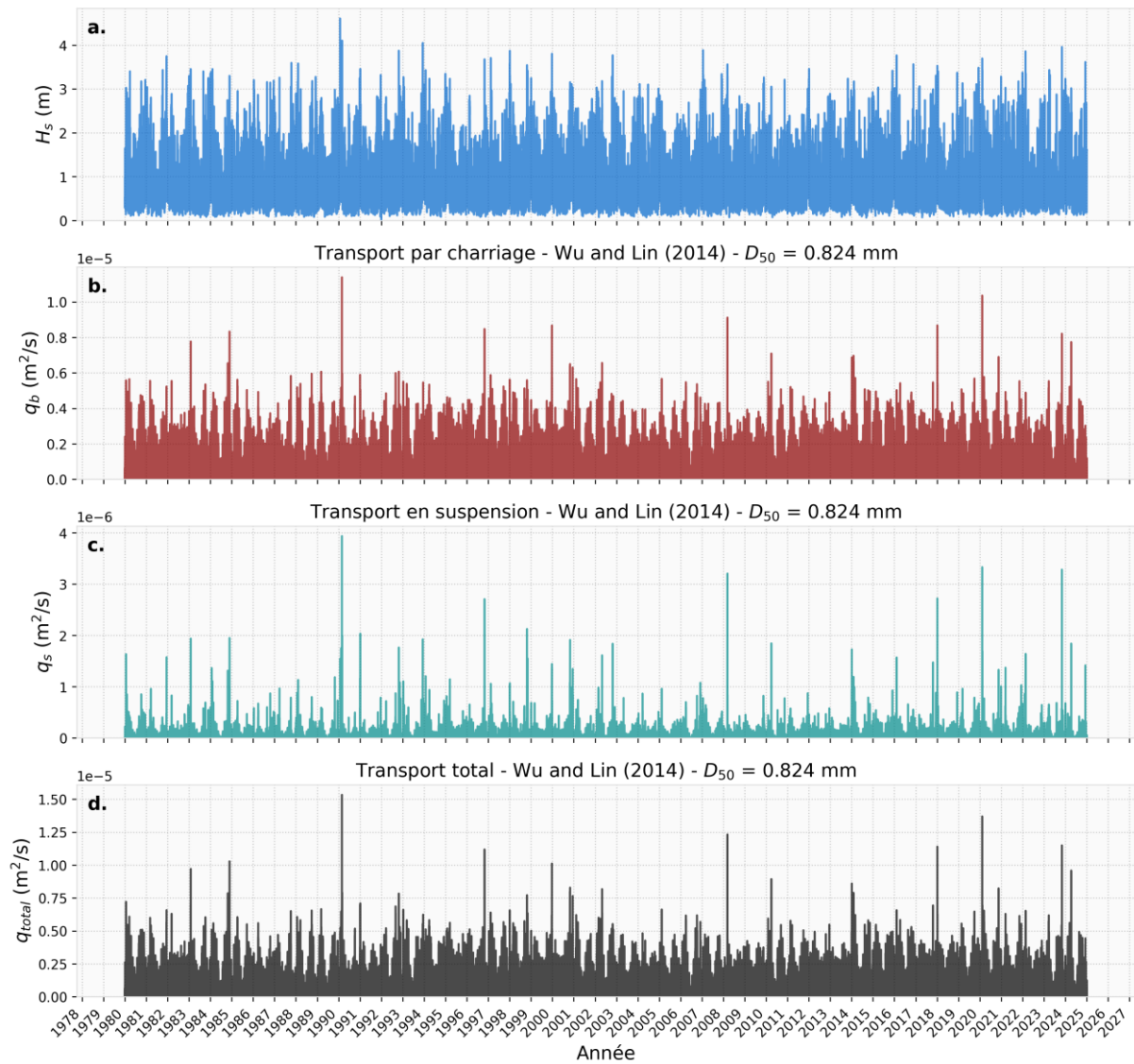
Analyse pour  $D_{50} = 16.377$  mm



**Figure 54.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377$  mm au Point P2 (Centre). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 0.824$  mm

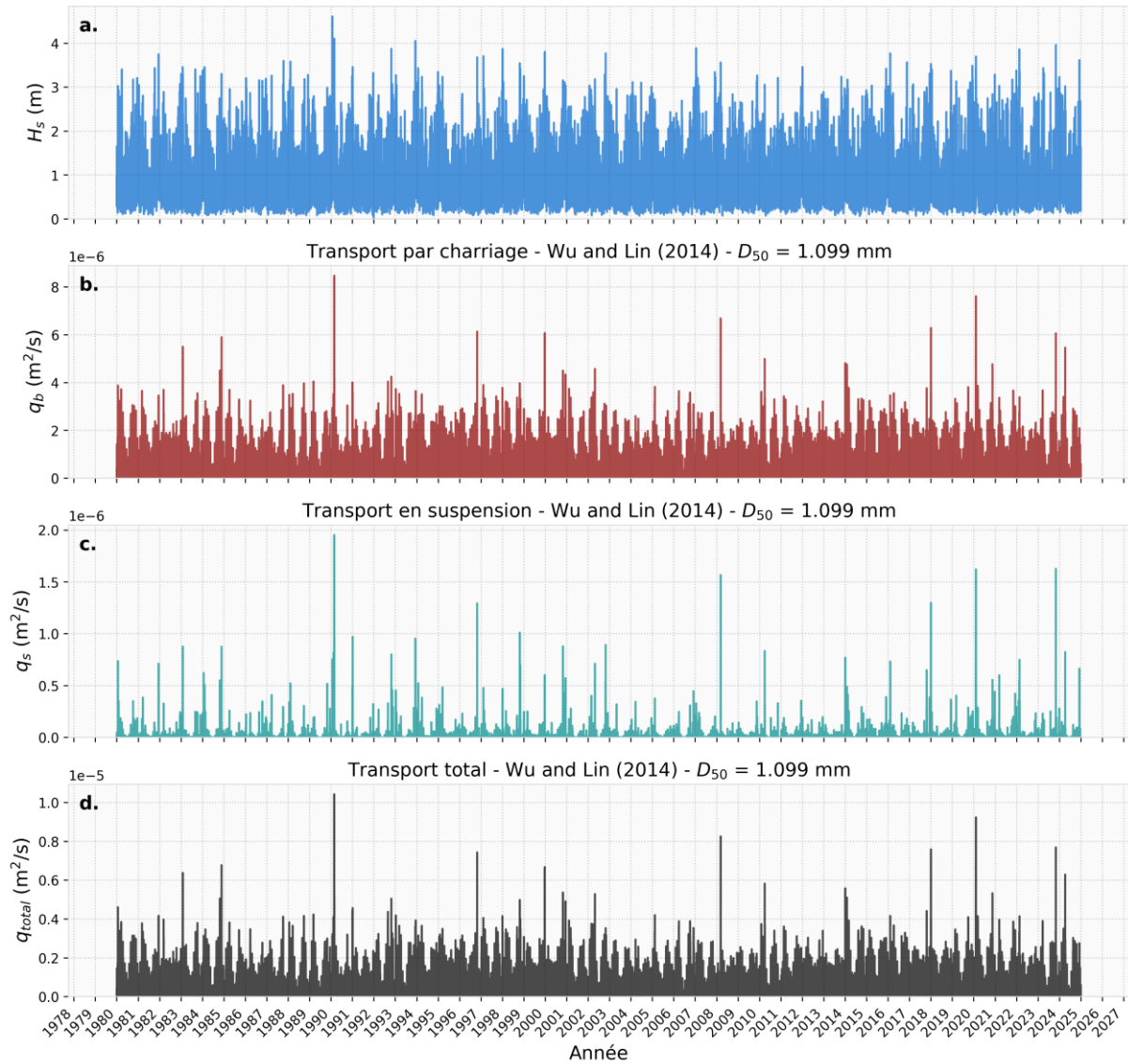
Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 42 m



**Figure 55.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824$  mm au Point P2 (Centre). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{total}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 1.099$  mm

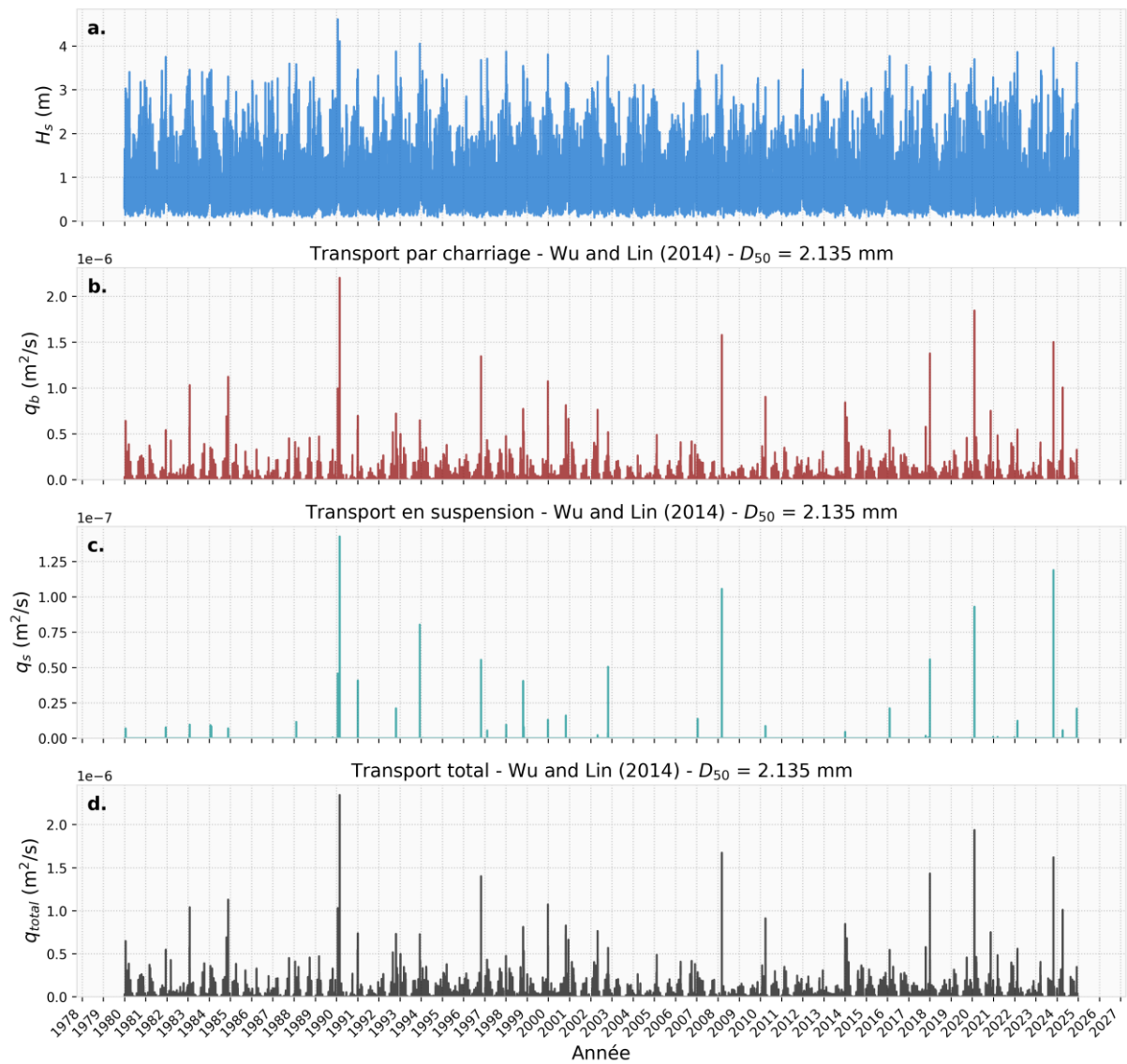
Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 42 m



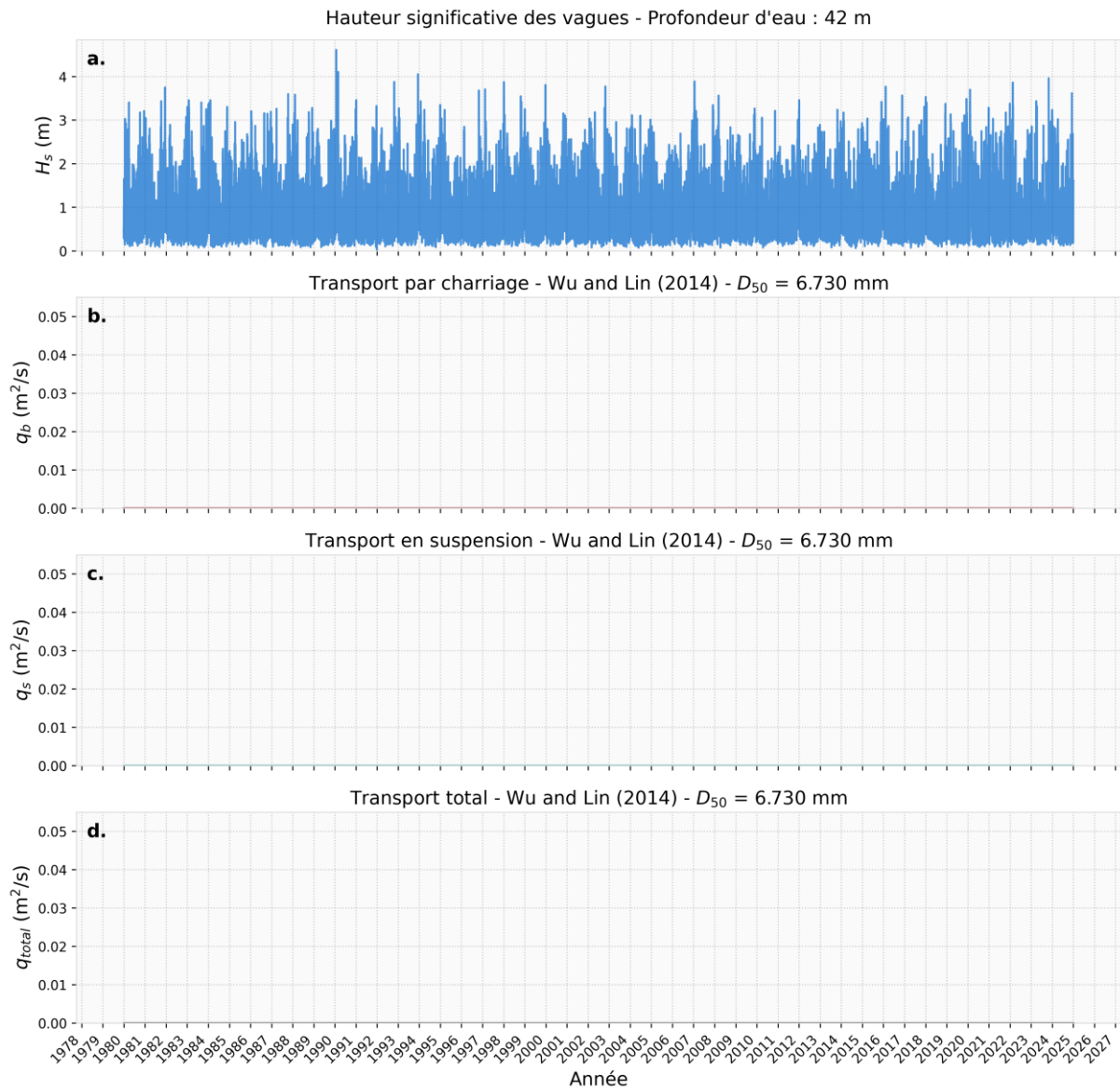
**Figure 56.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P2 (Centre). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{total}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 2.135$  mm

Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 42 m



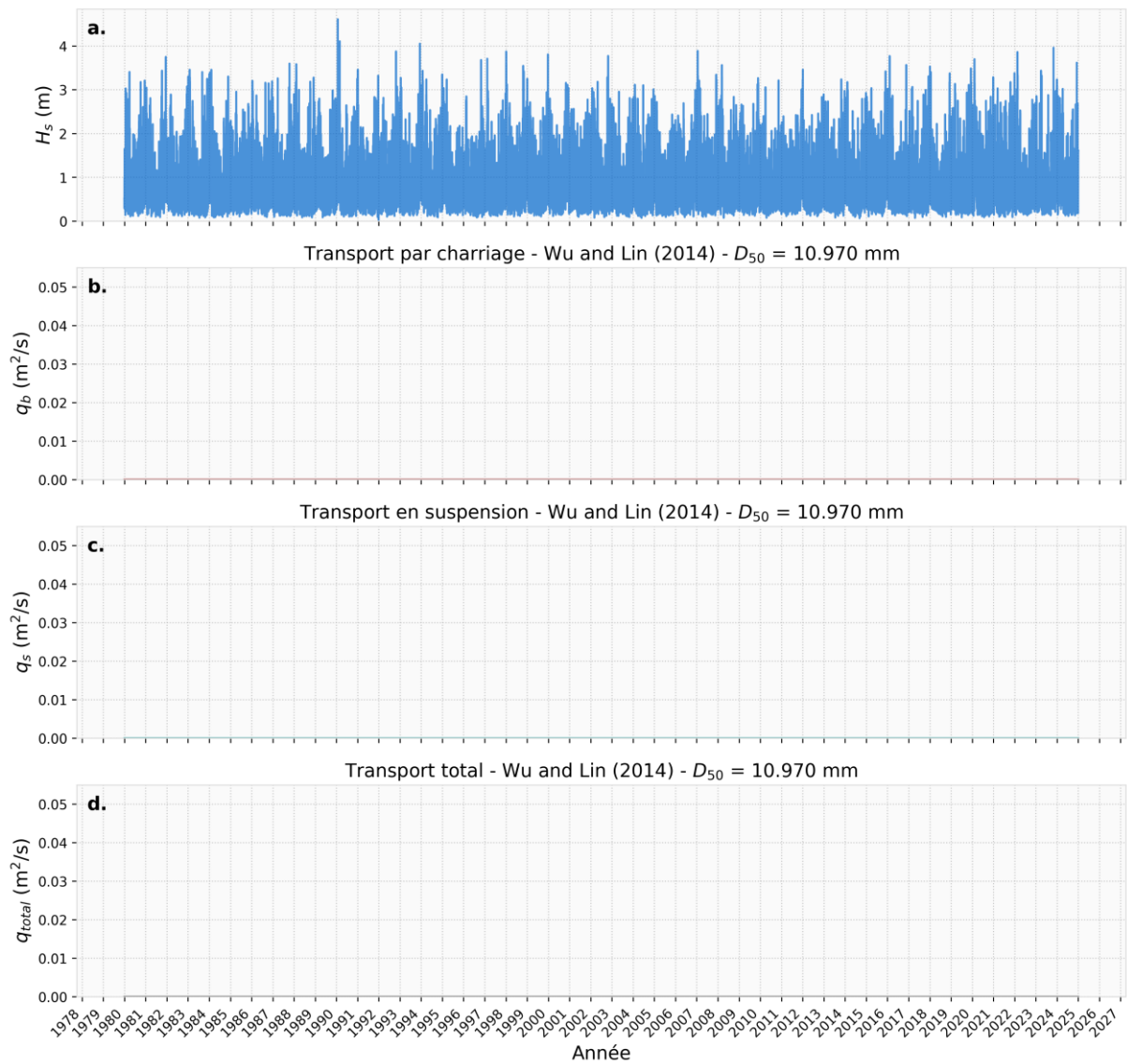
**Figure 57.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135$  mm au Point P2 (Centre). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{total}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 6.730$  mm

**Figure 58.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730$  mm au Point P2 (Centre). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{total}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 10.970 \text{ mm}$

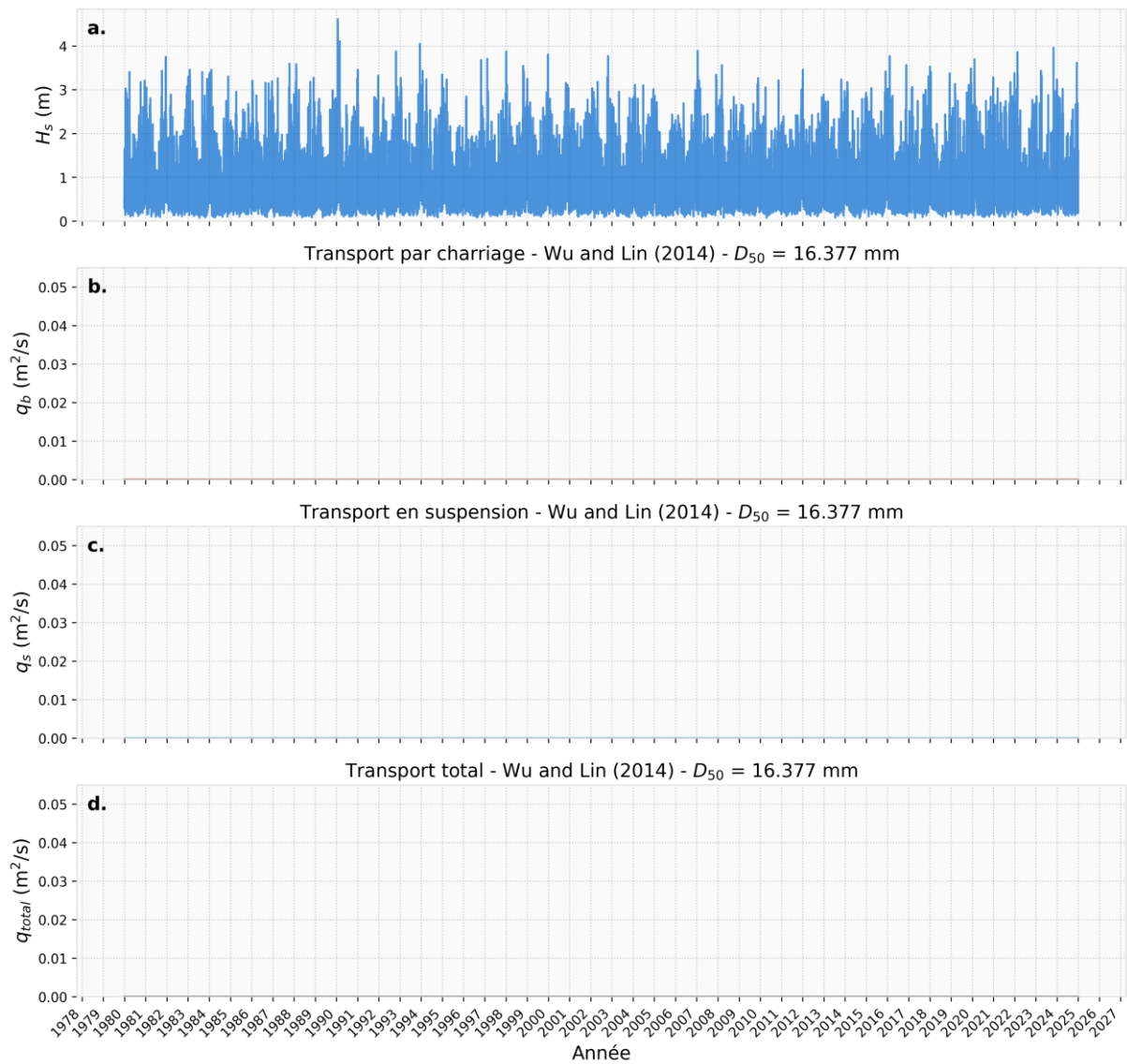
Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 42 m



**Figure 59.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970 \text{ mm}$  au Point P2 (Centre). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{\text{total}}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 16.377$  mm

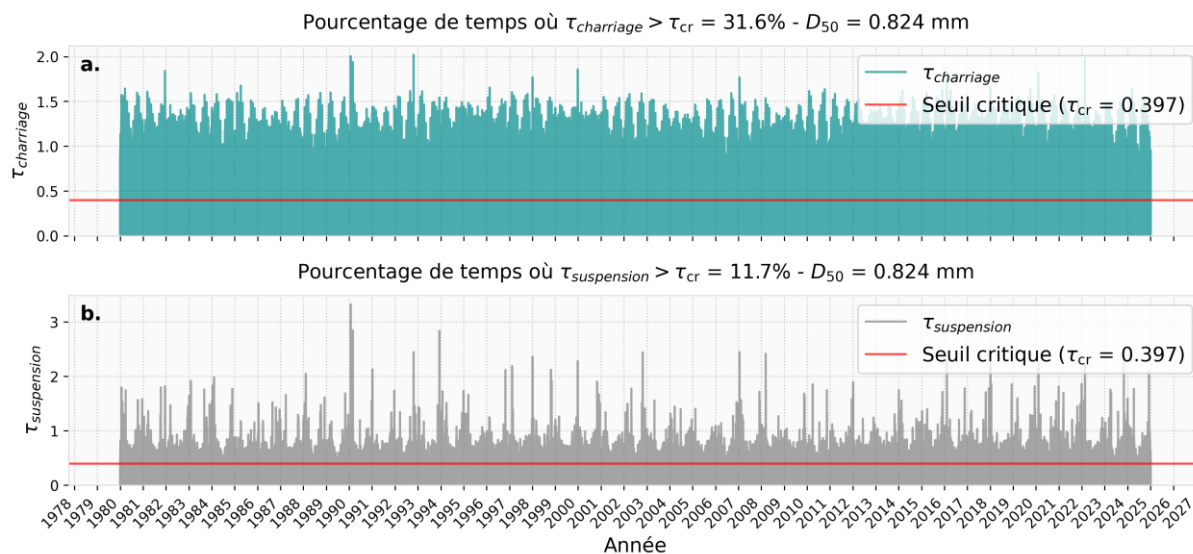
Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 42 m



**Figure 60.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377$  mm au Point P2 (Centre). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{total}$ ).

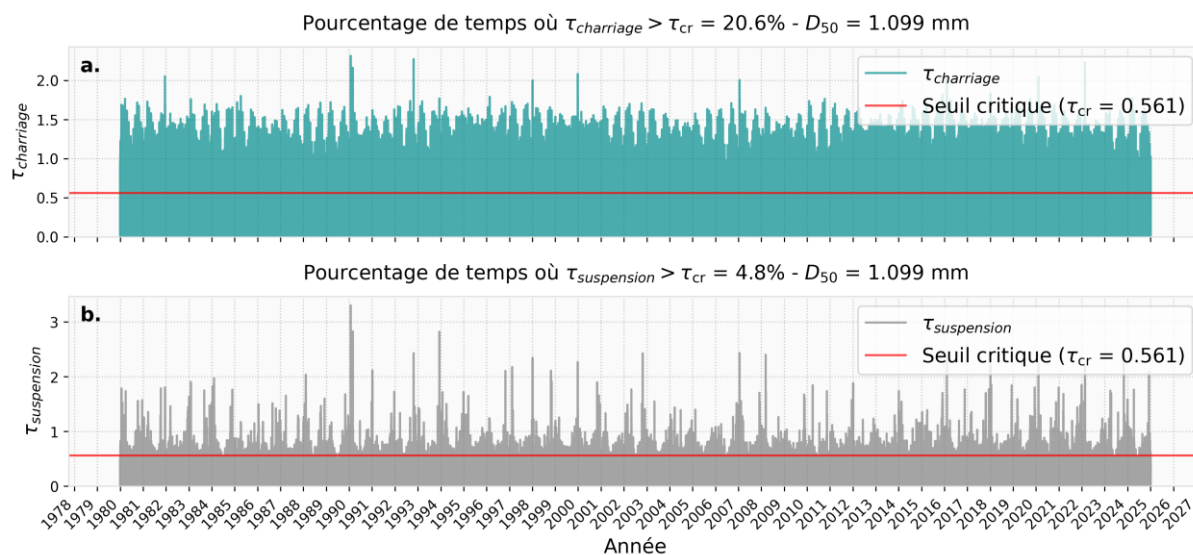
### 7.3 Point P3 (Est)

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 0.824$  mm



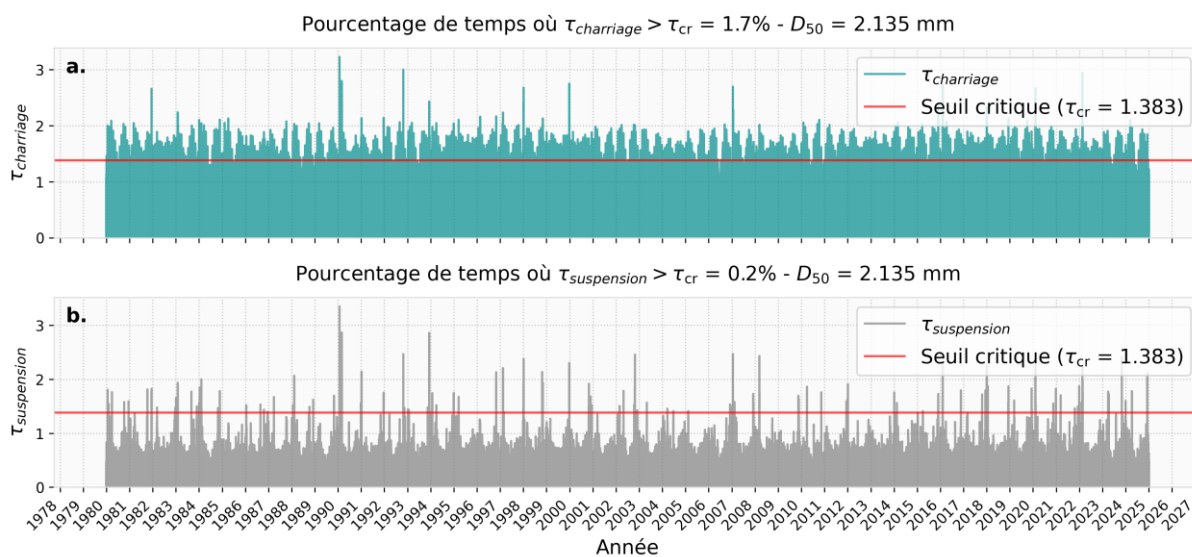
**Figure 61.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824$  mm au Point P3 (Est). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 1.099$  mm



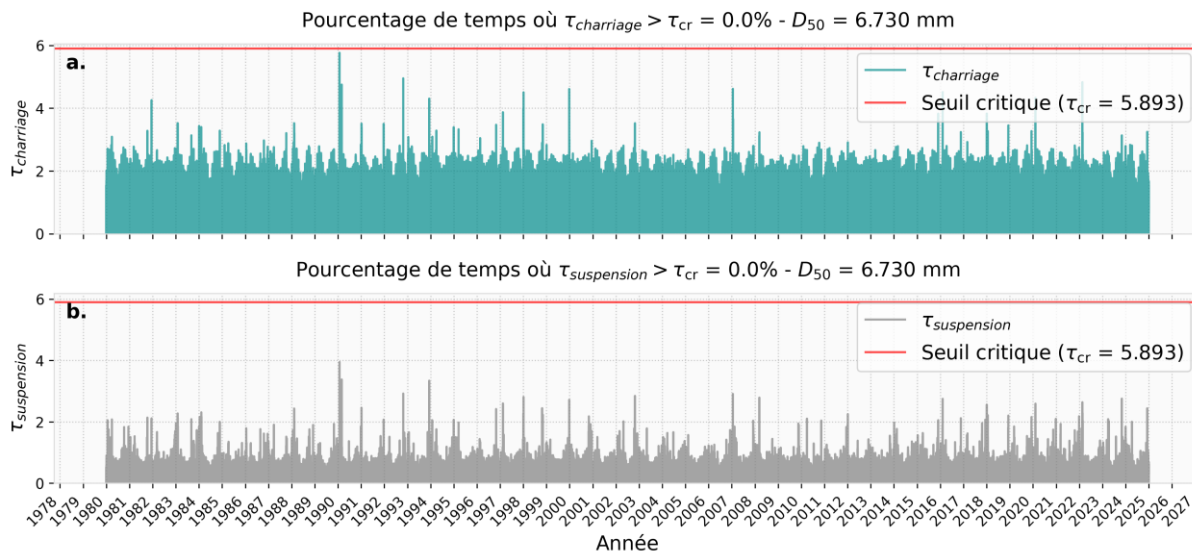
**Figure 62.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P3 (Est). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 2.135$  mm



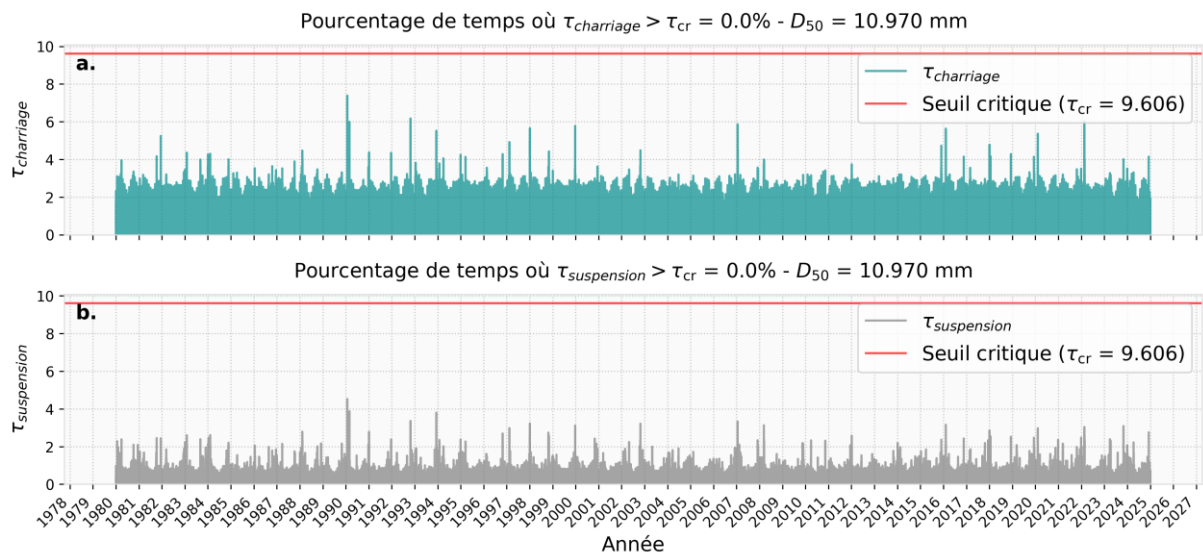
**Figure 63.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135$  mm au Point P3 (Est). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 6.730$  mm



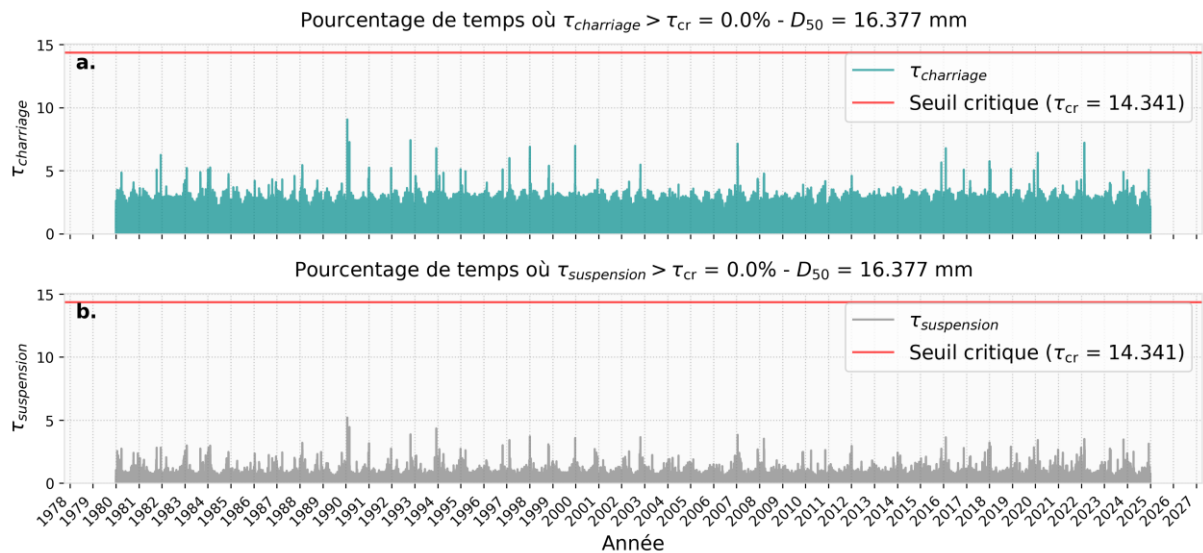
**Figure 64.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730$  mm au Point P3 (Est). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 10.970$  mm

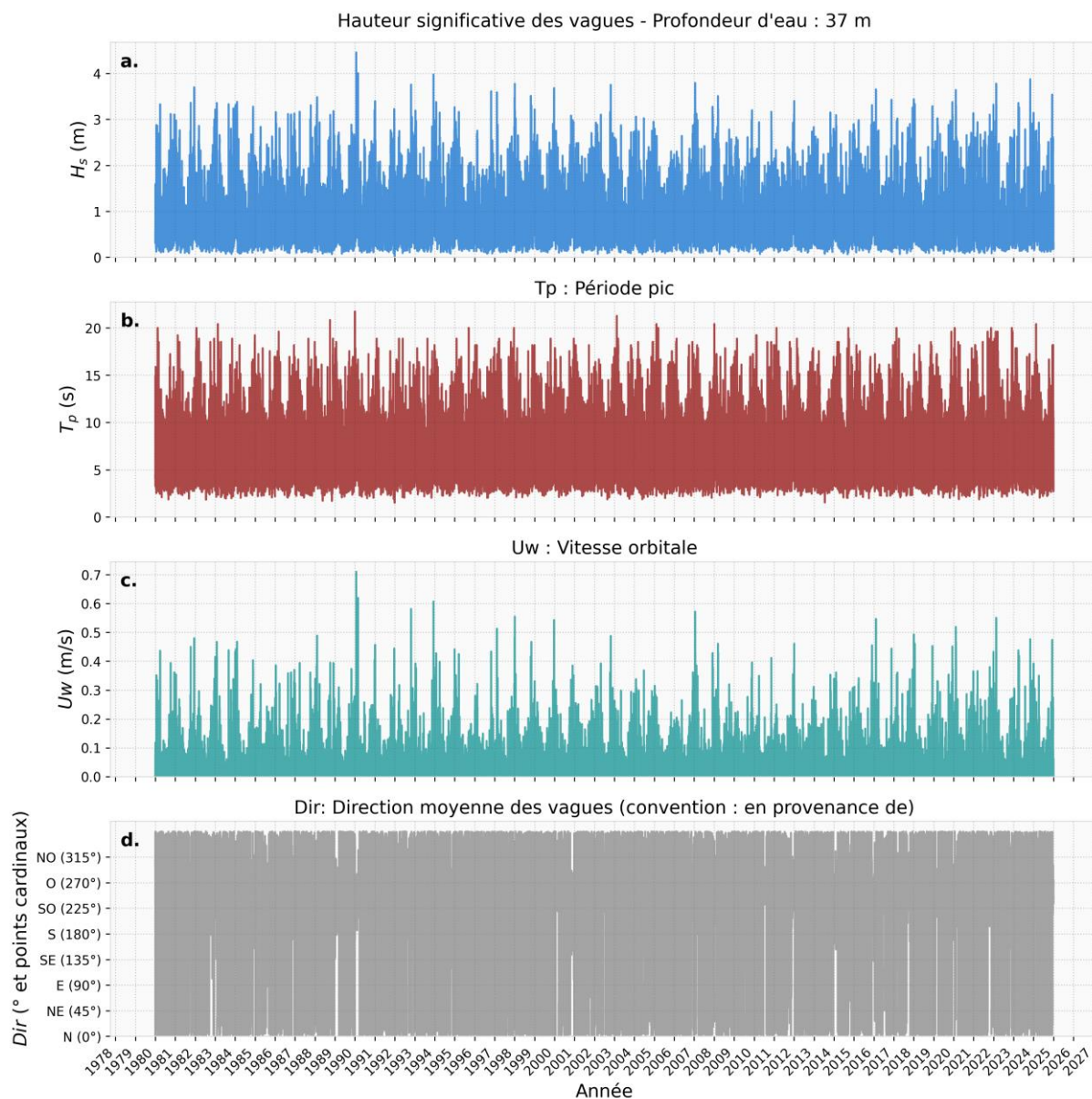


**Figure 65.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970$  mm au Point P3 (Est). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 16.377$  mm

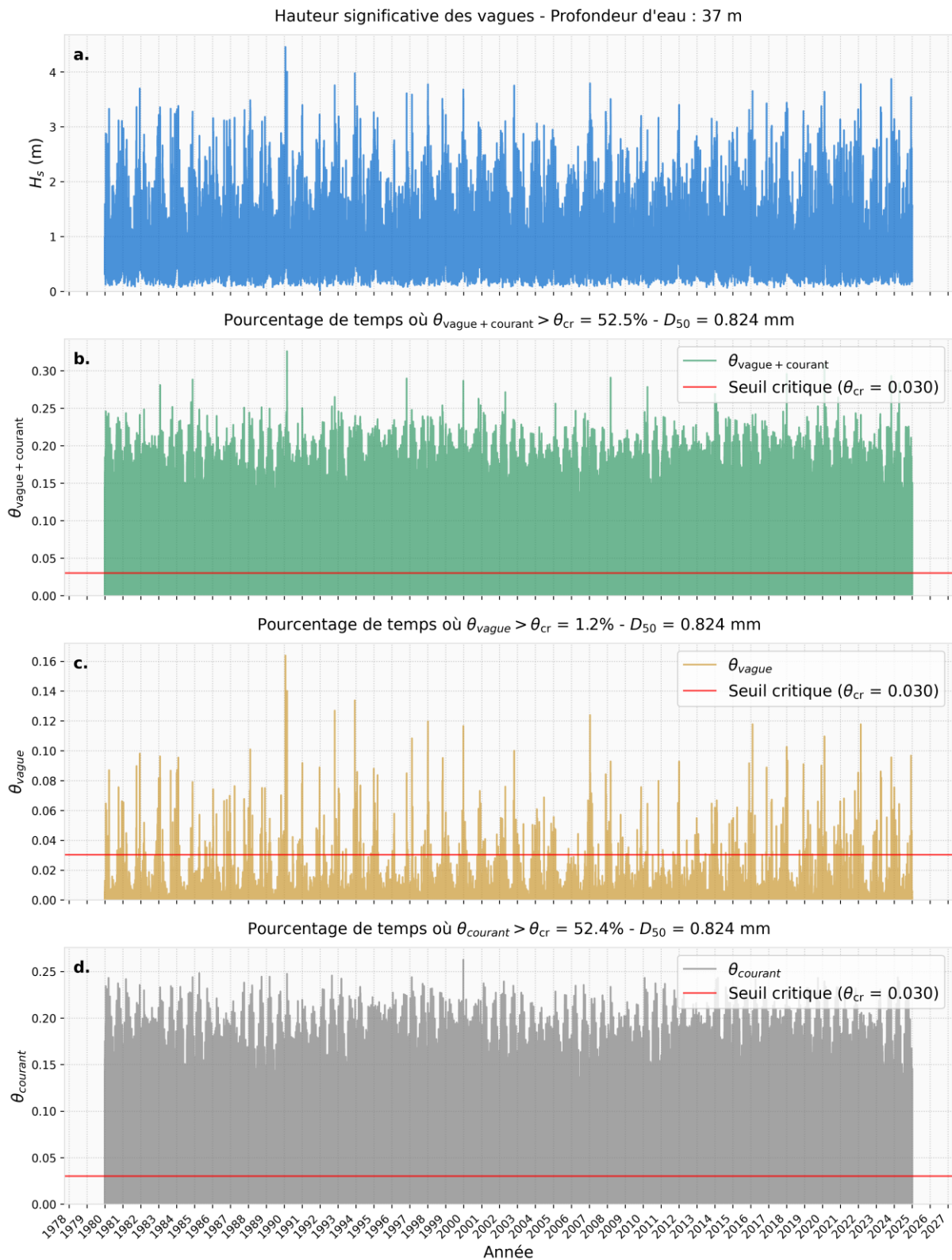


**Figure 66.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377$  mm au Point P3 (Est). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).



**Figure 67.** Séries temporelles extraites au Point P3 (Est), sur la période 1980–2024. **a.** Hauteur significative des vagues, **b.** Période pic, **c.** Vitesse orbitale, **d.** Direction moyenne des vagues (en degrés et points cardinaux).

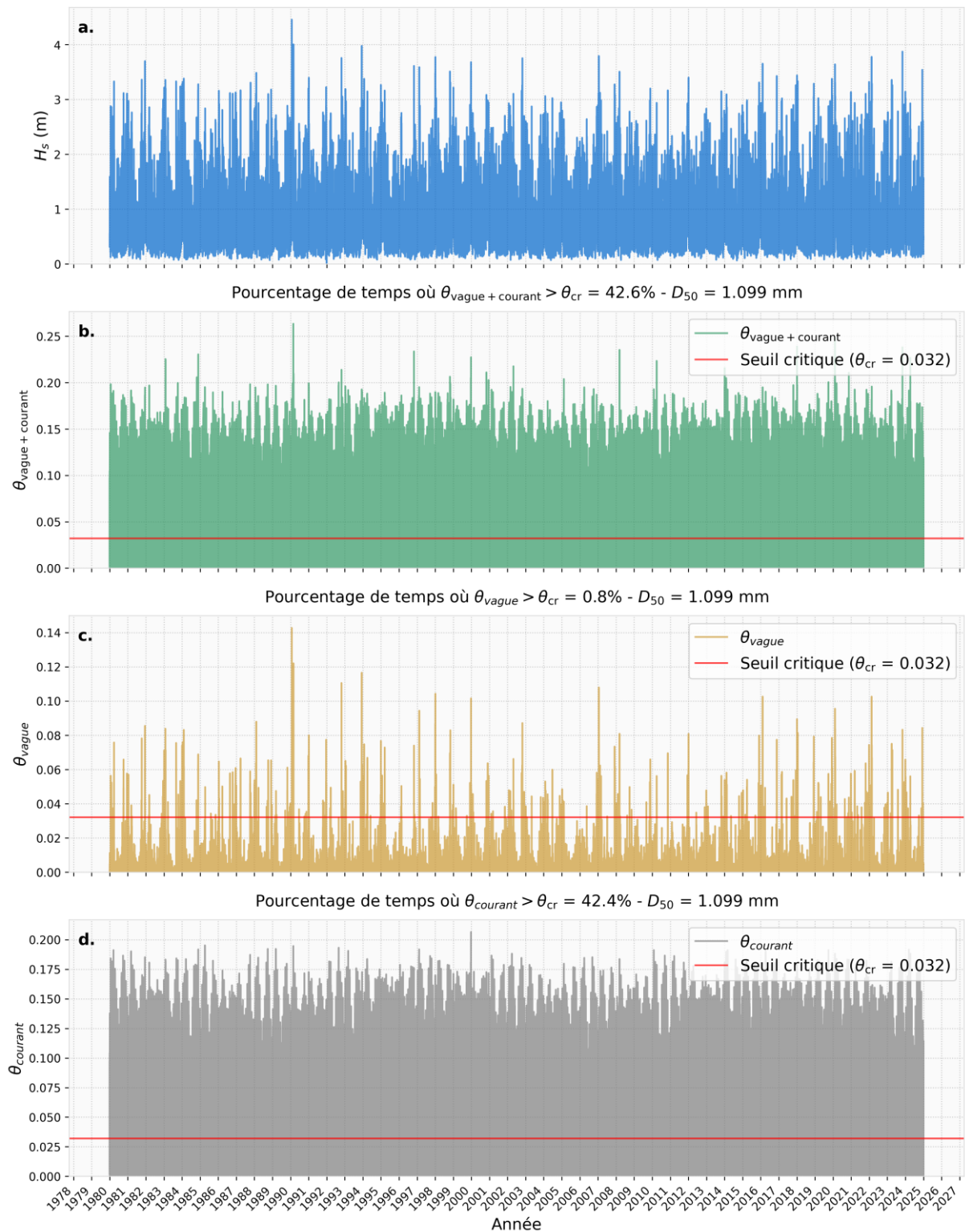
Analyse pour  $D_{50} = 0.824 \text{ mm}$



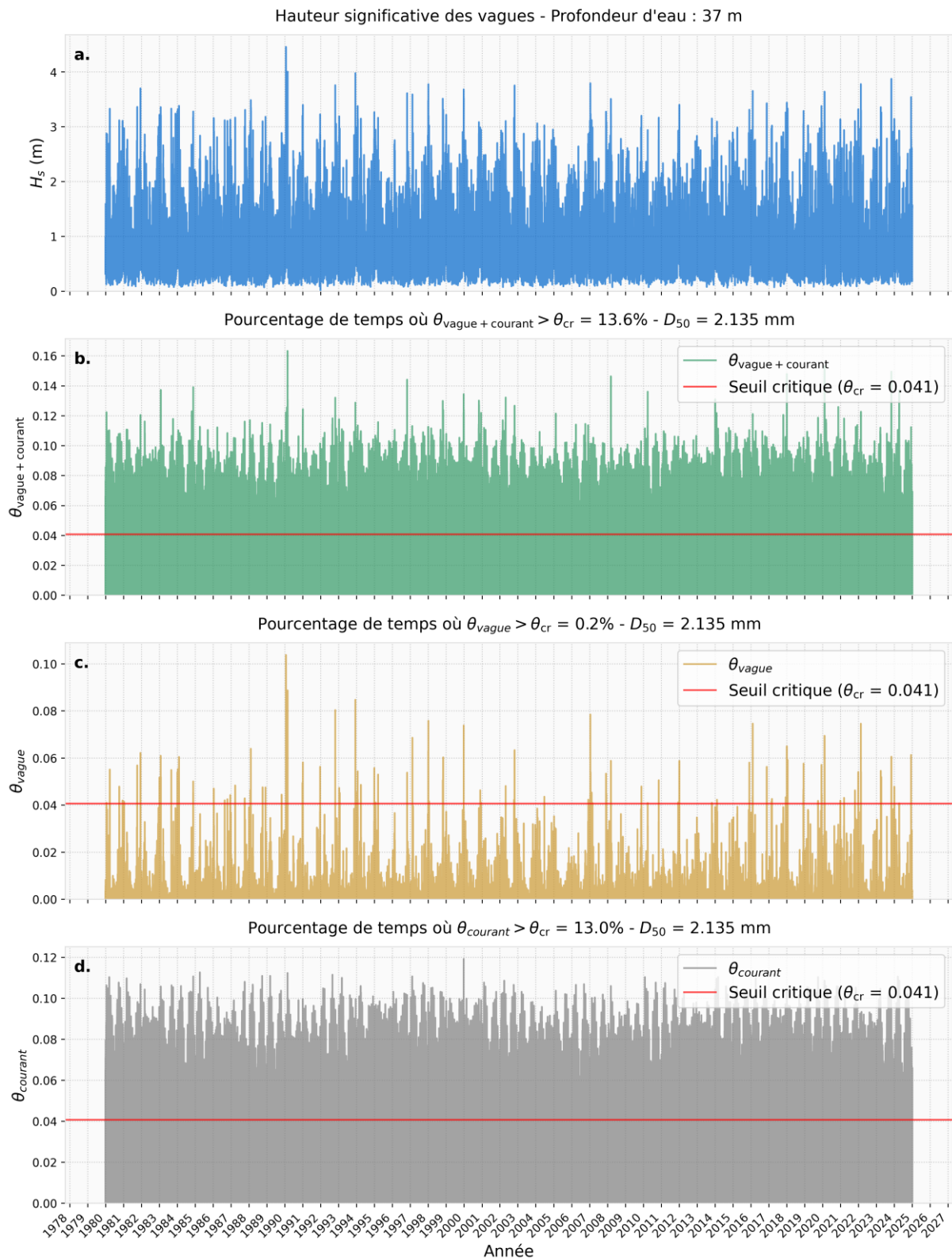
**Figure 68.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824 \text{ mm}$  au Point P3 (Est). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ).

Analyse pour  $D_{50} = 1.099$  mm

Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 37 m

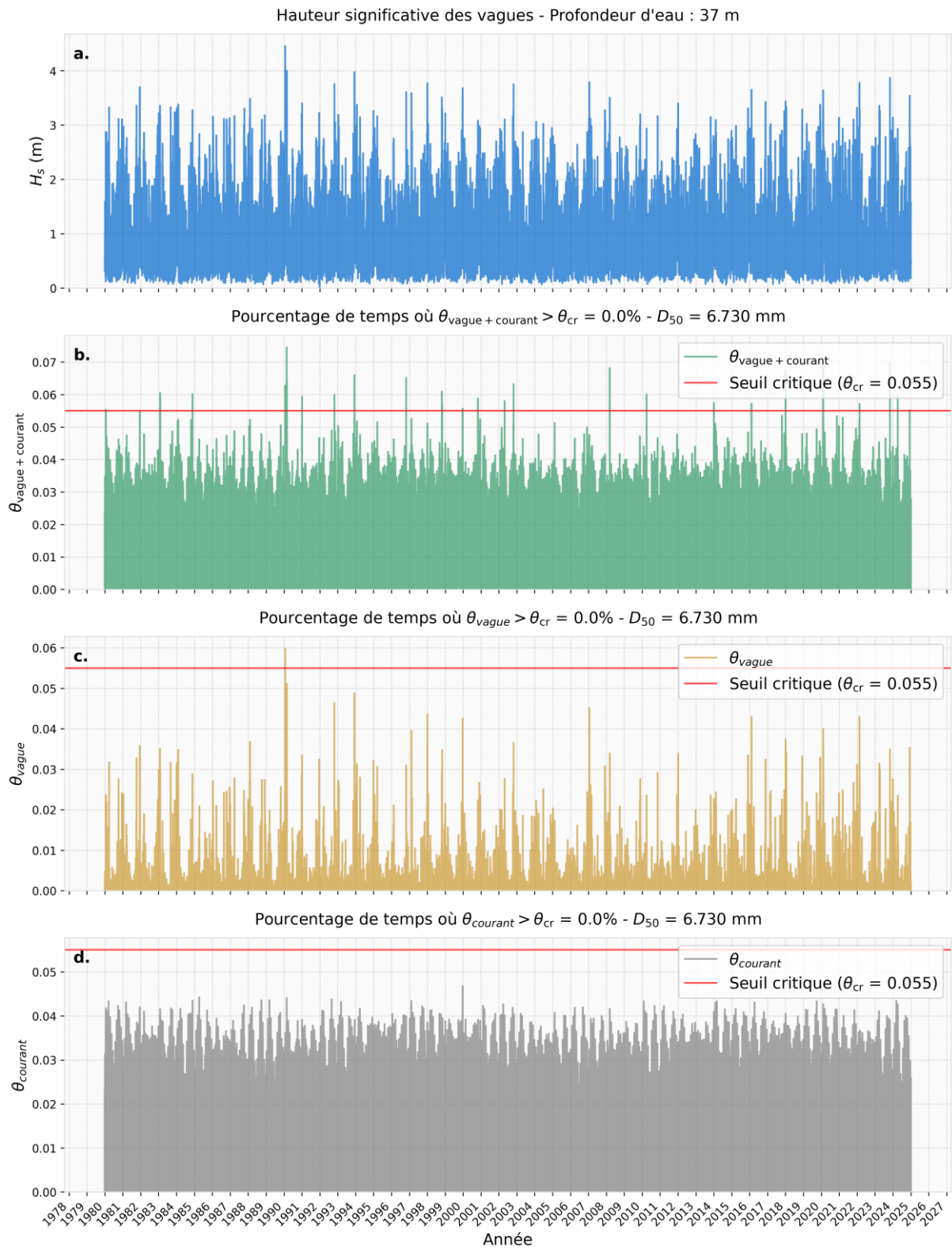


**Figure 69.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P3 (Est). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ).

Analyse pour  $D_{50} = 2.135$  mm

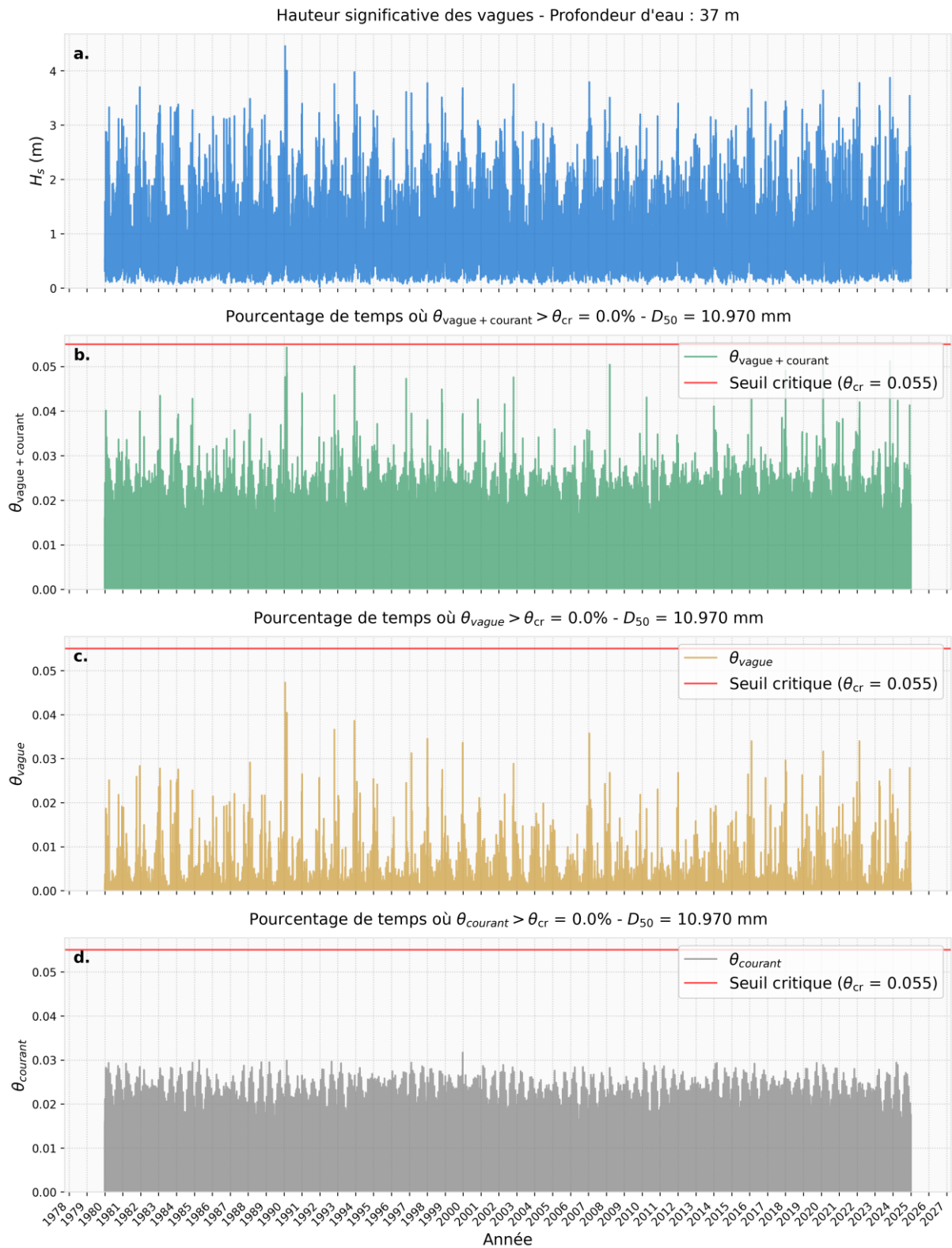
**Figure 70.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135$  mm au Point P3 (Est). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ).

Analyse pour  $D_{50} = 6.730 \text{ mm}$



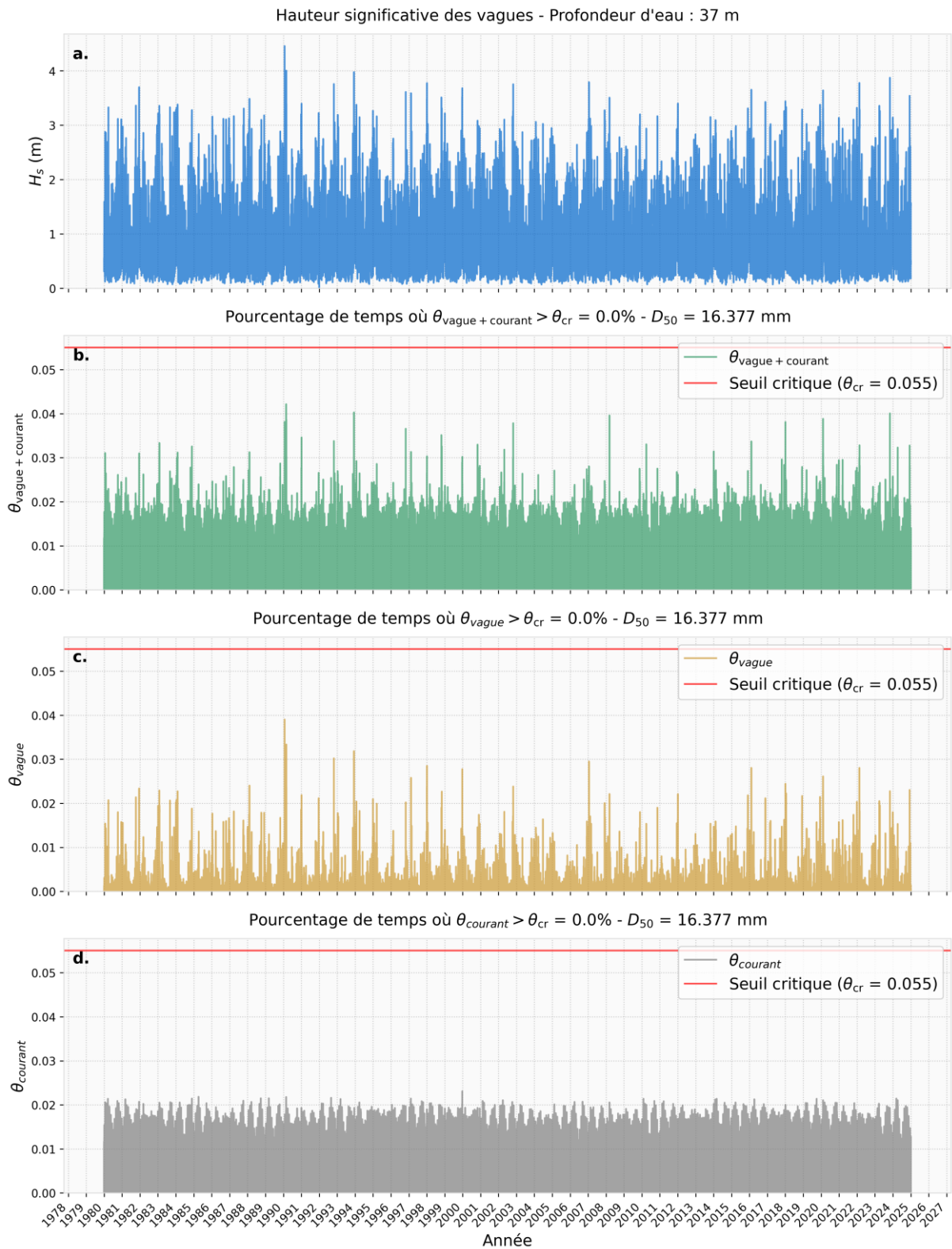
**Figure 71.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730 \text{ mm}$  au Point P3 (Est). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ).

Analyse pour  $D_{50} = 10.970 \text{ mm}$

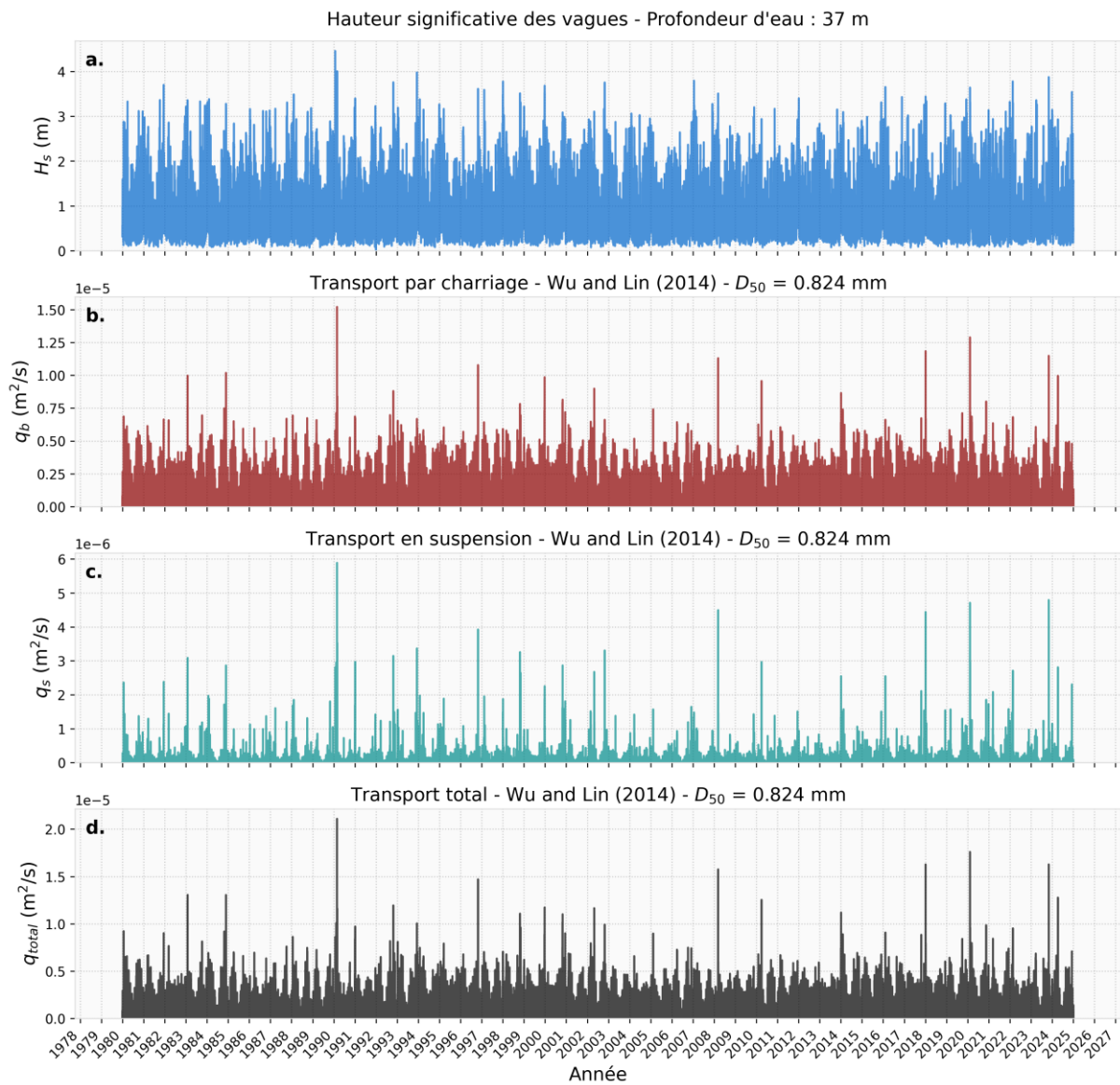


**Figure 72.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970 \text{ mm}$  au Point P3 (Est). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ).

Analyse pour  $D_{50} = 16.377$  mm



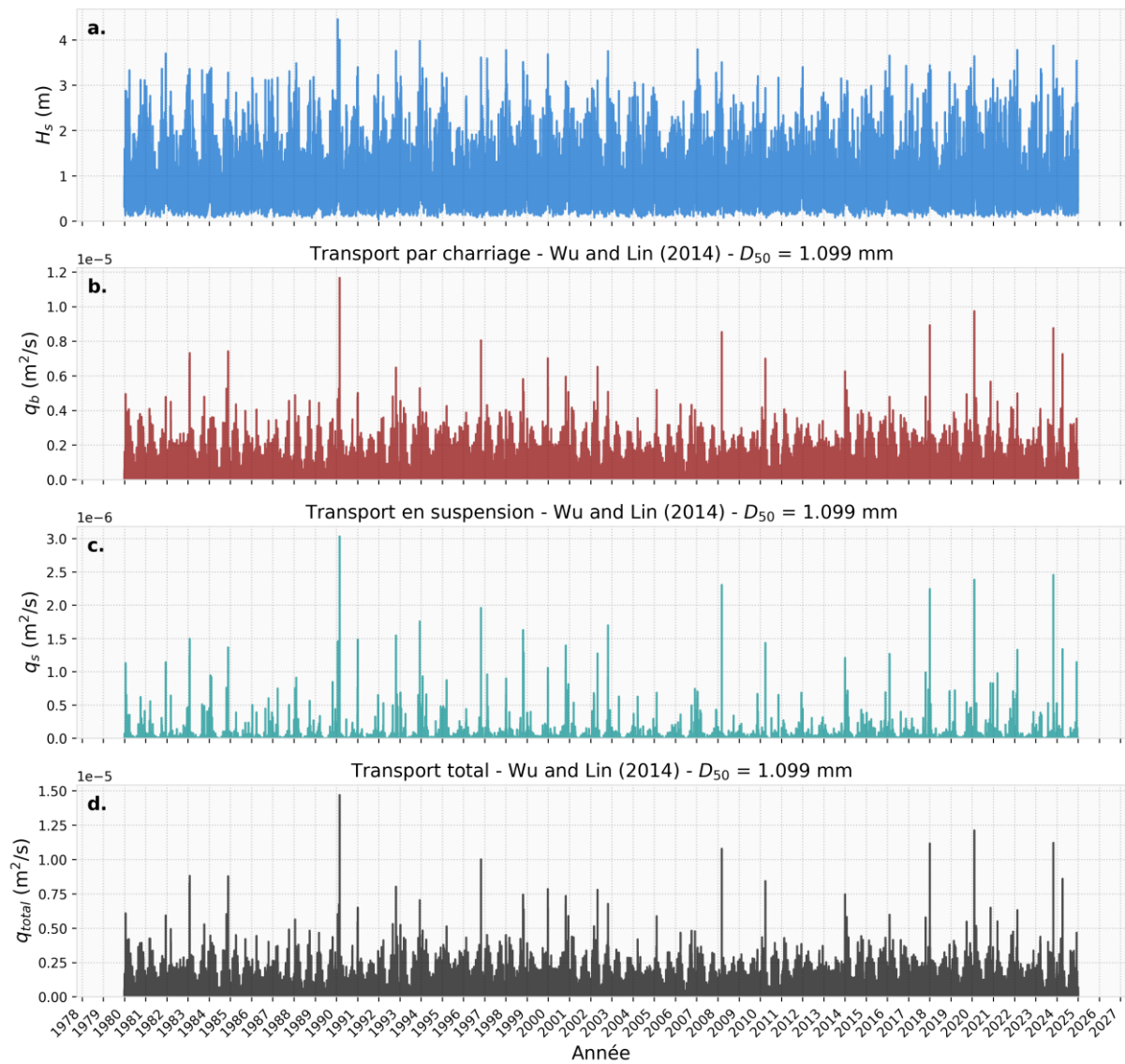
**Figure 73.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377$  mm au Point P3 (Est). **a.** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), **b.** Paramètre de Shields total ( $\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$ ), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues ( $\theta_{\text{vague}}$ ), **d.** Paramètre de Shields associé au courant ( $\theta_{\text{courant}}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 0.824$  mm

**Figure 74.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 0.824$  mm au Point P3 (Est). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{total}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 1.099$  mm

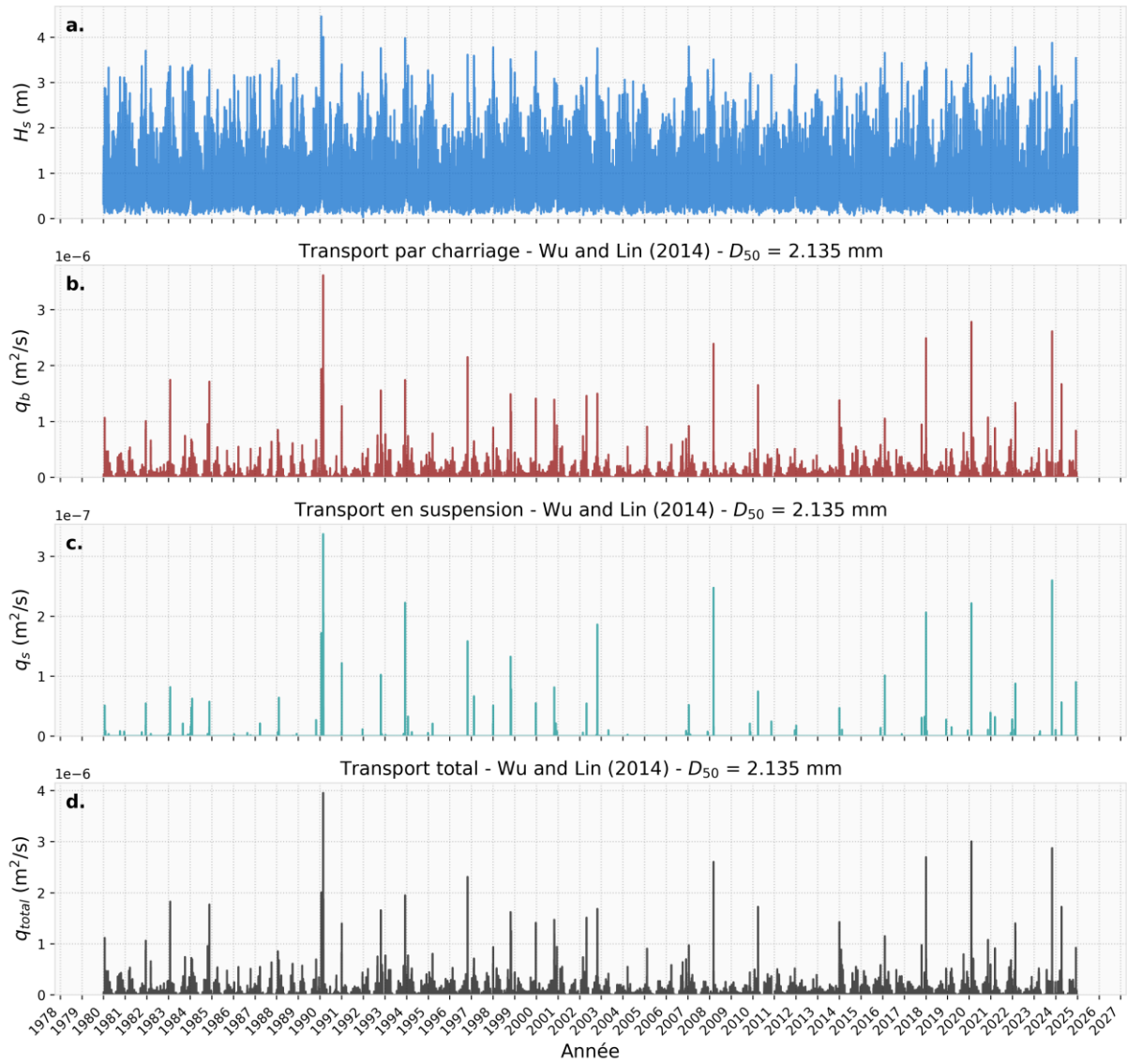
Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 37 m



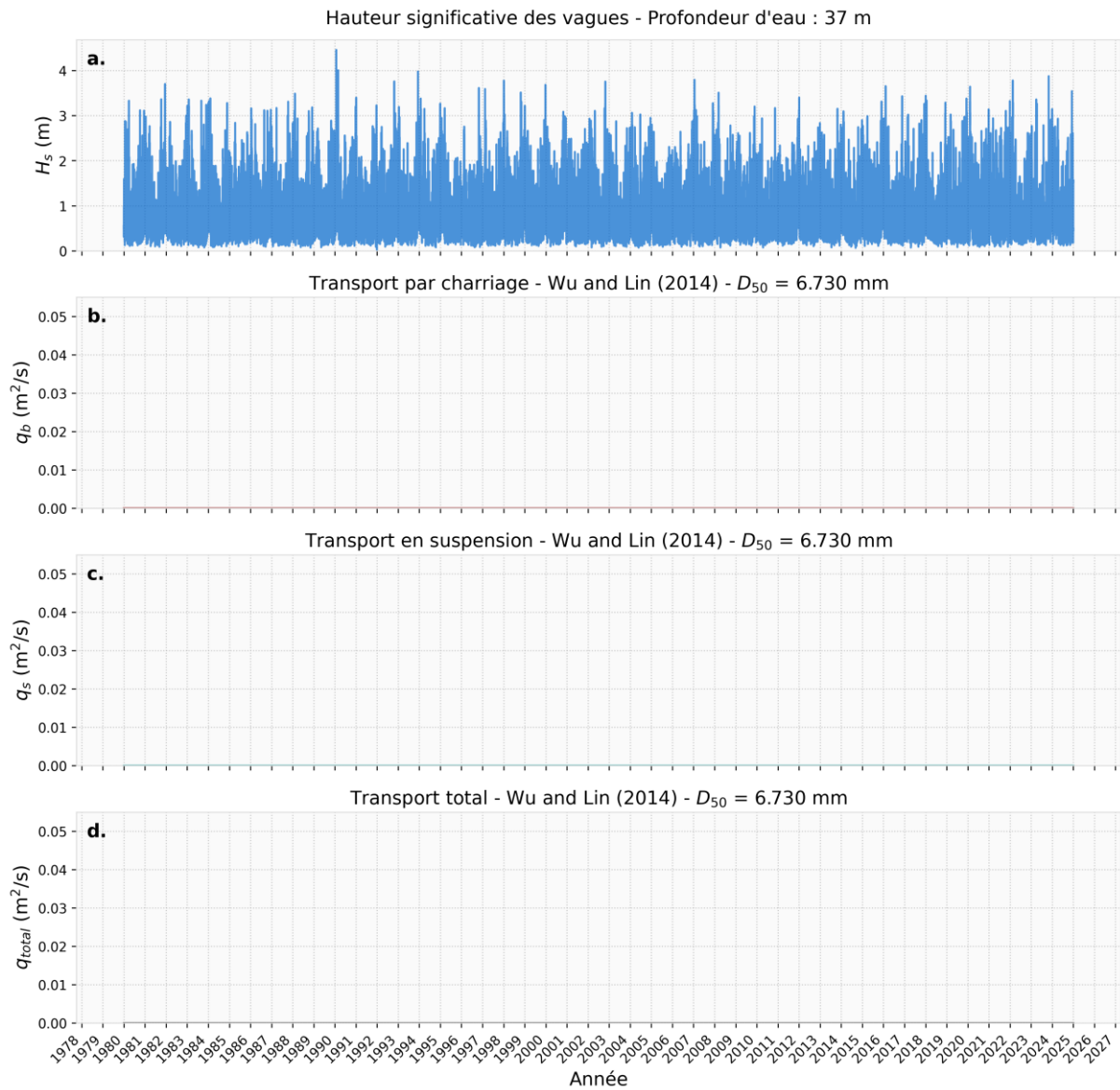
**Figure 75.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 1.099$  mm au Point P3 (Est). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{total}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 2.135 \text{ mm}$

Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 37 m



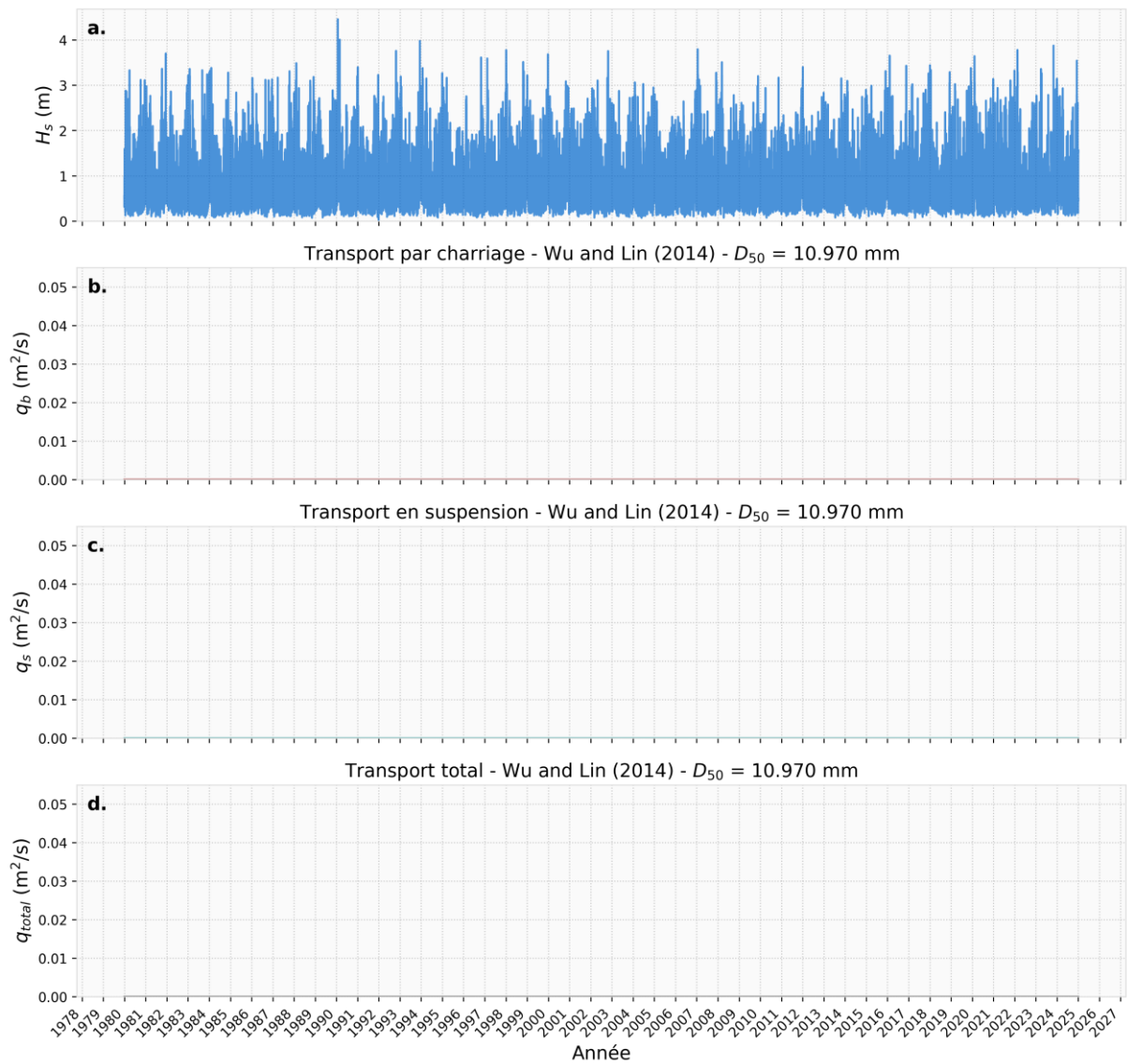
**Figure 76.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 2.135 \text{ mm}$  au Point P3 (Est). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{\text{total}}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 6.730$  mm

**Figure 77.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 6.730$  mm au Point P3 (Est). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{total}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 10.970 \text{ mm}$

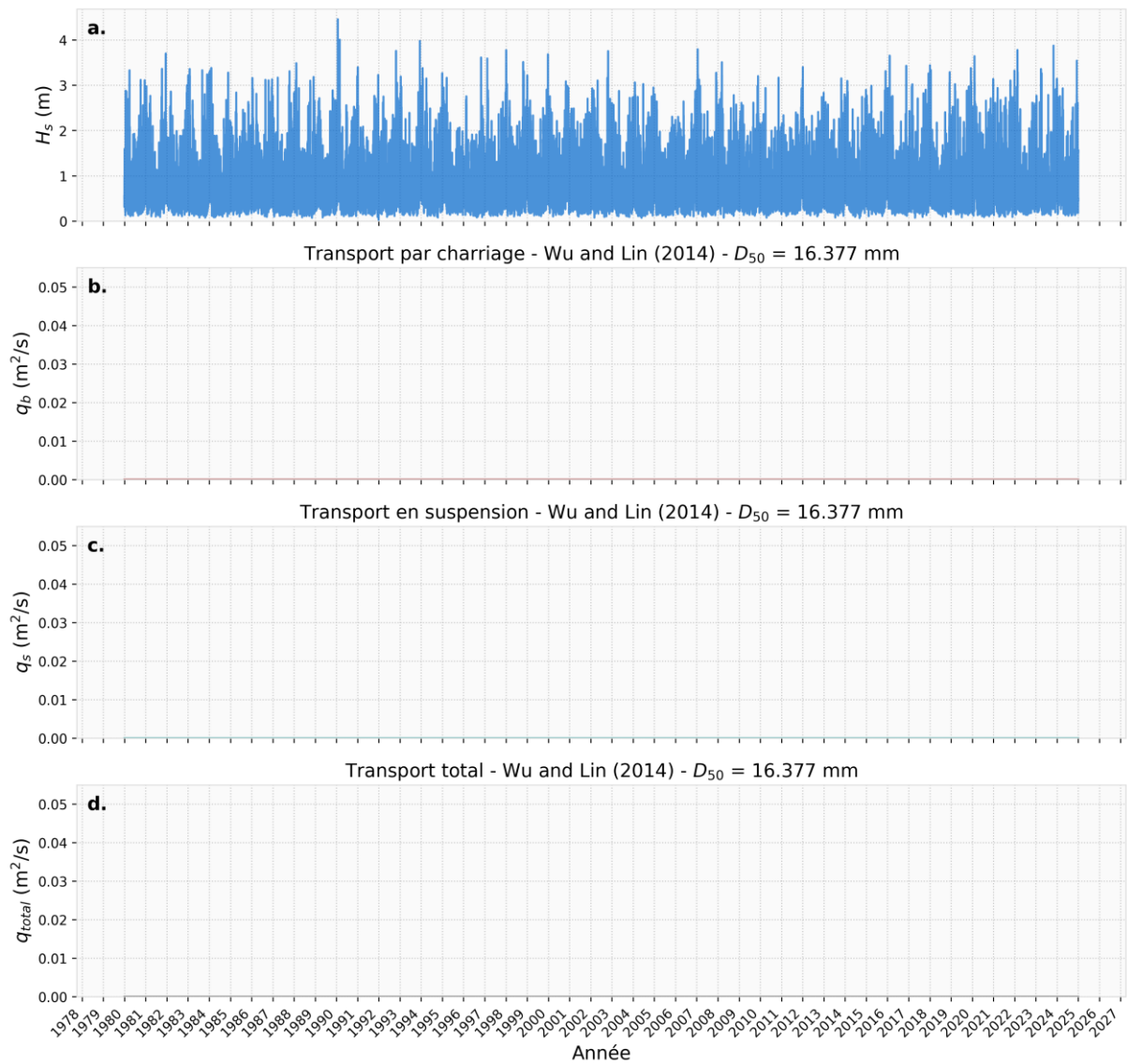
Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 37 m



**Figure 78.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 10.970 \text{ mm}$  au Point P3 (Est). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{\text{total}}$ ).

Transport Sédimentaire pour  $D_{50} = 16.377 \text{ mm}$

Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 37 m



**Figure 79.** Séries temporelles de 1980 à 2024 pour  $D_{50} = 16.377 \text{ mm}$  au Point P3 (Est). a. Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), b. Transport par charriage ( $q_b$ ), c. Transport en suspension ( $q_s$ ), d. Transport total ( $q_{\text{total}}$ ).