

*Plan expérimental de gestion des sédiments de la Rance*

# **Fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin maritime de la Rance**

*Rapport diagnostic*

**&**

*Suggestions pour le plan de gestion des sédiments de la Rance*

*Par le*

**Conseil Scientifique du Plan de Gestion des Sédiments de la Rance**

*Version N°3 du 15 juin 2023*

# Fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin maritime de la Rance

## *Conseil Scientifique du plan de gestion des sédiments de la Rance maritime*

*Mai 2023*

Le présent diagnostic a pour ambition de synthétiser l'état des connaissances sur le fonctionnement hydro-sédimentaire de la Rance maritime, en mettant l'accent sur des acquis récents, sans reprendre l'ensemble des connaissances anciennes déjà publiées, en particulier la synthèse coordonnée par C. Bonnot-Courtois, B. Caline, A. L'Homer et M. Le Vot parue en 2002 sous la forme du mémoire CNRS/EPHE/TotalFinaElf N°26 (Bonnot-Courtois *et al.*, 2002).

Ce rapport est structuré en deux parties. Une première partie plus opérationnelle, rappelle d'abord, les principaux messages issus du diagnostic en faisant de multiples renvois aux différentes sections du diagnostic dressé en partie 2, puis inventorie les différents leviers que le Conseil Scientifique propose de mettre en œuvre dans le cadre du plan de gestion des sédiments de la Rance.

La deuxième partie décrit le fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin maritime de la Rance, en distinguant les caractéristiques hydrodynamiques (marée et courants associés), l'hydrologie du bassin et la distribution des salinités, puis la dynamique sédimentaire actuelle dans le bassin (évolution topo-bathymétrique des fonds et de la nature des sédiments, remises en suspensions et flux associés) et présente des résultats de modélisation mathématique qui apportent des indications complémentaires sur le comportement du bassin.

Cette version 2 du rapport constitue une actualisation en profondeur de la version de juin 2022, avec de nombreux éléments complémentaires concernant l'évolution des fonds depuis la construction du barrage marémoteur, l'analyse de la campagne de carottages et l'instruction des leviers d'actions 1 et 2 relatifs au fonctionnement de l'usine marémotrice, en particulier la recherche de modes de fonctionnement alternatif qui a été menée avec EDF.

*A la fin du rapport un glossaire précise la signification de certains sigles et termes techniques.*

*La plupart des résultats commentés dans ce rapport sont issus d'études et de campagnes de mesures réalisées dans le cadre du plan de gestion expérimental des sédiments de la Rance. Quelques travaux sont encore en cours (notamment sur la couverture sédimentaire) et donneront lieu à une révision complémentaire de ce diagnostic. De plus, la réalisation d'une nouvelle carte topo-bathymétrique en 2023 par EDF devrait donner lieu à un complément concernant l'évolution actuelle de la sédimentation.*

Le rapport diagnostic global du CS du plan de gestion des sédiments de la Rance est donc constitué de quatre documents :

- Le présent rapport diagnostic hydro-sédimentaire
- Un rapport diagnostic écologique en cours d'écriture à ce jour
- Le diagnostic sur les enjeux territoriaux remis en avril 2023
- Un diagnostic sur les possibilités de valorisation des sédiments qui pourra être finalisé à l'issue du projet Suricates.

## SOMMAIRE

<b>Partie 1</b>		page
<b>1- Principaux messages sur le fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin de la Rance</b>		<b>5</b>
1.1 Evolution constatée des fonds		5
1.2 Une hydrodynamique modifiée par l'UMR		6
1.3 Dynamique des sédiments		7
1.4 Apports des modèles hydro-sédimentaires		8
<b>2- Suggestions pour le plan de gestion des sédiments de la Rance</b>		<b>10</b>
2.1 Levier N°1 : réduction des apports de sédiment fin		11
2.2 Levier N°2 : recherche d'un fonctionnement alternatif de l'usine marémotrice		12
2.3 Levier N°3 : maintien du piège du Lyvet et gestion de la sédimentation amont		16
2.4 Levier N°4 : réaliser des extractions localisées de vase pour maintenir certains usages		18
2.5 Levier N°5 : envisager une extraction massive de vase, sous certaines conditions		19
2.6 Recommandation d'études complémentaires		20
2.7 Recommandations de suivis hydro-sédimentaires		21
2.8 Considérations financières		22
 <b>Partie 2</b>		
<b>3- La marée en Rance</b>		<b>23</b>
<b>4- Les courants de marée</b>		<b>28</b>
4.1 Distribution des courants		30
4.2 Variabilité des courants au cours de la marée		30
4.3 structure verticale des courants		33
4.4 variabilité des courants sur le moyen terme		33
<b>5- Courants maximaux et asymétrie flot/jusant</b>		<b>36</b>
<b>6- Durée de l'étalement de pleine mer et temps d'immersion</b>		<b>40</b>
<b>7- Courants résiduels</b>		<b>43</b>
<b>8- Trajectoires des masses d'eau et excursions des particules</b>		<b>44</b>
8.1 Analyse des trajectoires partant en fin de jusant		44
8.2 Analyse des trajectoires partant en début de flot		44
8.3 Analyse des trajectoires partant à PM		46
8.4 Bilan de l'analyse des trajectoires		46
8.5 Excursion des particules au cours d'une marée		47
<b>9- Temps de renouvellement des masses d'eau</b>		<b>49</b>



## 1- Principaux messages sur le fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin de la Rance

*Ce chapitre synthétise les chapitres 3 à 14, auxquels de nombreux renvois sont faits.*

### 1.1 Evolution constatée des fonds

Pour rappel (§ 11 et Annexe 6), les données (sondages bathymétriques, levés LIDAR) ont une imprécision estimée de l'ordre de 20 cm. Un « décalage » de 20 cm étendu sur une surface de 20 km<sup>2</sup> représente un volume de 4 Mm<sup>3</sup>.

Trois relevés à peu près complets du bassin maritime ont été réalisés en 1957, 2009-2011 et 2018. La comparaison entre la situation actuelle et celle de 1957 (donc avant barrage) montre une sédimentation en amont, mais globalement une érosion dominante sur le bassin au nord de la cluse de Port St-Jean, concentrée sur les rives (haut estran), y compris en baie de Châteauneuf (§ 11.1, Fig. 28-30). Même si l'incertitude de la carte de 1957 invite à la plus grande prudence, une possible explication de cette érosion est le renforcement du rôle érosif des clapots sur le haut estran (Fig.32), entretenu par l'allongement de la durée de l'étale de pleine mer, laquelle se produit à une élévation qui varie moins qu'avant depuis la mise en route de l'usine marémotrice de la Rance (UMR). Auparavant, pendant les 3 années de construction de l'usine, le plan d'eau est resté à une cote proche de 8,50 m CM<sup>1</sup> : les vagues générées par le vent ont alors pu agir principalement sur des fonds de 6-7 m CM, de telle sorte que l'élévation des fonds soumis à érosion s'avère étendue.

La comparaison entre les levés 2009-2011 et 2018 (§ 11.2, Fig. 33) révèle une sédimentation nette de l'ordre de 1 M m<sup>3</sup>, très spectaculaire en amont de la pointe du Chêne Vert, mais répartie à 80 % jusqu'à la pointe du Ton (Le Minihic/Rance). Les dépôts sont largement majoritaires dans les secteurs subtidaux (jamais découverts par la marée) et dans la tranche bathymétrique 6-8 m (référence Carte Marine), c'est-à-dire un peu au-dessus des niveaux bas actuels dans le bassin, tandis que les niveaux supérieurs sont globalement en érosion (Fig. 34 & 35). Là encore, c'est l'érosion par les vagues à l'intérieur du bassin (clapots ou « mer de vent ») qui pourrait en être responsable, favorisée par l'étale de pleine mer prolongée du fait du fonctionnement de l'UMR, à une cote bathymétrique variant peu (entre 10 et 12 m CM, soit beaucoup moins que dans l'environnement naturel).

En amont de Mordreuc, la sédimentation constatée entre 2009-2011 et 2018 s'est poursuivie depuis, avec en particulier un comblement assez rapide du chenal à terre du banc de la Moinerie (§ 11.4, Fig. 38 & 39). La sédimentation soudaine après construction du barrage s'explique pour partie par l'empêchement de la propagation de la marée au-delà du Châtelier, favorisée par le rehaussement du barrage de Lyvet. La réduction du volume oscillant de marée a pu initier une sédimentation vaseuse qui devait se produire plus en amont, et a été favorisée par la réduction du marnage liée à l'usine marémotrice. Le comblement du chenal de la Moinerie est la marque d'une dynamique assez intense dans le secteur, le chenal qui existait à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle mais avait quasiment disparu en 1958, tandis qu'il s'est à nouveau creusé depuis, avant de se combler rapidement depuis 10 ans, peut-être à la faveur du chenal au sud-ouest de Mordreuc qui a fait l'objet d'un dragage en 2004.

Les données dans le bras de Châteauneuf sont rares (secteur très mal couvert en 2009), mais la comparaison des photographies aériennes actuelles avec un cliché de 1952 montre que la haute slikke

---

<sup>1</sup> CM : Cote Marine, exprimée par rapport au zéro des cartes marines

(vasière découvrante dans la moitié supérieure de l'estran) présente les mêmes petits chenaux de drainage, laissant penser à une faible évolution (Fig. 37). Il est probable que ceux-ci soient partiellement remplis de vase molle, car moins actifs en raison de la réduction du marnage. Plus globalement, les herbues sont plutôt en régression, latéralement mais aussi verticalement (abaissement des niveaux supérieurs du schorre).

Un échantillonnage récent des fonds sédimentaires sur l'ensemble de l'estuaire a montré une légère réduction globale de la fraction fine des sédiments (celle qui caractérise les vases), en particulier en bas et moyen estran, tandis que la fraction fine serait accrue dans les secteurs plus profonds en accord avec la sédimentation constatée (§ 11.6, Fig. 46). Le haut estran semble également enrichi en particules fines, mais l'échantillonnage insuffisant dans cette tranche topo-bathymétrique incite à compléter les analyses (action entreprise par le CS et l'EPTB en 2022, analyses bientôt disponibles).

## **1.2 Une hydrodynamique modifiée par l'UMR**

La réduction du marnage par l'UMR, d'un facteur 2, est bien connue, mais on peut aussi relever une très forte atténuation de la variation d'amplitude de marée se traduisant par une modulation très atténuée de la variation naturelle du niveau des pleines mers et une quasi constance du niveau de basse mer (qui correspond au niveau de mi-marée avant barrage), en dehors d'épisodiques séquences de « niveaux très bas » pratiqués depuis 2020 (§ 3, Fig. 1 & 2).

Il en résulte une élévation du niveau moyen de 2,65 m (Fig. 2c), un rétrécissement de l'estran (Fig. 2c & 16), et la quasi disparition des secteurs peu souvent immergés (ceux qui ne l'étaient que lors des fortes vives eaux), avec un impact potentiel sur la biodiversité (disparition d'un habitat spécifique).

La réduction du marnage entraîne une forte réduction des courants de marée (§ 4 & 5), en flot comme en jusant (Fig. 13), un léger renforcement de l'asymétrie des courants en faveur du flot (donc vers l'amont de l'estuaire), déjà prégnante avant barrage (§ 5, Fig. 14). Cette domination du flot est propice au transport de sédiment vers l'amont. A noter cependant une direction de courant dominant vers l'aval (d'intensité faible) dans de nombreuses baies en marge de la zone centrale plus profonde, phénomène qui existait avant barrage et qui persiste, en raison du caractère festonné de la géométrie du bassin de la Rance, de part et d'autre d'un chenal globalement nord-sud (Fig. 14).

Un examen attentif de la variation des courants au cours de la marée (§ 4.1) montre :

- une réponse quasi instantanée de l'ensemble du bassin au régime de fonctionnement de l'UMR, et des courants en phase avec les débits transitant à travers les vannes ou les groupes-bulbes (Fig. 7 & 11) ; notamment, la pointe de flot, qui se situe en tout début de flot, à basse mer, est très marquée et susceptible d'entraîner les sédiments vers l'amont ; de même les niveaux très bas pratiqués périodiquement depuis 2020 se traduisent par des pics de vitesse en direction du jusant mais aussi lors du flot qui suit (Fig. 10 & 11), accentuant le transfert de sédiment fin vers l'amont ;
- des oscillations de vitesse et même des inversions de courant, spectaculaires pendant le jusant et à la renverse flot/jusant (Fig. 7), qui sont liées à des seiches maintes fois décrites dans le bassin (il s'agit d'oscillations du plan d'eau à une période de l'ordre de la demi-heure, comme on en observe souvent dans des plans d'eau semi-fermés tels que les bassins portuaires, mais aussi dans certains petits estuaires naturels tels que l'Elorn, la rivière de Morlaix...) ; l'impact de ces seiches sur la dynamique sédimentaire est sans doute modéré, mais se traduit par des survitesses temporaires (dans le sens du flot ou du jusant) qui contribuent à mobiliser les sédiments ;

- des périodes de forte stratification (*i.e.* avec des différences marquées entre surface et fond ; § 10, Fig. 23 & 24), accentuées par le barrage (Fig. 25), pouvant se traduire par une annulation des courants de jusant près du fond dans la cluse de Port S<sup>t</sup>-Jean en morte eau, lorsque les apports d'eau douce sont significatifs à l'amont en période pluvieuse (Fig. 9).

La durée de l'étale de courant à pleine mer (§ 6), typiquement inférieure à une heure dans les estuaires bretons, a été considérablement rallongée dans le bassin de la Rance, atteignant 2-3 h (durée pendant laquelle la vitesse reste inférieure à 10 cm/s) même dans le chenal (§ 6, Fig. 15). Ce phénomène est propice d'une part à la sédimentation, en particulier dans les zones profondes, mais aussi à l'entretien de l'action érosive par le clapot sur les secteurs peu profonds du haut estran, immergé à ce moment-là.

La mise en place de l'UMR a eu pour effet d'allonger les temps de résidence/renouvellement des masses d'eau dans l'estuaire de la Rance (§ 9, Fig. 20). Il est naturellement plus long en amont qu'en aval, mais il est passé d'environ 3 - 5 jours à plus de 15 jours en amont de la cluse, tandis que dans la partie centrale de l'estuaire il serait de 4 jours maintenant au lieu de 2 jours avant barrage.

### **1.3 Dynamique des sédiments**

Des mesures récentes de courant et de matières en suspension, menées par l'EPTB d'une part et par EDF d'autre part, ont permis de mieux décrire et comprendre les conditions environnementales qui prévalent pour la dynamique des sédiments en Rance (§ 12).

La mesure des matières en suspension près de la pointe de la Jument a montré qu'en aval du barrage il y avait très peu de remises en suspension par la marée en dehors des périodes de forte vive eau (Fig. 48), et que les eaux étaient claires la plupart du temps, sauf lorsque l'agitation par les vagues est grande : en général ces vagues résultent de la propagation de houles du large, et peuvent aussi coïncider avec des vents d'ouest/nord-ouest assez forts (§ 12, Fig. 48, 49 & 52).

A l'intérieur du bassin, les eaux restent claires d'une manière générale. Une mesure dans la cluse de port St-Jean a révélé des resuspensions régulières en vive eau, mais aussi en période de revif (lorsque l'amplitude de marée augmente) souvent (mais pas toujours) simultanément à des épisodes de niveau très bas qui sont pratiqués lors de cette phase d'augmentation de l'amplitude de marée (§ 12, Fig. 49). Surtout, lors d'un niveau bas exceptionnel pratiqué fin octobre 2020, une augmentation significative des suspensions a été relevée, aussi bien à la cluse, donc assez en amont, qu'en aval du barrage à la pointe de la Jument, alors qu'il y avait peu de vagues et que l'amplitude de marée était moyenne (Fig. 49 & 50). Le changement de régime de l'UMR pour générer ce niveau très bas a eu pour conséquence d'accroître significativement les courants dans le bassin, générant des resuspensions. La présence simultanée de suspensions accrues à la pointe de la Jument peut résulter d'une dispersion partielle des sédiments déplacés dans le bassin, ou d'une resuspension locale provoquée par l'augmentation ponctuelle des débits à travers le barrage au cours de l'opération. De façon générale, il est frappant de constater la simultanéité des variations de matières en suspension, dans le bassin et en aval (Fig. 49, 52 & 53).

La modélisation mathématique permet de visualiser la distribution spatiale des matières en suspension (MES) : comme décrit dans les années 90, un maximum de MES est constaté en amont de Mordrec, mais les simulations montrent que, en raison des courants de marée plus intenses sans barrage marémoteur, les MES seraient beaucoup plus importantes (pour une disponibilité en sédiment identique) et leur maximum localisé plus en aval (Fig. 55). Le fonctionnement de l'UMR entraîne une

réduction des MES et leur confinement vers l'amont (dans le secteur du moulin du Prat, pour un débit moyen de la Rance).

Enfin, la relation entre les vagues au large et l'arrivée de matières en suspension à proximité du barrage se retrouve de façon très claire dans le bassin, même en amont à hauteur de la cluse (Fig. 52). En outre, les enregistrements à l'intérieur du bassin ont montré que les agitations générées localement par le vent (clapots) étaient susceptibles de provoquer des resuspensions dont on retrouvait l'empreinte dans la cluse (Fig. 52).

La mesure simultanée du courant et des matières en suspension a permis d'estimer un flux de sédiment fin dans la cluse de Port St-Jean, à proximité du fond (§13, Fig. 56). Si des flux alternés de flot et de jusant sont perceptibles en vive eau, le flux net reste toujours orienté vers l'amont (le sud). Il est négligeable en morte eau, augmente significativement avec l'amplitude de marée, mais il est aussi très marqué lors des épisodes de niveau très bas ; ce flux de sédiment fin vers l'amont est amplifié en présence de mer de vent locale et fortement accentué lorsque les matières en suspension à l'extérieur, favorisées par l'occurrence de tempêtes au large (fortes vagues/vents), sont élevées.

En rapprochant les bilans sédimentaires estimés d'après les différentiels bathymétriques et les mesures locales de flux, on peut considérer que l'ordre de grandeur du flux de sédiment fin entrant dans le bassin maritime depuis le large serait de 100 000 m<sup>3</sup>/an, et que celui transitant dans la cluse serait de 50 000 m<sup>3</sup>/an vers l'amont (§ 13).

Ces transferts de sédiments peuvent entraîner des sédimentations locales. Le flux net de sédiment vers l'amont observé dans la cluse de Port St-Jean est cohérent avec les fortes sédimentations observées en amont du bassin. Des mesures fines de variations du niveau de vase réalisées sur le banc de la Moinerie ont révélé des dépôts de l'ordre du cm lors d'épisodes de niveau très bas et de 2 cm autour d'une vive eau exceptionnelle (Fig. 57).

#### **1.4 Apports des modèles hydro-sédimentaires**

Deux modèles hydro-sédimentaires complémentaires ont été développés pendant le plan de gestion expérimental. Leur exploitation dans des configurations-tests aident à la compréhension du fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin maritime de la Rance et à mettre en évidence le rôle du barrage et de l'UMR (§ 14).

En prenant en compte des vagues de façon très schématique, les simulations montrent le rôle potentiel des vagues dans la redistribution des sédiments fins au sein du bassin (§ 14.1 à 14.3, Fig. 58 à 61).

Les résultats de modélisation sont très dépendants de la disponibilité initiale du sédiment qui est encore mal connue. Avec un stock de vase uniforme en condition initiale, et sans l'action des vagues, le modèle reconstitue un « nettoyage » des chenaux au profit d'une sédimentation répartie dans la partie centrale du bassin et en amont (Fig. 58) ; sous l'action des clapots, les sédiments sont redistribués, avec un transfert vers l'amont plus net (le secteur est abrité) et des secteurs de dépôt plus localisés, et conformes à ceux observés pendant la dernière décennie (Fig. 59). S'il n'y avait pas de barrage, les courants de marée plus forts remanieraient plus de sédiment, générant alors une sédimentation amont supérieure, mais aussi et surtout une dispersion des sédiments vers le large. Cela se perçoit bien sur les flux résiduels à travers diverses sections de l'estuaire (Fig. 60 & 61) : avec le fonctionnement actuel de l'UMR, au niveau du barrage, on observe d'abord un export de sédiment vers l'aval, provoqué par la resuspension rapide des sédiments initialement placés dans le chenal, mais

ensuite le flux à travers le barrage est orienté du large vers le bassin, à un rythme d'environ 50 000 t/an, soit une quantité de vase de l'ordre de 100 000 m<sup>3</sup>/an (§ 14). Sans barrage, et avec prise en compte des vagues, les remises en suspension dans le bassin seraient nettement supérieures et à la fois les flux vers l'amont dans le bassin amont et vers le large au niveau du barrage seraient renforcés (Fig. 61).

Une simulation sans stock initial de sédiment a permis d'évaluer les flux entrant dans le bassin maritime, soit à partir de la Rance en amont, soit venant du large où une concentration en MES de 10 mg/l, d'ordre de grandeur réaliste mais à confirmer, a été imposée (§ 14.4, Fig. 62). Dans une telle configuration, les flux de sédiment fin sont tous orientés vers l'amont dans le bassin, décroissant depuis le barrage jusqu'à Mordreuc du fait de la sédimentation, à un rythme de 70 000 t/an (de l'ordre de 140 000 m<sup>3</sup>/an) au niveau du barrage (Fig. 63). Une simulation dans les mêmes conditions mais sans barrage marémoteur conduit à des entrées de sédiment fin dans l'estuaire nettement plus faibles, de l'ordre de 48 % de la valeur avec barrage et UMR : cette simulation nous donne une indication de la contribution de l'usine marémotrice à la sédimentation de vase observée dans le bassin maritime. Les apports amont sont quant à eux beaucoup plus faibles (leur quantification précise n'est pas connue, faute d'information disponible sur la concentration en MES de la Rance au Châtelier). A noter que dans ces simulations sans barrage, un dépôt de vase est constaté en amont, à proximité de l'écluse du Châtelier : de fait, ces simulations ont été effectuées avec une limite de remontée de la marée à cet endroit, ce qui n'était pas vraiment le cas avant la construction du barrage marémoteur (la cote du barrage de Lyvet, inférieure à ce qu'elle est maintenant, autorisait un débordement par marée de vive eau, générant des courants supérieurs dans le secteur amont, autour du pont de Lessart).

Une crue réaliste de la Rance pendant 4 jours a également été simulée (§ 14.5 et Fig. 64). Le modèle montre une sensibilité des processus sédimentaires dans le bief en amont de Mordreuc : la sédimentation amont est réduite, compensée par une moindre érosion ou un dépôt relatif au niveau du chenal à hauteur de Mordreuc, indiquant l'étendue potentielle d'un effet de chasse à l'écluse du Châtelier.

Enfin, l'effet d'une extraction massive de sédiment en amont du bassin (1,8 M m<sup>3</sup> correspondant à 1 m d'épaisseur de sédiment en amont de Plouër-sur-Rance, et se traduisant par un changement bathymétrique de la même épaisseur) sur la sédimentation ultérieure dans le bassin a été testé (§ 14.6). La redistribution d'une couche initiale de vase dans le bassin est à peu près inchangée par rapport à celle obtenue sans modification bathymétrique (Fig. 65), mais le taux de sédimentation amont (dans le secteur préalablement dragué) est accru d'environ 30 %, alors que le flux à travers le barrage ne change pratiquement pas (Fig. 66).

## 2- Suggestions pour le plan de gestion des sédiments de la Rance

L'examen des différentiels bathymétriques révèle que si la mise en place du barrage a entraîné une érosion près des rives du bassin maritime et une sédimentation substantielle en amont, la tendance depuis une dizaine d'années est une sédimentation annuelle de l'ordre de 120 000 m<sup>3</sup>, essentiellement répartie sur le bas estran et en zone subtidale (jamais découverte par la marée). Cette sédimentation est distribuée pour 56 % en amont de la cluse de port St-Jean, dont près de la moitié en amont de la pointe du Chêne Vert. C'est dans ce secteur que la sédimentation est la plus visible. Ce phénomène est classique en estuaire, en particulier dans les rias bretonnes, mais c'est son rythme actuel qui peut être préoccupant. Cette sédimentation toujours actuelle, à laquelle participe l'usine marémotrice, peut être reliée à une alimentation du bassin maritime par des sédiments marins, dont l'apport net annuel est estimé à 100 000 m<sup>3</sup> environ.

Le constat global que fait le Conseil Scientifique est une sédimentation vaseuse en cours dans le secteur amont du bassin maritime. Cette sédimentation est accentuée par le fonctionnement de l'usine marémotrice (de l'ordre d'un facteur 2 d'après certaines simulations numériques). Elle semble avoir marqué une rupture avec la période d'avant barrage, mais cela est aussi provoqué par la limitation de la marée en amont du Châtelier, qui a été renforcée par le rehaussement du barrage de Lyvet. Auparavant, il est probable que des vases d'origine marine remontaient l'estuaire plus en amont, comme dans beaucoup d'estuaires naturels. Vouloir retrouver une configuration de l'amont semblable à celle du milieu du XX<sup>ème</sup> siècle supposerait de restituer un volume oscillant de marée au niveau de Lyvet. Cependant, l'import annuel de sédiments fins depuis la mer, tel que déduit du différentiel bathymétrique récent, reste un sujet de préoccupation. La nouvelle bathymétrie acquise pendant l'hiver 2023 devrait permettre de confirmer ou de réévaluer le taux de sédimentation actuelle et le plan de gestion des sédiments devra en tenir compte. Compte tenu de l'accentuation du piégeage de particules fines par le fonctionnement de l'usine marémotrice, le Conseil Scientifique recommande d'intervenir pour limiter au maximum les apports futurs.

L'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire, telle qu'elle résulte des mesures récentes dans l'estuaire et des exercices de modélisation, conduit le Conseil Scientifique à formuler des suggestions pour le plan de gestion des sédiments de la Rance. Il s'agit d'actions concrètes autour de 5 leviers principaux, soutenues par la recommandation d'études complémentaires de modélisation, de la mise en place d'un suivi portant sur l'hydro-sédimentaire et sur la qualité biologique du milieu, et complétées par des considérations financières devant intégrer les coûts environnementaux.

Les leviers considérés sont les suivants :

Levier N°1 : réduire les apports de sédiments fins.

Levier N°2 : tenter de modifier le fonctionnement de l'usine marémotrice, en visant d'une part une atténuation de l'asymétrie actuelle des courants de marée et d'autre part une variation plus forte du marnage dans le bassin, en intervenant aussi sur les niveaux hauts.

Levier N°3 : maintenir l'exploitation du piège du Lyvet et de l'ICPE de la Hisse, et « gérer » la sédimentation dans le bassin amont en exploitant les possibilités de chasse au Châtelier.

Levier N°4 : réaliser des extractions localisées de vase pour maintenir certains usages.

Levier N°5 : envisager une extraction massive de vase, sous certaines conditions.

Les sections suivantes reprennent successivement ces leviers, qui doivent être vus comme des possibilités d'actions complémentaires les unes des autres (*i.e.* il est tout à fait recommandé de mobiliser simultanément plusieurs leviers).

### **2.1 Levier N°1 : réduction des apports de sédiment fin**

Les mesures de turbidité à la cluse et en aval du barrage ont montré que l'entrée de sédiments fins venant de la mer se produit essentiellement au moment des « tempêtes ». Ce sont les vagues qui provoquent des resuspensions de sédiments vaseux dans certains secteurs de la baie de St-Malo ou plus au large. Ces vagues peuvent être liées à une tempête locale ou à des houles se propageant dans la Manche. Des acteurs locaux (pêcheurs) indiquent que les eaux turbides en baie de St-Malo sont principalement liées à des tempêtes d'ouest. Il conviendra d'analyser finement les 6 mois de turbidité enregistrés devant la pointe de la Jument (entre Dinard et St-Malo) pour préciser les conditions météorologiques majoritairement responsables des épisodes turbides (tempête d'ouest-nord/ouest, tempête de nord et/ou houle longue d'ouest) afin d'envisager de réduire, voire empêcher les entrées d'eau à travers le barrage (vannes et/ou turbines) en flot. Déjà les valeurs moyennes sur 24 h des MES en aval du barrage ont pu être corrélées au carré de la hauteur des vagues au large (Cézembre) moyennées dans la journée précédente (§15.1, Fig.67), nous permettant de mettre en relation le flux de sédiment marin entrant dans le bassin à la hauteur des vagues au large. De nouvelles mesures acquises très récemment dans le cadre de l'opération de dragage au Chêne Vert devraient nous permettre de comparer les turbidités à l'amont et à l'aval du barrage pour mieux déterminer le flux net de sédiment à travers le barrage.

Les prévisions météorologiques de ces événements sont réalisables jusqu'à près de 8 jours avant, laissant un laps de temps réduit mais raisonnable pour programmer le fonctionnement de l'usine en conséquence afin de stopper les entrées d'eaux dans le bassin pendant les épisodes de tempête. Les volumes d'eau entrant étant maximums en vive eau, la mesure sera d'autant plus efficace si elle est exécutée en vive eau. Enfin, la probabilité de tempête est naturellement plus forte en saison hivernale : c'est donc pendant cette saison que les périodes de réduction des échanges mer/bassin efficaces pour réduire les apports de sédiment seront les plus nombreuses. Ces périodes concernent nécessairement des marées entières.

Cette mesure a naturellement un coût, puisqu'elle contrarie la production électrique à chaque marée concernée, d'autant plus que la production électrique est supérieure en vive eau, et que le besoin d'électricité est plus grand en hiver. Des premières simulations utilisant le modèle MARS de la Rance (§15.3) ont montré que 21 % de l'import de sédiments depuis la mer pourrait être évité en fermant le bassin pendant 9 marées au cours d'une période de 4 mois, entraînant une perte de production électrique de 9.145 GWh, soit environ 5,5 % de la production de l'usine marémotrice pendant la même période. Des tests complémentaires consistant à modifier le fonctionnement de l'usine marémotrice sans complètement fermer le bassin montrent qu'il est possible de réduire l'entrée des sédiments lors des tempêtes tout en ayant un impact très réduit sur la production électrique : par exemple en supprimant le survirage et en raccourcissant le turbinage direct d'1 heure, on réduirait l'entrée de sédiments de 5,8 % pour une réduction de la production électrique de 0,46 %.

Ce premier levier est potentiellement l'un des plus efficaces, puisque l'apport de sédiment fin par la mer est largement dominant. En effet, pour un même ordre de grandeur des concentrations en suspension en Rance fluviale et en mer littorale, l'écart considérable entre le débit fluvial amont et les débits de flot ou de jusant au barrage, très largement supérieurs, fait que les apports sédimentaires

par la mer sont très largement supérieurs. Ce levier est aussi le plus séduisant d'un point de vue environnemental, puisqu'il cherche à corriger la source de sédiment responsable de la sédimentation actuelle, et qu'il évite une intervention sur les fonds marins, susceptible de dégrader leur qualité environnementale. En évitant l'introduction en excès de sédiments dans la Rance, l'application de ce levier rendrait la production électrique de l'UMR beaucoup plus satisfaisante pour l'environnement.

Du point de vue « gestion des sédiments », c'est donc une piste d'action pertinente. Les modalités pratiques d'application et en particulier le niveau d'eau recommandé dans le cas d'une fermeture complète des vannes et turbines n'ont pas été précisément étudiés. Ces modalités et leurs conséquences en termes environnementaux et surtout financiers sont naturellement à étudier avec EDF, gestionnaire de l'usine marémotrice, mais si la fermeture du bassin devait être complète, il semble préférable de le faire au moment de l'étalement de niveau haut, pour des raisons écologiques : en effet, des organismes habitués à vivre en milieu alternativement inondé et exondé supportent plutôt mieux une immersion prolongée qu'une émergence prolongée.

## ***2.2 Levier N°2 : recherche d'un fonctionnement alternatif de l'usine marémotrice***

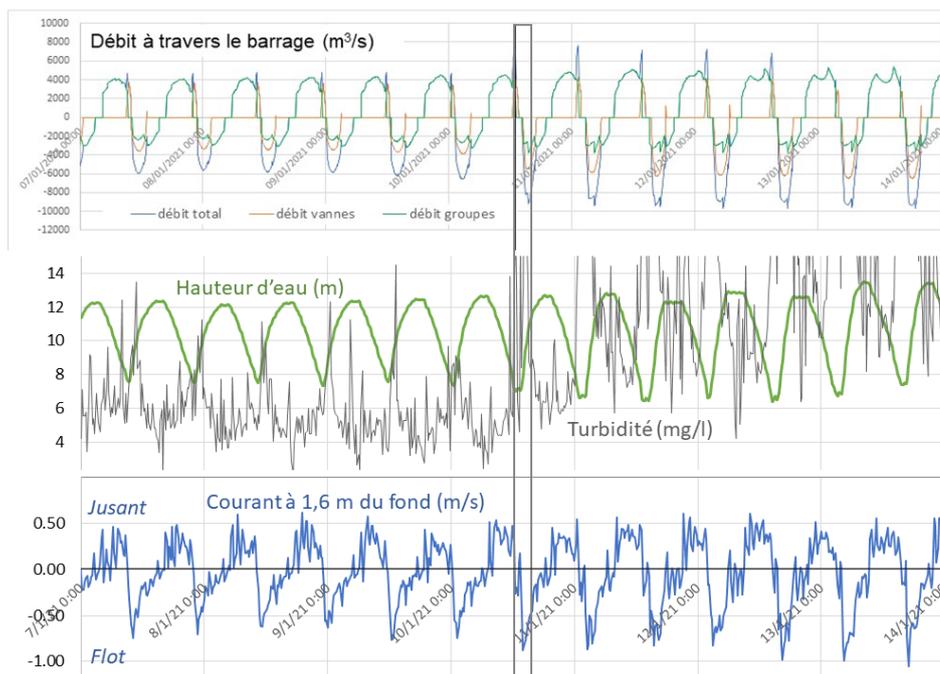
Les remises en suspension puis le transport des sédiments fins dans le bassin sont directement liés aux courants de marée. Ceux-ci ont été fortement modifiés par l'usine marémotrice, entraînant un allongement des étales favorable à la sédimentation, une forte réduction des courants également favorable à la sédimentation et une accentuation de la suprématie du flot sur le jusant (qui privilégie donc le transport de sédiment vers l'amont). Les observations montrent que les maximums de courant (en flot comme en jusant) sont extrêmement sensibles aux séquences d'ouverture des vannes et des groupes bulbes, avec un temps de réaction très court, même en amont du bassin.

S'il paraît difficile d'intervenir sur la durée des étales qui est liée au besoin de générer un dénivelé suffisant entre le bassin et la mer afin de disposer d'une charge hydraulique pour produire de l'électricité lors du turbinage, on peut chercher d'une part à renforcer les courants pour favoriser des remises en suspension, et d'autre part à atténuer l'asymétrie entre maxima de flot et de jusant pour réduire le transport vers l'amont. Pour renforcer les courants, il « suffit » d'accroître le marnage dans le bassin.

Des premiers tests sur modèle mathématique ont montré qu'il était possible d'augmenter l'amplitude de marée en abaissant les niveaux de basse mer sans modifier les niveaux hauts et en sacrifiant une partie de la production électrique pendant quelques marées. Ces premiers tests ne modifiaient guère l'asymétrie flot/jusant, de telle sorte qu'ils génèrent effectivement de la resuspension (augmentation des vitesses), mais que les sédiments ainsi remobilisés étaient transportés vers l'amont. Cela pourrait être un but recherché, par exemple en « comptant » sur l'efficacité du piège du Lyvet (voir section suivante), ou de nouveaux pièges à mettre éventuellement en œuvre, pour ensuite extraire le sédiment accumulé en amont : on dispose donc d'un levier pour réduire la sédimentation constatée dans les secteurs subtidiaux ou de bas-estran dans l'ensemble de l'estuaire, en accentuant le transfert des vases vers le piège amont.

Mais il est aussi tentant de chercher à réduire simultanément l'asymétrie flot/jusant et de viser une évacuation partielle des sédiments hors du bassin. Actuellement, les maximums de flot se produisent systématiquement au début du flot, juste après basse mer, et sont obtenus par l'ouverture des vannes et le turbinage, comme le montre la figure ci-après. Une progressivité ou un délai dans l'ouverture des vannes pourrait atténuer le pic de flot initial, d'autant plus que lorsque le niveau monte dans le bassin,

les sections d'écoulement augmentent et un même débit à travers le barrage génère un courant plus faible. Cette piste est d'ailleurs à explorer indépendamment de l'augmentation du marnage, pour éventuellement une application plus généralisée.



**Figure : lien entre le débit à travers le barrage (simulation) et le courant (mesure) dans la cluse.**

Depuis l'automne 2022, une commission CS/EPTB/EDF s'est réunie 5 fois pour préciser les contours d'un fonctionnement alternatif, ce qui a permis de rappeler les leviers d'action (ouverture de quelques vannes pendant le turbinage de jusant, limitation du nombre de vannes à certains moments du flot, consignes de niveaux dans le bassin...) et de définir des indicateurs de performance des modes de fonctionnement alternatif évaluables à partir des résultats du code EDF de programmation de l'UMR (chapitre 16). Ces indicateurs concernent les niveaux hauts et bas dans le bassin maritime, les courants déduits des débits à travers le barrage<sup>2</sup>, la probabilité de remaniement sédimentaire en flot et au jusant, ainsi que leur efficacité potentielle, et surtout l'asymétrie entre flot et jusant.

Une première série de tests a donc été réalisée avec le code EDF de programmation de l'usine (§16.3 & 16.4). Comme l'efficacité des courants de marée vis-à-vis de la dynamique sédimentaire est très supérieure en vive eau, une période de 4 jours a été considérée. Parmi la cinquantaine de scénarios étudiés pour l'instant, une dizaine a montré une amélioration sensible des indicateurs pour une perte de production électrique de l'ordre de 2 à 5 % (§16.4). Si ces fonctionnements alternatifs étaient adoptés pour toutes les périodes de vive eau, mais seulement pour ces périodes, cela représenterait une perte de 0,9 à 2,2 % de la production annuelle de l'UMR. Naturellement, il reste à vérifier la pertinence des indicateurs en réalisant des tests utilisant la modélisation hydro-sédimentaire<sup>3</sup> : cela devrait être possible à partir de mi-2023.

La piste poursuivie jusqu'à maintenant vise prioritairement à réduire l'asymétrie de la

<sup>2</sup> Une relation linéaire approximative entre les courants dans le bassin et les débits à travers le barrage, dépendant du niveau d'eau dans le bassin, a pu être établie à partir des résultats du modèle MARS (§16.2).

<sup>3</sup> La vérification par des tests *in situ*, en pratiquant temporairement ces fonctionnements alternatifs, paraît compliquée parce qu'il sera très difficile d'observer des différences à partir d'observations (sauf en ce qui concerne les courants, mais c'est là que la modélisation mathématique est la plus performante et tout à fait fiable...)

marée, tandis que d'autres tests concernent son amplification. Pour y parvenir, les premiers tests de fonctionnement alternatif cherchaient à augmenter les courants en abaissant les niveaux bas et souvent en conservant les niveaux hauts. Mais il serait intéressant d'augmenter aussi les niveaux hauts à plusieurs titres :

(1) pour un même accroissement du marnage et donc des courants, si on augmente les niveaux hauts, on abaisse moins le niveau de basse mer, et on atténue donc le pic de flot,

(2) pour des questions de sécurité, il est préférable de ne pas générer des courants forts dans le secteur des vannes autour d'une basse mer abaissée, car l'étendue des zones alors découvertes incite à la pêche amateur malgré les interdictions d'usage,

(3) l'augmentation des niveaux hauts dans les anses conduit à inonder partiellement les ceintures végétales non halophiles préexistantes (par exemple les roselières), favorisant ainsi une reconquête de la partie supérieure des herbues au dépend de la végétation non halophile actuelle. L'inondation plus fréquente de ces herbues compenserait pour partie leur régression sous l'action des clapots, en favorisant le dépôt de sédiments vaseux. A noter que cette inondation épisodique permet de régénérer les chenaux secondaires qui assurent le drainage à travers la haute slikke (haut estran vaseux), où des envasements récents ont pu être constatés.

Plus généralement, il y aurait intérêt à faire varier les niveaux hauts en se rapprochant des variations naturelles, ce qui réduirait le temps d'action des vagues et les érosions qu'elles entraînent [pour rappel, les vagues de clapot n'ont une action significative que pour une tranche réduite de hauteur d'eau (typiquement, de l'ordre du mètre) : si la longue étale de pleine mer (niveau haut) se produit trop fréquemment au même niveau, l'action des vagues agira principalement sur le sédiment dont l'élévation se situe 1 m en-dessous de ce niveau ; au contraire, plus les niveaux hauts varient, plus l'action des vagues sera étalée sur l'estran...]. Enfin, le renforcement de la variabilité des niveaux hauts conduira à une diversification des habitats, ce qui ne peut qu'être favorable à la biodiversité.

Le CS est conscient que le nouveau référentiel de niveaux adopté en 2020 résulte d'une consultation large et longue, et que sa modification pourrait entraîner un nouveau cycle de débats. Surtout, la limitation actuelle à 12,30 m est motivée par un certain nombre de contraintes liées à des aménagements récents (par exemple : rejets de stations d'épuration, cheminements pédestres ou peut-être cyclables...) ou à la stabilité de berges anciennes (endiguements de moulins à marée, perrés, par exemple). Mais il ne faut pas se cacher que tout plan de gestion a un coût, et qu'il vaut mieux procéder à une réfection de digue fragilisée ou à des modifications de hauteurs de points de rejets plutôt que de financer un supplément de dragage. Rappelons également que le niveau naturel des pleines mers les plus hautes dépassait parfois 13,50 m avant le barrage, voire 13,70 m en raison de l'amplification de la marée ...

Par ailleurs, que l'on modifie les niveaux bas ou les niveaux hauts, le positionnement des séquences alternatives dans le cycle de marée (morte eau / vive eau) mérite une attention particulière. Dans beaucoup de cas, il peut être plus efficace de modifier le régime de marée lors de la vive eau. Mais c'est aussi la période la plus productive en électricité : la recherche d'un compromis peut être nécessaire. Si le choix se porte sur des marées d'amplitude intermédiaire, il faut se poser la question d'une préférence éventuelle pour une période de revif (amplitude de marée croissante) ou de déchet (amplitude décroissante). La première période est suivie d'une vive eau avec courants forts, tandis que la seconde est suivie d'une morte eau. Par exemple, il s'avère (Figs. 1 et 8) que les séquences de niveau bas ou très bas (sans accroissement du marnage) sont programmées en revif aujourd'hui : or les mesures faites dans la cluse et les simulations par modèle mathématique montrent que les cycles de niveau (très) bas entraînent des remises en suspension, et *in fine* un transit des particules renforcé

vers l'amont. Il est probable que si ces séquences de niveau (très) bas étaient pratiquées en déchet (pour une amplitude de marée identique) le transport des suspensions serait amorti plus rapidement, et la sédimentation amont diminuée. Il y a donc lieu de revisiter la programmation des séquences de niveau (très) bas, en exploitant la modélisation hydro-sédimentaire.

Les bénéfices attendus de ce levier ne sont pas complètement quantifiés, faute d'expérimentation ou de modélisation aboutie. Une expérimentation sur un laps de temps court ne permettra pas d'observer un bénéfice en termes de sédimentation, mais plutôt une faisabilité technique. Au contraire, et sous réserve de validation préalable, une modélisation mathématique peut permettre d'évaluer le gain sur les bilans sédimentaires. Pour faire aboutir ce levier, il est indispensable de procéder à de telles simulations, le modèle hydro-sédimentaire d'EDF devant pouvoir être mobilisé à cette fin, après validation complète. On peut espérer progresser sur ce sujet d'ici la fin de l'année 2023.

Il est probable que la recherche d'un moment plus favorable pour l'ouverture des vannes, dont l'intérêt a été décrit ci-avant, ne soit pas compatible avec les contraintes actuelles de fonctionnement des vannes. Le mode de fonctionnement de ces dernières, qui date de la construction du barrage, ne permet pas leur ouverture ou fermeture quelle que soit la chute d'eau entre mer et bassin. Pour remédier à cette contrainte, une modification des vannes est envisageable, pour un coût estimé par EDF entre 1 et 2 M€ par vanne. Une analyse plus fine par EDF devrait permettre de préciser ce montant et d'évaluer la pertinence de procéder à cette modification, soit pour l'ensemble des 6 vannes (coût entre 6 et 12 M€) soit pour certaines d'entre elles seulement. Par exemple, plusieurs scénarios de fonctionnement alternatif intéressants vis-à-vis des indicateurs d'asymétrie comportent une ouverture d'une ou plusieurs vannes pendant le turbinage direct en jusant : or c'est à ce moment-là que la chute est la plus élevée, une rénovation des vannes concernées serait donc nécessaire.

Il est clair que ce levier d'action ne pourra aboutir qu'après une exploitation fine de la modélisation hydro-sédimentaire et après l'acceptation claire de ses principes par EDF. Depuis octobre 2022, une dynamique très positive a été initiée avec EDF (collaboration EDF/CS/EPTB) : en raison des enjeux et du potentiel du levier N°2, qui comporte encore des incertitudes, il semble nécessaire que cette dynamique se démultiplie dans les mois qui viennent, de façon à consolider ce levier ou au contraire le modérer, pour permettre de le prendre en compte dans sa bonne dimension dans la proposition de plan de gestion pérenne.

Le CS attire l'attention sur la possibilité de mixer les leviers 1 et 2 : il s'agirait par exemple de privilégier les périodes de tempête au large pour adopter un mode alternatif performant vis-à-vis de la dynamique sédimentaire au prix d'une dégradation accrue, mais temporaire, de la production électrique : par exemple *via* une réduction de l'amplitude de marée dans le bassin, ou une suppression, voire une inversion provisoire de l'asymétrie flot/jusant.

Les leviers 1 et 2 ont en commun l'idée d'intervenir sur le fonctionnement de l'usine marémotrice, dont *a priori* la production électrique a fait l'objet d'une optimisation de la part d'EDF. Les leviers 1 et 2 sont susceptibles de réduire cette production, tandis que les charges de maintenance et de fonctionnement de l'usine resteront identiques, ce qui entraînera une augmentation de coût du kWh produit par l'usine de la Rance. Le CS n'a pas compétence pour redéfinir le coût juste de l'électricité produite par le barrage, mais s'étonne que le prix de vente qui lui soit affecté ne soit pas aligné sur celui des énergies renouvelables telles que l'éolien ou le photovoltaïque. La source d'énergie de l'UMR est entièrement décarbonée et renouvelable, avec même l'avantage d'être entièrement prédictible : elle apparaît donc comme une énergie « verte », et il serait dommage que l'envasement qu'elle est susceptible de renforcer ne la fasse percevoir comme une énergie « vert kaki ». Le Conseil Scientifique considère que l'énergie produite par l'usine de la Rance devrait bénéficier de la même tarification que

les hydroliennes ou les éoliennes, même s'il ne s'agit pas d'une conception nouvelle de production d'énergie renouvelable : notre démarche consiste justement à la rénover pour qu'elle devienne tout à fait « verte », et une tarification favorable encouragerait à l'adopter. Sur ce sujet, le Conseil Scientifique regrette la frilosité du gouvernement français, et rejoint les nombreuses demandes des acteurs et décideurs locaux qui vont dans ce sens, même si cela devrait nécessiter la mise en oeuvre d'un avenant au cahier des charges de la concession de l'UMR à EDF qui arrivera à échéance en 2043. Il est de toute manière possible que les fonctionnements alternatifs de l'UMR envisagés pour les leviers 1 et 2 soient aussi à intégrer dans un avenant au cahier des charges de la concession.

### **2.3 Levier N°3 : maintien du piège du Lyvet et gestion de la sédimentation amont**

Le dispositif constitué par l'association du piège du Lyvet et du centre de transit ICPE La Hisse est fonctionnel, et a montré depuis une vingtaine d'années son efficacité. En particulier ce piège, d'une capacité d'environ 80 000 m<sup>3</sup> se remplit rapidement (de l'ordre d'une année) et aurait une capacité de piégeage potentiel de 50 à 100 000 m<sup>3</sup>/an, à condition d'être vidé dès qu'il est « plein ». La limitation du dispositif tient à la nécessité de prolonger la décantation dans l'ICPE pendant 2 à 3 ans pour permettre une désalinisation du sédiment par ressuyage pour une valorisation ultérieure, et surtout à la capacité du territoire à écouler le volume de sédiment ainsi reconditionné.

Le projet européen ENO *Suricates* (2021-2023 sur le territoire de la Rance) dont l'EPTB est partenaire depuis 2021, en cours de finalisation, doit permettre de préciser cette capacité d'« absorption » des vases (éventuellement complétées par des sables selon l'usage envisagé) par le territoire. Les résultats encore provisoires indiquent qu'elle dépasserait les apports annuels de sédiments selon leur estimation actuelle. Naturellement, la notion de territoire reste floue, puisque son extension dépend du coût de transport (intégrant le désagrément entraîné) que l'on est prêt à consentir. Cet aspect du problème fait partie des interrogations traitées par le projet *Suricates*.

La filière agricole, déjà expérimentée en Rance (épandage de sédiments dessalés), semble la plus prometteuse en volume, et donc à même de définir le volume de base pour la valorisation des sédiments (ce qui bien sûr n'exclut pas d'autres utilisations possibles : merlons, remblais de chaussées, fabrication de granulats, céramiques ...). Aujourd'hui, on peut compter sur une capacité potentielle minimum de 100 000 m<sup>3</sup> tous les 3 ans, compatible avec une vidange du piège du Lyvet tous les 2,5 ans et un temps de ressuyage du même ordre pour désaliniser et concentrer les vases. Ce débouché entraînerait naturellement un transport extensif par camions entre l'ICPE et les champs à amender, dont l'acceptabilité par la population locale doit être vérifiée.

Le CS recommande donc de maintenir le dispositif *Lyvet/La Hisse*, en cherchant à optimiser son fonctionnement par un suivi régulier (1) de la salinité des sédiments stockés et (2) du rythme effectif de remplissage du piège après vidange.

Puisque les études en cours montrent que la capacité du territoire à réutiliser les sédiments est supérieure, il devient possible (1) soit de tenter de raccourcir le temps de transit à 2 ans (sous réserve d'obtenir un sédiment suffisamment dessalé pour une utilisation agricole), portant la capacité du dispositif actuel à 50 000 m<sup>3</sup>/an, (2) soit de chercher à étendre les surfaces de l'ICPE de La Hisse pour mieux profiter de l'efficacité du piège, en visant toujours une capacité de 50 000 m<sup>3</sup>/an, voire supérieure. Il devient même envisageable de mettre en place un deuxième piège, comme cela sera évoqué dans l'exposé du levier N°5. L'optimisation du site de transit de la Hisse mérite aussi une recherche sur les possibilités d'accélérer le drainage des matériaux déposés, en s'appuyant sur

d'autres expériences en France ou à l'étranger. Il peut s'agir d'un rinçage forcé en utilisant l'eau douce disponible en quantité dans le bief amont (Léhon-Châtelier) en période hivernale. La question se pose d'une possible utilisation de cette eau, à proximité du piège du Lyvet, pour refouler les sédiments vers l'ICPE de La Hisse lors de la vidange du piège (cf. proposition de M. Malglaive lors du COPIL de décembre 2022), mais le CS n'a pas connaissance de la faisabilité réelle d'une telle pratique. Cela réduirait notablement la salinité des sédiments déposés à La Hisse, ou l'accélérerait dans le cas d'un rinçage forcé, et raccourcirait donc le temps de séjour nécessaire pour leur valorisation. Des expériences mériteraient d'être réalisées pour une partie du sédiment extrait lors de la prochaine vidange du piège de Lyvet.

L'exploitation du dispositif *piège du Lyvet / ICPE La Hisse* devrait pouvoir être accompagnée d'une stratégie de gestion des sédiments en amont de la pointe du Chêne Vert. D'une part, une sédimentation sur les bancs latéraux en bordure du chenal est observée dans la période 2010/2018, malgré le piégeage de vase au Lyvet et l'extraction pratiquée en 2014-2015. D'autre part, les calculs récents faits avec le modèle hydro-sédimentaire d'EDF montrent un effet de chasse intervenant jusqu'à Mordreuc lorsqu'un débit amont de crue ( $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ) est pratiqué pendant  $2 \times 2$  jours (§ 14.5). En outre, les mesures altimétriques faites sur le banc de la Moinerie (§ 13, Fig. 57) semblent indiquer une légère érosion simultanée à un débit de crue intervenant pendant moins de 2 jours. Il est admis que les sédiments ainsi remaniés se re-déposent immédiatement en aval, et sont susceptibles de retransiter très vite vers l'amont du bassin maritime, ce que notre connaissance réactualisée de l'hydrodynamique confirme. Mais si ce processus se produit lorsque le piège du Lyvet est à son niveau bas, moment au cours duquel il est plus efficace, il est probable qu'*in fine* le sédiment érodé sur les banquettes latérales de vase par effet de chasse se retrouve piégé au Lyvet. Dans ce cas, la combinaison chasse en amont / vidange du Lyvet est susceptible de permettre un meilleur équilibre sédimentaire global du bief amont du bassin maritime.

Il est donc proposé de réexaminer le potentiel de chasse en amont pour optimiser la gestion des dépôts dans tout le secteur Châtelier / Mordreuc, en s'aidant du modèle hydro-sédimentaire EDF (qui dispose d'une résolution spatiale de 5 m, suffisante), en ajustant les heures de lâcher pour que la chasse se produise lorsque les banquettes de vase latérales sont partiellement immergées. Parallèlement les possibilités de stockage d'eau dans le bief amont et de relargage par les vannes seraient à réexplorer [sur la base d'un bief amont Léhon/Châtelier d'une surface de l'ordre de  $1.2 \text{ km}^2$ , une variation de niveau de 30 cm en 1 heure permettrait de générer un débit de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  : il faudrait en particulier vérifier que l'écluse du Châtelier et les vannes adjacentes permettent un tel écoulement ; à noter qu'un tel effet de chasse aurait sans doute une fonction d'érosion d'une partie des sédiments déposés dans le secteur aval du bief Léhon/Châtelier].

On peut espérer que l'association des leviers 1 et 2 (réduction de l'alimentation aval ; fonctionnement alternatif de l'UMR) et 3 (exploitation du piège du Lyvet associé à une réutilisation à terre des sédiments et complétée par des effets de chasse au Châtelier) permette d'atteindre un équilibre sédimentaire ou *a minima* une réduction très forte de la sédimentation dans le secteur amont, là où celle-ci est spectaculaire.

#### **2.4 Levier N°4 : réaliser des extractions localisées de vase pour maintenir certains usages, ou à finalité patrimoniale**

Quelles que soient l'applicabilité et l'efficacité des leviers 1, 2 et 3, il est probable qu'il restera toujours des secteurs où un envasement localisé gêne un usage, ou fragilise un environnement. Ces cas de figure pourront faire l'objet d'une priorisation explicite concertée, qui reste à organiser/structurer. C'est typiquement le cas pour l'accès à certaines cales, posant des difficultés pour l'usage navigation. Dans ce cas, il paraît souhaitable de procéder à un dragage localisé facilitant l'accès pour une bonne part de la marée [le non usage d'une cale à marée basse est une contrainte inhérente à tous les estuaires macrotidaux (à forte marée), et acceptée par les usagers]. C'est ce qui a été pratiqué en 2020 au cours du plan expérimental de 5 ans autour des cales de St-Jouan et de St-Suliac. Nous attendons la réactualisation des bathymétries locales, normalement effectuée en ce printemps 2023, pour caractériser sur ces deux exemples le taux de sédimentation qui a pu se produire depuis 2020, rappelant qu'en général lorsqu'on pratique une excavation localisée, la sédimentation reprend de façon plus intense après le dragage (c'est le principe du piège). Le bilan *a posteriori* des opérations St-Jouan / St-Suliac permettra d'évaluer l'efficacité réelle de ces dragages ainsi que le coût d'entretien des accès à ce type de cales, à intégrer dans le plan pérenne de gestion des sédiments.

Il y a d'autres circonstances pouvant justifier des opérations ponctuelles à prévoir. Le cas de l'environnement du « camp viking » est le plus emblématique. Ce site d'intérêt patrimonial exceptionnel est situé sur un schorre détaché de la côte par un chenal de ceinture qui s'est envasé, en particulier sur son débouché (nord-)ouest depuis 2010, avec un risque de fragilisation du site qui pourrait alors être très visité. Sous réserve d'une confirmation de cette évolution par la bathymétrie de 2023, il y a lieu de lancer une étude d'opportunité rassemblant différents points de vue (environnemental, protection du patrimoine, ...) et de consulter les services de l'Etat concernés, avant d'effectuer le dragage de ce chenal de ceinture. Une telle action mériterait d'être complétée par une augmentation du taux d'inondation du secteur, en élevant de temps en temps les niveaux hauts, comme cela a été proposé dans le cadre du levier N°2, pour restaurer (partiellement) les régimes hydrauliques des herbues. Il faut rappeler que c'est à cette condition que les chenaux de drainage du schorre pourront se reconstituer, et aider à l'entretien des chenaux plus importants, en particulier celui qui isole le *camp viking* de la côte.

Dans cette même catégorie d'actions localisées, on pourrait évoquer les actions de dragage de certains réservoirs d'anciens moulins à marée (comme ce fut le cas par le passé pour les entretenir). Les volumes concernés ne seraient pas suffisants pour avoir un effet à l'échelle du bassin maritime, mais la remise en eau de certaines retenues, doublée d'une remise en état minimale des digues et des vannes, permettrait de restaurer la richesse patrimoniale de ces environnements estuariens bretons, et d'entretenir les chenaux d'accès sur un certain linéaire grâce à des possibilités de chasse locale. L'impact potentiel de telles actions sur la stabilité des digues et ouvrages concernés justifie ici aussi la nécessité d'une étude d'incidence, au cas par cas.

Pour ces extractions localisées, la question du devenir des sédiments extraits peut être posée. Les trois principales options sont un rejet en jasant à proximité du barrage, un dépôt à terre suivi d'une revalorisation ou même un rejet dans le bassin dans un secteur de fort courant (ce qui est parfois pratiqué par EDF pour entretenir le chenal en amont de Mordreuc). La 3<sup>ème</sup> option est moins satisfaisante puisque les sédiments restent dans le bassin et la première sera discutée au moment du bilan de l'opération Chêne Vert de 2023 (dont le coût au m<sup>3</sup> est très pénalisant alors que l'efficacité en termes de refoulement du sédiment hors bassin maritime est limitée à 70 % d'après la modélisation mathématique). La seconde option est sans doute à privilégier, compte tenu de la capacité

d'absorption du territoire évoquée plus haut. Mais pour ce levier N°4, quelle que soit l'option retenue, le problème du devenir du sédiment extrait n'est pas majeur tant qu'il est question de quantités petites (de l'ordre de 5000 voire 10 000 m<sup>3</sup>). Pour des quantités plus importantes, on rejoint le cas de figure considéré dans le levier N°5.

Ainsi la mise en œuvre du plan de gestion nécessitera de choisir au fil du temps les opérations à mener dans le respect du contexte budgétaire préétabli. Cela pose la question de la meilleure allocation de ce budget entre les opérations globales et locales d'une part, et celle de la sélection des opérations locales d'autre part (le présent levier N°4). Cette réflexion pourra être conduite sur la base d'une comparaison d'efficacité en termes de coûts par m<sup>3</sup> de sédiment évité ou extrait [en euros, mais aussi coût environnemental, qui peut s'exprimer à travers des indicateurs d'impact sur l'environnement (par exemple *équivalent CO<sub>2</sub>*) et sur la biodiversité], combinée avec la prise en compte des demandes d'extraction locale exprimées par les acteurs. Dans cette perspective, le Conseil Scientifique recommande que le maître d'ouvrage du plan de gestion des sédiments puisse s'appuyer sur une *commission* qui permettrait de poursuivre la concertation initiale de 2023 et de garantir que tous les enjeux concernés (usages / paysage / biodiversité) soient bien représentés formellement, afin de conforter la légitimité des préconisations. Il recommande également que le travail de cette commission prenne appui sur des critères explicites et renseignés avec des valeurs actualisées et partagées non seulement par l'ensemble des membres de la commission mais aussi par toutes les parties prenantes (voir pour compléments le diagnostic territorial proposé par le CS<sup>4</sup>).

### **2.5 Levier N°5 : envisager une extraction massive de vase, sous certaines conditions**

Tous les efforts listés à travers les leviers 1 à 3 visent à réduire ou annihiler la sédimentation actuelle, sans nécessairement extraire les dépôts plus anciens, qu'ils se soient produits avant ou après la construction du barrage. L'état de santé du bassin maritime de la Rance, et les conditions de maintien de sa biodiversité ne semblent pas nécessiter une telle extraction. Ce point de vue sur l'état écologique du bassin maritime sera développé dans un rapport spécifique présentant un diagnostic écologique de ce milieu, qui pourra être synthétisé après avancement des études en cours (courant 2023). Pour autant, la motivation d'une extraction massive de vase peut reposer sur d'autres arguments, en particulier d'ordre paysager (ou même patrimonial). Cet enjeu paysager/patrimonial est lui-même justifié par les activités qui en dépendent et son lien avec l'identité de la Rance, telle que défendue par certains collectifs.

C'est typiquement le cas dans la « plaine de Mordreuc », entre le port éponyme et le secteur de la Ville Ger, où une sédimentation importante s'est produite dans un passé récent. Se pose alors la question de la méthode de dragage de ce secteur étendu, et surtout celle de la piste à suivre pour évacuer la vase qui serait extraite, considérant que si elle était rejetée dans le même secteur, même en jusant, elle resterait en amont de la cluse. Deux options restent : une évacuation en mer *via* un rejet à proximité du barrage, voire en mer au large, ou un dépôt à terre dans la perspective d'une réaffectation (valorisation agricole en particulier). Comme évoqué pour le levier N°4, l'option évacuation en mer est handicapée par le coût au m<sup>3</sup> : même si le bilan de l'opération Chêne Vert n'est pas définitivement établi, il apparaît que son coût dépasse 50 €/m<sup>3</sup>, alors qu'elle a fait l'objet d'un

---

<sup>4</sup> Le territoire de la Rance : dynamiques paysagères, inscription socio-politique de la gestion des sédiments et propositions d'action. *Rapport diagnostic territorial* du CS-Rance, 2023, 20p.

appel d'offre élargi. En outre l'efficacité de la dispersion en mer dans le cas d'un rejet en amont du barrage n'est pas totale et sera difficile à vérifier sur le terrain (pour l'opération Chêne Vert, la quantité rejetée est trop faible pour que les mesures de suivi permettent de confirmer l'estimation d'une dispersion en mer de 70 % et un retour de 30 % dans le bassin, issue de la modélisation mathématique ; ces mesures de suivi ont surtout permis de vérifier l'absence de dépôt significatif sur des zones sensibles, ou de turbidité excessive dans l'eau). Un rejet en mer ouverte pourrait être envisagé : s'il se faisait juste en aval du barrage, les contraintes de dispersion (privilégier le jusant) seraient analogues à celles du rejet en amont. Concernant la filière de réutilisation à terre, il nous faut attendre les conclusions des études en cours (notamment le projet Suricates) qui doivent permettre de préciser la capacité de réutilisation du territoire, comme cela a déjà été évoqué pour le levier 3. Si cette capacité de valorisation des sédiments est bien confirmée, et s'avère supérieure à celle du piège du Lyvet couplé à l'ICPE de La Hisse, alors il est envisageable de mettre en place un nouveau piège et un second site de stockage. Ce deuxième piège pourrait probablement être positionné dans la plaine de Mordreuc, à un endroit qui pourrait être précisé en s'aidant d'un modèle hydro-sédimentaire.

Indépendamment de ces questionnements sur la méthode qui serait à employer pour réaliser une extraction d'envergure à Mordreuc, nous avons exploré son impact potentiel sur le fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin et *in fine* sur la sédimentation ultérieure dans le secteur. En effet, une extraction significative de sédiment se traduirait par une variation bathymétrique importante, susceptible de modifier le prisme tidal dans le bassin sud et les courants de marée responsables de la dynamique sédimentaire. De tels changements sont susceptibles de modifier les conditions de sédimentation dans tout le secteur amont de la cluse.

Le test de modélisation qui a été effectué (§14-6) indique qu'effectivement la sédimentation serait accrue après l'extension massive, comme si cette dernière fonctionnait comme un nouveau piège. Ce résultat affaiblit l'intérêt de procéder à une telle extraction, mais reste qualitatif car il dépend de la quantité de sédiment mobilisable dans le bassin, mal connue. En outre, le résultat changerait si la source de sédiments venant du large était très réduite (levier N°1). Dans le cas où le déploiement du levier 2 visant à réduire l'asymétrie en faveur du flot fonctionnerait, alors le résultat pourrait aussi changer, favorablement. Cet exemple illustre la complémentarité des leviers qui sont envisagés.

**Cas du bras de Châteauneuf.** L'opportunité de procéder à une extraction massive dans le bras de Châteauneuf n'est pas claire. Les données d'évolution bathymétrique récente dans le secteur manquent, en raison d'une mauvaise couverture de la bathy 2010. Les datations d'une carotte dans le secteur se sont révélées en contradiction avec le différentiel bathymétrique 2018-1957 (§11.5 et Fig.43). Dès que l'on disposera de la nouvelle bathymétrie dans le bras de Châteauneuf, on pourra conclure sur sa tendance au comblement ou pas, et selon le cas envisager une extraction d'ampleur (un dragage du secteur avait d'ailleurs été suggéré par COEURE en 2016 dans son plan de gestion).

## **2.6 Recommandations pour des études/développements complémentaires**

A court terme, et après s'être assuré de sa validation, il est prévu d'exploiter la modélisation hydro-sédimentaire (modèle Telemac d'EDF et/ou modèle MARS-3D d'Ifremer) pour simuler certains scénarios. En décembre 2021 une première liste d'applications avait été dressée, elle pourra évoluer :

- Simulation de l'évolution du secteur du Chêne Vert après opération de dragage
- Simulation de différents scénarios de fonctionnement alternatif de l'UMR (diverses modulations de la marée, diverses périodicités dans l'année) : effets sur la dynamique de marée, sur les transits de sédiments et sur les érosions/dépôts

- Simulation d'un second piège à sédiment (Mordreuc / Châteauneuf) : taux de remplissage, interaction avec le piège du Lyvet
- Test de sédimentation locale faisant suite à une opération de dragage (par exemple celle des accès aux cales de St-Jouan/St-Suliac, excavation par « Nessie » à La Richardais)
- Test d'un effet de chasse amont (Châtelier)
- Test d'un effet de chasse depuis une ancienne retenue de moulin à marée (site à préciser en concertation)

Mais compte tenu des constats effectués récemment, il est essentiel que la modélisation mathématique puisse prendre en compte les clapots dans le bassin de la Rance, et les vagues au large pour modéliser le devenir des sédiments : leur prise en compte est en cours dans le modèle hydro-sédimentaire d'EDF. Dès que cette étape sera terminée, la validation du modèle devra être réactualisée (normalement avant l'été 2023), et un sujet prioritaire sera l'analyse des flux sédimentaires à travers le barrage.

Une analyse fine des mesures de MES en aval et en amont du barrage (celles de 2020-2021 pour l'aval, celles de 2023 pour l'aval et l'amont), devra être menée rapidement pour approfondir les relations avec les vagues au large et valider la modélisation hydro-sédimentaire, de façon à consolider les flux sédimentaires reconstitués par le modèle. A l'issue de cette analyse, il pourra être décidé d'éventuellement prolonger les mesures, mais on peut penser que ce ne sera pas nécessaire.

## **2.7 Recommandations de suivis hydro-sédimentaires**

Quoi qu'il en soit, il sera nécessaire de structurer le suivi bathymétrique du bassin maritime de la Rance.

Il est proposé de réaliser tous les deux ans une couverture du secteur amont de la Ville Ger (jusqu'à l'écluse du Châtelier), secteur le plus dynamique. L'ensemble du bassin devrait être couvert tous les 4 à 6 ans, ce qui devrait permettre de suivre son évolution et en même temps lisser les effets d'incertitude des différentiels bathymétriques. Le CS est très satisfait de l'initiative d'EDF de réactualiser la bathymétrie du bassin en 2023, soit 5 années après la précédente bathymétrie de 2018. L'analyse du différentiel 2023-2018 sera très précieuse, car elle devrait permettre de confirmer, ou non, le rythme actuel de la sédimentation dans le bassin maritime, et d'infléchir éventuellement le plan de gestion des sédiments.

Il est suggéré de tester l'applicabilité du *LIDAR bathymétrique* dans le bassin (en vérifiant que les eaux sont assez claires pour renseigner la bathymétrie des zones subtidales). Son utilisation sur l'ensemble du bassin (subtidal et intertidal) permettrait sans doute de réaliser une économie par rapport aux opérations antérieures qui comprenaient une campagne de sondage multifaisceaux pour le subtidal et du LIDAR classique pour l'intertidal (ce fut aussi le cas semble-t-il pour la bathymétrie réalisée en 2023 à l'initiative d'EDF).

A court terme, il serait utile de mesurer les MES entrant dans le bassin maritime par l'amont, pour tenter une évaluation des apports amont, aujourd'hui très peu précise. Comme la turbidité des apports amont et leur débit liquide sont des signaux très épisodiques, ces mesures devraient durer une à deux années.

En ce qui concerne le suivi de la nature des sédiments superficiels, le CS recommande de procéder à une analyse périodique (tous les deux ou trois ans) de la granulométrie des sédiments à différentes cotes bathymétriques le long de quelques sections du bassin (typiquement une dizaine de stations sur 4 à 6 sections transversales distribuées le long du bassin, dont une dans le bras de Châteauneuf) : le

CS pourra proposer une trame d'ici la fin 2023, après analyse des derniers résultats de granulométrie d'estran qui sont attendus en ce printemps 2023.

*La présente section n'inclut pas les éléments de suivis environnementaux, qui seront proposés une fois posé le diagnostic environnemental. Il est probable qu'un suivi de la faune benthique puisse être associé au suivi de la nature des sédiments, avec campagne d'échantillonnage commune.*

## **2.8 Considérations financières et bilan environnemental et énergétique des opérations**

La mise en œuvre de chacun des leviers a un coût. Le coût des leviers 1 et 2 a été formulé en perte de production électrique, exprimée en MWh. Ainsi, selon des calculs encore provisoires la fermeture complète du barrage en cas de tempête (levier 1) entraînerait une réduction de production annuelle de l'ordre de 25 à 30 GWh pour une réduction d'environ 20 000 m<sup>3</sup> de sédiments importés, et le levier 2 pourrait « coûter » de l'ordre de 2 % de la production annuelle de l'usine, soit 10 GWh, avec une efficacité potentielle importante mais qui reste à montrer par modélisation. A ce coût annuel, il faut peut-être ajouter un coût d'investissement correspondant à la rénovation d'une ou plusieurs vannes pour permettre leur ouverture/fermeture avec plus de souplesse que maintenant. Enfin, rappelons que si au titre du levier N°1, on remplaçait la fermeture complète de l'usine pendant une marée par un fonctionnement dégradé inspiré des fonctionnements alternatifs du levier 2, une forte réduction des entrées de sédiment pourrait vraisemblablement être obtenue pour un coût énergétique bien inférieur à celui de la fermeture complète.

S'agissant des dragages (avec une phase d'extraction suivie d'un rejet ou d'une valorisation à terre telle que pratiquée aujourd'hui<sup>5</sup>), l'ordre de grandeur est de 50 €/m<sup>3</sup> pour les volumes petits ou modérés (5-20 000 m<sup>3</sup>) et peut-être 20 €/m<sup>3</sup> pour les très gros volumes (> 100 000 m<sup>3</sup>). A ce sujet, le CS suggère que les opérations petites ou grandes soient autant que possible groupées en un seul appel d'offre même si étalées sur plusieurs années pour raison budgétaire, afin d'inciter un maximum d'entreprises, y compris de taille internationale, à répondre et ainsi réduire les coûts de dragage au m<sup>3</sup>. Avec une moyenne de 30 €/m<sup>3</sup>, l'extraction de 50 000 m<sup>3</sup>/an aurait un coût de l'ordre de 1.5 M€ au minimum.

Concernant le coût de vidange d'un piège de l'importance de Lyvet, il faut compter actuellement autour de 30 €/m<sup>3</sup>, incluant 15 € pour le dragage et 15 € pour la valorisation agricole (une autre filière de valorisation serait probablement plus chère), plus les frais de gestion du site de transit.

A ces montants il convient de rajouter des coûts annexes (études de projets, études d'impact, suivi environnementaux) et un coût global de fonctionnement pour assurer le plan de gestion pérenne des sédiments.

Par ailleurs le Conseil Scientifique rappelle que d'un point de vue environnemental, pour un coût équivalent et un résultat comparable (ce qui n'est pas toujours possible), il faut privilégier un « manque à gagner » par perte de production électrique, vis-à-vis d'une opération de dragage nettement plus impactante : production de CO<sup>2</sup> des engins de dragages (amenée/repli, mise en œuvre, coût de réalisation...), nuisances de chantiers, impact sur la faune benthique... Ainsi il est nécessaire que le plan de gestion pérenne des sédiments intègre et compare les coûts environnementaux et bilans énergétiques de toutes les opérations qui, à défaut d'être exprimés en euros, doivent peser dans la balance lors des choix politiques qui seront faits.

---

<sup>5</sup> Les sédiments de La Hisse n'ont pas été revendus après décantation, mais mis à disposition voire transportés gratuitement, avec un coût d'opération pris en charge par la collectivité

### 3 - La marée en Rance

La marée dans le bassin maritime de la Rance, déjà impactée par le barrage de La Hisse et l'écluse du Châtelier en amont, a été très modifiée depuis la mise en service de l'usine marémotrice, et s'avère très différente de celle de St-Malo. Les ouvertures des vannes et des groupes bulbes sont programmées de sorte à maximaliser la puissance disponible lorsque les groupes sont en fonction, puissance qui dépend à la fois de la hauteur de chute entre le niveau du bassin et celui de la mer ouverte, et du débit transitant à travers chaque groupe. C'est en particulier pour cette raison que l'étalement de pleine mer est prolongée dans le bassin, jusqu'à l'obtention d'un dénivelé significatif entre celui-ci et l'aval du barrage. La déformation de la courbe de marée dans le bassin est décrite dans de multiples documents et sera rappelée plus loin.

Depuis 2020 et surtout 2021, un nouveau référentiel de niveaux en Rance est pratiqué par EDF, suite à une concertation menée par l'Etat auprès des acteurs du territoire, qui se traduit par un niveau haut maximum de 12.30 m CM (« CM » = référence carte marine, 0 m CM étant le niveau des plus basses mers à St-Malo), l'occurrence de 45 niveaux très bas (< 6 m CM) par an (dont deux à la cote 4.5 m CM) et la réalisation d'un « survidage » systématique en fin de turbinage direct. La figure 1 ci-dessous illustre la répartition des niveaux en Rance au cours de l'année 2021, ainsi que les marnages qui en résultent, comparés aux niveaux et marnages naturels à St-Malo.

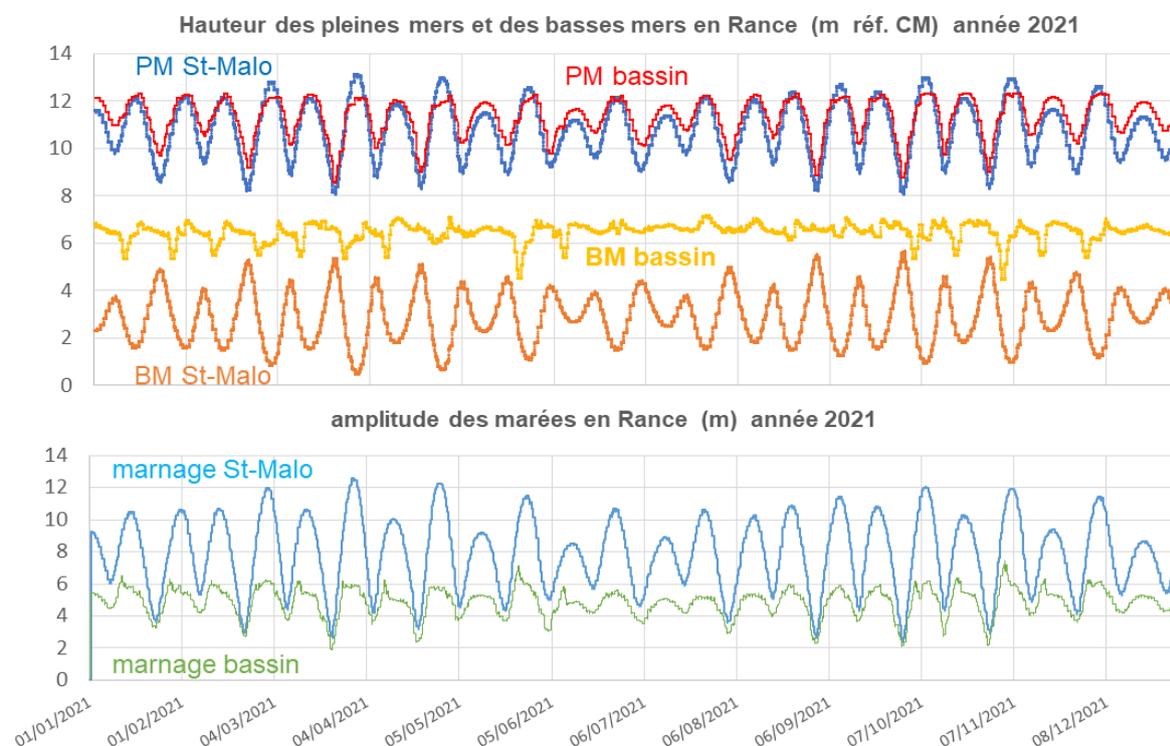
Les caractéristiques suivantes peuvent être relevées :

- les niveaux de pleine mer (PM) conservent une modulation Morte Eau (ME) / Vive Eau (VE) mais très atténuée : les niveaux hauts de grandes marées sont écrêtés tandis qu'ils sont surélevés lors des marées moyennes ou des mortes eaux, du fait du pompage par les turbines (motivé par l'augmentation de la hauteur de chute lors du turbinage qui suit) ;
- les niveaux de basse mer (BM) varient généralement très peu au cours d'un cycle VE / ME, sauf pendant les épisodes de niveaux très bas, qui interviennent en période de revif (phase d'augmentation de l'amplitude de marée, entre ME et VE) ; les BM sont même plus hautes en VE qu'en ME ; ces niveaux bas correspondent à peu près au niveau de mi-marée que connaissait l'estuaire avant barrage ;
- il en résulte des marnages environ deux fois plus faibles dans le bassin en vive eau, et 10 à 30% plus faibles qu'en mer ouverte en morte eau, ainsi qu'une modulation ME/VE très atténuée.

Cette atténuation de la marée dans le bassin a évolué depuis la construction du barrage, comme le révèle la figure 2 (Goguel, 2019, 2020). Si le fonctionnement de l'usine marémotrice était très irrégulier au début (*e.g.* année 1969), il s'est régularisé ensuite (année 1979) avec ultérieurement une pratique du pompage (visible sur les périodes suivantes par des niveaux hauts plus élevés dans le bassin qu'en mer, Fig.2a). Une tendance au relèvement des niveaux bas entre 1979 et 2019 est notable (de 6.5 m à 7.5 m), mais la tendance a été clairement rectifiée depuis la mise en place du nouveau référentiel (Fig. 2b). Selon EDF, le niveau moyen des BM était de 6.69 m CM en 2020 et celui de PM à 11.23 m CM, alors qu'ils étaient respectivement à 7.11 m CM et 11.17 m CM en 2019.

Concernant les niveaux hauts, on peut remarquer que pendant les premières décennies ils n'étaient en moyenne que modérément inférieurs à ceux du large (cf figure 2a, période janvier-avril 1979), tandis qu'après 1995, l'exploitation du barrage marémoteur a imposé un niveau haut plafonné à 12 m, motivé par la protection de certains perrés. Ce plafond a été relevé à 12m30 depuis 2020. Ces changements de régimes ont des conséquences sur l'évolution des herbues.

Il résulte de cette altération de la marée dans le bassin une augmentation considérable du niveau moyen, qui passe de 6.76 m CM à 9.41 m CM, soit une surélévation moyenne de 2.65 m.



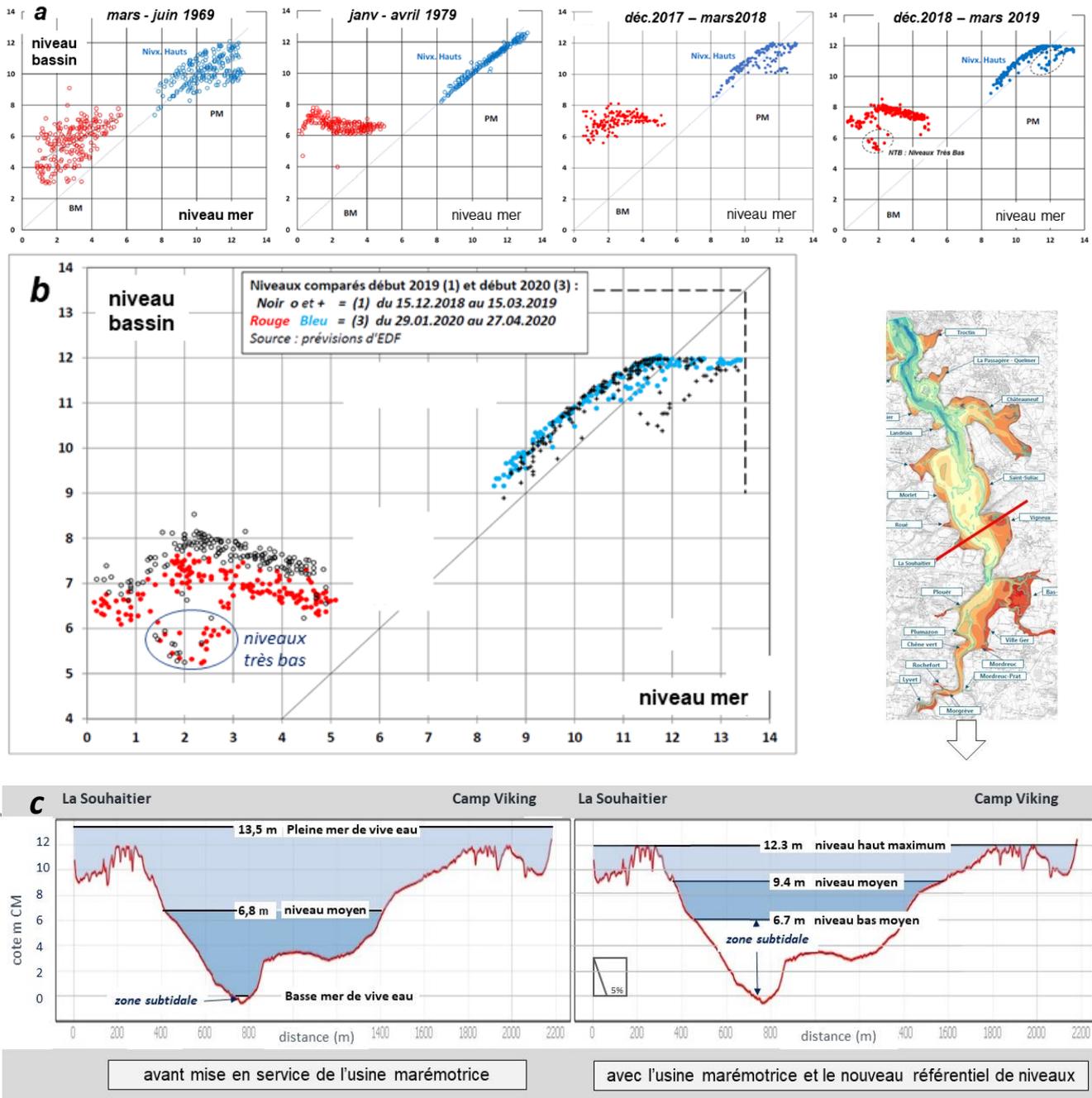
**Figure 1 : succession des niveaux de pleine mer et de basse mer à St-Malo et dans le bassin maritime de la Rance au cours de l'année 2021 (prévision EDF de fin 2020), et marnages associés.**

La figure 2c illustre la répercussion de cette variation des niveaux d'eau sur les secteurs d'estran (zone alternativement inondée ou exondée selon les conditions de marée) dans l'exemple de la section « La Souhaitier / camp viking » au milieu du bassin maritime : on voit que le linéaire d'estran le long de la section a beaucoup diminué, et que les herbues situés en haut d'estran sont à peine recouverts actuellement, alors que la hauteur d'eau pouvait y atteindre 1 m à 1.5 m auparavant, et en particulier pendant la période où ils ont été constitués. La surélévation des niveaux bas se traduit par un accroissement considérable de la zone subtidale, jamais découverte (de fait les séquences de niveaux très bas retenus depuis l'adoption du nouveau référentiel de niveaux permettent un découvrément partiel (jusqu'à la cote 4.5 m CM), mais seulement deux fois par an.

Depuis 2019, l'adoption du nouveau référentiel de niveaux en 2020 a encore modifié la marée dans le bassin. Comme le montre le tableau ci-dessous, le niveau bas moyen a baissé de 50 cm, le marnage moyen a augmenté de 60 cm et les durées d'étales ont diminué : de 9 % pour les étales de niveau haut, et de 70 % pour les étales de niveau bas (EDF, COSUI 8 mars 2023). Ces évolutions tendanciellles sont *a priori* favorables pour l'environnement, et la marée qui en résulte est un peu moins éloignée de la marée naturelle. C'est ce que montre la figure 3 ci-après, qui révèle aujourd'hui une répartition des niveaux de marée plus équilibrée dans le bassin qu'il y a seulement 4 ans.

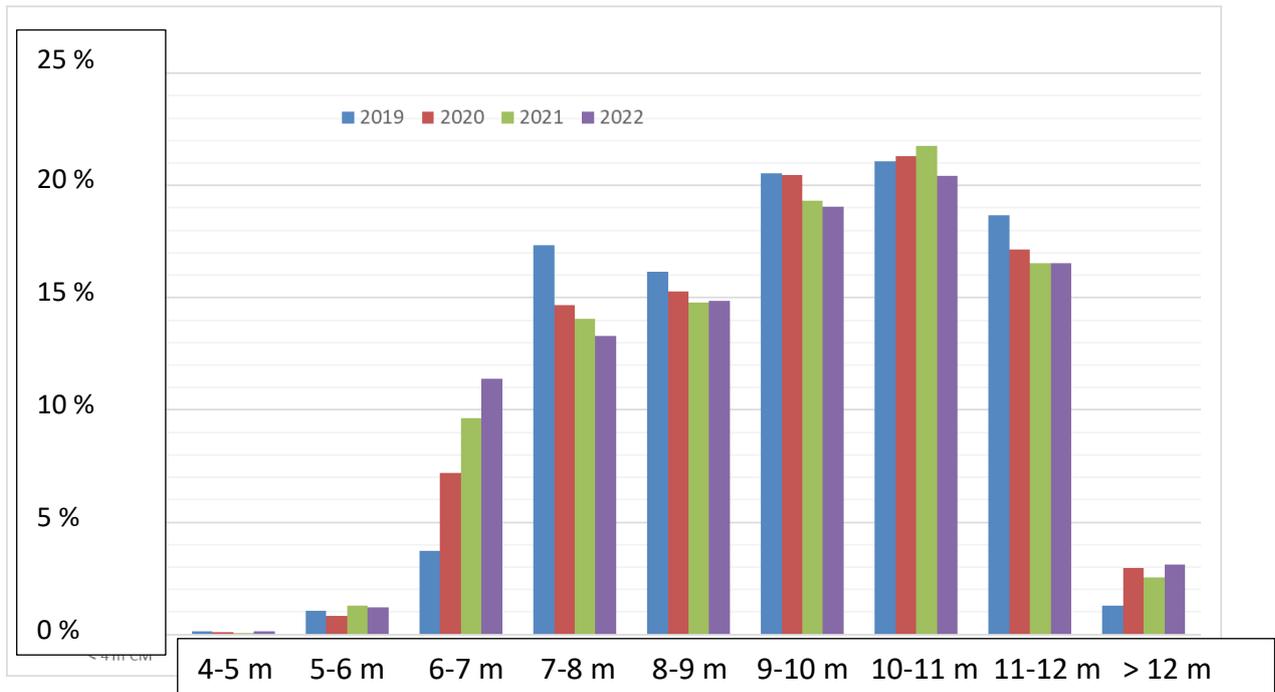
	Niveau bas moyen	Niveau haut moyen	Marnage moyen
2019	7.11 m	11.16 m	4.05 m
2022	6.39 m	11.22 m	4.83 m

Source : EDF, COSUI nouveau référentiel de niveau en Rance, 8 mars 2023



**Figure 2 :**

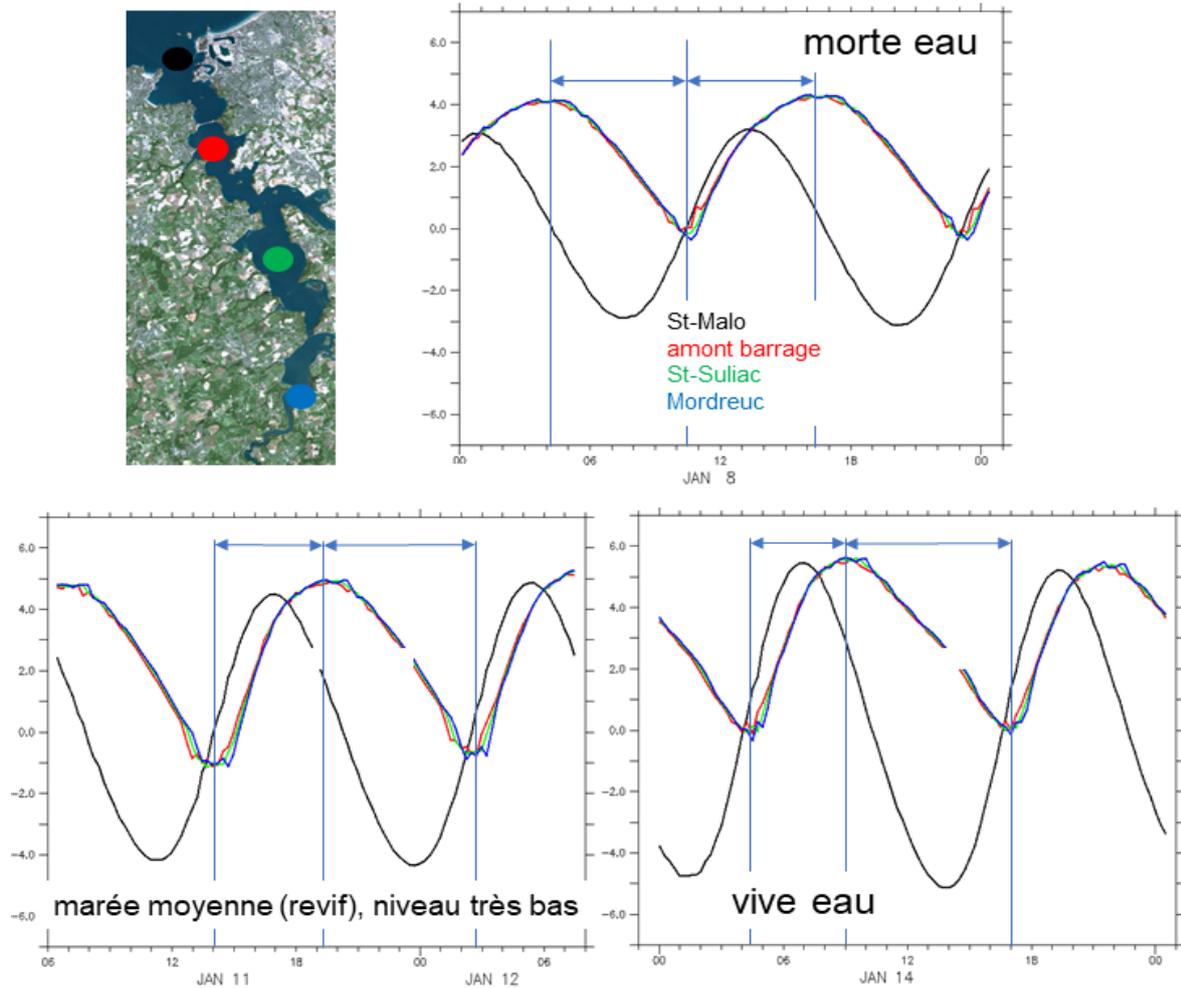
- a)** corrélation entre niveaux hauts (en bleu) ou bas (en rouge) en mer et dans le bassin pour différentes périodes de fonctionnement de l'usine marémotrice. *Adapté d'après Goguel, 2019.* Les niveaux entourés de pointillés correspondent à des séquences de niveau (très) bas.
- b)** corrélation analogue pour les années 2019 et 2020. *Adapté d'après Goguel, 2020*
- c)** représentation des niveaux d'eau avant (à gauche) et après (à droite) mise en service de l'usine marémotrice, sur la section La Souhaitier – camp viking (en rouge sur la carte).



**Figure 3 : Fréquence d’occurrence des niveaux par plages d’1 m (référence Cote Marine)**  
 (Analyse des niveaux mesurés à Saint- Suliac avec un pas de temps de 5 min, soit environ 105 000 valeurs / an). D’après EDF, COSUI 8 mars 2023.

L’aperçu rapide des différentes marées dans le bassin (Fig.1) permet d’identifier 3 types de marée : vives eaux, mortes eaux et marées de revif avec niveau très bas dans le bassin. L’hydrodynamique pour ces principaux types de marée sera analysée ultérieurement. La figure 4 visualise la déformation de l’onde marée par rapport à celle en mer ouverte, mais aussi sa propagation dans le bassin.

Quelle que soit son amplitude, la propagation de la marée est très rapide : la pleine mer se produit au même moment près du barrage et à Mordreuc, tandis que la basse mer accuse en amont un retard d’environ une demi-heure, en particulier en période de niveau très bas. On observe aussi une oscillation du plan d’eau, à PM et à BM : ce sont des seiches, phénomène physique qui se produit fréquemment dans les environnements semi-fermés tels que les ports ou certains petits estuaires (surtout en présence d’endiguements). Les seiches en Rance sont très marquées (de l’ordre de +- 10 cm) et les niveaux s’opposent entre l’amont et le barrage. Elles ont fait l’objet d’observations détaillées (Goguel, 2017).



**Figure 4 : propagation de la marée dans le bassin maritime de la Rance (simulation MARS)**

La figure 4 montre aussi que la basse mer dans le bassin se produit au moment de la mi-marée montante à St-Malo, et que l'asymétrie de marée, se traduisant par un « montant » plus court que le « perdant », s'accroît avec l'amplitude de marée, et est plus accusée qu'à St-Malo. Enfin, la surélévation du niveau d'eau dans le bassin en morte eau et en marée moyenne, induite par un fonctionnement des turbines en mode pompage, apparaît nettement.

#### 4 - Les courants de marée

La courantologie dans le bassin maritime de la Rance a rarement été décrite, en dehors de quelques stations où des mesures de courant avaient été réalisées. La modélisation numérique nous donne facilement accès à cette information. Deux modèles de la Rance sont opérationnels en 2022 : le modèle Telemac 2D ou 3D d'EDF (Rtimi et al., 2021) et le modèle MARS-3D d'Ifremer, à partir duquel beaucoup d'informations sur les courants ont été constituées (Ifremer, 2021a, 2021b, 2021c).

##### *Quelques mots sur la morphologie de l'estuaire*

Comme dans toute baie côtière et en particulier les estuaires, les courants de marée sont dépendants de la forme de l'onde marée à l'embouchure, mais aussi de la morphologie du bassin. Nous proposons ici un rappel de la géométrie du bassin de la Rance, tel que fournie par la dernière campagne topobathymétrique effectuée en 2018, et numérisée par EDF (figure 6, page ci-après).

La configuration du bassin de la Rance n'a guère changé depuis un siècle, et est caractérisée par un cours non rectiligne voire méandrique, forcé par le relief général de la vallée et des pointes rocheuses, ainsi qu'un chenal profond sur près de la moitié de sa longueur entre le secteur actuel du barrage marémoteur et St-Suliac (profondeur d'une dizaine de mètres lors des niveaux bas). En amont de St-Suliac, des zones d'estran étendues prennent place dans les anses, conduisant à des secteurs de schorre (herbus) parfois très développés, en particulier dans les environs du camp Viking et surtout au niveau des Bas-Champs. Les 4 km les plus en amont se présentent comme un chenal très étroit (10 à 100 m) bordé de vasières élevées, comme dans beaucoup de rias bretonnes.

L'hypsométrie du bassin (Figure 5), qui décrit les surfaces concernées par une élévation donnée du fond, fournit une vision synthétique du volume du bassin et de sa surface en fonction du niveau d'eau. Si l'on se souvient que les niveaux les plus bas sont autour de 5 m (Fig. 1 et 3), on peut considérer que la surface toujours immergée (dite « subtidale ») est d'environ 11 km<sup>2</sup>, soit 52 % d'une surface totale qui s'élève à 21.6 km<sup>2</sup>. Les surfaces concernées par les cotes supérieures à 0 mCM (plus basses mers avant barrage marémoteur) sont très équilibrées, de l'ordre de 1.2 km<sup>2</sup> pour une élévation de 1m, mais présentent un maximum très net (2.3 km<sup>2</sup>), pour la tranche 8 à 9 m cote marine, qui se situe juste en-dessous du niveau moyen actuel<sup>6</sup> (9.4 m).

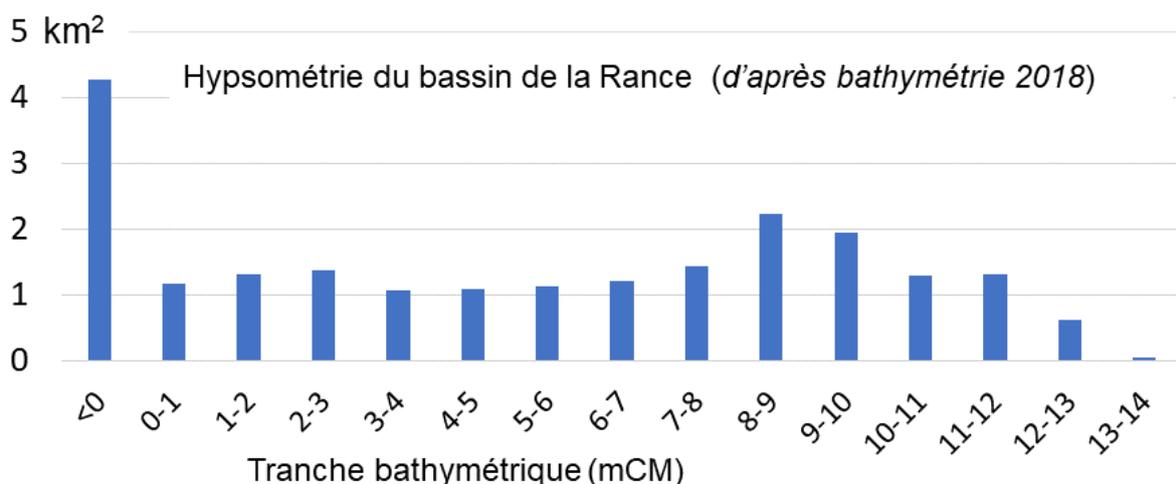


Figure 5 : hypsométrie du bassin maritime de la Rance (d'après topobathymétrie de 2018)

<sup>6</sup> Compte tenu de la forme de la marée, le niveau moyen est au-dessus du niveau de mi-marée, qui se situe à peu près à 8.80 m.

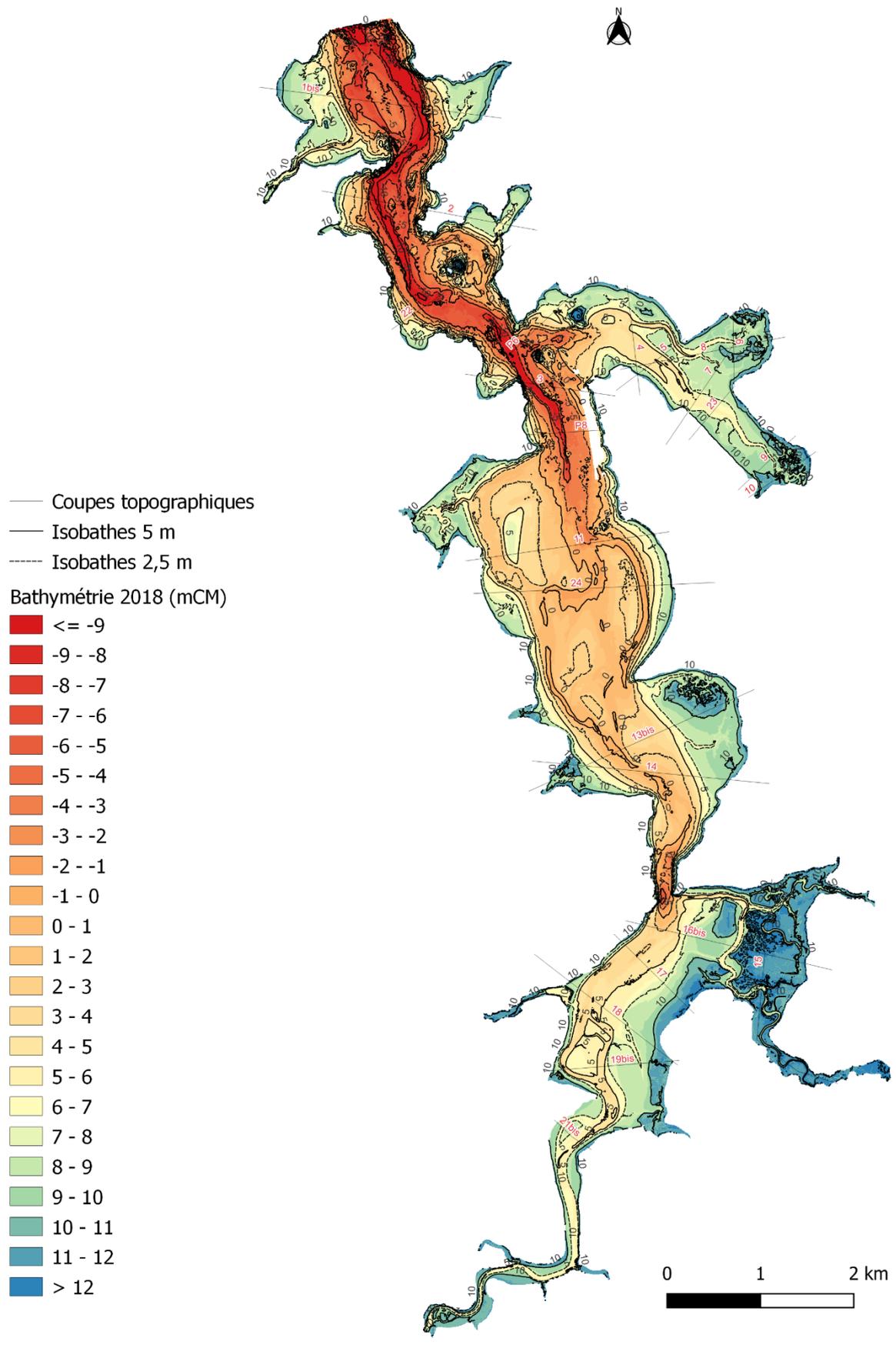


Figure 6 : bathymétrie du bassin de la Rance en 2018 (référence : 0 des cartes marines à St-Malo). Donnée EDF.

#### **4.1 Distribution des courants**

En raison de la géométrie assez compliquée du bassin maritime, les gradients de vitesses sont très accusés, et la représentation des courants nécessite un découpage du secteur en trois zones. Des cartes horaires de courants de marée ont été produites pour 3 marées (VE, ME et marée moyenne), et 4 situations de VE (début et fin de jusant, pic de flot et étale de pleine mer) sont présentées en annexe 1 au présent rapport, et rapidement commentées ci-après.

Les cartes de fin de jusant (BM St-Malo + 2h) mettent en évidence le dédoublement du chenal au sud (le chenal de la Moinerie apparaît bien) et au nord du Chêne Vert, entre le Minihiac et St-Suliac, autour des îles Chevret et Notre-Dame, ainsi qu'un contre-courant au sud de la pointe de Cancaval et dans l'anse des Rivières à La Richardais... Un débit d'évacuation à travers le barrage est bien visible au niveau des groupes-bulbes. En aval du barrage, le courant de jusant se divise pour contourner l'îlot Bizeux, et entraîne un contre courant en baie de St-Servan. Entre Dinard et St-Malo, les courants, peu intenses à ce moment-là de la marée, dessinent un vaste tourbillon formé par le courant de jusant venant du barrage à l'ouest, et une branche de flot à l'est, qui dérive d'un flux vers l'est au large de St-Malo où la mer monte depuis plus de deux heures.

Lors du début de flot (BM St-Malo + 4h), qui s'avère être le pic de flot dans le bassin, les courants sont très intenses en amont des vannes (plus de 2.20 m/s) et jusqu'à la pointe de Cancaval, mais un flux de flot passe également par les bulbes (turbinage inverse). De part et d'autre de cette veine de courant, des contre-courants se développent dans de très nombreuses baies, qu'il serait fastidieux de lister ici. On notera en particulier des contre-courants au nord des îles Chevret et Notre-Dame et un tourbillon naissant entre le Minihiac et St-Suliac, qui se développe dans les heures qui suivent. Plus en amont, des maxima de courant sont atteints dans la cluse de Port St-Jean / Port St-Hubert (qu'on appellera « cluse » par la suite) et dans le chenal devant Mordreuc.

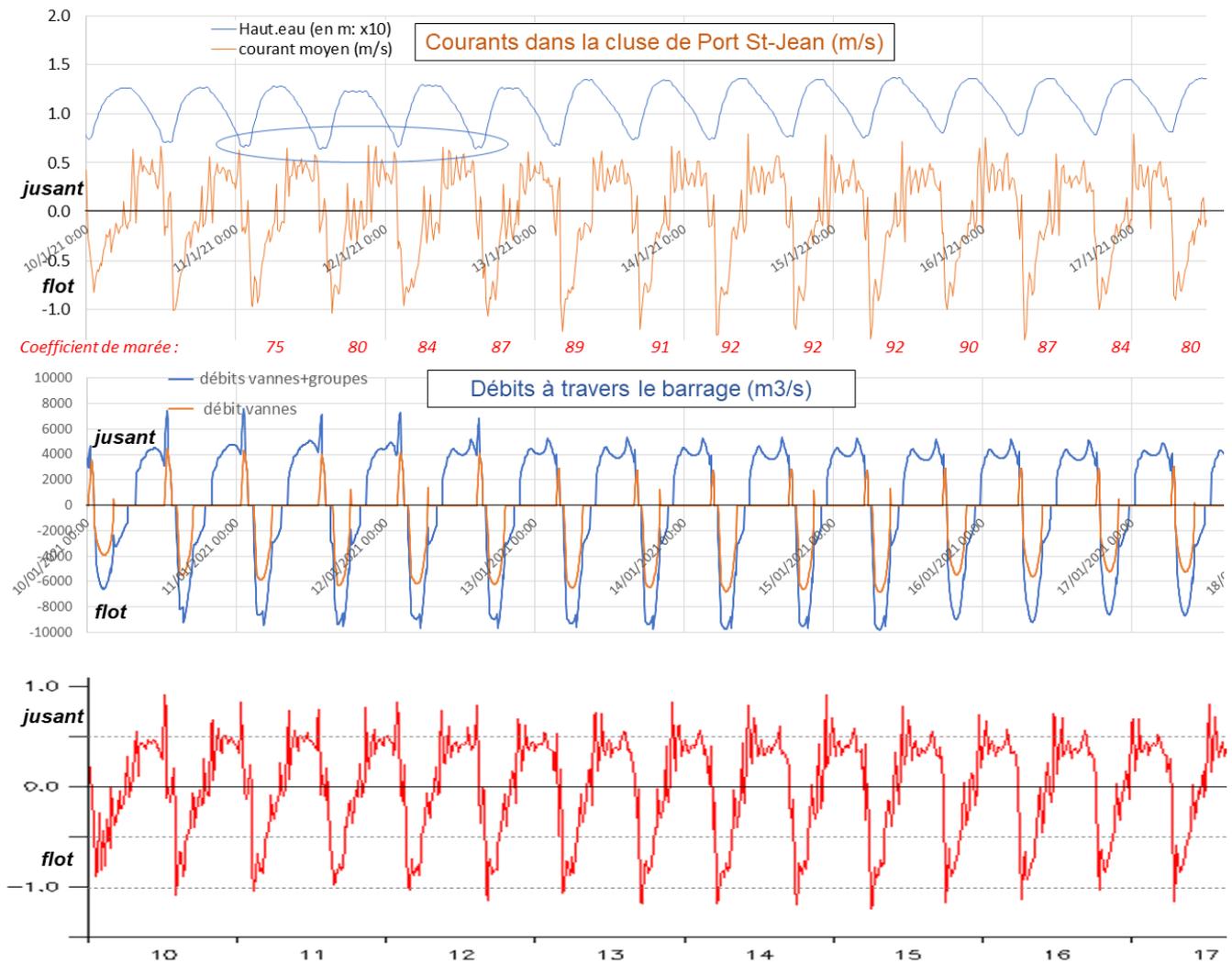
Pendant l'étalement de PM dans le bassin (soit BM St-Malo + 7h), le jusant est établi au large de St-Malo où la mer descend, mais les courants sont très faibles en aval du barrage. Immédiatement en amont du barrage, des courants tourbillonnaires assez intenses se manifestent, alors qu'aucun flux ne passe par les vannes ou les groupes-bulbes. En amont de ce tourbillon contre le barrage, l'« étalement » de PM se caractérise par une succession de tourbillons jusqu'à St-Suliac, animés de courants de l'ordre de 20 cm/s. Un examen du champ de vitesses tous les quarts d'heure a permis de constater la résilience de la plupart de ces tourbillons, seuls les plus petits pouvant disparaître au gré des phases successives des seiches du plan d'eau qui se produisent au même moment.

Enfin, lorsque s'établit le jusant dans le bassin (BM St-Malo + 9h), le champ de vitesses se régularise. On notera dans les secteurs amont la chenalisation au sein des herbues, ainsi que la déviation du courant par le chenal au sein de la veine de courant ouest-est (direction générale de la vallée de la Rance) au sud-est du moulin de Rochefort.

#### **4.2 Variabilité des courants au cours de la marée**

Les courants dans la cluse de Port St-Jean ont été enregistrés d'octobre 2019 à janvier 2020 à l'aide d'un profileur acoustique posé sur le fond (Dynamocean, 2021). La figure 7 montre une forte asymétrie entre le jusant (vers l'aval) et le flot (vers l'amont), beaucoup plus court et plus intense, et que les vitesses sont en phase avec les débits à travers le barrage, qui les contrôlent. On voit ainsi l'effet de l'ouverture des vannes en fin de jusant (après le turbinage direct) qui se répercute jusqu'à la cluse. On voit aussi clairement des oscillations de courant pendant tout le jusant et tout particulièrement au

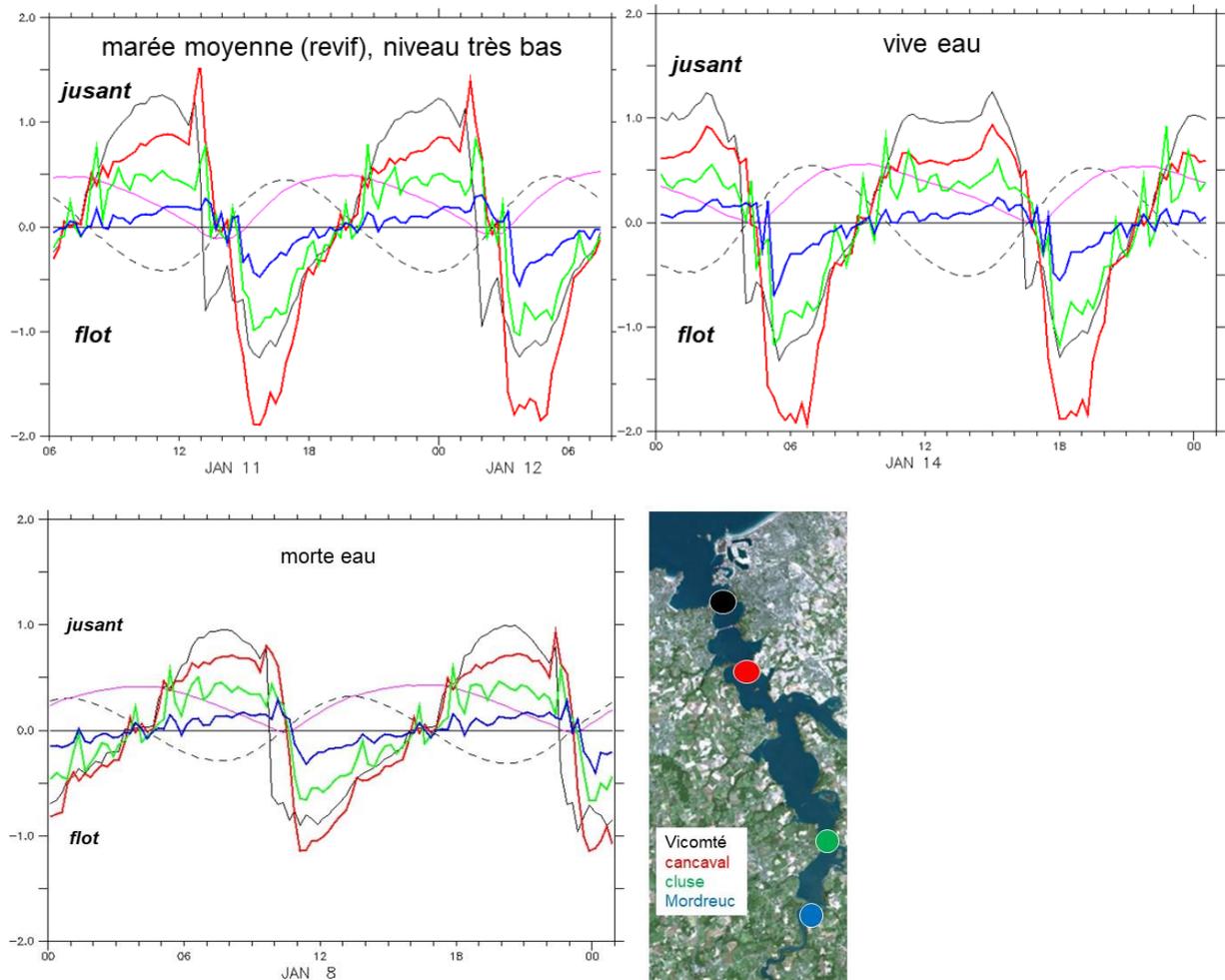
moment des étales de pleine mer, qui s'observent à chaque marée, confirmant les seiches relevées précédemment.



**Figure 7 :** *en haut :* courant moyen mesuré dans la cluse de Port-St-Jean (moyenne du courant de surface et du courant à 1m60 du fond), simultanément à la surface libre.  
*au milieu :* débits à travers le barrage (recalculés à partir de la programmation de l'usine marémotrice par EDF fin 2020).  
*en bas :* courant moyen simulé avec le modèle MARS3D-Rance au point de mesure dans la cluse.

La représentation du courant barotrope (moyenné sur la verticale) calculé par le modèle MARS sur la figure 7 montre une excellente analogie avec la mesure, qui permet ainsi de valider le modèle et les interprétations des résultats de ce dernier. En particulier, l'amplitude des oscillations (seiches) est du même ordre, et on peut également observer des pics de vitesse générés par l'ouverture des vannes en fin de jussant, surtout en début de période, et probablement en lien avec un cycle de « niveau bas » généré les 11 et 12 janvier : il en résulte des maxima de jussant supérieurs à ceux de la vive eau du 14 janvier, et des pics de flot qui voisinent aussi ceux de la vive eau, alors que le coefficient de marée n'est que de 75. Enfin, les mesures comme le modèle montrent que le pic de flot apparaît au tout début de ce dernier.

Cette validation du modèle permet d'exploiter celui-ci pour quantifier les variations de vitesse du nord au sud. C'est l'objet des figures 8 a, b et c.



**Figure 8 : Courants de marée en 4 points de l'estuaire**

Dans le bassin maritime, en restant près du chenal, les vitesses sont maximales en aval (sans considérer la zone proche du barrage où la proximité des groupes ou des vannes a une forte influence) et décroissent vers l'amont. Les oscillations de courant liées aux seiches sont très marquées dans la cluse, moins à Mordreuc et beaucoup moins devant la pointe de Cancaval ce qui est classique si le bassin maritime de la Rance constitue le domaine de résonance (c'est a priori le contraire pour les oscillations de niveau). Les marées sélectionnées sur la figure 8 sont les mêmes que celles de la figure 4, et permettent de constater que malgré une amplitude de marée au large nettement plus faible, les pics de vitesse lors de la marée moyenne sont du même ordre qu'en vive eau, ponctuellement renforcés par des niveaux (très) bas pratiqués ce jour-là. En morte eau par contre, les courants sont nettement plus faibles, surtout en flot. Quelle que soit l'amplitude de marée et le secteur du chenal considéré, le maximum de flot est nettement plus élevé que le maximum de jusant, ce dernier durant plus longtemps : l'asymétrie de marée est très importante en Rance. Le déplacement de sédiment se faisant préférentiellement par courant élevé, cette asymétrie favorise un transport vers l'amont. Nous y reviendrons. A noter aussi que l'asymétrie des courants est nettement moins marquée en aval du barrage, devant la Vicomté.

### 4.3 Structure verticale des courants

Le bassin maritime de la Rance est réputé bien mélangé, avec des courants très proches en surface et vers le fond (au-dessus d'une couche limite d'ordre métrique). C'est probablement le cas pendant une bonne partie de l'année, car les débits de la Rance sont faibles. Mais les crues de 50 à 100 m<sup>3</sup>/s sont assez fréquentes, et sont susceptibles de générer une stratification avec un écoulement des eaux douces préférentiellement en surface. La figure 9 illustre ce phénomène, à partir des mesures réalisées début 2021. Le débit de la Rance s'est élevé à 50 m<sup>3</sup>/s les 23 et 24 décembre, puis à nouveau le 29 décembre 2020. Un tel débit est assez fort pour accélérer les courants de jusant (positifs sur la fig.9) en surface et les réduire près du fond, voire les annuler en morte eau (cf. les 23 et 25 décembre, puis le 30 décembre). La figure 9 révèle que le processus est quasi instantané (le jour même ou le lendemain).

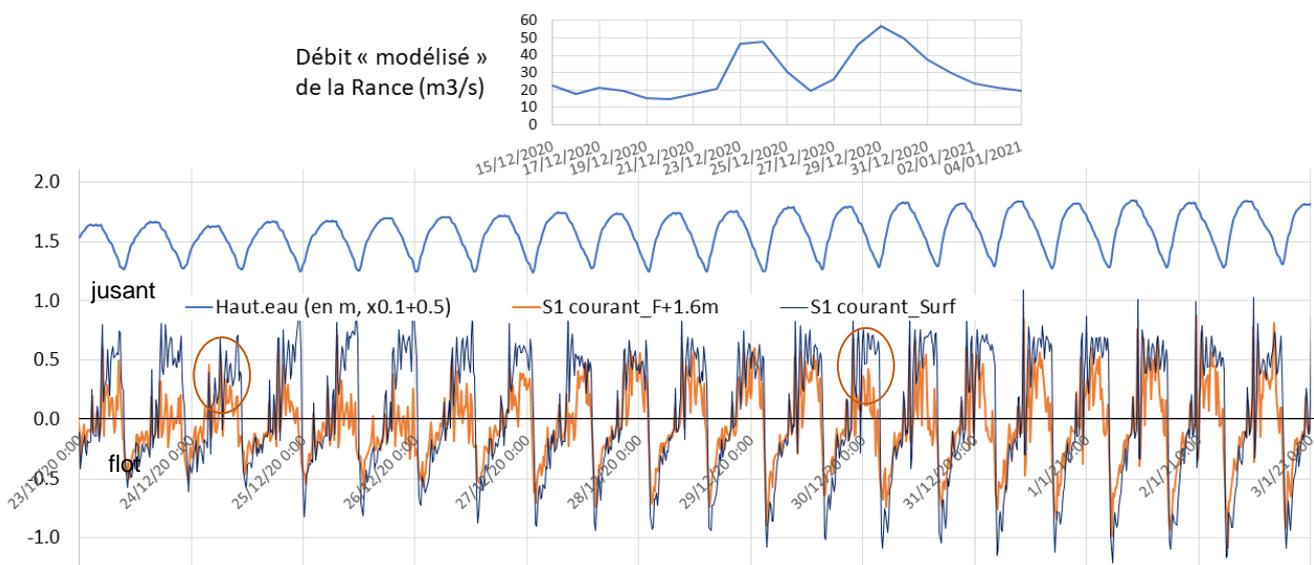
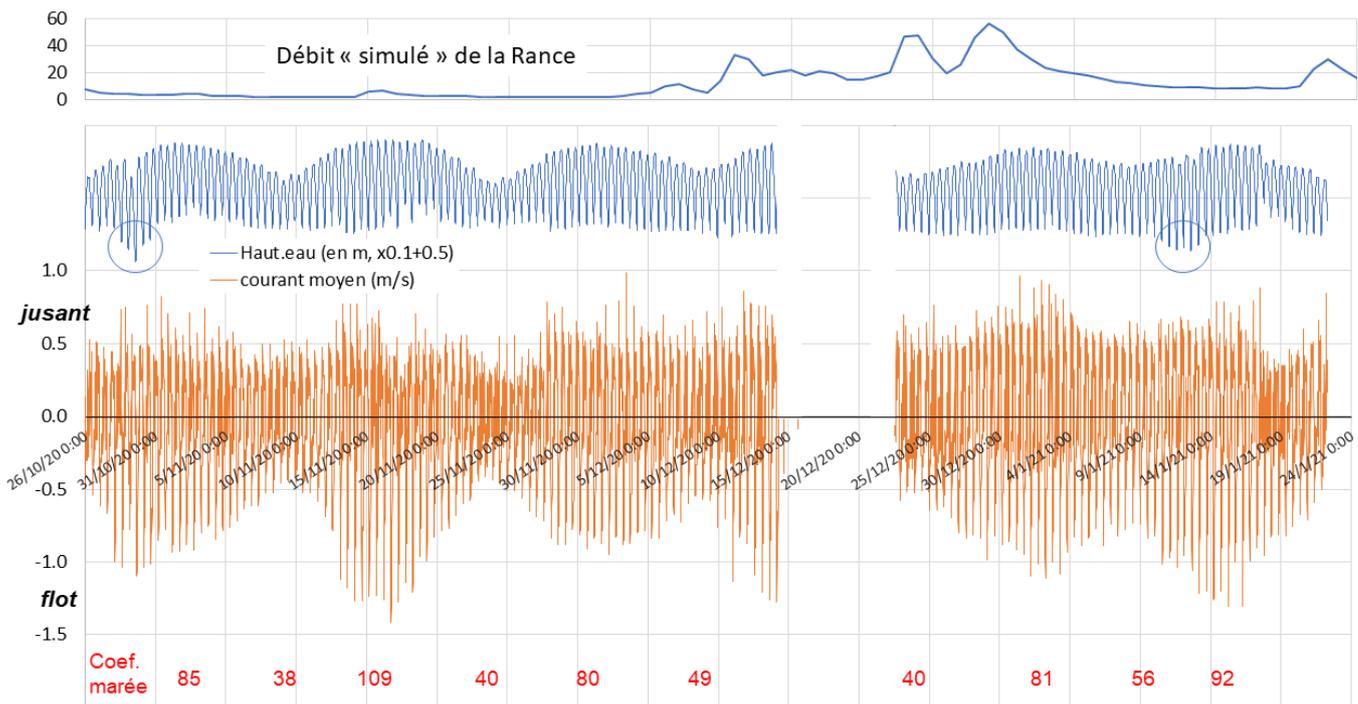


Figure 9 : stratification du courant mesuré dans la cluse de Port St-Jean.

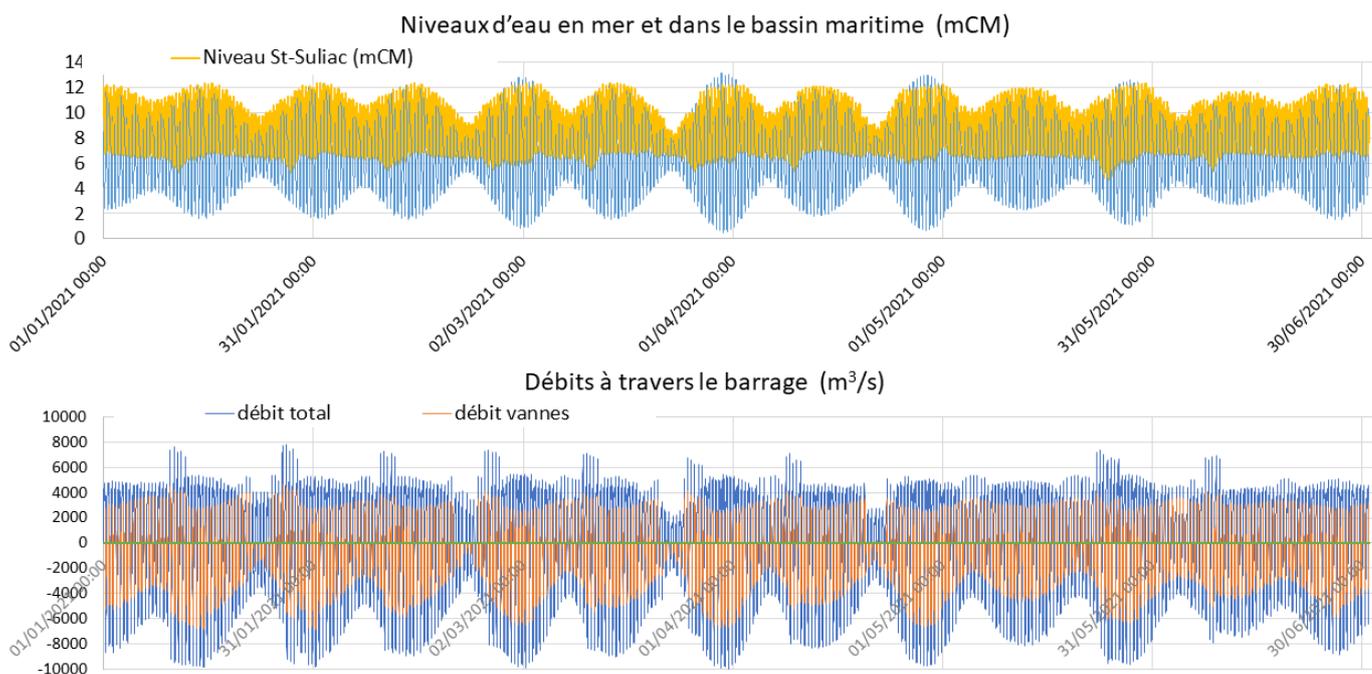
### 4.4 Variabilité des courants sur le moyen terme

Un aperçu d'ensemble de la mesure en continu du courant dans la cluse de Port St-Jean (Figure 10) permet d'associer les pics de flot à l'amplitude de marée mais aussi aux événements de niveau très bas, en particulier ceux d'octobre 2020 et janvier 2021. Par exemple le niveau très bas du 29 octobre 2020 qui se produit lors d'une marée moyenne génère des pointes de flot nettement plus élevées que la vive eau de coefficient 85 qui suit. L'impact sur les pointes de jusant, qui sont elles-mêmes plus diffuses, est moins clair. On notera un net effet du débit de la Rance début décembre 2021. Mais il faut rappeler que ces maxima de jusant sont nettement plus faibles que les pointes de flot, et qu'ils sont sensibles aux seiches décrites précédemment.



**Figure 10 : mesure du niveau d'eau et du courant (moyenne du courant de surface et du courant à 1.6 m du fond) dans la cluse de Port St-Jean, d'octobre 2020 à janvier 2021.**

Un examen du régime de l'usine marémotrice pendant 6 mois, tel que programmé par EDF pour 2021, montre l'extrême sensibilité des débits maximaux de jusant à travers le barrage aux épisodes de niveau très bas, systématiquement générés en marée moyenne de revif (Figure 11). L'effet sur les débits de flot (négatifs sur la fig.8) se distingue aussi très bien, mais est atténué par les maxima constatés en vive eau. Ceux-ci sont très marqués dans le sens du flot, mais très peu pour le jusant.

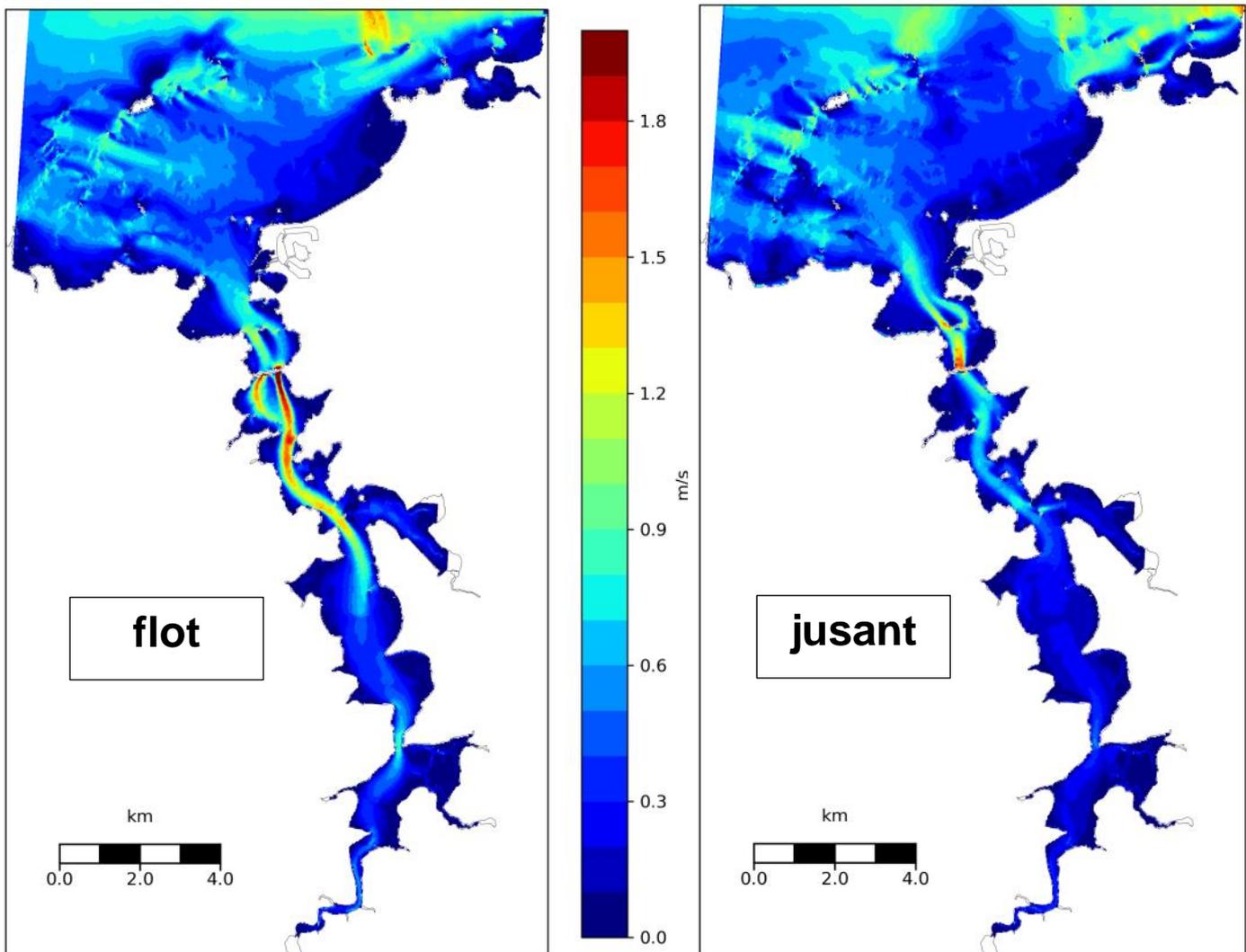


**Figure 11 : fonctionnement de l'usine marémotrice pendant 6 mois (année 2021). Correspondance entre niveaux d'eau, amplitude de marée et débits à travers le barrage.**

Cette pratique des niveaux très bas en revif (marée d'amplitude croissante) est peut-être à revoir, car la vive eau qui succède à ce niveau très bas génère un transport de sédiment vers l'amont, alors que le renforcement du jusant pendant les niveaux bas serait susceptible d'aider à son évacuation.

## 5 - Courants maximaux et asymétrie flot/jusant

L'examen des courants en stations fixes ne portait que sur des vitesses dans le chenal. Il mérite d'être complété par des cartes de courants max, en distinguant les courants de flot et de jusant puisque les directions de transport sont opposées. Plutôt que les courants maximaux, dont l'occurrence peut n'être que tout à fait exceptionnelle, il est préférable de considérer des percentiles élevés du courant. Ainsi le percentile 95, représenté sur la figure 12, est le courant qui n'est dépassé que 5 % du temps. Il apporte une valeur « statistique » à la notion de maximum.

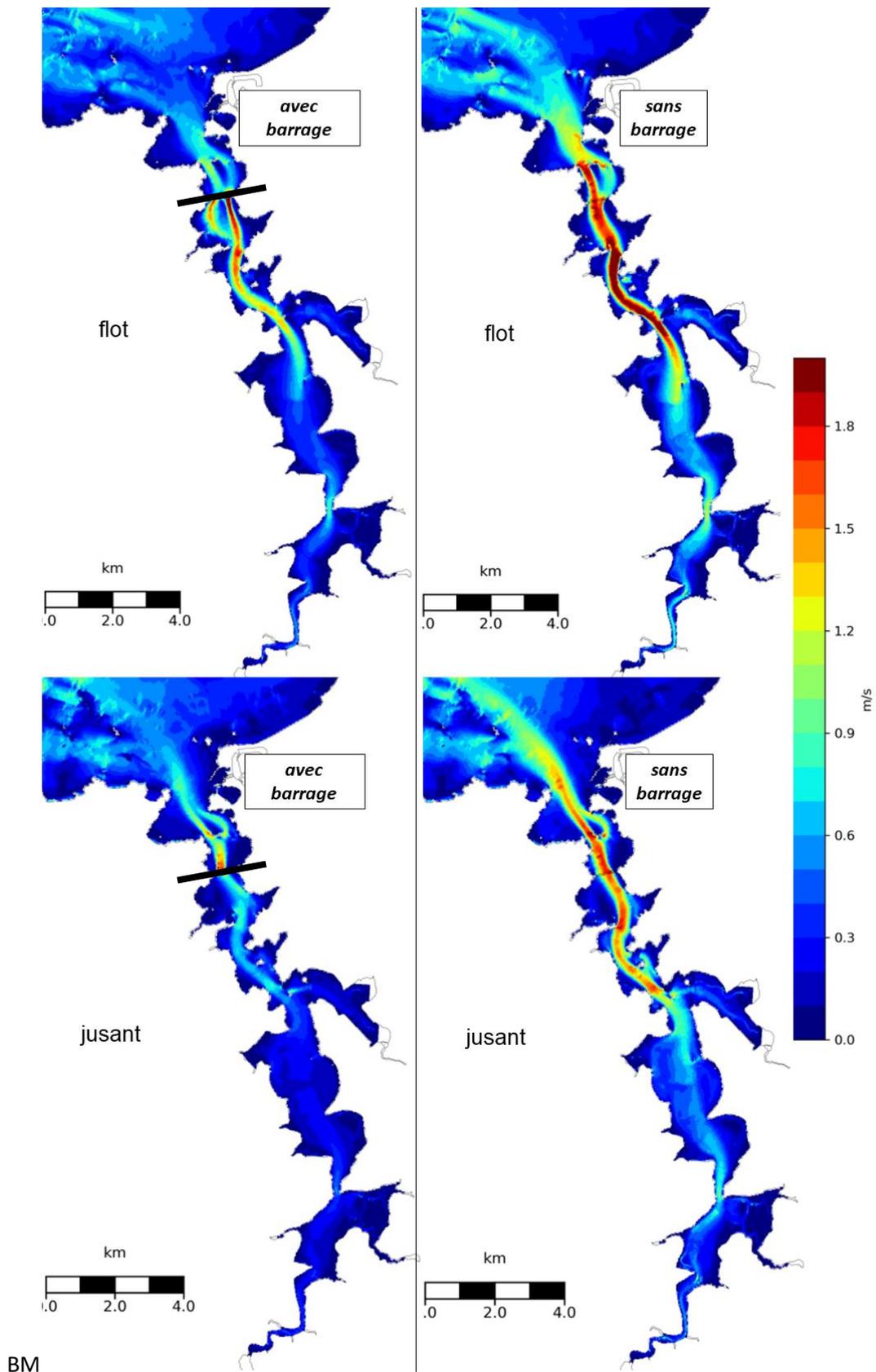


**Figure 12 : distribution des percentiles 95 des courants de marée en flot (à gauche) et en jusant (à droite).** *Calculs réalisés pour la bathymétrie de 2010, sans différence par rapport à l'actuelle à cette échelle d'observation.*

La figure 12 montre clairement (1) la suprématie du courant de flot dans le bassin et (2) que les courants sont nettement plus élevés dans le secteur aval, avec un gradient décoissant vers l'amont, sauf au niveau du resserrement provoqué par la cluse. Les gradients transversaux sont également très marqués, avec un rapport qui peut atteindre 10 entre le chenal et les banquettes latérales.

L'implantation du barrage et le fonctionnement de l'usine marémotrice ont entraîné une diminution importante de l'amplitude de marée. L'utilisation de la modélisation mathématique permet d'en

déterminer les répercussions sur l'intensité des courants associés, en simulant la propagation de la marée dans un estuaire de même topobathymétrie, mais sans barrage (Figure 13).



BM  
Figure 13 : effet du barrage marémoteur sur le percentile 95 des courants de marée en Rance maritime.  
*Simulations réalisées avec la bathymétrie de 2010.*

Le constat est une réduction drastique des courants dans la configuration actuelle, que ce soit en flot ou en jusant.

L'asymétrie de marée, déjà relevée en termes de différence de durée entre marée montante et marée descendante et en termes de différences entre flot et jusant en quelques points, peut être représentée par le rapport entre les intensités max de flot et de jusant. Cet indicateur d'asymétrie est pertinent, mais il est susceptible d'amplifier le poids d'un pic de courant qui serait très bref. Il est représenté en annexe A3.

Nidzioko et Ralston (2012) ont proposé un indicateur basé sur le moment d'ordre 3 du courant de marée  $U$  normalisé par le moment d'ordre 2 (élevé à la puissance 3/2) :

$$\gamma_0^U = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}} \quad \text{où} \quad \mu_m = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (U)^m \quad \text{et } N : \text{nombre d'échantillons au cours de la marée}$$

L'intérêt de cet indicateur est de moduler l'effet d'un pic de courant très élevé qui ne durerait qu'un instant bref. Il est représenté figure 14.

L'indicateur de Nidzioko et Ralston (2012) a le même signe que le courant dominant (en Rance, le jusant est pris positif car orienté vers le nord). La domination du flot dans l'ensemble du bassin est nette, en particulier dans les secteurs les plus profonds. Par contre, on retrouve une domination du « jusant » dans la plupart des baies latérales, en dehors des secteurs d'élévation haute (schorre) où les courants sont très faibles. En fait cette apparente prédominance de jusant sur les bords est trompeuse : elle révèle un courant préférentiellement vers le nord effectivement, mais qui peut se produire à marée montante pendant un flux général de flot dans le bassin maritime, du fait des nombreux contre-courants qui ont été décrits sur les cartes de courants de marée instantanés. Il n'en reste pas moins que les courants dominants sont inversés entre le chenal (au sens large) et les baies adjacentes.

Il est frappant de constater que l'asymétrie des courants de marée était analogue, avant l'implantation de l'usine marémotrice. C'est d'ailleurs assez courant en estuaire. On peut relever que la suprématie du flot sur le jusant dans le secteur central a plutôt été renforcée par l'aménagement, tandis que les dominances de courant vers le nord sur les bords étaient au moins aussi importantes. Naturellement, l'asymétrie a beaucoup évolué de part et d'autre du barrage, mais le phénomène est principalement lié à la disposition des vannes et des groupe-bulbes, qui souvent ne sont pas actifs en même temps.

Un indicateur analogue a été défini pour quantifier l'asymétrie de la vitesse de variation de la surface libre (marée montante et descendante) par Nidzioko et Ralston (2012). Il a été évalué pour la Rance par Rtimi et al (2021), qui ont aussi calculé l'indicateur d'asymétrie des vitesses, avec des résultats tout à fait semblables à ceux qui sont présentés ici.

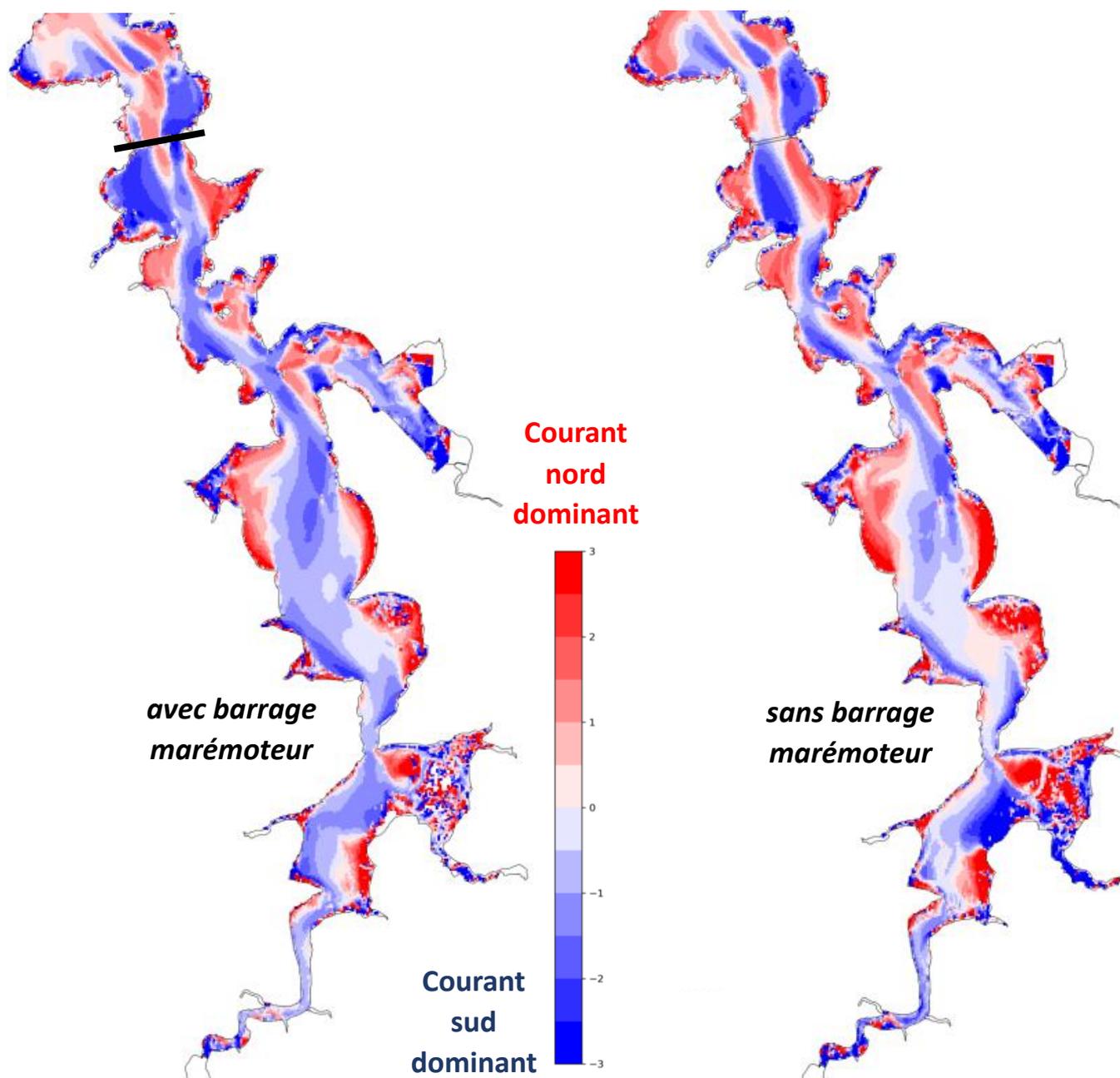


Figure 14 : distribution spatiale de l'asymétrie de marée à l'aide de l'indicateur de Nidzieko et Ralston (2012).  
 A gauche : fonctionnement actuel ; à droite sans barrage marémoteur. Calculs réalisés avec la bathymétrie 2010

## 6 - Durée de l'étalement de pleine mer et temps d'immersion

L'augmentation de l'étalement de pleine mer dans le bassin, imposée par la recherche d'une chute optimale entre le bassin et la mer pour augmenter la production électrique lors du turbinage direct en jusant, est bien connue en Rance, et préoccupante car elle constitue une période favorable pour le dépôt des sédiments dans des secteurs où les courants sont souvent insuffisants pour éroder les dépôts de pleine mer. La durée d'étalement de courant, ici définie comme la période au cours de laquelle le courant reste inférieur à 10 cm/s (condition favorable au dépôt de particules) est représentée par la figure 15, en valeur moyenne pour un cycle VE/ME.

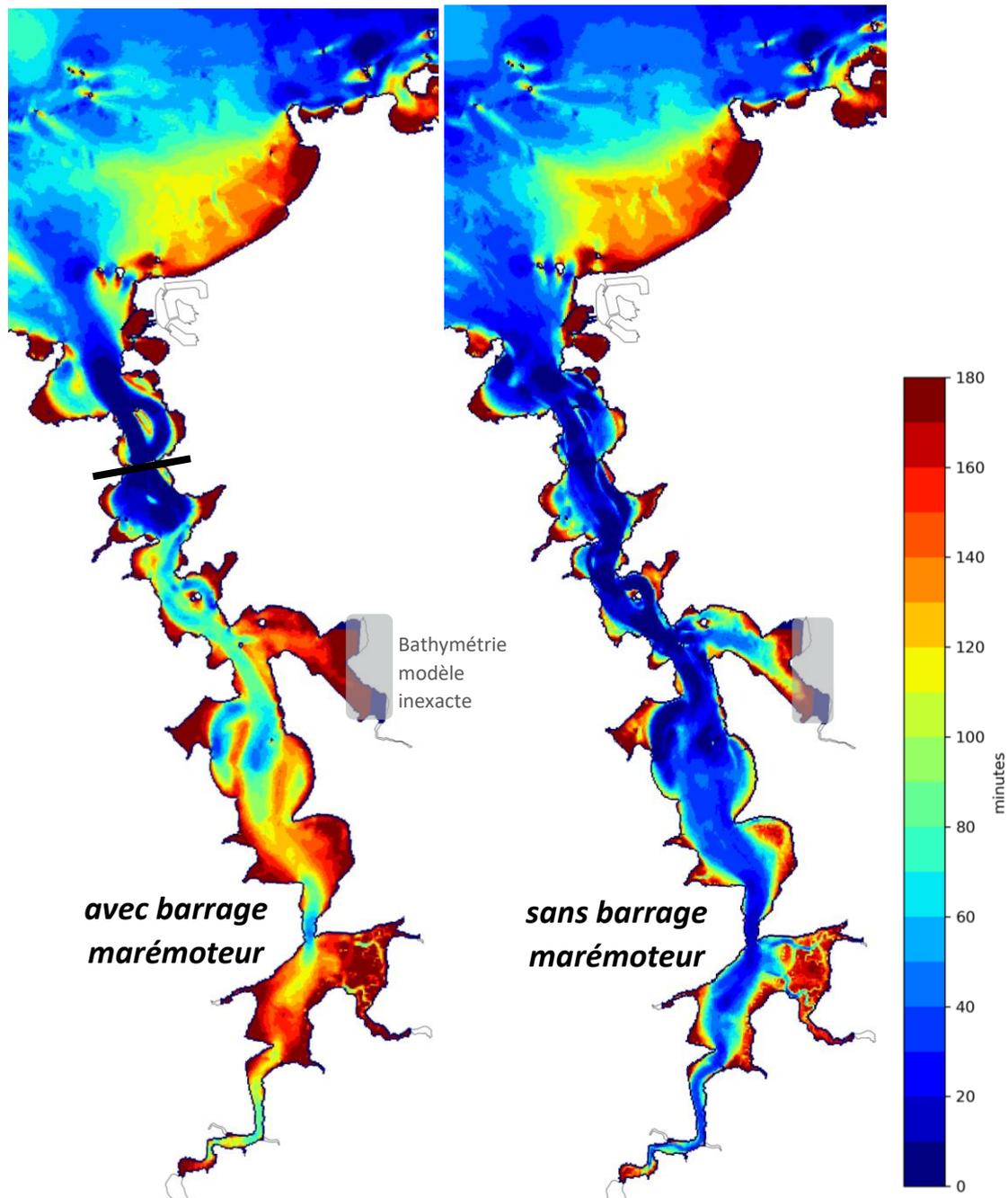


Figure 15 : répartition spatiale des durées d'étalement de courant (vitesse < 10 cm/s) à pleine mer, en moyenne par marée pour un cycle complet vive eau / morte eau. Calculs réalisés avec la bathymétrie 2010

La situation d'avant construction du barrage (à droite sur la figure 15) est représentative des durées d'étales dans un estuaire macrotidal tel que les rias bretonnes. La durée est en général inférieure à une heure, sauf sur les bords peu profonds (haut estran). La Rance d'aujourd'hui connaît des étales de PM très longues, atteignant 3 heures sur des surfaces importantes. On notera que l'aval du barrage est également impacté (en particulier la baie du Prieuré).

L'augmentation de l'étales de pleine mer est susceptible d'influencer le temps d'immersion dans le bassin maritime. C'est ce qu'indique la figure 16.

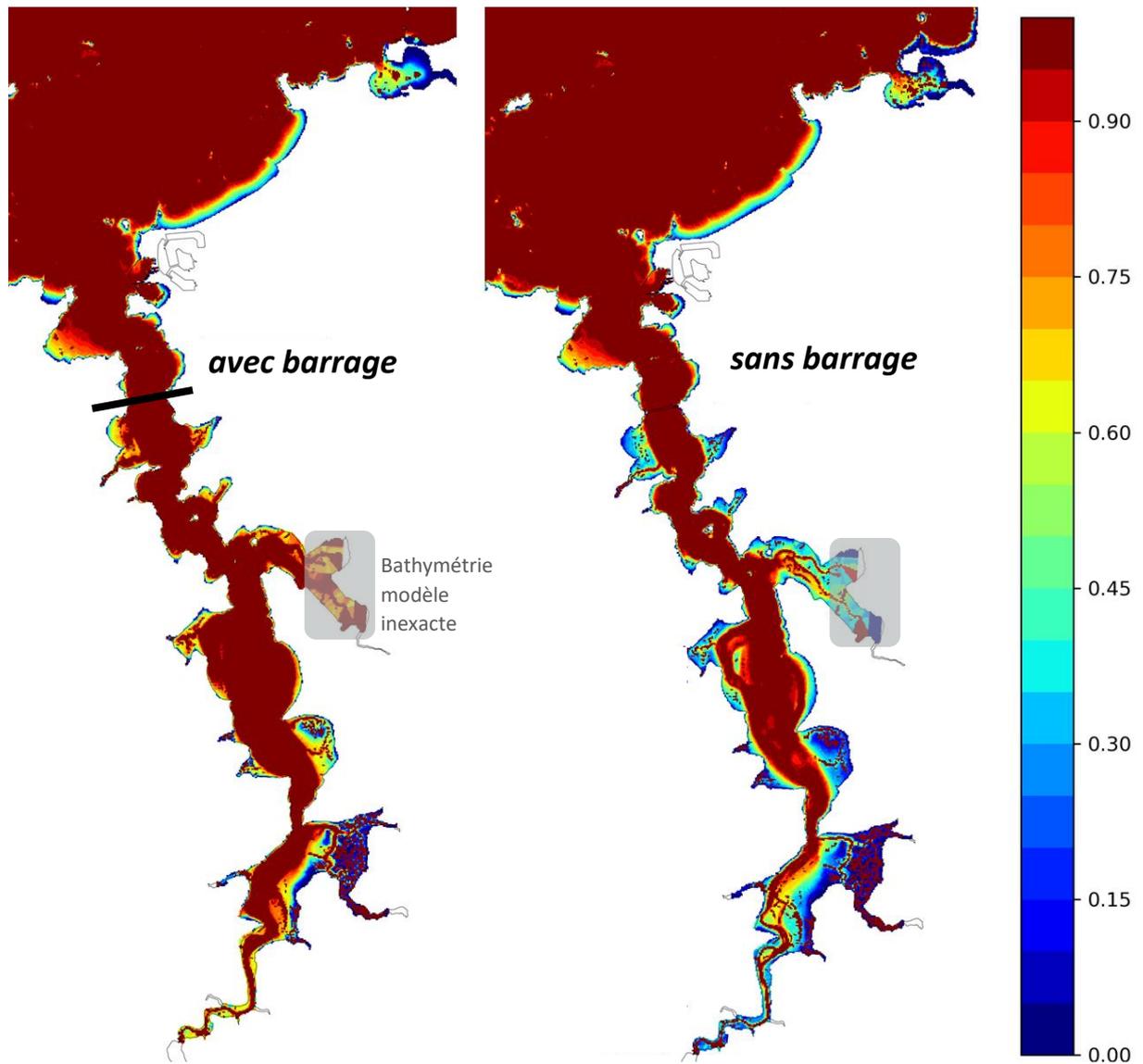
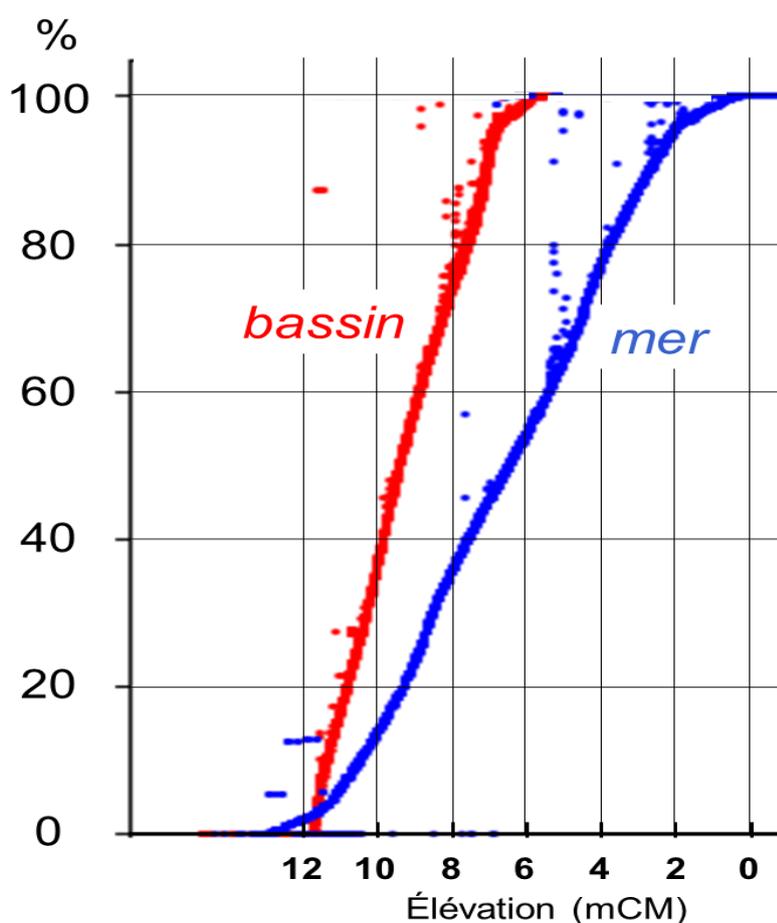


Figure 16 : répartition des temps d'immersion pendant un cycle vive eau / morte eau (en fraction du temps). Calculs réalisés avec la bathymétrie 2010.

Cette figure montre d'abord la réduction déjà connue des surfaces d'estran du fait du fonctionnement de l'usine marémotrice : les zones qui ne sont pas de couleur bordeaux (surface immergée 100 % du temps) sont plus étroites<sup>7</sup>.

La figure 16 révèle aussi que les secteurs bleus, immergés très peu de temps, ont quasiment disparu, sauf dans les Bas-Champs. Cela se voit sur la figure 17 représentant la fraction d'immersion en fonction de la cote du fond (relation à peu près uniforme dans le bassin maritime d'une part, et en mer - ou dans le bassin sans barrage - d'autre part). On retrouve côté bassin, en rouge le rétrécissement de la zone d'estran lié à la réduction d'amplitude de marée, et l'absence de secteurs à immersion rare (la courbe rouge est presque « verticale » pour les faibles taux d'immersion, ce qui n'est pas le cas de la courbe bleue, qui montre un « étalement » naturel).



**Figure 17 :** répartition des temps d'immersion (en % du temps) en fonction de l'élévation du fond (simulation effectuée pour un fonctionnement de l'usine antérieur à 2020)  
*A titre d'exemple, la cote 10 mCM était immergée 14 % du temps avant barrage (dans le bassin comme en mer), elle est maintenant immergée 34 % du temps dans le bassin.*

Ce processus a des conséquences en termes de biodiversité caractéristique des zones d'estran en milieu estuarien. En particulier les surfaces de schorre (herbus, marais maritimes) « actifs » ont a priori considérablement diminué.

<sup>7</sup> A noter que la comparaison de la figure 16 n'est pas exactement fidèle à l'évolution qui s'est produite depuis 60 ans, car la configuration sans barrage a ici été simulée avec la bathymétrie actuelle, mais cette comparaison reste juste au premier ordre.

## 7 - Courants résiduels

Les 3 premières planches de l'annexe A3 représentent les courants résiduels de marée, en surface. Ce sont les moyennes des vitesses obtenues au cours d'un cycle complet vive eau / morte eau. L'intensité habituelle des courants résiduels de marée est inférieure à 10 cm/s, et des courants plus forts révèlent des asymétries locales de vitesse importantes entre flot et jusant, et/ou des circulations tourbillonnaires. On peut voir en particulier sur la figure centrale du bassin la présence de tourbillons résiduels qui se calquent sur les tourbillons repérés en circulation instantanée lors de la période de pleine mer (BM St-Malo + 7h, dans l'annexe A1). Ainsi, au nord des îles Chevret, Harteau et Notre Dame, la forte intensité des courants résiduels qui portent vers l'ouest révèle que les courants ont cette direction pendant pratiquement toute la marée. On note aussi que même en l'absence d'écoulement de la Rance amont (condition de la simulation représentée) la moyenne du courant est dans le sens du jusant sur les bancs de la Moinerie et du Chêne Vert, tandis qu'elle est nulle dans le chenal principal, et ce courant préférentiel de jusant se retrouve sur la moitié est de la « plaine de Mordreuc », plus au nord.

Dans le secteur du barrage, on retrouve naturellement un courant dominant de jusant au droit des groupes-bulbes et un flux de flot devant les vannes en aval de l'usine marémotrice, mais en amont de celle-ci, le courant résiduel de flot en amont des vannes ne s'exprime que sur une faible distance, étant contrarié par des moyennes du courant dans le sens du jusant depuis l'amont à hauteur de la baie du Troctin. Ce courant résiduel de jusant se prolonge jusqu'aux groupes-bulbes au centre de l'estuaire, mais plus à l'ouest, on observe un courant résiduel très marqué vers le sud en marge de l'anse des Rivières. C'est l'empreinte du tourbillon décrit pendant une bonne partie de la marée et en particulier lorsque les vannes sont fermées et les groupes à l'arrêt. Un calcul de débit résiduel permettrait de savoir si ces vitesses résiduelles se traduisent par des flux d'eau moyens sur la marée qui seraient analogues.

Les courants résiduels ne représentent pas les déplacements moyens des masses d'eau, car celles-ci changent de secteur constamment au cours de la marée et ne connaissent jamais la même succession de courants que celle relevée en un point fixe. Pour accéder à ces mouvements réels, il est nécessaire de simuler des trajectoires d'éléments fluides qui seraient animés d'un courant réactualisé à chaque instant à leurs nouvelles positions.

Par contre, les sédiments sableux grossiers ou de taille moyenne se déplacent peu dans la marée et ne sont mobilisés qu'au-delà d'une certaine vitesse. 15 cm/s a été choisi comme un seuil de mobilité représentatif des sables, et le sens de déplacement de ces sables peut-être visualisé de façon approximative en considérant la moyenne des courants (à 1 m au-dessus du fond) qui dépassent ce seuil. Les résultats sont présentés en 3 cartes à la fin de l'annexe A3.

## 8 - Trajectoires des masses d'eau et excursions des particules

Les trajectoires des masses d'eau au cours de la marée sont a priori dépendantes des positions et heures de départ. Une étude assez fine des multiples possibilités de trajectoire a été menée à l'aide du modèle MARS-3D en Rance (Ifremer, 2021c). La marée étant un processus barotrope, les « masses » d'eau suivies sont transportées par le courant moyenné sur la verticale. 13 heures de lâcher (de PM ST-Malo -6 h à PM +6 h) de particules ont été considérées en vive eau et en morte eau, pour des conditions sans vent et un débit amont réaliste en été (de l'ordre de  $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). A chaque heure de départ, 3 trajectoires tous les 10 m le long de radiales transversales à l'estuaire (1 radiale tous les km) ont été simulées, initialement séparées les unes des autres d'environ 3 m. Ainsi à chaque lâcher, ce sont 4428 trajectoires pendant 48h (environ 4 marées) qui ont été calculées. Bien au-delà de ce qui était attendu, une extrême variabilité des trajectoires suivies a été constatée. Pour bien l'accepter, il nous paraît intéressant d'en commenter quelques unes.

La figure 18 représente des exemples de trajectoires partant de 3 radiales réparties dans le bassin maritime (en amont, dans la plaine de Mordreuc, au centre à hauteur de St-Suliac et en aval devant La Richardais) à 3 moments différents de la marée (4h avant PM de St-Malo, soit en fin de jusant dans le bassin, 1h avant PM de St-Malo, soit en flot dans le bassin et 2h après PM de St-Malo, soit à PM dans le bassin). En chaque radiale, 5 trajectoires réparties entre rive gauche et rive droite et se distinguant par leur couleur sont calculées pour une marée de vive eau. Pour aider à les distinguer, les trajectoires parties de la radiale St-Suliac (points de départ représentés par des disques de couleur) sont en traits continu, celles de la radiale aval (resp. amont) sont en pointillés (resp. tiretés). Les positions des trajectoires après une marée sont représentées par des cercles évidés.

### 8.1 Analyse des trajectoires partant en fin de jusant

Sur la radiale aval, la trajectoire partant rive gauche (vert) se déplace un peu vers la terre, pour finalement revenir tout près du point de départ après une marée. La trajectoire partant 300 m plus vers le chenal (en rouge) est d'abord emportée par la fin du jusant, puis remonte l'estuaire en amont de la pointe de Cancaval, décrit 2 tourbillons, sort du bassin à travers un groupe bulbe et se retrouve au large de Dinard au bout d'une marée. Celle qui part depuis le chenal (bleu) franchit une première fois le barrage, revient dans le bassin par les vannes et ressort au jusant suivant (par un groupe) pour rejoindre St-Malo. La trajectoire suivante (magenta) n'a pas le temps de franchir le barrage avant la fin du jusant, remonte plus en amont l'estuaire et s'évacue finalement au jusant suivant assez au large. La trajectoire partie rive gauche (moutarde) reste confinée en baie de Troctin.

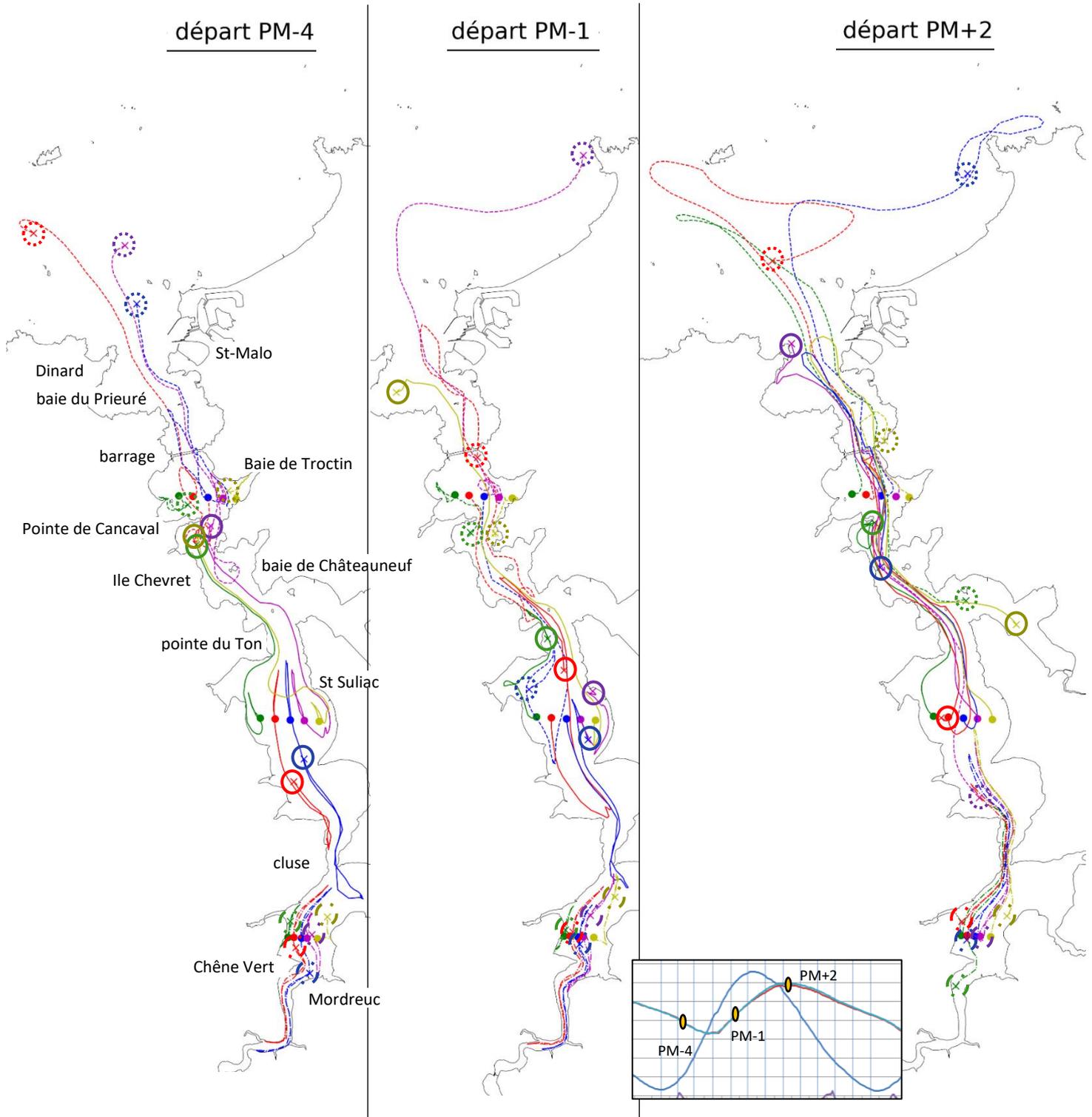
Les trajectoires de la radiale de St-Suliac sont plus faciles à suivre, vers le nord pendant la fin de jusant, puis vers le sud en flot et à nouveau vers le nord au jusant suivant, mais leur dispersion après une marée est extrême : les trois trajectoires parties près des rives (vert pour la rive gauche, moutarde et magenta en rive droite) se retrouvent à proximité de la pointe de Cancaval, tandis que celles parties plus au centre (rouge et bleu) ont un déplacement résiduel vers l'amont.

Les trajectoires amont sont plus courtes (courants plus faibles) et révèlent un déplacement résiduel très faible, susceptible d'être modifié en fonction du débit amont de la Rance.

### 8.2 Analyse des trajectoires partant en début de flot

Pour la radiale aval, la dispersion des trajectoires est encore très marquée : celles lâchées près des rives remontent un petit peu l'estuaire, la rouge remonte l'estuaire jusqu'à la pointe du Ton, mais profite du jusant pour quitter le bassin par les groupes avant de franchir le barrage par une vanne !

Seule la trajectoire initialement sur le bord est du chenal, prise sans doute dans un contre-courant initial en baie de Troctin (cf. Fig A1 BM+4h), suit d'abord un mouvement tourbillonnaire avant de franchir l'usine marémotrice dès le début du jusant et arrive au nord de la plage de St-Malo avant la fin de la marée.



**Figure 18 :** exemples de trajectoires de masses d'eau simulées en Rance maritime au cours d'une marée de vive eau. L'instant de départ est précisé en haut de chaque carte par rapport à la pleine mer de St-Malo. Les points de départ sont matérialisés par des pastilles de couleur, les positions après 12h30' par des cercles évidés.

Les déplacements résiduels des trajectoires parties à hauteur de St-Suliac sont beaucoup plus faibles, même si l'excursion des particules reste importante. Étonnamment, la trajectoire partant de la rive droite (tout près de St-Suliac) est très peu emportée par le flot et a le temps de franchir le barrage au jusant suivant, pour atteindre la baie du Prieuré avant la fin de la marée.

### **8.3 Analyse des trajectoires partant à PM**

Toutes les trajectoires de la radiale aval sortent rapidement du bassin au cours du jusant qui suit, sauf celle en bord est du chenal qui est entraînée très en amont pendant le flot suivant (à proximité de la cluse !). Mais toutes les trajectoires divergent : celle partie de La Richardais (vert) va loin au large mais repasse par les vannes au cours du flot et remonte jusqu'en baie de Châteauneuf, celles initialement dans le chenal sont prises par le courant de flot qui porte à l'est au large de St-Malo et ne reviennent pas dans la marée, celle issue de la baie de Troctin reste piégée en rive droite de l'autre côté du barrage.

Les trajectoires parties de la radiale de St-Suliac sont encore très contrastées : celle de la rive gauche (vert) arrive à la pointe de Cancaval, celle partie 300 m plus à l'est (rouge) revient à son point de départ, la suivante (bleu) fait un aller-retour à travers le barrage et revient à hauteur de l'île Chevret, celle du chenal rive droite (magenta) se retrouve à Dinard et la dernière, rive droite, franchit également le barrage dans les deux sens pour remonter au fond de la baie de Châteauneuf.

La dispersion des trajectoires amont reste encore modérée, malgré un aller retour à travers la cluse où les courants sont plus forts.

### **8.4 Bilan de l'analyse des trajectoires**

Cet aperçu d'un échantillon parmi plus de 50 000 trajectoires calculées pour la seule vive eau donne un aperçu de l'extrême diversité des trajectoires d'éléments fluides sous le seul forçage de la marée. Ce phénomène assez classique est exacerbé en Rance pour plusieurs raisons : (1) la morphologie du bassin est complexe et génère des gradients de vitesse importants, (2) la distribution des courants de marée a révélé de nombreuses structures tourbillonnaires, (3) l'excursion des particules au cours de la marée est du même ordre que la dimension du bassin et (4) le fonctionnement de l'usine marémotrice accentue la dispersion des trajectoires au gré du franchissement ou non des vannes ou des groupes-bulbes. Il est essentiel de garder à l'esprit que cette dispersion ne résulte pas d'une incertitude du calcul (une même trajectoire calculée deux fois restera la même) mais d'une variabilité qui résulte d'un positionnement initial légèrement différent dans l'espace ou dans le temps.

Les trajectoires issues des mêmes points aux mêmes heures de lâcher mais en morte eau sont montrées en annexe A4. La dispersion des trajectoires est très nettement atténuée, car les gradients de vitesse sont plus faibles, les tourbillons moins marqués et l'excursion des particules (liée à l'intensité du courant) plus faible. Seules les trajectoires aval, donc à proximité du barrage, montrent des divergences encore importantes.

Des simulations de trajectoires dans une configuration sans barrage ont également été réalisées (annexe A5) : sans surprise, les trajectoires sont beaucoup plus grandes, et la sortie en mer plus au large est facilitée. La variabilité et la dispersion des trajectoires reste considérable.

### **8.5 Excursion des particules au cours d'une marée**

Les calculs de trajectoires ont permis d'évaluer l'excursion des éléments fluides au cours d'une marée. Il s'agit de la distance parcourue par une particule d'eau au cours d'une marée (limitée ici à 12h24'). Comme les trajectoires elles-mêmes, ces distances sont extrêmement variables d'un secteur à l'autre, mais aussi dépendent de l'heure marée à partir de laquelle elles sont comptées. Il s'avère que cette variabilité est considérablement réduite si la distance est affectée non pas au point de départ, mais au « centre de gravité » de la trajectoire. En effet, une particule partant du milieu du bassin en début de flot aura sa trajectoire dans la moitié sud du bassin, tandis que si elle part en début de jusant sa trajectoire sera dans la moitié nord, de même que celle d'une particule qui part du barrage en flot. Si ces centres de trajectoires sont proches, la probabilité pour que les excursions au cours de la marée soient du même ordre est forte. Par contre, naturellement, la géométrie du bassin fait que le « centre de gravité » d'une trajectoire, qui n'a pas de réalité physique, peut se retrouver à terre. C'est ce que montre la figure 19, où toutes les excursions calculées (quel que soit l'instant de départ) sont représentées. On constate que la dispersion observée sur les trajectoires individuelles se retrouve moins dans les excursions positionnées aux centres de gravité au lieu des points de départ.

La figure 19 révèle qu'en vive eau l'excursion de marée est de l'ordre de 7 km dans le bassin sud, et plutôt de l'ordre de 10 km dans la moitié aval, et que les excursions sont nettement plus faibles près des rives. En morte eau, les excursions sont autour de 4-5 km dans la moitié sud, et de 8 km en aval de St-Suliac. S'il n'y avait pas de barrage, les excursions de marées seraient beaucoup plus grandes : de l'ordre de 18 km (resp. 12 km) en aval de St-Suliac en vive eau (resp. morte eau).

Toujours à partir des simulations de trajectoires, le temps moyen d'atteinte du barrage à partir d'un secteur de l'estuaire a été estimé. Il est de l'ordre de 35 h depuis St-Suliac, et de 20 h depuis le secteur de l'île Chevret. Ce ne sont que des valeurs moyennes, la variabilité restant forte. En amont il est beaucoup plus long : la plupart des trajectoires (limitées à 48 h) n'ont pas encore atteint le barrage.

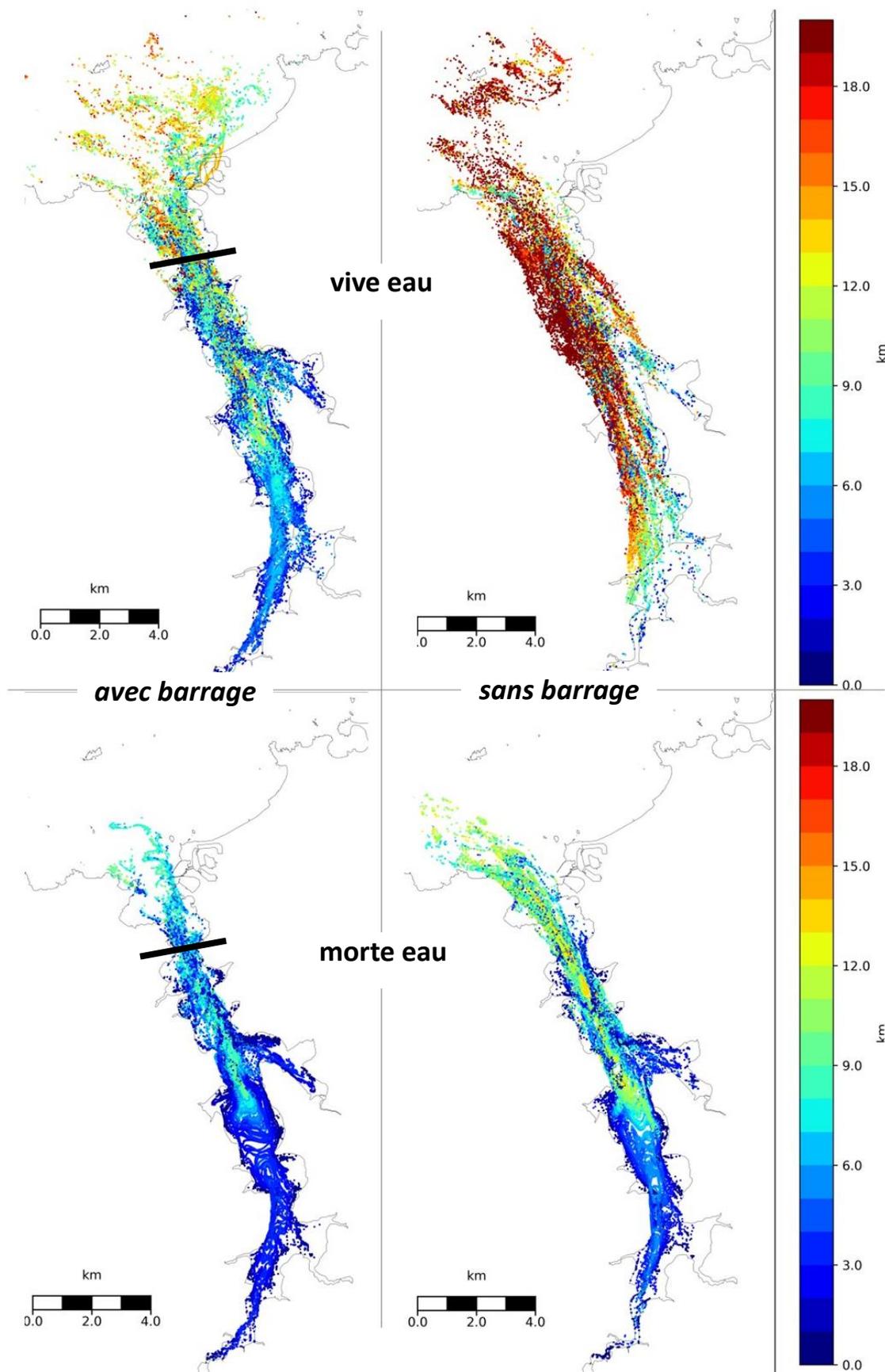


Figure 19 : dimension (en km) de l'excursion de marée, rapportée au centre de gravité des trajectoires pendant 12h24'

## 9 - Temps de renouvellement des masses d'eau

La notion de temps de renouvellement d'une masse d'eau est considérée comme essentielle par les écologues pour qualifier un plan d'eau. Il n'y a pas de descripteur universellement reconnu pour le caractériser, mais il est souvent proposé de l'évaluer comme un temps caractéristique décrivant la diminution de la concentration d'un marqueur. Classiquement, la variation de concentration d'un marqueur du domaine considéré qui se disperse dans le milieu a une allure exponentielle décroissante. Le temps de renouvellement  $Tr$  est défini tel que la variation de concentration  $C$  peut s'approcher de la relation :

$$C(t-t_0) = C_0 e^{-(t-t_0)/Tr}$$

où  $t_0$  est le temps à partir duquel la concentration commence à diminuer par dispersion dans le milieu. C'est la méthodologie proposée par Jouon et al. (2006) qui est appliquée ici (Ifremer, 2021c), le volume de contrôle choisi étant tout l'estuaire, de l'écluse du Châtelier jusqu'à l'embouchure à hauteur de Dinard/St-Malo.

Deux conditions de marée sont considérées : morte eau et vive eau, et la condition initiale choisie est une situation de pleine mer. Les résultats rassemblés sur la figure 20 montrent que le temps de renouvellement est beaucoup plus long en amont de la cluse, de l'ordre de 15 jours, qu'il diminue progressivement entre la cluse et la baie de Châteauneuf et qu'il n'est plus que de l'ordre de 2 jours (respectivement 4 jours) en vive eau (resp. morte eau) dans le secteur du barrage. Ces temps sont considérablement plus longs que ceux que l'on avait sans barrage : dans ce cas le temps de renouvellement était de l'ordre de 3-4 jours (resp. 6 jours) en amont et de la journée (resp. 3 jours) en aval en situation de vive eau (resp. morte eau). L'impact du barrage est également visible en aval de celui-ci (abords de St-Malo et baie du Prieuré). Les calculs ont été faits pour les masses d'eau de surface et les masses d'eau du fond : les résultats diffèrent très peu dans les conditions de simulation réalisées avec un faible débit d'étiage de la Rance en amont.

On observe donc que la réduction du marnage dans le bassin maritime de la Rance depuis la mise en service de l'usine marémotrice s'est accompagnée d'une réduction des courants et d'un allongement très fort du temps de renouvellement des masses d'eau qui a plus que doublé.

Cette réduction du marnage se traduit aussi par une réduction du prisme de marée, le volume d'eau qui entre et qui sort du bassin à chaque marée : il est de 80 Mm<sup>3</sup> en vive eau et 40 Mm<sup>3</sup> en morte eau, alors qu'avant barrage il oscillait entre 130 Mm<sup>3</sup> et 60 Mm<sup>3</sup> entre vive eau et morte eau, pour un volume total du bassin de 184 Mm<sup>3</sup> à pleine mer de vive eau (Rtimi et al., 2021).

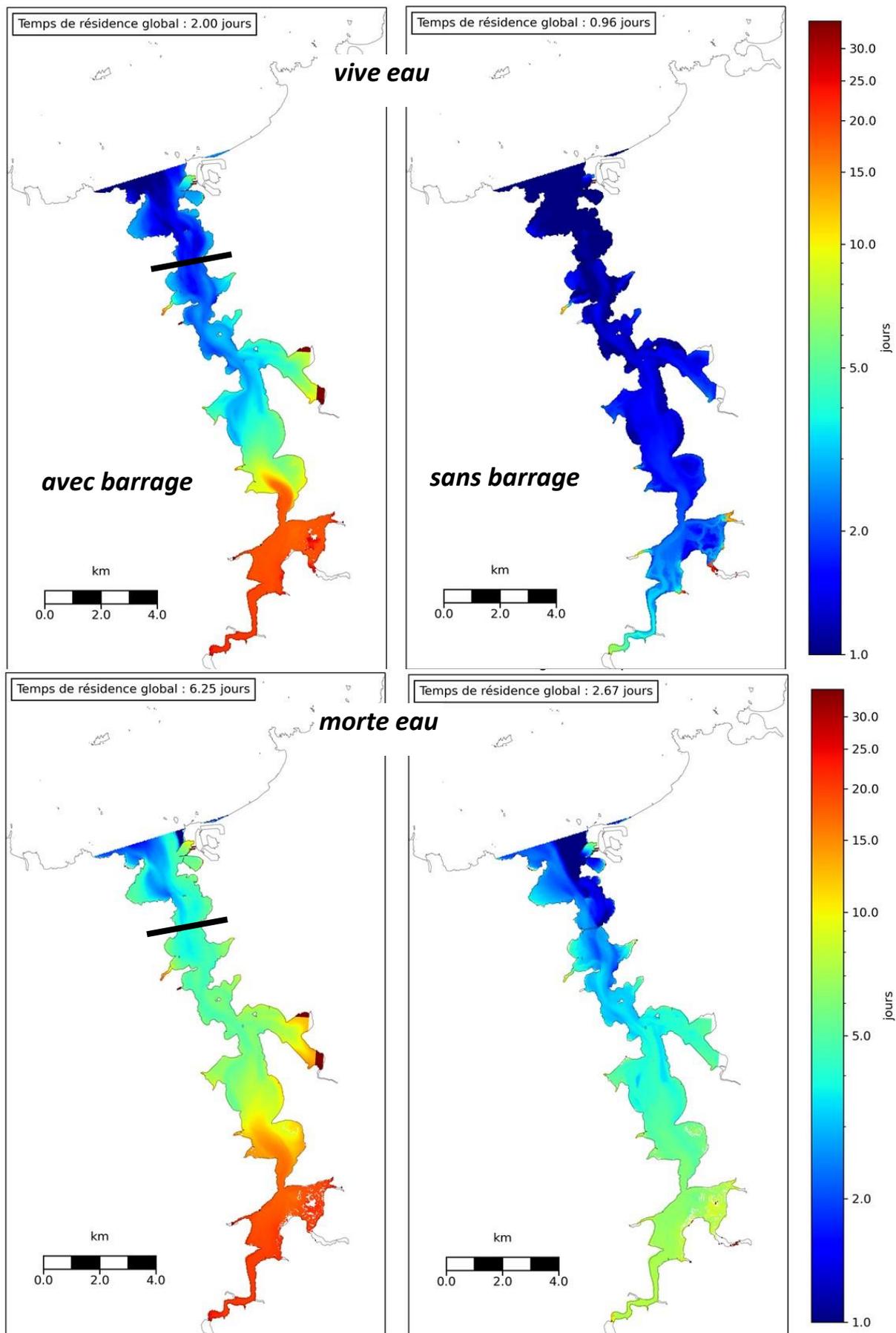
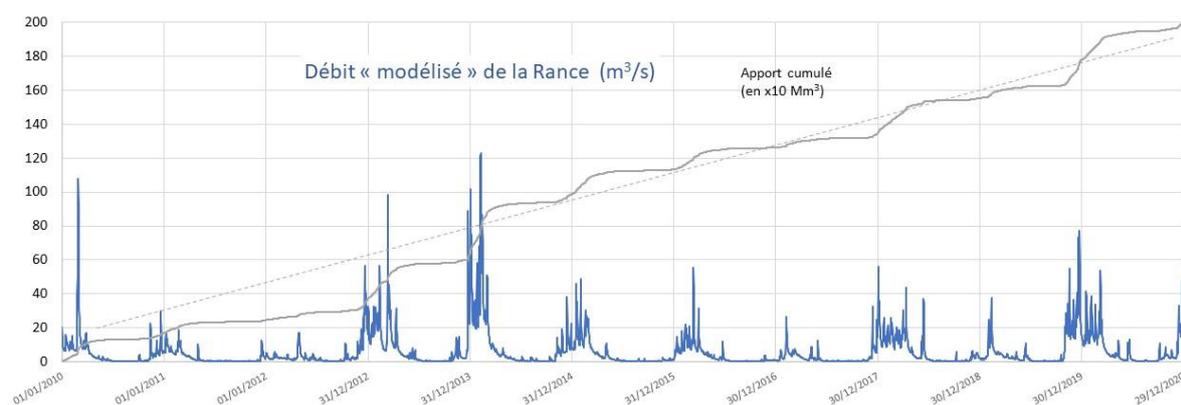


Figure 20 : temps de renouvellement des masses d'eau (de surface), en partant à pleine mer.

## 10 - Apports d'eau douce et distribution des salinités dans le bassin maritime de la Rance

Les informations disponibles relatives à la salinité étaient assez pauvres, et il était admis que la mise en service de l'usine marémotrice avait repoussé plus en amont les eaux dessalées, typiquement en amont de la cluse de Port St-Jean (Bonnot-Courtois et al., 2002).

Les apports d'eau douce eux-mêmes étaient mal connus car la station de mesure des débits est située très en amont de l'écluse du Châtelier. Cette incertitude est maintenant partiellement levée, puisqu'on dispose d'un modèle hydrologique sur l'ensemble des bassins versants de Bretagne, rendu accessible par le Conseil Régional de Bretagne, l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et l'institut AGROCAMPUS Ouest (<https://geosas.fr/simfen/>). Ce modèle hydrologique a été calibré sur les données de la banque hydro Bretagne (origine des données : Hydro-MEDDE/DE). La figure 21 représente l'évolution des débits au cours des 11 dernières années, et montre clairement des périodes d'étiage prolongées pendant l'été et souvent l'automne (débit de l'ordre de 0.5 m<sup>3</sup>/s), et des débits plus soutenus en période hivernale, atteignant fréquemment des débits de 20 à 40 m<sup>3</sup>/s, et plus exceptionnellement 50 à 100 m<sup>3</sup>/s. Le débit moyen est de 5.8 m<sup>3</sup>/s. Selon les résultats du modèle, il n'a guère évolué depuis 1984 (moyenne de 5.7 m<sup>3</sup>/s).



**Figure 21 : débit (m<sup>3</sup>/s) de la Rance en amont du bassin maritime, fourni par le modèle hydrologique SIMFEN. La courbe grise représente les apports cumulés, soit 2000 Mm<sup>3</sup> en 11 ans.**

Des mesures récentes de salinité, réalisées par EDF et par l'EPTB, complétées par la modélisation MARS-3D de l'estuaire, ont permis de préciser la distribution des dessalures dans le bassin maritime.

En particulier, des enregistrements en continu de la salinité de surface à St-Suliac et dans la cluse de Port St-Jean au cours de l'hiver 2020-2021 (figure 22) montrent que pour un débit de la Rance 40-50 m<sup>3</sup>/s la salinité de surface varie entre 10 et 30 PSU (~ g/l) dans la cluse et qu'à St-Suliac elle oscille entre 22 et 32 PSU, ce qui dénote des dessalures bien plus prononcées que ce que l'on croyait. La figure révèle aussi la réaction quasi instantanée du système au régime hydrologique de la Rance, les variations de salinité étant en phase ou en très léger retard (inférieur à 1 journée) par rapport aux variations de débit.

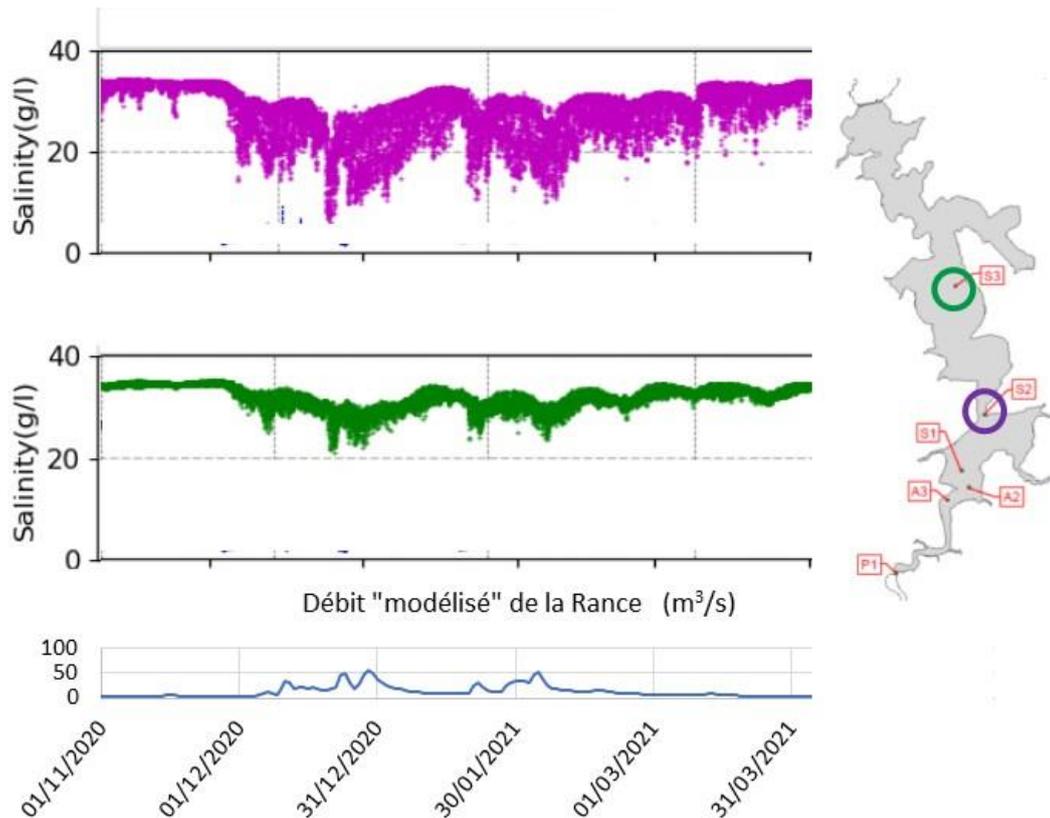
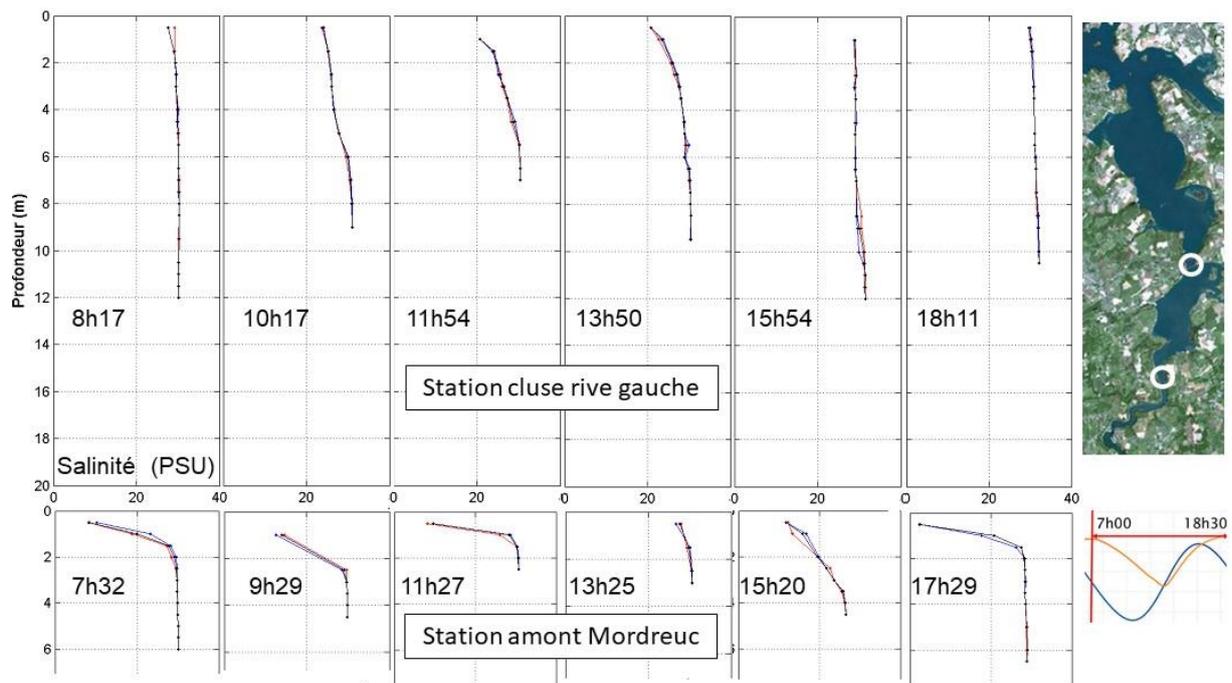


Figure 22 : mesures EDF de salinité de surface dans la cluse de port St-Jean et à St-Suliac

(d'après Parquet, 2021)

Des mesures en stations fixes à l'aide d'une sonde réalisées par l'EPTB ont par ailleurs mis en évidence la stratification de la masse d'eau en amont de la cluse (Figure 23). Les profils réalisés le 11 décembre 2020 pour un débit d'environ  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  et une marée de moyenne amplitude (coef. 70) révèlent des différences entre surface et fond dépassant 20 PSU en amont de Mordreuc et atteignant 5 PSU dans la cluse. Ainsi la salinité de fond ne descend guère en-dessous de 26 PSU au fond du chenal à Mordreuc et 30 PSU dans la cluse : les eaux restent principalement marines dans le chenal et les secteurs profonds.

La modélisation mathématique peut aider à décrire les structures spatiales des dessalures dans le bassin. La figure 24 visualise le panache d'eau dessalée en surface et au fond, pour des conditions de PM et de BM en ME et en VE, et un débit constant de la Rance égal à  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ , soit le débit moyen. Le panache est naturellement plus étendu à basse mer. Il est frappant de voir que même en vive eau, la stratification est marquée dans les secteurs subtidiaux de la « plaine de Mordreuc », en face de Plouër s/Rance (de l'ordre de 10 PSU), alors qu'elle n'est plus que de 2 PSU dans la cluse, et qu'elle approche 16 PSU entre Mordreuc et le Chêne vert. Cette stratification s'accroît en morte eau, mais reste dans les mêmes gammes. Ces différences entre salinités de surface et de fond sont dans l'ordre de grandeur des observations présentées figure 23, qui étaient mesurées par marée d'amplitude moyenne et pour un débit d'environ  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  (mais pendant quelques jours seulement). Ces résultats infirment l'idée assez répandue que le bassin maritime de la Rance serait homogène : si cela est assez vrai en aval, l'amont s'avère globalement stratifié.



**Figure 23 : Mesures de profils verticaux de salinité dans la cluse Port St-Jean et en amont de Mordrec, le 11 décembre 2020 (d'après Kervella et al., 2021).**

Cette stratification est plutôt inhabituelle dans un estuaire macrotidal, en particulier en condition de vive eau où les courants de marée sont intenses. Cela est dû à la forte réduction du marnage dans le bassin, très importante surtout en vive eau. Il a été vu en section 3 que les différences de marnage entre VE et ME étaient très atténuées dans le bassin en raison du fonctionnement de l'usine marémotrice. C'est ce qui explique la stratification analogue constatée en ME et en VE, avec également des extensions de panache très proches.

La comparaison entre la situation actuelle (avec barrage, et pour la bathymétrie de 2018) et une situation sans barrage (avec la bathymétrie de 2010, mais l'influence de la bathymétrie est d'un ordre de grandeur inférieur) est illustrée par la figure 25. Les salinités moyennes au cours d'un cycle vive eau/morte eau, calculées pour un débit constant de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ , sont représentées en surface et au fond. Il apparaît clairement que la stratification (différence surface/fond) est beaucoup plus marquée dans la situation actuelle que dans une configuration sans barrage, avec des dessalures plus étendues en aval en surface, contrairement à ce qu'on pensait auparavant, et par contre des salinités plus élevées au fond en raison du fonctionnement de l'usine marémotrice. La différence est particulièrement nette dans le secteur de Mordrec, où les salinités de fond seraient passées d'une moyenne de 22 PSU à près de 30 PSU, pour un débit moyen de la Rance.

Naturellement, ces modifications de salinité ont pu avoir des conséquences sur l'écosystème, en particulier près du fond où vit toute la faune benthique qui se déplace peu.

On notera enfin que la salinité dans le secteur des Bas-Champs est de l'ordre de 30 PSU, qu'elle n'aurait guère changé en présence de l'usine marémotrice, et que la plaine de Mordrec a une salinité de fond inférieure d'environ 4 PSU à celle des fonds subtidiaux de la rive gauche.

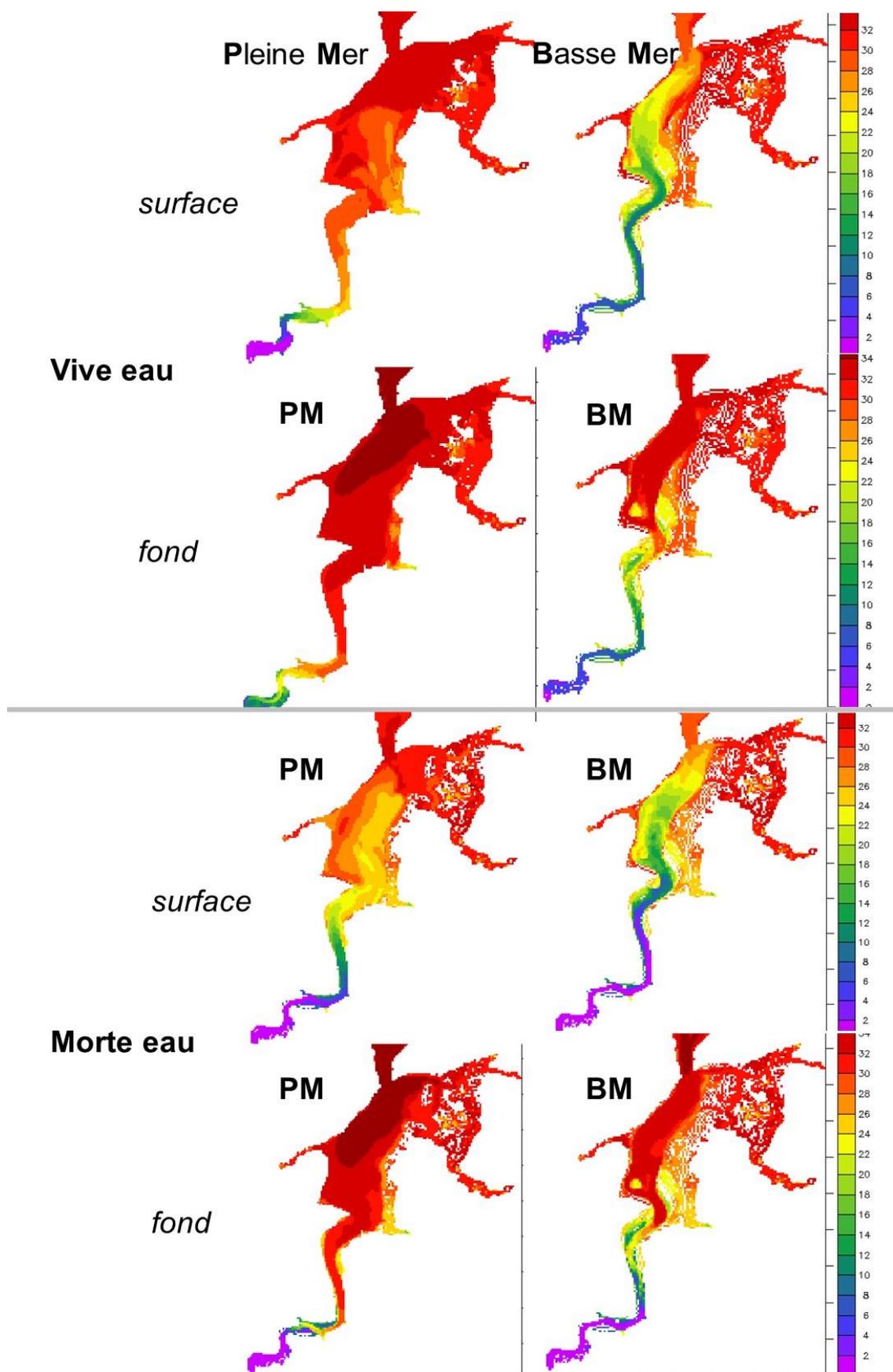


Figure 24 : Simulation des salinités en surface et au fond, à pleine mer et à basse mer de vive eau et de morte eau, pour un débit moyen de la Rance de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  (configuration actuelle).

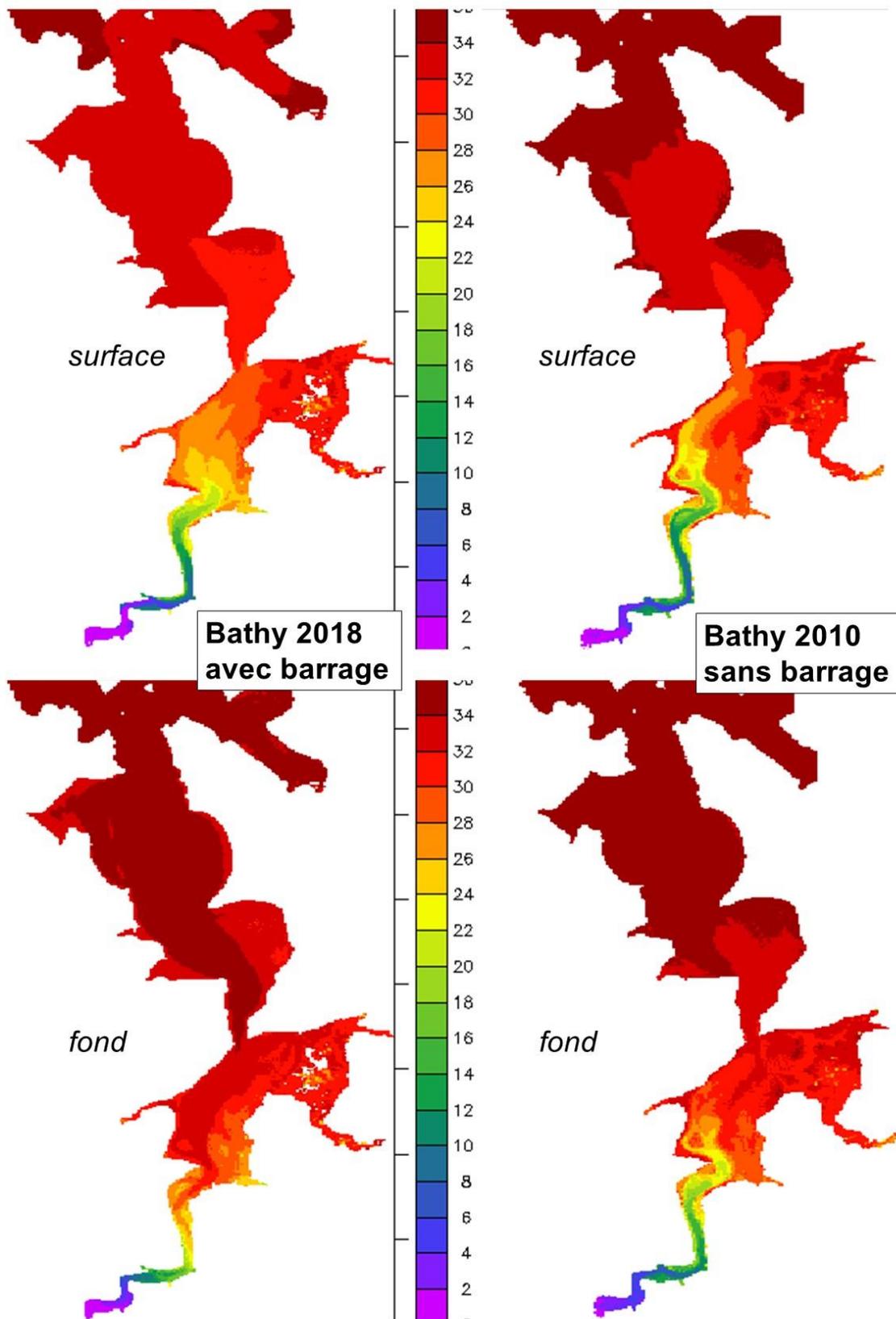


Figure 25 : Simulation des salinités de surface et de fond, en valeur moyenne au cours d'un cycle VE/ME, pour un débit moyen de la Rance de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ . A noter qu'un secteur d'estran découvert conserve la salinité qu'il avait au moment du découvremnt, ce qui peut générer un biais sur la salinité moyenne dans les secteurs d'estran.

## 11 - Evolution des fonds

L'évolution des fonds du bassin maritime de la Rance est déduite d'informations topo-bathymétriques cartographiées en différentes périodes depuis la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Ces informations sont les élévations du fond dans les secteurs immergés (on parle de bathymétrie) ou émergés (il s'agit de topographie) par rapport à une référence unique, en général le zéro des cartes marines (référence St-Malo) situé à 6.29 m sous le zéro IGN 69.

Le Service Hydrographique de la Marine a édité en 1889 une première carte de l'estuaire de la Rance en aval de l'écluse du Châtelier, construite une quarantaine d'années plus tôt. Faite pour la navigation, cette carte est détaillée en aval et dans les zones profondes, mais l'est très peu dans les parties supérieures de l'estran, de telle sorte qu'elle est difficilement exploitable pour établir des bilans sédimentaires. Elle est reproduite en annexe 7. Pour quelques sections qui seront présentées plus loin, les cotes bathymétriques estimées en 1889 ont été reportées. La comparaison est permise, car le zéro hydrographique mentionné plus haut n'a guère changé depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle, et a varié au plus de 11 cm<sup>8</sup>. La figure 26 ci-dessous montre une évolution modérée de la bathymétrie de l'estuaire entre 1889 et 2018, à travers le positionnement des isobathes -5 m et 0 mCM.

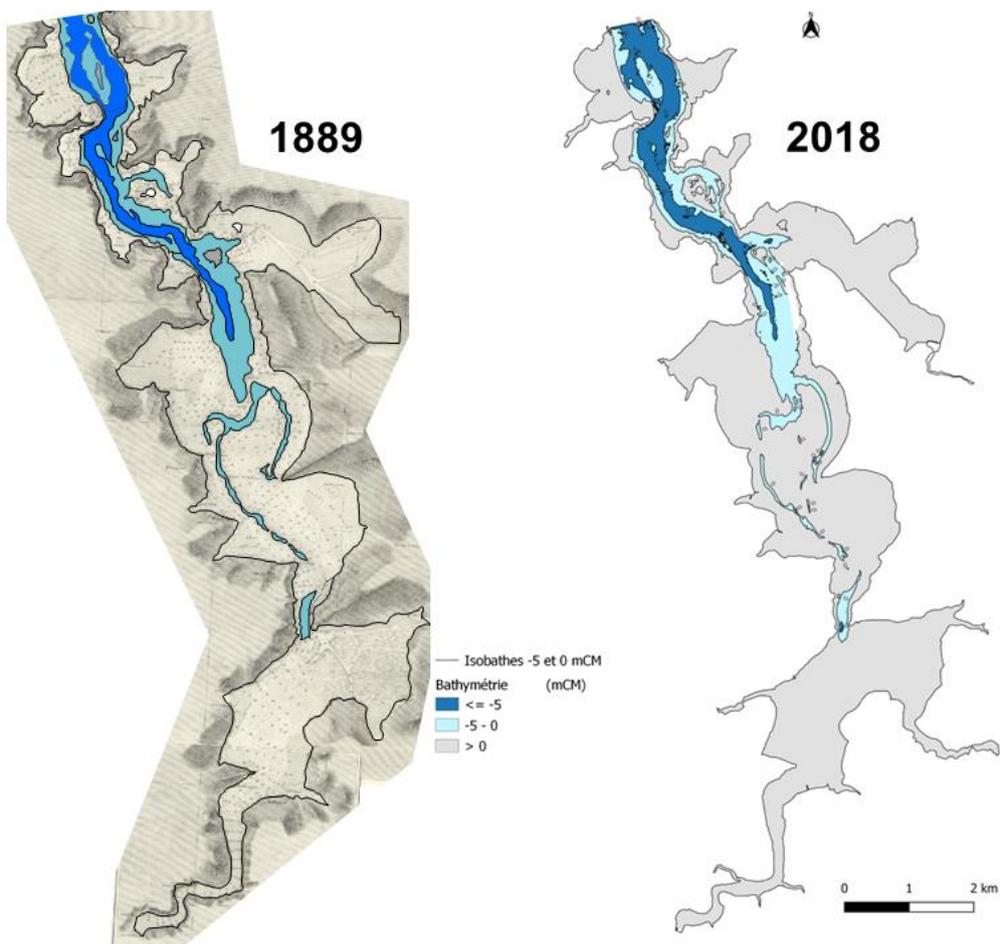


Figure 26 : Représentation des secteurs profonds (subtidaux) de l'estuaire de la Rance en 1889 et 2018

<sup>8</sup> SHOM, 2022. PAPI de St-Malo : axe 1 « amélioration de la connaissance et de la conscience du risque », action 1.II « numérisation des données du marégraphe de St-Malo ».

L'ensemble du bassin maritime a été cartographié 3 fois entre 1950 et 2018 : la carte de 1957 élaborée par EDF à partir de levés hydrographiques de 1957 et de levés photogrammétriques de l'IGN de 1953, la carte de « 2010 » qui associe un levé LIDAR (laser aéroporté) de 2009 pour les secteurs exondés et des sondages hydrographiques de 2011 pour les secteurs toujours immergés, et enfin la carte de 2018 établie par EDF à partir de nouveaux levés multifaisceaux et d'une nouvelle couverture LIDAR. Ces trois situations permettent en principe de déterminer l'évolution morphologique du bassin de la Rance entre la situation avant barrage et l'actuelle, représentant schématiquement l'effet du barrage et de l'usine marémotrice, et entre la situation actuelle et celle de 2010, représentant essentiellement la « dynamique actuelle » des sédiments en Rance maritime, bien après l'impact sévère prévisible après la mise en place du système.

Les mesures topo bathymétriques comportent toujours une incertitude de mesure qui est de l'ordre de la dizaine de cm pour les données les plus récentes, et sans doute plus pour les données anciennes. Lorsqu'un écart est considéré (bathymétries différentielles) les erreurs sont susceptibles de s'ajouter. Même si les erreurs ne s'appliquent pas uniformément sur l'ensemble du domaine, il faut garder à l'esprit l'énorme incertitude qu'elles entraînent sur les bilans sédimentaires : un décalage de 20 cm (deux fois l'incertitude de chaque levé) étendu sur la surface du bassin approximée à 20 km<sup>2</sup> représente un volume de 4 millions de m<sup>3</sup>.

Lorsque l'on compare les 3 bathymétries qui couvrent une période supérieure à 60 ans (Figure 27), au cours de laquelle un changement majeur est intervenu (construction du barrage et mise en route de l'usine marémotrice), on est d'abord frappé par la grande similitude des 3 bathymétries à l'échelle de l'estuaire, devenu le bassin maritime de la Rance. Naturellement un examen plus attentif fait apparaître des différences, décrites ci-après.

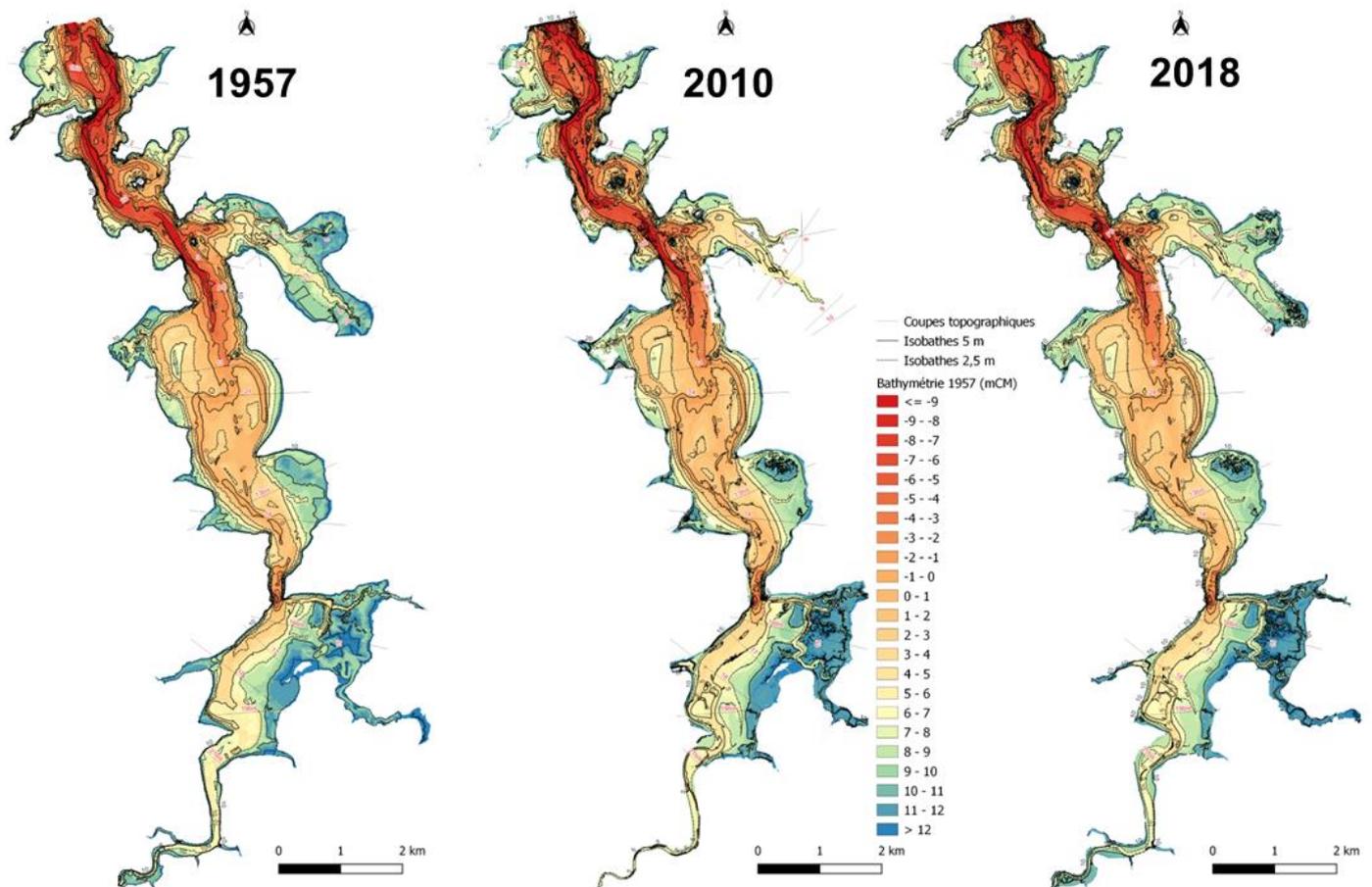


Figure 27 : bathymétrie de l'estuaire de la Rance en 1957, 2010 et 2018.

### 11.1 Evolution des fonds 1957-2018

Le CS a pu obtenir en 2022 un scan des cartes produites en 1958 qui représentent la topobathymétrie 1957 par des isobathes tous les mètres, référencées par rapport au 0 mCM. Ce sont ces cartes qui ont été numérisées en 2016<sup>9</sup> pour constituer le MNT 1957 (modèle numérique de terrain, qui attribue une cote bathymétrique en chaque nœud d'un maillage régulier à haute résolution, typiquement 5m x 5m). Ce fichier comporte quelques erreurs, liées à des isobathes non étiquetées sur les cartes, en particulier dans les secteurs d'herbus. Il nous a donc paru préférable de ne pas calculer un bilan sédimentaire entre 1957 et 2018, mais plutôt de considérer des sections caractéristiques, qui sont représentées ci-après en accompagnement de la carte des différentiels bathymétriques. Pour certaines d'entre elles, des sections réalisées en 1981 (par le LCHF) et 1998 (par EDF) ont été ajoutées<sup>10</sup>. Les résultats sont commentés ci-après, du nord au sud.

Les figures 28 à 30 représentent d'aval en amont le différentiel bathymétrique de 1957 à 2018. Pour tenir compte de l'incertitude sur les différents levés, les secteurs où la différence entre les deux topobathymétries est inférieure à +/- 25 cm sont représentés en blanc. Les zones en érosion apparaissent en bleu, celles en dépôt sont en rouge.

Dans le secteur aval (entre le barrage et la pointe de Cancaval ; section 1, fig. 28), on observe une érosion intense en amont des vannes, mais aussi sur le banc central qui séparait très nettement deux chenaux ; sur la figure 13 *droite* des courants de marée, on comprend que le chenal Est était un chenal préférentiel de jusant, tandis que le chenal Ouest était le chenal de flot, alors que c'est maintenant le contraire du fait de la présence des vannes – qui assurent l'essentiel du débit de flot - à l'Est : c'est peut-être cette « contrariété vis-à-vis de la nature » qui explique la très forte érosion du banc (3 à 4 m). L'érosion est également sensible sur le flanc oriental du chenal actuel de flot, lequel est intense en raison de sa brièveté. Par contraste les dépôts sont beaucoup plus faibles, et semblent concentrés dans les chenaux secondaires du haut estran et de la rivière venant de La Richardais, peut-être du fait de l'abaissement des plus hautes mers, et de la réduction consécutive de l'effet de drainage sur le haut-estran caractérisé par une faible pente. En face, la baie de Troctin connaît une sédimentation très faible, et par contre un dépôt important est observé au sud de la pointe du Coudray, devant laquelle les courants de jusant venaient frapper avant de s'infléchir vers le nord-ouest : ces courants de jusant ont été largement réduits depuis la mise en service de l'usine marémotrice.

Dans l'anse de Montmarin (section 2), l'épaulement à la cote 4 m a été fortement érodé, tandis qu'un dépôt généralisé de l'ordre d'1 m est observé dans l'anse de la Passagère. Plus en amont, au sud de l'île Chevret (section 22), on note un dépôt important en « queue de comète » constitué à l'abri de cette île, peut-être lié au transport par le flot des sédiments érodés en amont des vannes, alors que le secteur sud de l'île Chevret marque un ralentissement des vitesses, avec gradient transversal des vitesses et tourbillon pendant le flot (figure 13, et figure BM+4h de l'annexe 1). Par ailleurs, cette section est remarquable par une stabilité à l'est, et une érosion dominante dans le chenal à l'ouest, ou encore au niveau d'un épaulement sur le flanc ouest, à l'instar de ce que montrait la section 2. A noter également le comblement d'une dépression locale, à terre de cet épaulement.

---

<sup>9</sup> Par la société Mesuris pour EDF.

<sup>10</sup> D'autres sections réalisées en 1981 et 1998, superposées à des coupes 1957 élaborées aux mêmes sections étaient disponibles (Denot et Marcos, 1998), mais des erreurs importantes sur les sections 1998 ou 1957 dont nous disposions déjà nous ont conduits à les écarter.

Sur la section 3 qui passe par la pointe du Ton, on note à l'ouest l'érosion d'un banc central dans l'anse de la Landriais, et un dépôt significatif à l'approche de la rive droite vers St-Suliac. L'apparent dépôt

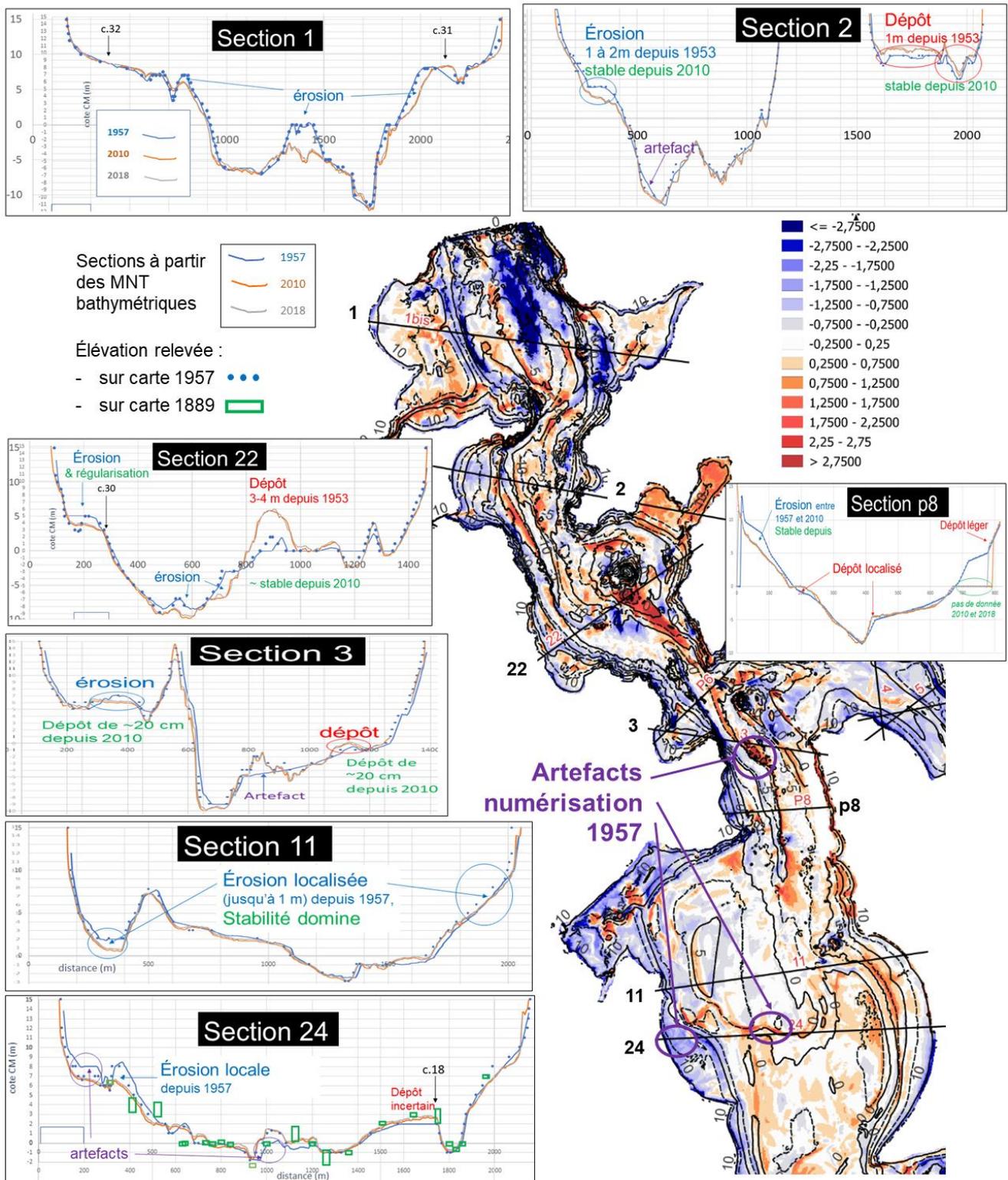


Figure 28 : différentiel bathymétrique 2018 – 1957 : moitié nord du bassin maritime (érosion en bleu, dépôt en rouge, mètres)

important juste à l'est du chenal (tâche rouge sur la carte) se révèle être un artefact de la numérisation.

La section p8, juste au nord de la pointe du Crapaud montre des dépôts localisés de part et d'autre du chenal, et une érosion importante (de l'ordre de 2 m) sur l'estran occidental, intervenue avant 1981.

A la hauteur de St-Suliac, la section 11 montre une stabilité globale des fonds, avec cependant une érosion significative sur le flanc est (de près d'1 m), et surtout à l'ouest, avec creusement supérieur à 1 m du « chenal » qui contourne à l'ouest le banc de Trégondé. Cette érosion est à rapprocher d'une érosion apparemment dominante dans l'anse du Minihic (secteur bleu sur la figure 28), qu'il conviendrait de confirmer par une section supplémentaire. La section 24 passe à travers un chenal orienté est-ouest (la figure 27 montre d'ailleurs que ce dernier est à peu près stable) et les érosions/dépôts qu'elle peut faire apparaître en son centre ne sont pas significatifs (l'apparent dépôt central résulte d'ailleurs d'un artefact de la numérisation des cartes de 1957, tout comme l'érosion sur la rive ouest). Par contre, l'érosion à 200 m de cette même rive semble concerner tout le flanc oriental de l'anse de Morlet, à une cote d'environ 7-8 m. Sur cette section 24, les élévations du fond en 1883 interpolées à partir des sondages portés sur la carte marine de 1889 (annexe 7) ont été représentées en vert, sous forme de rectangles englobant les incertitudes estimées : il en ressort une impression de stabilité entre la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle et 1957.

L'évolution du bras de Châteauneuf est décrite sur la figure 29. Sur cette carte, la domination de l'érosion (en bleu) est frappante. L'examen des sections 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 et 23 montre d'une part qu'il ne semble pas y avoir d'artefact lié à la numérisation des cartes bathymétriques de 1957 (accord entre trait continu bleu et pointillé bleu, à l'exception de l'extrémité orientale de la section 7, et du début de la section 6, toutes deux dans le secteur du moulin Quinard), et d'autre part que l'érosion concerne les secteurs d'estran. Plus précisément, à l'entrée de la baie de Châteauneuf (secteur occidental, section 4) l'érosion se manifeste depuis une cote initialement à 5 mCM (passant alors à la cote 4 m), et s'étend jusqu'à la cote 13 mCM. Entre les deux, l'épaisseur érodée atteint fréquemment 2 m. Plus en amont (secteur oriental de la baie), les fonds remontent et l'érosion concerne les niveaux 8 à 12-13 m. A l'inverse, les fonds des chenaux sont stables (sections 5, 7 et 23 par exemple) ou connaissent une sédimentation, surtout en amont (sections 9 et 10 par exemple). On peut également noter des sédimentations significatives dans certaines courbes du chenal du secteur amont, qui sont l'empreinte de son méandrement.

On relève aussi une érosion du dessus de l'herbu dans l'anse nord-est du bras de Châteauneuf (de part et d'autre du ruisseau de la Couaille) visible sur les sections 6, 7 et 8, ce qui est inhabituel. En général, un herbu régresse latéralement par érosion de sa limite du côté de la slikke vaseuse (haut d'estran submergé en marée moyenne), principalement sous l'effet des vagues (clapots induits par le vent). Mais il se trouve que l'action des vagues est ici largement renforcée par la durée des étales de niveau haut. Selon les résultats présentés dans le chapitre sur la marée en Rance (figure 2), dans les années 70, le niveau dans le bassin maritime atteignait régulièrement 12m50<sup>11</sup>, ce qui peut expliquer une large part de l'érosion souvent constatée sur le haut estran et sur les herbous.

---

<sup>11</sup> Même pour l'année 1996, période pendant laquelle le niveau bassin ne dépassait pas 12 m en principe, un niveau max bassin de 12.71 m a été relevé (Barreau, in Bonnot-Courtois et al., 2002)

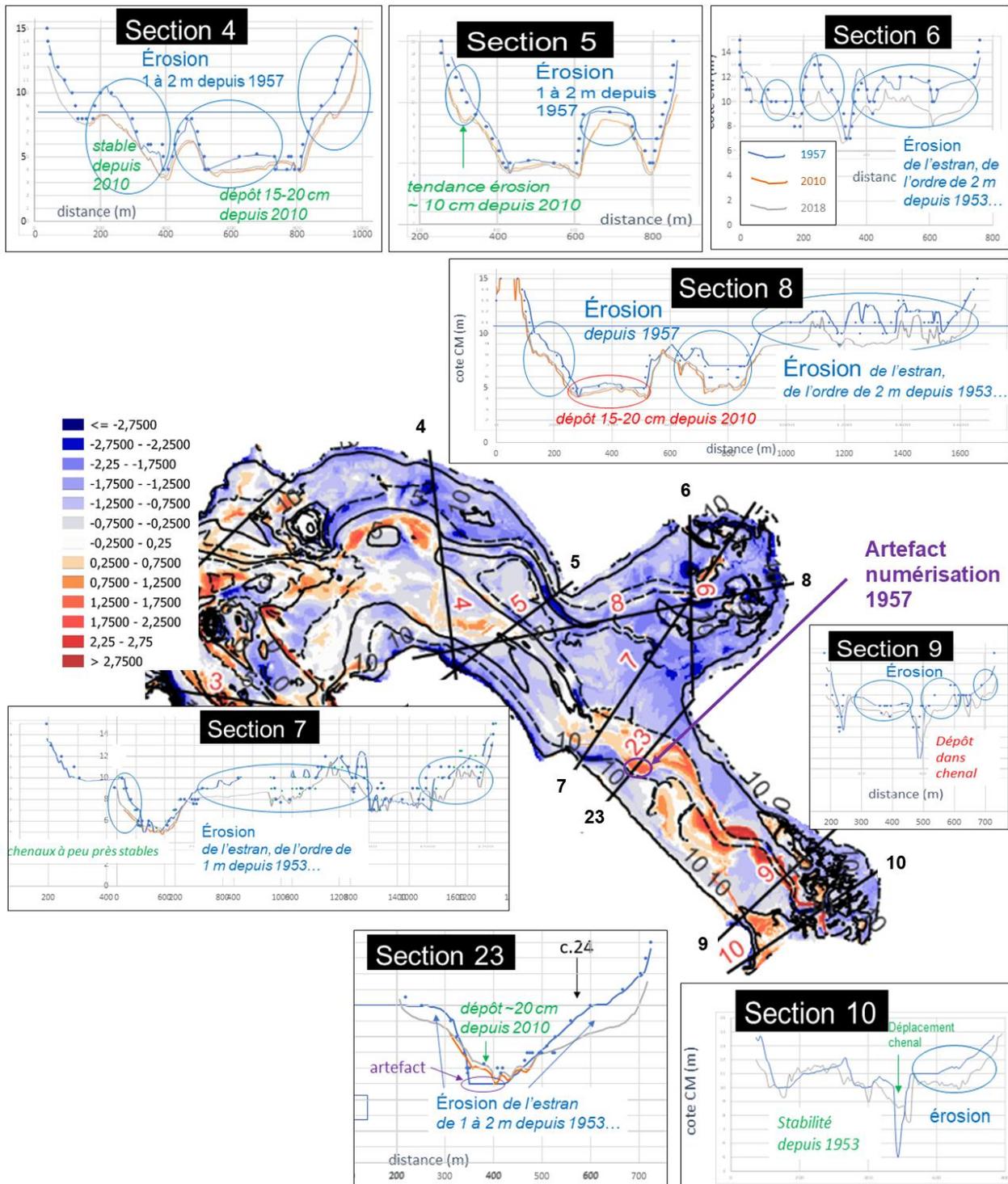


Figure 29 : différentiel bathymétrique 2018 – 1957 : baie de Châteauneuf (érosion en bleu, dépôt en rouge, mètres)

L'évolution bathymétrique de la moitié sud du bassin de la Rance entre 1957 et 2018 est présentée sur la figure 30.

La section 13 rejoint l'anse de la Souhaitier à l'herbu du « camp viking ». On note que les deux secteurs de schorre (herbus) aux extrémités de cette section sont stables, ou en léger abaissement (côté camp

viking) par rapport à 1957. L'estran entre les cotes 6 et 10 m est en érosion, tandis que le bas estran et le secteur subtidal sont stables. On observe une érosion semblable sur l'estran de la section 14, avec cependant un dépôt localisé au fond du chenal.

En amont de la cluse de Port-St-Jean/Port St-Hubert, et jusqu'à Mordreuc, les surfaces concernées par l'érosion et par la sédimentation sont du même ordre (Fig. 30). Les sections 16, 17, 18 montrent que les dépôts ont lieu au niveau du chenal principal, à des cotes 3-4 m, ainsi que dans d'importants chenaux secondaires du secteur des Bas-Champs (sections 15 et 16). L'érosion se manifeste dans les parties les plus élevées (initialement vers 13 m CM) du schorre des Bas-Champs (sections 15 et 16),

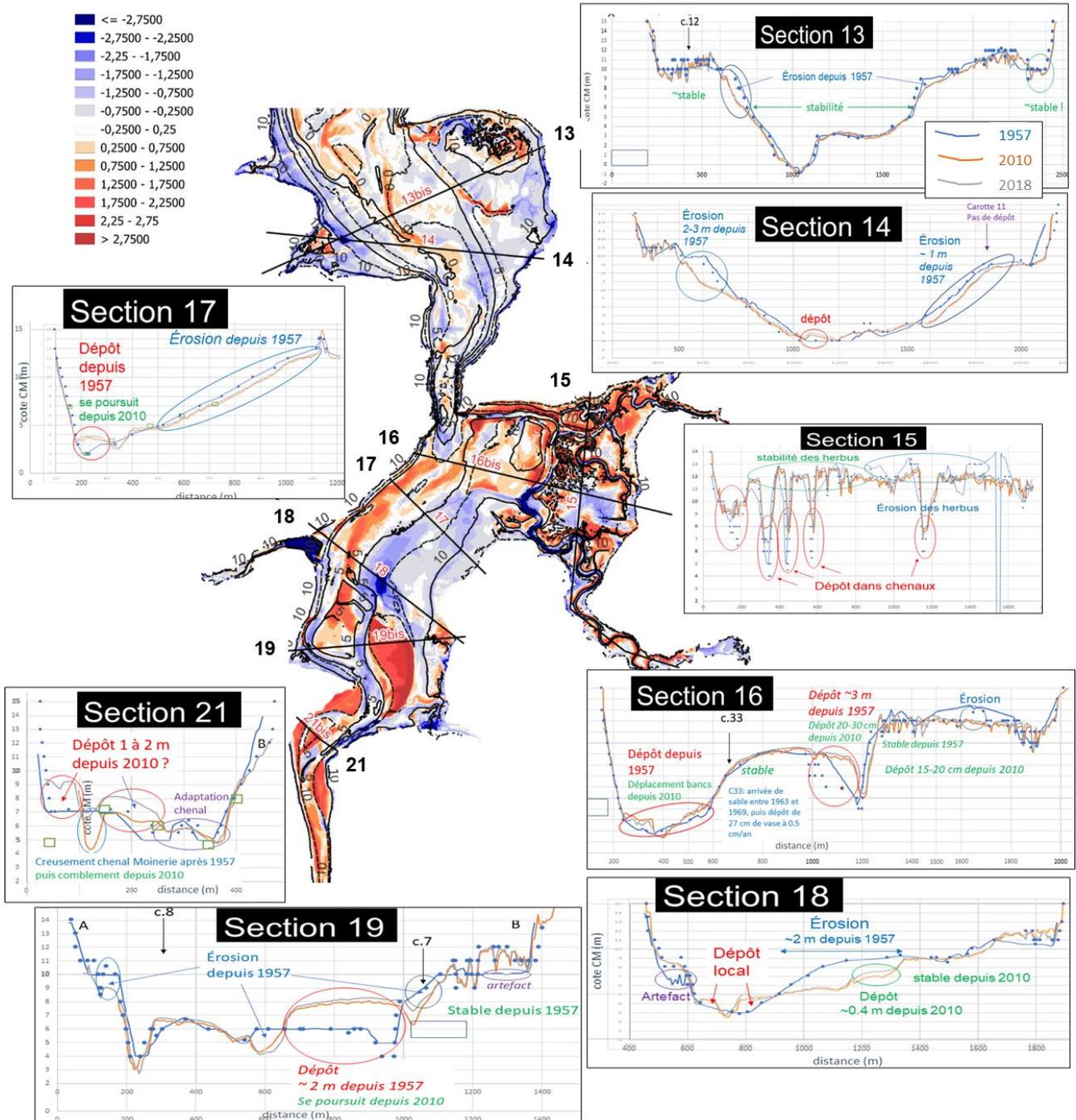
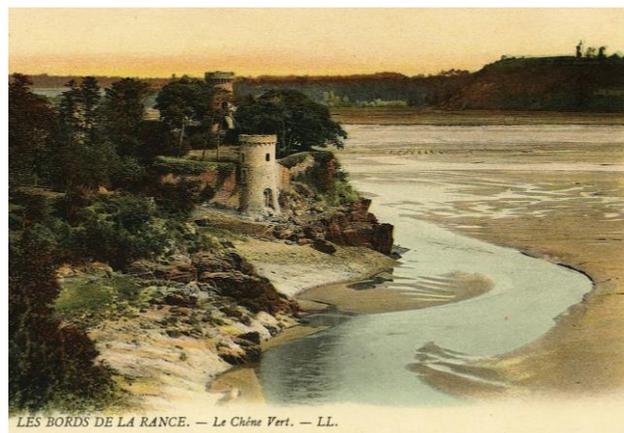


Figure 30 : différentiel bathymétrique 2018 – 1957 : moitié sud du bassin maritime (érosion en bleu, dépôt en rouge, mètres)

ainsi que sur l'estran devant la Ville-Ger entre les cotes 5 et 11 m. L'érosion dans ce secteur avait été constatée par le LCHF en 1985 (in Bonnot-Courtois et al., 2002). L'analyse du processus nous semble différente pour le secteur de la Ville-Ger (section 17) et celui plus au sud (section 18). Dans le premier cas, il s'agirait d'une érosion de l'estran sous l'action des clapots, favorisés par la longue durée de l'étalement des niveaux hauts. Cette érosion de l'estran s'accompagne d'ailleurs d'une régression du schorre (herbus), déjà relevée en 1985 (fig. 2.7 p. 219 in Bonnot-Courtois et al., 2002) [à noter que le niveau du sédiment relevé sur la carte de 1889 est analogue à celui observé en 2018, sauf dans le chenal où il est identique à celui de 1957]. Dans le second cas, il s'agirait plutôt d'une érosion liée à un déplacement vers le nord du chenal principal dont le cours dénote un méandrement important, dans des fonds initiaux de sables fins. Cette érosion qui atteint localement 3 m s'accompagne effectivement d'une sédimentation plus au sud, bien visible sur la section 19 (voir également figure 2.8 p. 219 in Bonnot-Courtois et al., 2002). On peut constater qu'en dehors de la zone centrale en dépôt, qui apparaît sous forme de tâche bien rouge au nord de Mordreuc sur le différentiel bathy de la figure 30, il y a encore des structures d'érosion de part et d'autre sur cette même section est-ouest de la plaine de Mordreuc. A l'extrémité Est, la zone de schorre à hauteur de la Ville-Ger est stable depuis 1957.

Enfin la section 21 est représentative d'une forte sédimentation qui s'est produite dans tout le bief amont du bassin maritime, figurée par la zone rouge au sud de la pointe du Chêne Vert. La figure 30 s'arrête au nord du moulin du Prat, car la carte 1957 présentait un décalage de projection plus au sud, empêchant la réalisation du différentiel bathymétrique. Mais la sédimentation spectaculaire de l'amont du bassin maritime jusqu'à l'écluse du Châtelier est bien connue (voir aussi § 11.4). La section 21 montre un dépôt important (de l'ordre de 2 m) sur la rive ouest, mais surtout depuis 2010 (voir § 11.2). Le chenal est à peu près à la même cote maintenant et en 1957, mais il faut rappeler qu'il a fait l'objet d'un dragage dans les années 2000. La section 21 révèle aussi que le chenal de la Moinerie n'existait pas à cet endroit-là en 1957, comme le montre d'ailleurs la photo aérienne de 1952 qui sera discutée plus loin. Mais le positionnement sur cette même section des relevés de la carte marine de 1889 (en vert) montre la présence d'un ancien chenal de la Moinerie, très proche de la rive (ouest), à une cote inférieure à 5 m. Ce chenal se poursuivait jusqu'à la pointe du Chêne Vert, comme le montre la carte postale ancienne reproduite en figure 31, mais n'était donc pas une structure stable, car située dans un environnement plutôt sableux et très dynamique.



**Figure 31 : Le site du Chêne Vert, vers 1920 (reproduction d'une carte postale ancienne)**

Pour synthétiser l'évolution des fonds entre les années 50 et maintenant, on peut considérer que si une sédimentation importante est bien visible en amont de Mordreuc et dans le secteur oriental de la « plaine » de Mordreuc, c'est une tendance érosive qui domine dans le reste du bassin, sauf en

quelques secteurs localisés comme au sud de l'île Chevret. Même la baie de Châteauneuf serait en érosion (comprise entre 50 cm et 1 m). Ailleurs, c'est surtout la rive occidentale qui est concernée par une érosion significative, en dehors de l'amont des vannes du barrage marémoteur, où les courants très forts qui s'y produisent sont connus pour avoir généré une forte érosion.

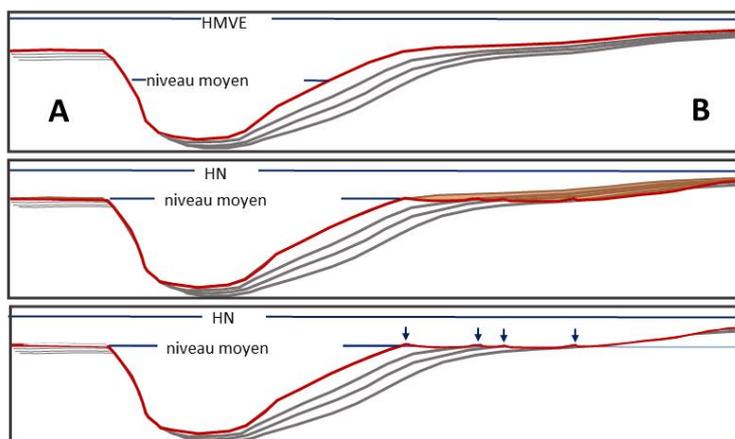
Il faut bien sûr insister sur les incertitudes inhérentes à la comparaison des bathymétries 1957 et 2018, en grande partie liées aux imprécisions de la digitalisation des cartes de 1957 (EDF recommande une extrême prudence sur l'exploitation de la bathymétrie 1957 et du MNT qui en a été déduit). Mais ce différentiel est le seul élément factuel de comparaison avant/après barrage disponible aujourd'hui.

Il est à noter que l'érosion concerne surtout les secteurs situés au-dessus de 5 m CM, donc sur l'estran actuel (le rappel de la bathymétrie actuelle sur les figures 6 ou 27 permet de faire cette relation). Les courants de marée y sont pourtant faibles (cf. Fig.12). L'origine possible d'une telle érosion doit être recherchée ailleurs : une contribution des clapots générés par les vents locaux (le barrage empêche toute propagation des vagues venant du large) n'est pas à exclure. En effet les petites vagues qui constituent un clapot n'ont pas d'action sur les fonds sauf par très faible profondeur (typiquement une hauteur d'eau deux à quatre fois plus importante que la hauteur des vagues). Or la marée dans le bassin se caractérise maintenant par une étale de pleine mer très longue, et donc une période au cours de laquelle la hauteur d'eau peut rester faible longtemps. Cette configuration se produit dans la tranche d'élévation de la surface libre comprise entre 10 et 12 m, selon la position des niveaux hauts dans le bassin, montrée en Figure 1. Si l'on considère une hauteur de vague de 30 cm, qui semble une valeur réaliste pour du clapot par vent soutenu, l'action de ces vagues se ferait sentir pour moins de 1m d'eau, soit sur des fonds localisés au-dessus de l'isobathe 9 m, ce qui semble en relatif bon accord avec les secteurs d'érosion des figures 28 à 30.

La vraisemblance d'une telle érosion est révélée par la figure 32 qui reprend une photographie aérienne du fond du bras de Châteauneuf, où l'on voit une forme d'érosion caractéristique à peu près dans cette tranche bathymétrique (autour de 9 m CM). L'interprétation de ces reliefs concentriques dans le méandre est donnée schématiquement sur la figure 32 : ils seraient la trace relique de couches de dépôt formées successivement lors du déplacement latéral du chenal de marée au niveau de ce méandre, et maintenant érodées dans les niveaux hauts.

Cette érosion en haut d'estran après mise en place du barrage et de l'usine marémotrice qui, rappelons-le, se traduit par une montée significative du niveau moyen, peut-être rapprochée des processus d'érosion côtière accompagnant souvent une transgression marine liée à une élévation relative du niveau de la mer.

L'érosion est aussi fréquente dans des secteurs dont l'élévation actuelle est entre 5 m CM et 8 mCM, bien inférieure aux niveaux hauts actuellement pratiqués. Il est probable qu'une bonne part de cette érosion soit intervenue pendant les 3 années (1963 à 1966) de construction du barrage marémoteur, période au cours de laquelle le niveau du plan d'eau est resté à la cote 8.50 m, à l'exception de vidanges bi-hebdomadaires partielles (amplitude de 1 m) à caractère sanitaire (Retière, 1989, 1996). Les clapots ont probablement été très actifs sur des fonds de 6 à 8 m pendant cette « étale » extrêmement longue. C'est par exemple ce qui peut expliquer l'érosion du flanc oriental de l'anse de Morlet, à une cote d'environ 7-8 m repérée sur la section 24 de la figure 28.



**Figure 32 : vue aérienne de la baie de Châteauneuf en février 2022, et interprétation des reliefs concentriques sur la rive convexe dans un méandre du chenal de marée. Les photos aériennes de 1952 et ~2020 (source « remonter le temps » de l'IGN) montrent un déplacement du chenal (le tracé en rouge sur la photo aérienne actuelle correspond à la position du chenal en 1952) justifiant les sédimentations successives en rive droite ; une érosion de la haute slikke (en brun sur l'interprétation) explique la présence des reliefs reliques en haut de vasière.**

## 11.2 Evolution des fonds 2010-2018

Le différentiel bathymétrique 2018-2010 a fait l'objet d'une analyse critique par le Conseil Scientifique (annexe A6), qui s'appuie sur un travail du laboratoire EPOC de l'Université de Bordeaux. Il ressort de cette analyse (1) une incertitude encore élevée, sans doute due à une moindre précision du levé 2010, et (2) le choix de ne pas prendre en considération les variations de topo-bathymétrie inférieures à 25 cm. Il en résulte un bilan sédimentaire qui se décline comme indiqué ci-après.

De 2010 à 2018, soit environ 8 années,

- sédimentation de 1.97 Mm<sup>3</sup> répartis sur 4.4 km<sup>2</sup>, correspondant à une épaisseur moyenne de 44 cm
- érosion de 1.03 Mm<sup>3</sup> répartis sur 1.1 km<sup>2</sup>, correspondant à une épaisseur moyenne de 91 cm
- un bilan net de 0.94 Mm<sup>3</sup> sur l'ensemble du secteur commun aux deux levés, représentant une surface de 19.5 km<sup>2</sup> (certaines zones n'ont pas été couvertes en 2009-2011).

Un tel bilan équivaut à une sédimentation annuelle de l'ordre de 120 000 m<sup>3</sup> dans le bassin maritime de la Rance, représentant la dynamique actuelle du système. Néanmoins, l'incertitude évoquée plus haut demeure.

La répartition des secteurs en érosion ou en sédimentation est fournie par la figure 33, et mise en regard du différentiel bathymétrique 2018-1957. On voit clairement qu'entre 2010 et 2018 la sédimentation domine, alors que l'érosion domine lorsqu'on compare 2018 à 1957. Mais les intensités d'érosion ou de dépôt sont nettement plus faibles. La sédimentation récente est surtout spectaculaire en amont de la pointe du Chêne vert, et dans la partie orientale de la plaine de Mordreuc, au sud de la Ville Ger. Ce secteur amont représente moins de 6 % de la surface totale du bassin maritime.

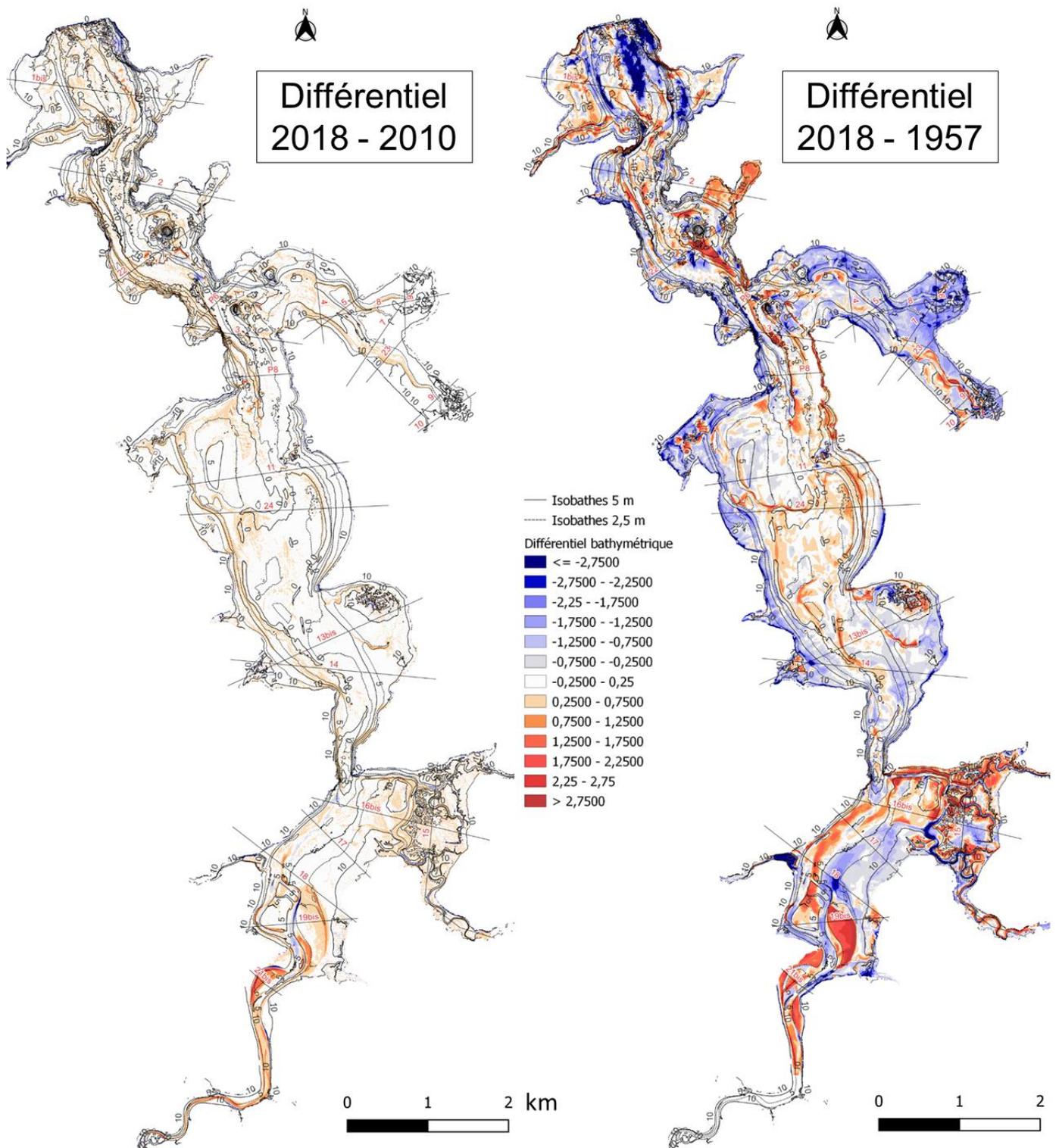
La figure 34 répartit le bilan sédimentaire selon les strates bathymétriques, dont les surfaces totales sont également représentées (hypsométrie). Il est frappant de voir que la sédimentation se produit surtout dans les secteurs subtidaux (d'élévation inférieure à 4 m CM, donc toujours immergés), il est vrai les plus étendus du bassin. La sédimentation reste relativement significative dans les tranches bathymétriques 4-6 m et 6-8 m, presque au prorata des surfaces de bassin concernées, mais elle est très atténuée dans la tranche 8-10 m pourtant très étendue sur le bassin. Par contre la tranche 10-12 m est globalement en érosion. C'est la zone de haut estran, la plus visible depuis la rive.

On peut aussi décliner les érosions/sédimentations par secteurs géographiques : c'est l'objet de la figure 35. Les barres noires y représentent les volumes totaux (tous positifs, correspondant à de la sédimentation nette), tandis que les barres de couleur représentent des volumes de sédimentation ou d'érosion (si négatif) pour chacun des secteurs selon les strates bathymétriques.

On voit ainsi que le secteur 1 (amont du Chêne Vert) contribue pour 25 % de la sédimentation dans le bassin, majoritairement dans la tranche bathymétrique 6-8 m CM.

Le secteur 2 (entre le Chêne Vert et la cluse de port St-Jean) représente 31 % de la sédimentation, qui ici est également distribuée sur toutes les strates bathymétriques au-dessus de 4 m CM.

Le secteur 3, le plus étendu, qui accueille lui 24 % de la sédimentation du bassin, montre un contraste entre une sédimentation dominante en dessous de 8 m CM, soit à peu près le niveau moyen de basse mer, et une érosion sur l'estran actuel au-dessus de la cote 10 m CM. On peut penser que cette érosion de l'estran supérieur résulte toujours de l'effet des clapots pendant les étales de niveau haut.



**Figure 33 : différentiel bathymétrique 2018-2010, en regard du différentiel 2018-1957 (érosion en bleu, dépôt en rouge, mètres). Les isobathes 2018 sont tracées en noir sur chaque carte pour visualiser le relief.**

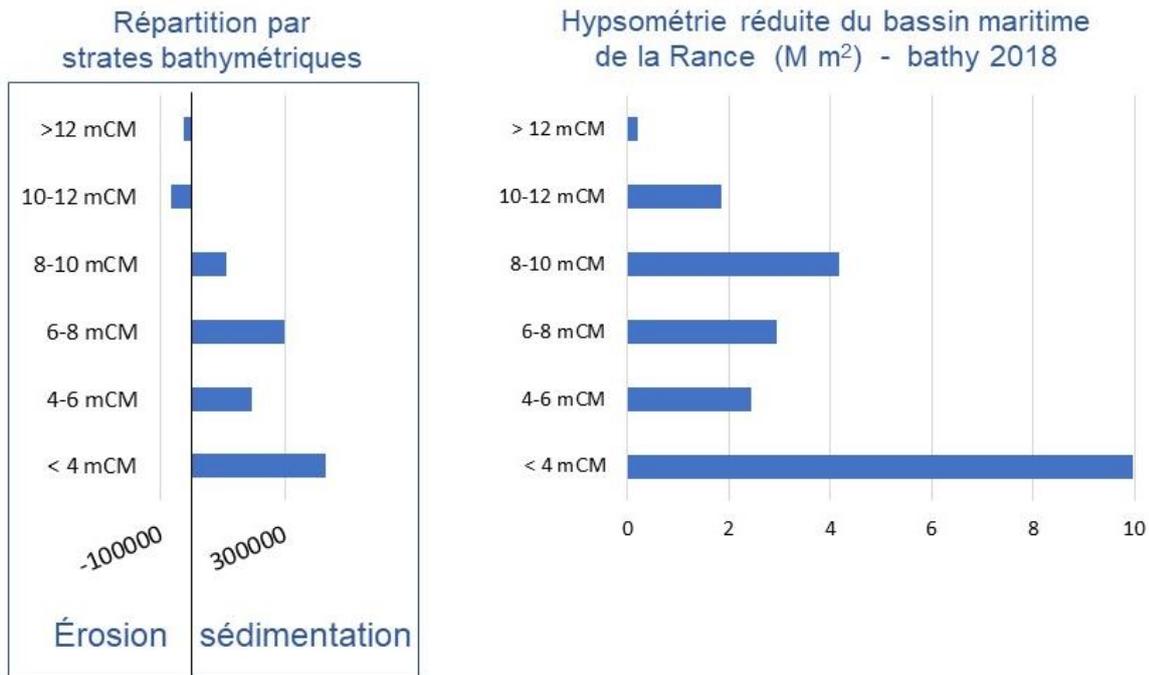


Figure 34 : bilan sédimentaire entre 2010 et 2018 distribué selon les strates bathymétriques (à gauche), en regard des surfaces concernées par ces strates bathymétriques (hypsométrie du bassin, à droite)

### Sédimentation /érosion par secteurs et par strates bathy

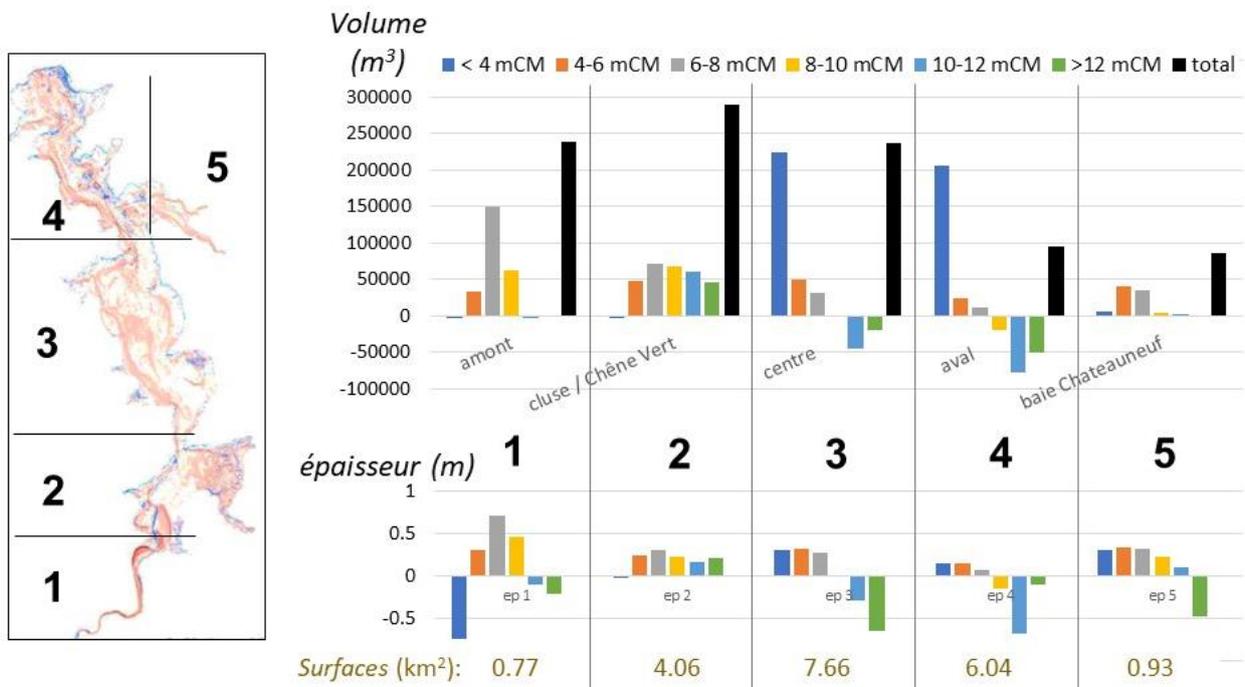


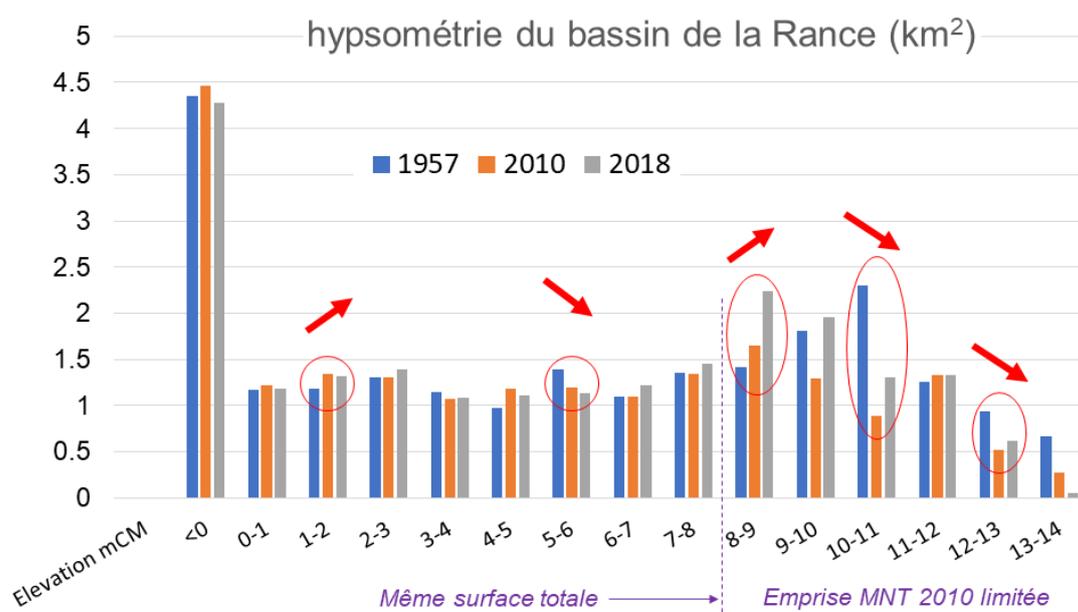
Figure 35 : répartition du bilan sédimentaire entre 2010 et 2018 par secteurs géographiques et strates bathymétriques.

Cette distribution altimétrique des dépôts et érosions se retrouve encore dans le secteur 4, en aval. Mais ce dernier présente une sédimentation globale qui se décline aussi en une sédimentation nette en rive gauche et une érosion nette en rive droite. Il reste naturellement influencé par les contrastes de courants de marée à proximité du barrage, avec un flot très prononcé en rive droite du côté des vannes. Enfin le bras de Châteauneuf (secteur 5) apparaît en sédimentation nette, essentiellement dans la tranche bathymétrique 4-8 m, mais le calcul ne restitue pas nécessairement la réalité car le haut estran était très mal couvert par le levé topo-bathymétrique de 2009-2011. Ainsi, on ne peut déterminer si la tendance à l'érosion constatée en haut d'estran pour l'ensemble de la période 1957 - 2018 est un processus qui se poursuit ou pas.

De façon générale, on peut considérer que le différentiel 2018-2010 confirme certaines tendances constatées sur le différentiel 2018-1957, à savoir une sédimentation importante et visible en amont, mais qui ne concerne que 25 % de la sédimentation totale, et plutôt de l'érosion en haut d'estran. A noter qu'une telle érosion n'est pas observée dans le secteur 2, où le haut estran est dominé par les bas-champs, qui constituent une zone où les clapots, facteur principal pouvant expliquer l'érosion, ne peuvent se propager à travers les herbues très étendus.

L'apparente érosion constatée en haut d'estran sous l'action des clapots ne saurait concerner les petits chenaux secondaires caractéristiques de la haute slikke (vasière non couverte de végétation) et du schorre. Il est probable que nombre de ces petits chenaux aient pu se combler partiellement de vase, en raison d'un moindre volume d'eau à drainer dans le schorre amont en vive eau lors de la marée descendante, puisque les niveaux hauts ont été notablement réduits par rapport aux pleines mers naturelles, qui fixent le niveau du schorre actif. C'est ce mécanisme de drainage qui est à l'origine de ces chenaux secondaires : leur fonctionnalité étant très atténuée, il devient naturel qu'ils s'ensavent. Pour y remédier, il faudrait provoquer des inondations périodiques du schorre (en augmentant les niveaux hauts).

Une approche synthétique de l'évolution de la morphologie du bassin est fournie par les variations de l'hypsométrie (distribution surfacique des secteurs d'un niveau donné). C'est l'objet de la figure 36,



**Figure 36 : hypsométrie du bassin maritime de la Rance d'après les bathymétries de 1957, 2010 et 2018** (l'emprise plus limitée du MNT 2010 explique les surfaces inférieures pour cette bathymétrie au-delà de la cote 8 m).

qui couvre la période 1950-2018. Quelques tendances se dégagent : augmentation des surfaces dans la tranche bathymétrique 1-3 m, devenue subtidale depuis la mise en service de l'usine marémotrice, réduction des surfaces à 5-6 m CM (effet du clapot pendant la phase de construction ?), réduction drastique de la tranche 10-11 m (effet du clapot pendant les étales de niveau haut ?<sup>12</sup>), réduction de la tranche 12-14 m (érosion latérale et verticale des herbues : voir section suivante § 11.3) et augmentation de la tranche 8-9 m, qui est peut-être liée à une sédimentation compensant l'effet du clapot sur les tranches supérieures, mais aussi résulte de l'abaissement des fonds d'élévation supérieure.

### **11.3 Evolution du schorre et des herbues**

La comparaison des photographies aériennes anciennes et actuelles, que l'on peut aisément réaliser à l'aide du site « remonter le temps » de l'IGN (<https://remonterletemps.ign.fr/>) montre plutôt une régression du schorre et des herbues dans l'ensemble du bassin maritime de la Rance. Cette tendance s'explique par le recul du front des herbues lié à l'action érosive des clapots qui génèrent des microfalaises de régression, mais aussi par une moindre alimentation des herbues en sédiments fins puisqu'ils ne sont plus recouverts par la marée ou qu'ils le sont beaucoup moins, ce qui empêche leur progradation. En outre, la limite supérieure du haut-schorre recule, car ce dernier se trouve colonisé par une végétation de marais maritime (jonc et roseau), étant très rarement atteint par la mer lors des niveaux hauts.

La figure 37 fournit un exemple de réduction du schorre (herbues) dans le bras de Châteauneuf (secteur de la Couaille) : dans l'ellipse rouge de la figure, la régression est nette sur le flanc sud, justement celui qui est exposé aux vagues. Les surfaces verdâtres en bordure du chenal sur la vue aérienne de 2020 représentent une couverture d'algues vertes (entéromorphes), devenues très fréquentes sur les vasières. On notera par ailleurs que dans la plupart des cas, les chenaux de drainage qui sillonnent la haute slikke (vasière non végétalisée, à une élévation inférieure à celle du schorre mais toujours dans la moitié supérieure de l'estran) conservent leur empreinte sur le long terme : la figure 37 montre des exemples de petits chenaux ayant conservé le même tracé entre 1952 et 2020 (cerclés de blanc), révélant une forme de stabilité de la vasière haute sur le long terme, à l'inverse de ce qui a pu être constaté dans les secteurs plus bas et/ou proches des chenaux principaux, beaucoup plus dynamiques (cf. l'exemple de la figure 32).

---

<sup>12</sup> Cette réduction de la tranche 5-6 m est un peu basse pour être expliquée par l'action du clapot lorsque la cote du plan d'eau était à 8.50 mCM ; elle serait plutôt compatible avec un effet du clapot lors des vidanges bi-hebdomadaires de l'ordre de 1 m évoquées par Retière (1989, 1996), mais on ne connaît pas leur durée....



**Figure 37 : comparaison de deux vues aériennes du bras de Châteauneuf à près de 70 ans d'intervalle (d'après le site IGN [remonterletemps.ign.fr](http://remonterletemps.ign.fr))**

Un examen plus fouillé de l'évolution des herbus (schorres) en Rance maritime est rapporté dans le chapitre « diagnostic écologique ». Outre la régression latérale des herbus évoquée plus haut, une réduction du niveau supérieur des schorres est constatée. Ainsi les secteurs d'herbus situés au-dessus de +12 mCM en 1953 (qui apparaissent sur la carte de 1957) ont fortement régressé en 2018 : c'est aussi ce que les sections 6 et 8 (figure 29), 13, 15 et 16 (figure 30) ont révélé. Il n'existe plus en 2018 d'herbu au-dessus de la cote + 13 mCM. Cette régression « verticale » est confirmée par des observations environnementales : fixation d'algues brunes, mise à nu de vases indurées, mise à jour de bivalves « fossiles ». Elle est expliquée par l'action des clapots lors des étales hauts sur un herbu dégradé après émergence continue pendant les 3 années de construction de l'usine, en particulier durant la période où les niveaux hauts étaient supérieurs à ceux d'aujourd'hui (typiquement 12.70 mCM dans les années 1970, cf Fig.2), et par l'absence de sédimentation lors des vives eaux exceptionnelles qui n'existent plus (avant barrage, le niveau dans l'estuaire montait probablement à 13.7 – 13.8 m lorsqu'il atteignait 13.5 m en mer, compte tenu d'une amplification de la marée dans l'estuaire<sup>13</sup>).

#### **11.4 Focus sur le secteur amont et sa sédimentation en cours**

Des bathymétries récentes de l'amont du bassin faites à l'initiative d'EDF en charge de la maintenance du chenal de navigation montrent que la sédimentation en amont du Chêne Vert se poursuit (Fig. 38 et 39).

<sup>13</sup> L'estuaire est dit « hypersynchrone » dans ces conditions. La modélisation de l'estuaire sans barrage montre une telle amplification naturelle de la marée lors de sa propagation dans l'estuaire.

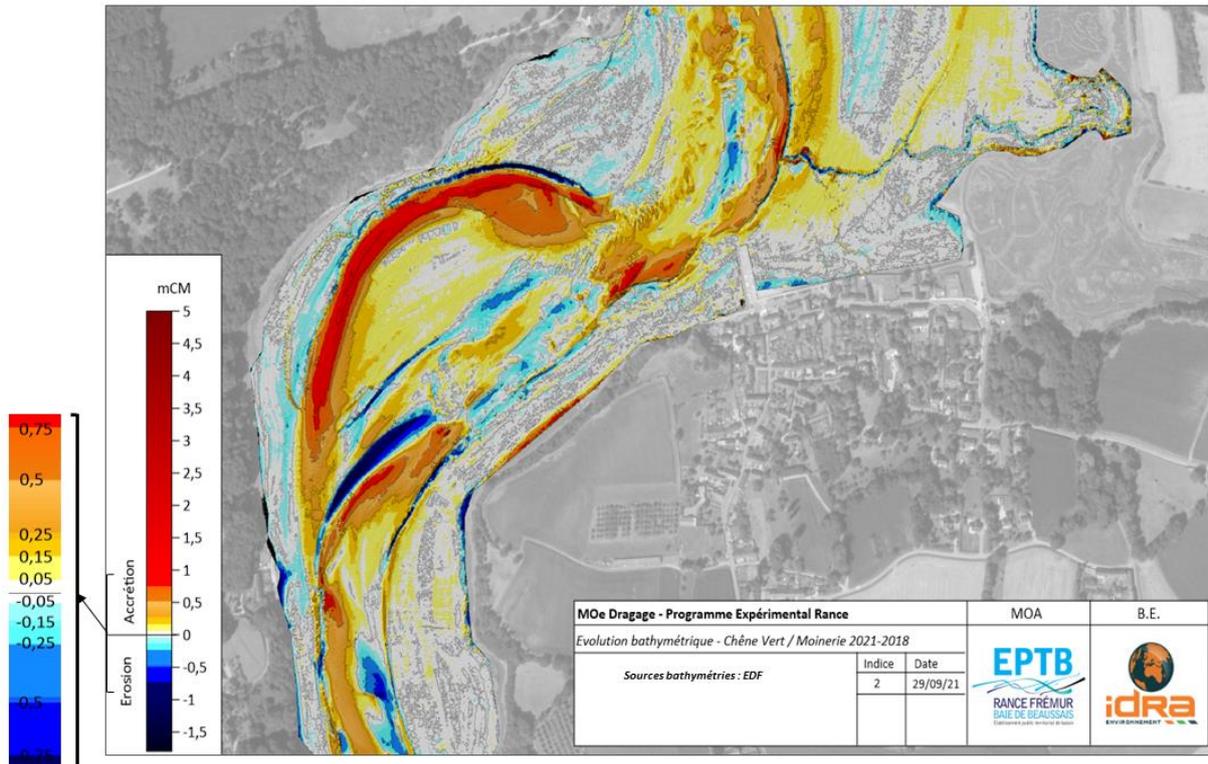


Figure 38 : sédimentations et érosions récentes dans le bassin amont de la Rance, à partir du différentiel bathymétrique 2021 - 2018 (données EDF et traitements idra pour l'EPTB).

Ce processus est surtout spectaculaire dans le chenal de la Moinerie, bien visible en rouge sur le différentiel 2021-2018, où l'on note aussi, et simultanément, une migration vers le nord-ouest du chenal principal au sud du banc de la Moinerie (Fig.38).

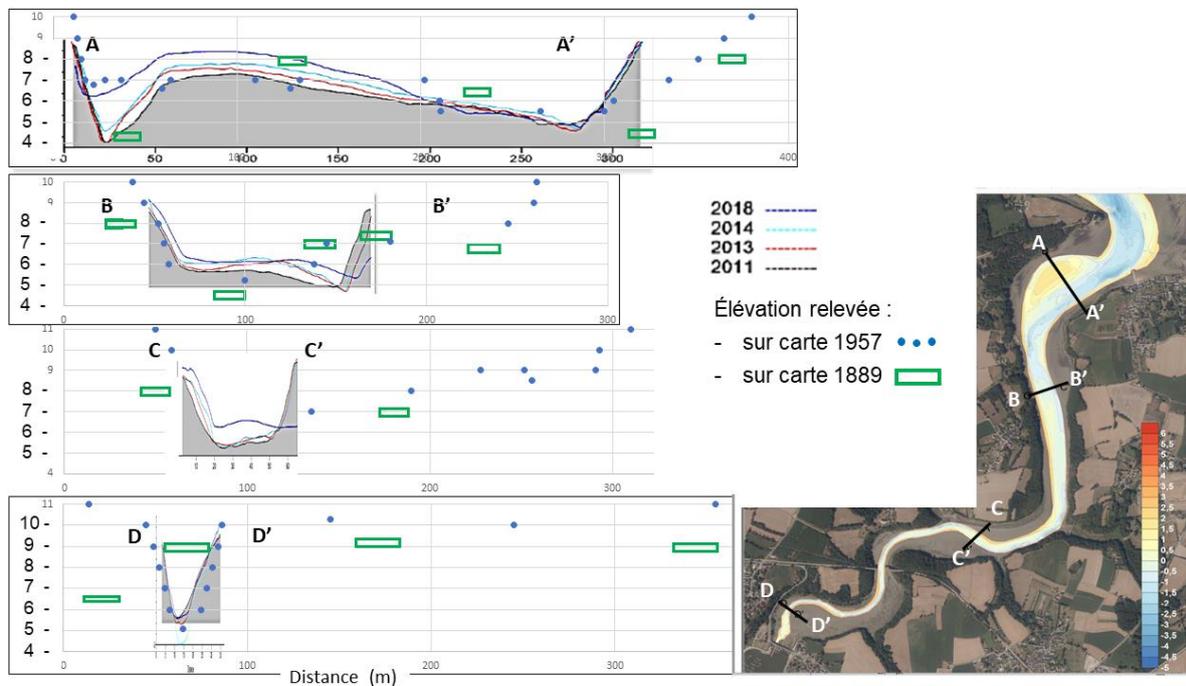


Figure 39 : évolution de la morphologie de l'amont du bassin de la Rance selon 4 sections (d'après données EDF et traitements idra pour les sections postérieures à 2011).

La coupe A-A' de la figure 39 révèle que le comblement du chenal de la Moinerie se déroule essentiellement depuis 2014 (peut-être même plus récemment, selon certains riverains), et que vers 2010 ce chenal était plus profond que le chenal oriental, devenu depuis le chenal principal. Il semblerait qu'à cette époque, pourtant récente, le chenal occidental (dit « de la Moinerie ») était le chenal préférentiel de l'estuaire de la Rance (en tout cas plus profond que le chenal oriental, selon la bathymétrie 2010, fig.27), alors que ce n'était pas le cas auparavant. En effet, le différentiel 2011-1957 réalisé par Mesuris pour EDF montre une forte érosion (de l'ordre de 2.5 m) au niveau du chenal de la Moinerie, presque exactement là où se produit le comblement actuel (Figure 40). De fait, sur la photographie aérienne de 1953 on ne distingue ce chenal qu'au sud, alors qu'il est nettement visible sur celle de 2003. Il semble donc que le chenal entre la Moinerie et le Chêne Vert se soit formé récemment (entre 1957 et 2003) et que sa disparition soit en cours (comblement très récent, peut-être initié ou en tout cas favorisé par le curage 2003-2004 au sud-ouest de Mordreuc). Il n'est pas sûr que le fonctionnement de l'UMR soit responsable de cette formation temporaire : ce que l'on peut dire, c'est que le secteur intertidal bas était beaucoup plus dynamique par le passé (comparer par exemple les photos 1952 et 1953 du site [remonterletemps.ign.fr](http://remonterletemps.ign.fr)), alors qu'il était probablement sablo-vaseux, tandis qu'il est plus ensasé de nos jours. Cette dynamique passée a pu permettre la progradation d'un chenal de jusant dont l'amorce apparaît plus au sud (justement à hauteur de la cale de la Moinerie). On verra si l'opération de dragage d'un chenal au Chêne Vert, dans le prolongement du chenal secondaire de la Moinerie, réalisé pendant l'hiver 2023, permettra de maintenir les deux chenaux, celui de la Moinerie et le chenal oriental de Mordreuc. Peut-être que la pratique de chasses à l'écluse du Châtelier peut y contribuer, ainsi que l'augmentation occasionnelle du marnage dans le bassin (qui accroîtrait le prisme tidal transitant à travers la section Mordreuc / Chêne Vert).



**Figure 40 :** vues aériennes du secteur Chêne Vert / Mordreuc en 1953 et 2003 (d'après IGN [remonterletemps.ign.fr](http://remonterletemps.ign.fr)) et différentiel bathy 2010-1957 (d'après Mesuris pour EDF, 2016).

Mais la section AA' de la figure 39, qui confirme l'absence de chenal de la Moinerie en 1957 (points bleus), montre aussi qu'en 1889 ce chenal existait bien, comme l'avait révélé la section 21 de la figure 30, et comme semble l'indiquer la carte postale reproduite en figure 31. Il apparaît donc que le système de chenaux entre Mordreuc et le Chêne Vert a beaucoup évolué, avec formation et disparition de chenaux distincts de flot et de jusant, comme cela peut se produire dans des environnements sableux très dynamiques. Les élévations des chenaux et bancs intermédiaires semblent être du même ordre depuis 1889, mais ce constat reste à préciser : en effet les sections totales d'écoulement se sont clairement réduites depuis 2011, et si le banc du Chêne Vert pourrait avoir retrouvé son élévation de la fin du XIXème siècle alors qu'il était 1 m plus bas en 1957, la rive droite (vers Mordreuc) montre une sédimentation très importante.

Les autres sections de la figure 39 indiquent que la cote du chenal ne montre guère de tendance depuis 1889<sup>14</sup>, mais montre une forte sédimentation sur les banquettes latérales (il conviendrait de retracer les sections 2011 à 2018 en les élargissant vers les rives).

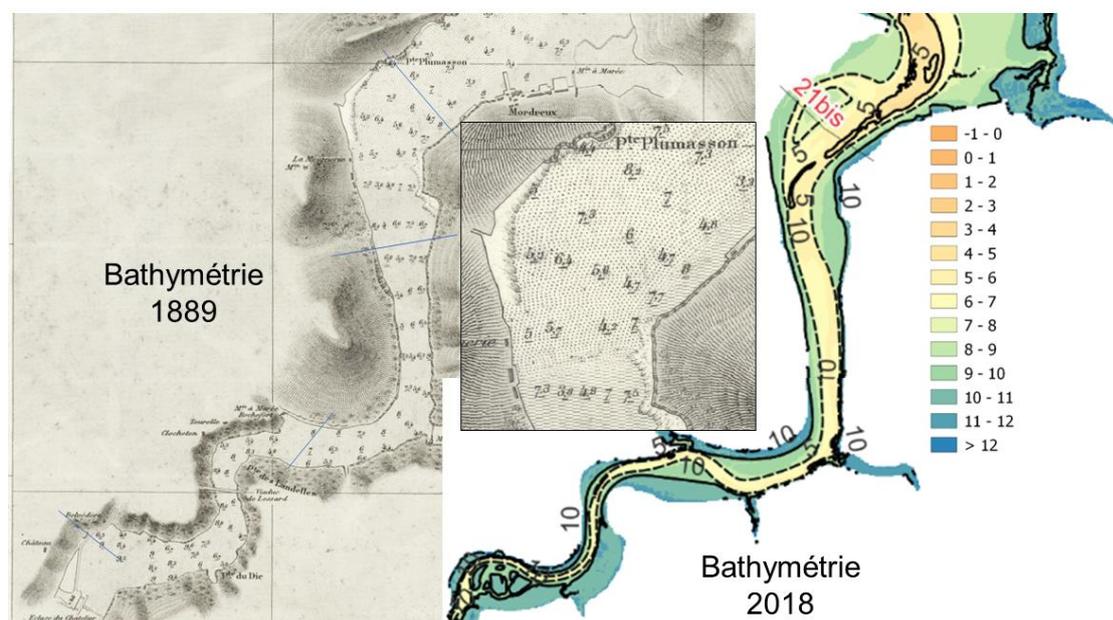


Figure 41 : Comparaison entre bathymétries de 1889 et 2018 de Mordreuc à l'écluse du Châtelier.

Plusieurs témoignages et documents expriment un changement de nature du sédiment superficiel dans le secteur amont du bassin de la Rance depuis la construction de l'usine marémotrice. Ainsi le sédiment de l'estran entre l'écluse-barrage du Châtelier et le pont de Lessart est-il décrit comme sableux, comme le montre la photographie de la figure 42. Pourtant la carte marine de 1889 indique des fonds vaseux au sud d'une ligne entre La Moinerie et Mordreuc, visibles sur le zoom central de la figure 41 ci-dessus. La même nature vaseuse du secteur est indiquée également sur la carte sédimentologique de Ruellan publiée en 1956 (Fig. 3.12 in Bonnot-Courtois et al., 2002). Bonnot-Courtois (1996) évoque des enrochements bordant le chenal de navigation dans le secteur du pont de Lessart, ayant entraîné un envasement [côté opposé au chenal] dès le début du XXème siècle (la figure 42 laisse penser que les personnes assises sur le sédiment sont plus bas que les enrochements).

<sup>14</sup> Des bathymétries récentes faites par EDF dans le secteur amont ont montré des variations de la cote du chenal, qui seraient peut-être dues à des variations de débit de la Rance, ce qu'il conviendrait de vérifier, ou à des effets de chasse.



**Figure 42 : photo ancienne montrant un fond sédimentaire probablement sableux au niveau du pont de Lessart, en cours de reconstruction vers 1950 (photo aimablement transmise par L. Delahaie).**

Quoi qu'il en soit, et même si avant barrage le sédiment était du sable envasé en amont, le sédiment s'est affiné dans ce secteur au niveau des banquettes où la sédimentation a été importante. On peut s'étonner que jusqu'en 1960 le sédiment en amont de l'estuaire de la Rance ne soit pas purement vaseux, comme il l'est en amont de pratiquement tous les estuaires naturels. Une explication peut être avancée en relation avec la remontée du barrage du Châtelier effectuée au moment de la construction de l'usine marémotrice. Jusqu'en 1963 le radier du barrage était à la cote 11.89 m CM (source EDF<sup>15</sup>) et était donc submergé par les marées de forte amplitude. Citant Lebrun (1943), Le Mao (1996)<sup>16</sup> mentionne que le barrage du Châtelier était franchi par la marée en moyenne 5 jours à chaque période de vive eau, soit tous les 15 jours. La remontée remontait semble-t-il jusqu'au port de Dinan. L'étroitesse de l'estuaire au pont de Lessart ou à l'écluse (une centaine de m à pleine mer) peut entraîner des courants de marée importants afin de remplir le bief amont du Châtelier. Un calcul très approché<sup>17</sup> permet d'estimer un courant moyen de l'ordre de 0.7 m/s, difficilement compatible avec un fond purement vaseux. C'est donc la remontée épisodique de la marée très en amont de l'écluse du Châtelier et l'étroitesse de l'estuaire à hauteur de La Vicomté qui expliquerait l'absence de vase sur une bonne part de la largeur de l'estuaire dans ce secteur (les vases se déposant dans un bief plus amont). La motivation du rehaussement du barrage du Châtelier par une batterie de clapets pour empêcher la remontée de la marée vers l'amont n'est pas claire : port de plaisance du Lyvet ? volonté de limiter l'envasement du bief amont ? ou tout simplement volonté de supprimer toute marée entre Dinan et le Lyvet, ainsi que toute remontée d'eau salée ? Quoi qu'il en soit ce rehaussement a eu pour effet d'accélérer l'envasement de l'amont du bassin maritime, par réduction des courants liée à la diminution du prisme tidal. Naturellement, les niveaux hauts pratiqués par le fonctionnement de l'usine (jusqu'à 12.70 m avant 1995, puis 12 m et maintenant 12.30 m depuis l'adoption du nouveau référentiel) sont beaucoup plus proches de la cote initiale du radier du barrage, limitant les courants qu'aurait entraîné la submersion du radier à pleine mer s'il n'avait pas été rehaussé : mais le contrôle

<sup>15</sup> Boucard F., 2022. Opérations de chasse à l'écluse du Châtelier. Note de synthèse EDF, 6p.

<sup>16</sup> Le Mao P., 1996. La flore des rives de la Rance. Penn Ar Bed N°160-161, 45-54.

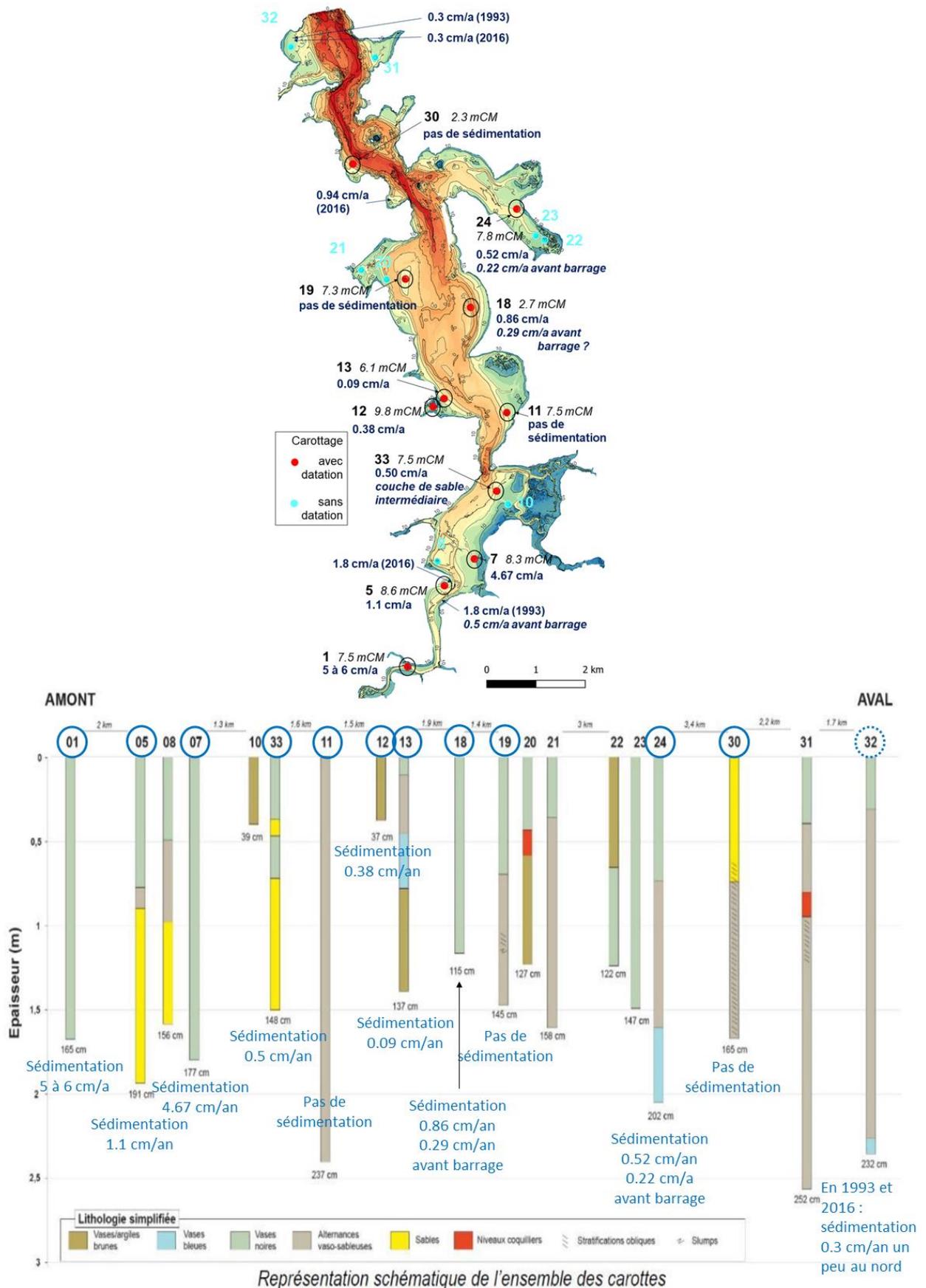
<sup>17</sup> faisant l'hypothèse que le bief amont a une surface de 800 000 m<sup>2</sup>, une vive eau montant à 13.5 m dépassant le radier du barrage de 13.5-11.9 = 1.6 m entraîne le passage de 1.6 x 800 000 = 1280 000 m<sup>3</sup> en 30' environ (fin de la marée) soit 711 m<sup>3</sup>/s ; en supposant une section moyenne de l'ordre de 1000 m<sup>2</sup> pour l'estuaire amont, il en résulte un courant de 0.7 m/s.

des niveaux hauts (qui sont bien plus fréquents qu'une pleine mer naturelle à 13.50 m) aurait pu constituer un levier pour ralentir l'envasement de l'amont.

### **11.5 Un complément d'information : mesure du taux de sédimentation nette par datation de carottes de sédiments**

Pour préciser les taux actuels de sédimentation et éventuellement pour les comparer à la situation d'avant barrage, ainsi que pour pallier l'imprécision des estimations déduites des différentiels bathymétriques, une campagne de carottages a été financée dans le cadre du plan expérimental de gestion des sédiments de la Rance et réalisée par l'Université de Bordeaux (laboratoire EPOC) et la société Géotransfert, avec les moyens nautiques de l'entreprise TSM Tanet Services Maritimes, sous le pilotage de l'EPTB Rance-Frémur-Baie de Beaussais (Maneux *et al.*, 2022). Une vision synthétique des 19 carottes prélevées est représentée figure 43. Une majorité d'entre elles étaient constituées de vase en surface, parfois superposées à des couches sableuses.

Parmi ces carottes, 11 ont fait l'objet d'analyses d'éléments radioactifs ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) à différentes profondeurs, permettant d'estimer le cas échéant un taux de sédimentation nette sur certaines périodes de quelques décennies, dans la gamme des demi-vies de ces radioéléments (22.3 ans pour le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et 30.17 ans pour le  $^{137}\text{Cs}$ ). Typiquement, la décroissance selon la profondeur du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  en excès donne accès à un taux de sédimentation lorsque celle-ci se produit plus ou moins régulièrement et que le sédiment est peu ou pas remanié. Le  $^{137}\text{Cs}$  est un radioisotope artificiel produit par les activités nucléaires anthropiques, et présente un maximum de retombées atmosphériques en 1963 dans l'hémisphère nord (essais nucléaires), ce qui correspond au début de construction de l'usine marémotrice (un autre maximum lié à l'accident de Tchernobyl en 1986 est parfois visible dans les enregistrements sédimentaires).



**Figure 43 : nature sédimentaire des carottes prélevées en 2022 et taux de sédimentation mesurés.** Sur la carte sont rappelés les sondes bathymétriques aux points de carottage et les taux de sédimentation mesurés en 1993 et 2016 pour la période post-barrage ou plus récente.

Le repérage des maximums dans les profils de  $^{137}\text{Cs}$  permet bien souvent de dater assez précisément un niveau sédimentaire et ainsi de confirmer l'évaluation initiale du taux de sédimentation<sup>18</sup>. Des exemples de profils de radioisotopes obtenus sont fournis en annexe 8.

Sur les 11 carottes « datées », 3 ne révélaient pas de sédimentation, dont une (la N°19) était vaseuse en surface, une autre sablo-vaseuse (la N° 11) et une dernière sableuse (la N°30). Trois autres présentaient un taux d'envasement très important :

- la N°1, en amont près du moulin de Rochefort, en partie basse d'une banquette de vase progradante dans la rive convexe d'un méandre, où le taux de sédimentation est de l'ordre de 5 à 6 cm/an
- la N°5, côté sud du banc du Chêne Vert, avec un taux de sédimentation de 1.1 cm/an en moyenne depuis la construction de l'UMR, montrant un certain ralentissement après une sédimentation très rapide au début, cohérente donc avec le taux de sédimentation de 1.8 cm/an mesuré en 1993 sur une carotte prélevée plus au nord sur le même banc ; on peut d'ailleurs rappeler qu'en face, sur le banc sud-ouest du port de Mordreuc, un taux de sédimentation équivalent (1.8 cm/an) avait aussi été mesuré en 1993, alors qu'avant barrage le taux de sédimentation au même endroit n'était que 0.5 cm/an
- la N°7, au nord-est de la « plaine » de Mordreuc (au nord), où le taux de sédimentation est estimé à 4.67 cm/an : cette valeur est en accord avec la forte accrétion révélée sous forme de « langue brune allongée » bien visible sur la figure 33 ; à noter que le même secteur apparaît sous forme d'érosion dans le différentiel 2018-1957 : ce qui signifie qu'il a d'abord connu une forte érosion commentée sur la section 19 de la figure 30, avant de laisser place à la sédimentation actuelle.

Les 5 autres carottes indiquent des taux de sédimentation récente compris entre 0.09 cm/an (N°13) et 0.86 cm/an (N°18), soit une accrétion de quelques décimètres depuis la construction de l'UMR (49 cm pour la carotte 18, 22 cm pour la N° 12 et 28 cm pour la N°24 en baie de Châteauneuf).

Dans l'ensemble, les taux de sédimentation calculés d'après les analyses de radioéléments sont cohérents avec les différentiels bathymétriques. Souvent les taux de sédimentation conduisent à des différences assez faibles, même sur une période de 60 ans, qui sont du même ordre que l'incertitude des différentiels (+- 25 cm), et n'apparaissent pas nécessairement sur ces différentiels. Sur les 11 carottes analysées, 9 donnent des résultats compatibles avec les bathymétries, même si certains sont étonnants : par exemple, le taux de sédimentation très élevé de la carotte 7 est cohérent avec l'accrétion visible sur le différentiel 2018-2010, mais n'est pas suffisant pour compenser la forte érosion qui a précédé, faisant apparaître une érosion résiduelle au même endroit sur le différentiel 2018-1957. C'est sans doute le même phénomène qui se produit sur la carotte 13, avec un dépôt faible de 0.09 cm dans la période actuelle, soit au plus 5 cm, donc non visible sur le différentiel 2018-2010, tandis que l'érosion visible sur le différentiel 2018-1957 a pu se produire avant (par exemple pendant la construction du barrage ou peu après).

Pourtant, deux carottes présentent des taux de sédimentation difficilement compatibles avec les différentiels bathymétriques. Il s'agit de la carotte N°12, dans l'herbu de la Souhaitier où le taux moyen de sédimentation de 0.38 cm/an depuis 59 ans conduit à un dépôt de 22 cm difficilement compatible avec la stabilité de cet herbu constatée sur la section 13 de la figure 30 (encore que l'on reste dans l'imprécision des bathymétries). C'est surtout le cas de la carotte N°24 devant les Gastines en baie de Châteauneuf. Les analyses cohérentes de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et de  $^{137}\text{Cs}$  indiquent un dépôt de 28 cm depuis 1963, alors que le secteur apparaît en érosion, de l'ordre de 1.50 m, visible sur le différentiel 2018-1957 (section 23, figure 29). Il n'y a pas de bathymétrie 2010 à cet endroit pour lever le doute. Une explication envisagée pourrait être un défaut de positionnement de cette carotte, qui aurait été prélevée à proximité du méandre du chenal en

---

<sup>18</sup> Pour plus de détails : Schmidt S., 2022. Etude de carottes sédimentaires de l'estuaire de la Rance. Rapport EPOC/Université de Bordeaux pour l'EPTB Rance-Frémur-baie de Beaussais, 27p.

cours de modification, comme le montre la zone de dépôt (orange) très proche sur le différentiel 2018-1957 (figure 29). Mais cette interprétation reste spéculative.

Enfin les analyses de radioéléments permettent dans certains cas d'accéder à un taux de sédimentation pour la période précédant la construction du barrage marémoteur. Après avoir écarté les carottes pour lesquelles l'estimation du taux antérieur à 1963 présentait beaucoup d'incertitudes, une information peu ambiguë est obtenue pour les carottes 18 et 24, qui présentent un taux d'accumulation deux à trois fois plus faible avant construction du barrage qu'après (Fig.43). C'est aussi ce qui avait été observé dans les précédentes campagnes de carottage (par exemple en baie de la Richardais ou à Mordreuc) mais pas toujours (cas de la Landriais en 2016).

Pour conclure, les carottages et datations confirment dans l'ensemble les observations faites sur les différentiels bathymétriques en apportant des précisions sur la dynamique actuelle, mais seulement de façon localisée, et pourront aider à l'analyse du différentiel bathymétrique qui devrait être réactualisé dans un futur proche (courant 2023, avec une nouvelle bathymétrie réalisée pendant l'hiver 2023). Ce sera aussi l'occasion de lever le doute sur les observations apparemment contradictoires relevées en baie de Châteauneuf (carotte 24).

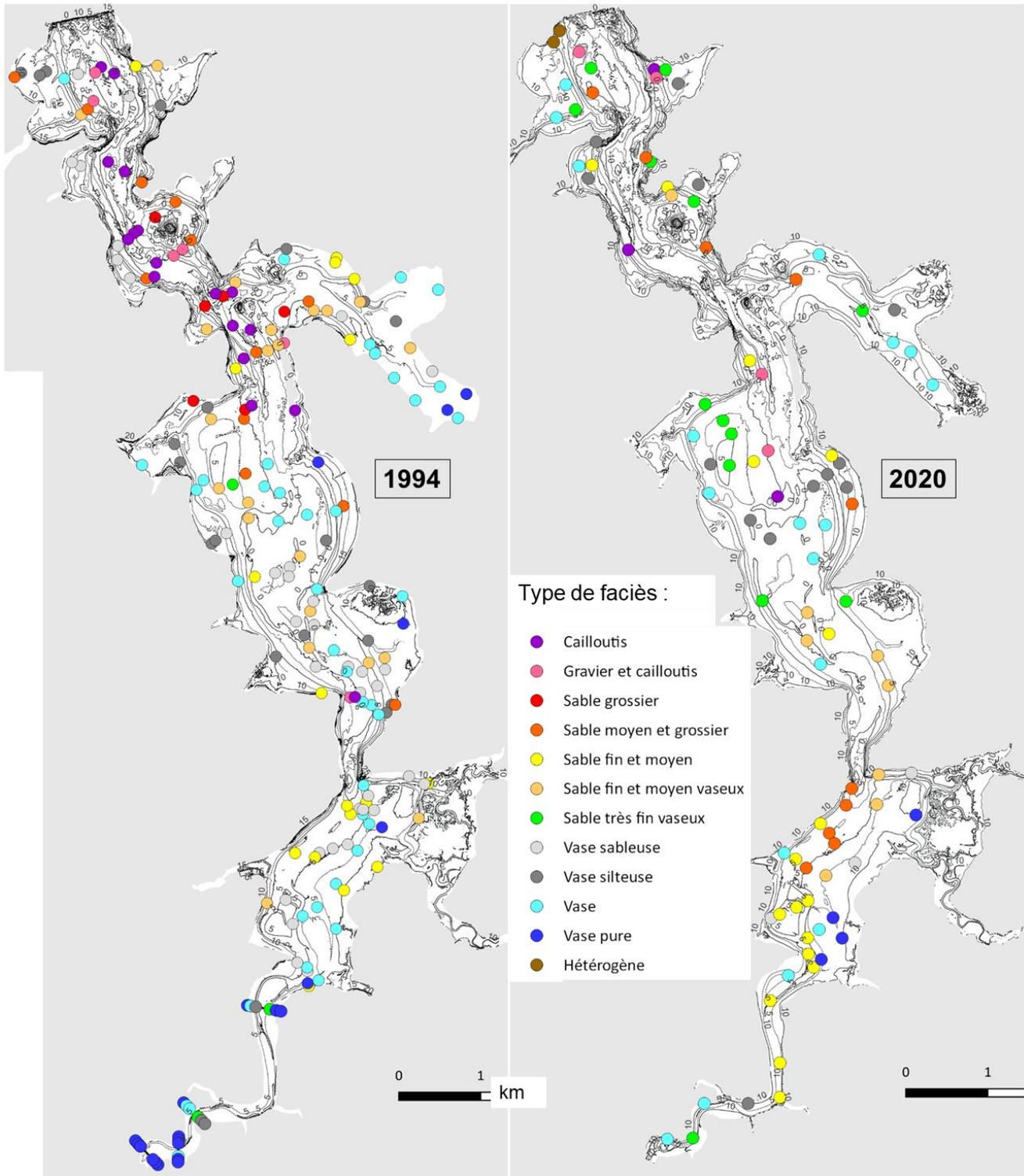
### **11.6 Evolution de la nature du sédiment superficiel**

*Dans la section 11.4, le cas du changement de la nature des fonds (de sable plus ou moins envasé à vase pure) dans le secteur amont du bassin maritime (typiquement de l'écluse du Châtelier au moulin de Rochefort) a été abondamment commenté, et ne sera pas repris ici.*

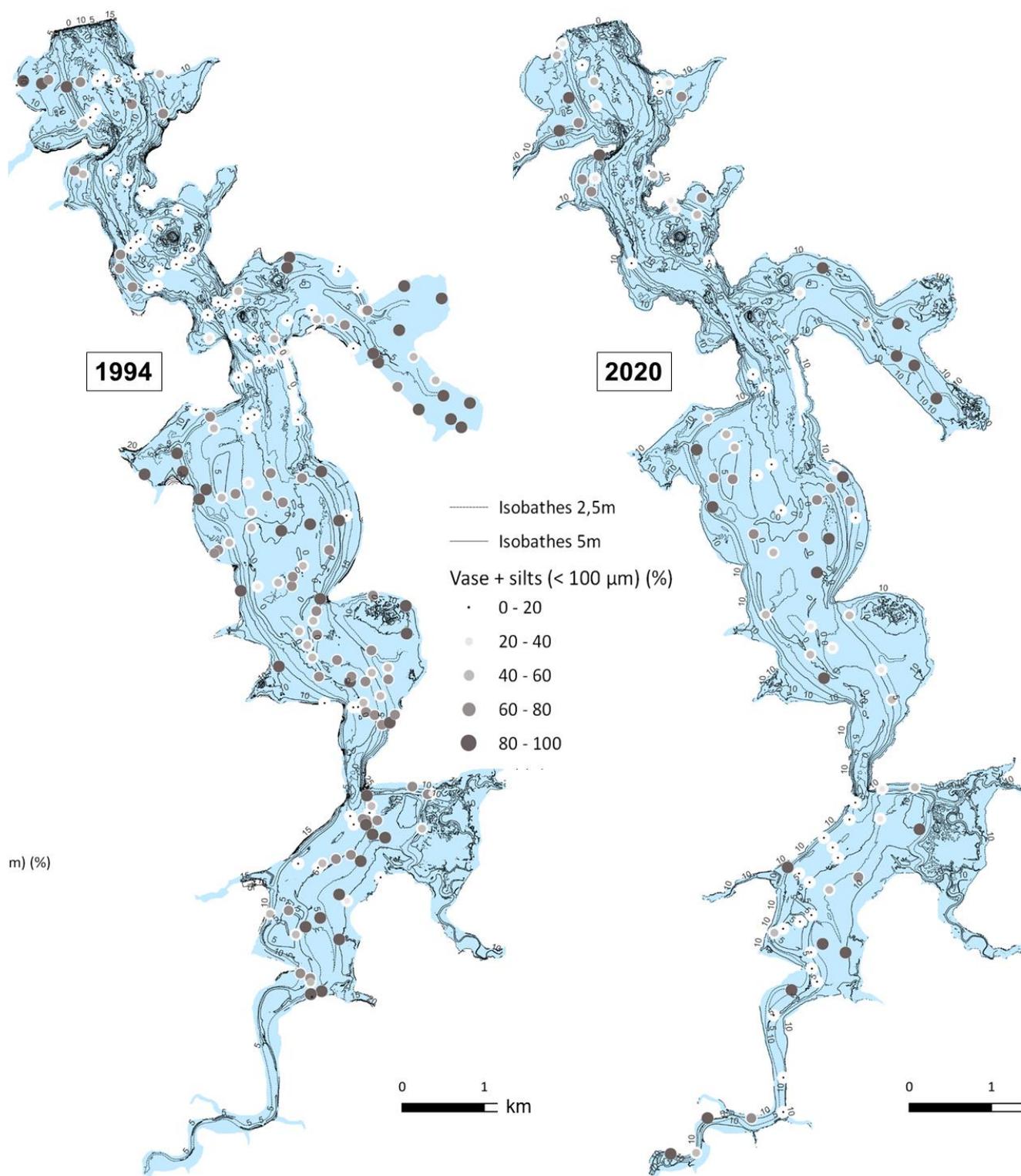
Afin de déterminer la variation de la nature du sédiment superficiel, et en particulier la nature granulométrique des sédiments déposés récemment, une nouvelle campagne de prélèvements a été réalisée en 2020, de concert avec des prélèvements de faune benthique, en vue d'une comparaison avec la couverture sédimentaire de 1994.

La figure 44 représente côte à côte les faciès sédimentaires observés en 1994 et en 2020. En raison d'un nombre d'échantillons trop faible en 2020 (une centaine) et des variations spatiales importantes de la granulométrie compte tenu de la morphologie du bassin, il n'a pas été possible pour l'instant de proposer une carte sédimentaire interpolée. Ce sont donc les stations elles-mêmes qui sont représentées. En annexe 9, une carte commune pour les échantillons de 1994 et ceux de 2020, différenciés par une symbolique adaptée, permet de mieux préciser les localisations des prélèvements, qui malheureusement ne sont pas identiques entre les deux campagnes. L'annexe 9 contient aussi la définition des faciès. Un premier regard ne permet pas de voir une évolution significative (Fig. 44 ou annexe 9).

En raison de la préoccupation majeure exprimée sur l'envasement, l'attention a été portée sur la fraction fine au sein de chaque échantillon, en rassemblant les classes de vase pure (particules de taille inférieure à 40  $\mu\text{m}$ ) et de silts (taille comprise entre 40 et 100  $\mu\text{m}$ ). L'abondance de ces particules est un bon indicateur de l'impression d'«envasement». La figure 45 compare la distribution des fractions fines en 1994 et 2020. Là encore, il est difficile de constater une évolution d'ensemble.



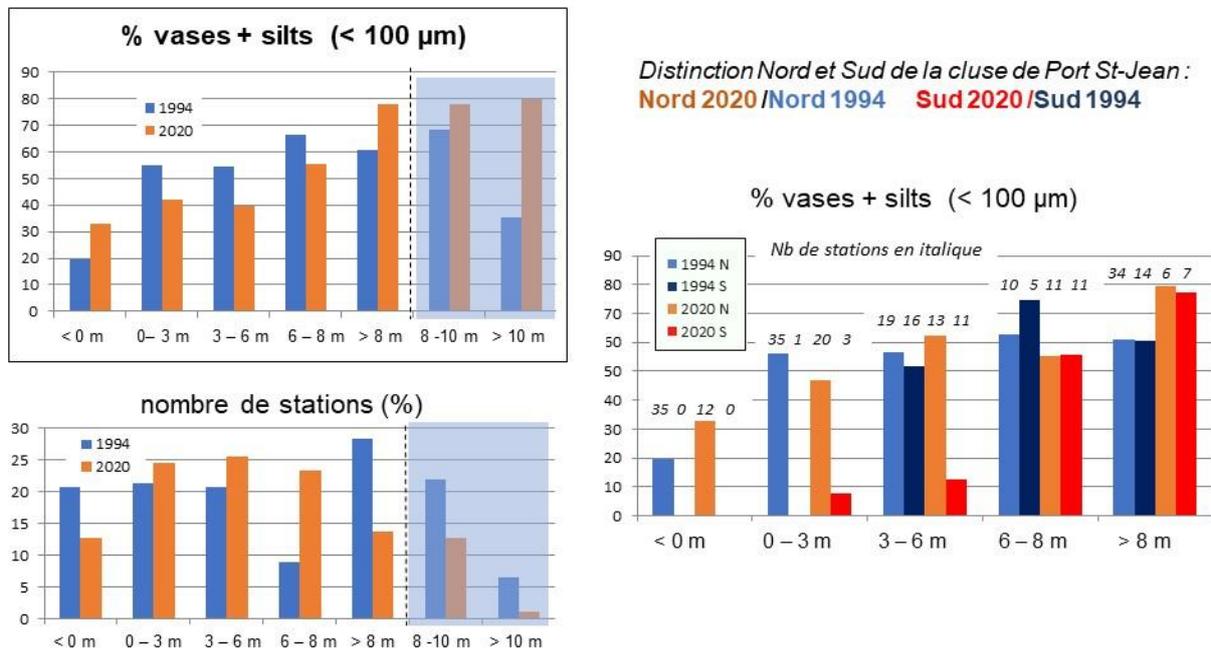
**Figure 44 : faciès du sédiment superficiel du bassin maritime de la Rance en 1994 et en 2020. Données EPHE (1994) et Ifremer (2020). La définition des faciès est présentée en annexe 9.**



**Figure 45 : teneurs des sédiments en particules fines (< 100 μm) en 1994 et 2020. Données EPHE (1994) et Ifremer (2020)**

L'échantillonnage de 2020 ayant été réalisé sur des stations très proches de celles choisies en 1994 pour les prélèvements de faune benthique, il s'avère que très peu de stations sont communes avec celles de la campagne granulométrique de 1994. Parmi les 13 stations communes, plutôt bien réparties sur l'ensemble du bassin, 6 montrent une réduction de la fraction fine, 3 indiquent une augmentation et 4 ne montrent pas de changement.

Pour contourner la difficulté générée par les décalages entre la plupart des stations 1994 et 2020, une analyse statistique par strates bathymétriques a été réalisée. C'est l'objet de la figure 46.



**Figure 46 : évolution, de la fraction fine dans le sédiment superficiel : comparaison statistique des valeurs 1994 et 2020 par tranches bathymétriques.**

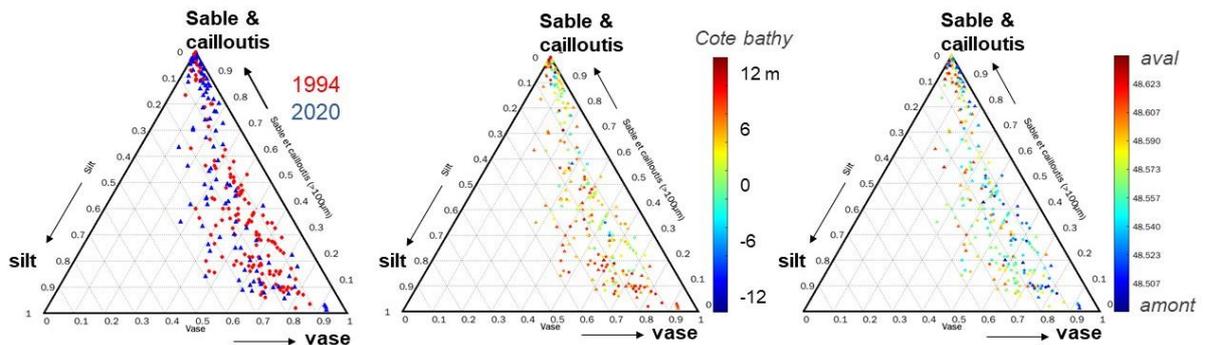
En plus de la fraction moyenne de particules fines par tranches bathymétriques (référence carte marine) sur l'ensemble du bassin (*en haut à gauche*), la figure 46 présente la répartition des stations au sein de ces tranches (*en bas à gauche*), ainsi que la fraction de fines par tranches bathymétriques en distinguant l'amont et l'aval de la cluse de Port St-Jean (*respectivement sud et nord, dans le diagramme de droite*). Pour les deux campagnes, on retrouve une augmentation de la fraction fine en fonction de l'élévation du fond, classique en estuaire. Surtout, cette figure nous apprend que :

- il y a une légère réduction globale de la fraction fine (50.18 % en moyenne en 1994, 48.35 % en 2020)
- la fraction fine augmente en haut estran (ce constat ne concerne probablement pas les herbues, situés à la cote 11.5 / 12 m, qui ne sont plus guère alimentés actuellement)
- la fraction fine augmente dans les secteurs profonds (< 0 m CM)
- la fraction fine diminue entre cotes 0 et 8 m CM, englobant l'estran inférieur
- la réduction des fines entre les cotes 0 et 6 m (presque toujours submergées dans le fonctionnement actuel, cf. Fig.1) est marquée en amont de la cluse.

Ces résultats doivent être pondérés du fait d'un sous-échantillonnage relatif des tranches hautes (> 10 m) et basses (< 0 m), c'est aussi pour cela que les classes 8-10 m et > 10 m, qui apparaissent en grisé sur la figure, ont été regroupées en une seule classe « > 8 m ». Néanmoins, on peut déduire une redistribution des vases, une partie des vases observées sur les niveaux supérieurs pouvant provenir des niveaux inférieurs, au cours de remaniements internes au bassin, et également de certains secteurs d'herbus en régression (il se peut qu'une partie des vases remaniées par érosion des fronts d'herbus

se redéposent en contrebas dans les chenaux de marée secondaires, par exemple dans le Bras de Châteauneuf).

L'examen de la seule fraction fine ne restitue pas la richesse d'information contenue dans la distribution granulométrique des sédiments. Un complément peut être apporté par des diagrammes ternaires qui permettent de distinguer 3 fractions granulométriques. Après quelques tentatives à partir des classes disponibles pour les prélèvements de 1994, c'est finalement la distinction *vase pure* / *silts* / *particules > 100 µm* qui permet d'observer une certaine évolution (Figure 47).



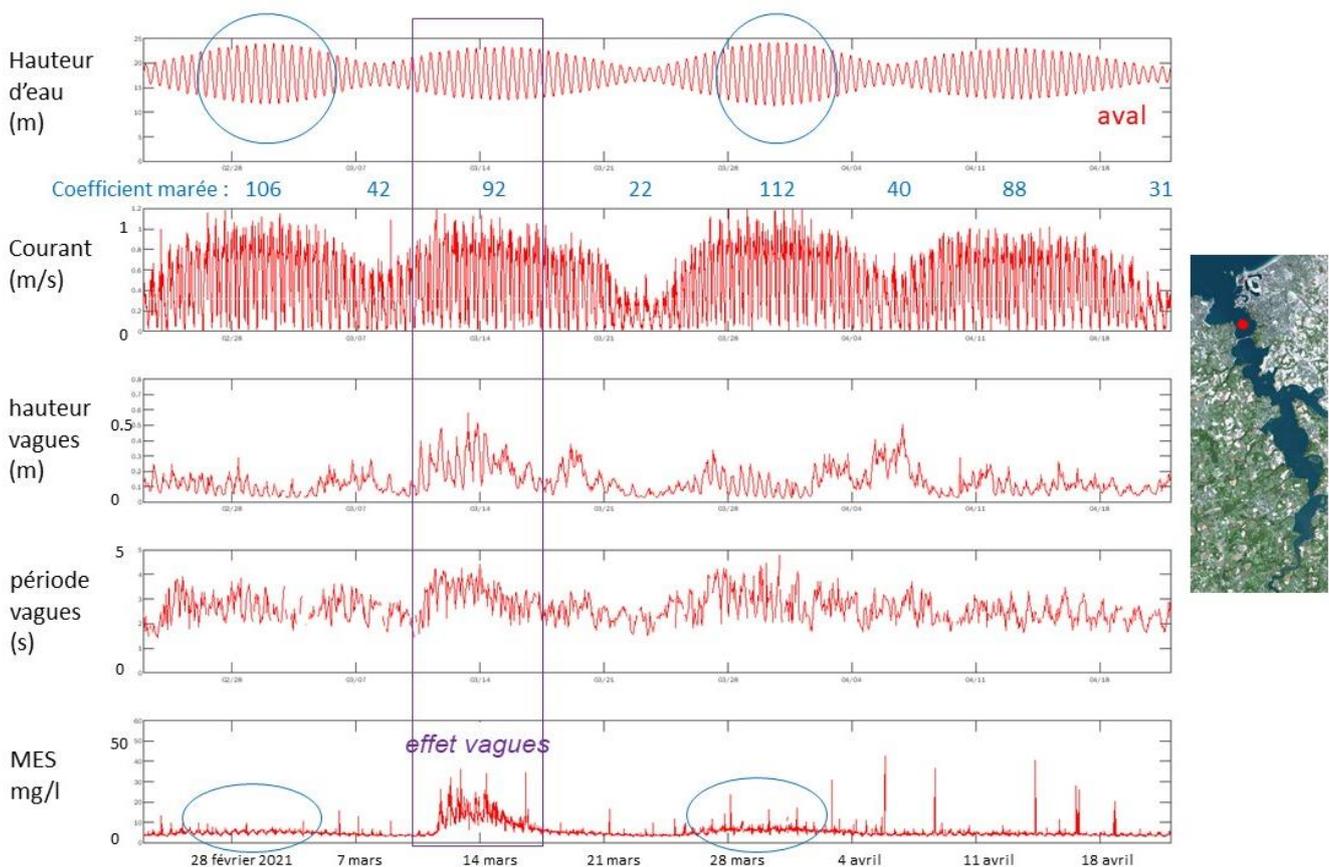
**Figure 47 : diagrammes ternaires de la distribution statistique des sédiments en Rance (« vase » : < 40 µm ; « silt » : 40-100 µm ; « sable & cailloutis » : > 100 µm). A gauche : distinction des échantillons 1994 et 2020 ; au centre : coloration selon la cote bathymétrique au point de prélèvement (réf. CM) ; à droite : coloration selon la latitude (position amont/aval dans le bassin).**

La figure 47 (à gauche) montre un enrichissement en silts en 2020 par rapport à 1994, et un léger appauvrissement en vase. Le diagramme central indique que cet enrichissement en silts concerne plutôt les tranches bathymétriques 3-10 m, et celui de droite indique qu'il se produit plutôt dans le bassin central. Pour lever un possible biais statistique du fait du sous-échantillonnage des secteurs profonds et de haut estran lors de la campagne 2020, déjà mentionnée, les mêmes diagrammes ternaires ont été produits en ne retenant que les échantillons prélevés dans la tranche 0-6 m : les conclusions restent analogues.

## 12 - Sédiments en suspension

Jusqu'au démarrage du plan expérimental de gestion des sédiments, en 2018, la connaissance des concentrations de matières en suspension (MES) dans le bassin maritime de la Rance et ses abords était très parcellaire car elle reposait sur des prélèvements discrets, alors que dans tous les environnements estuariens les MES présentent une variabilité considérable. Des mesures en continu de MES ont depuis été acquises en 2020-2021 par l'EPTB, conjointement à des enregistrements de vagues et de profils de courant déjà évoqués (section 4), et en 2019-2021 par EDF (Parquet, 2021 ; Rtimi, 2022).

Elaborée sur proposition du Conseil Scientifique du plan de gestion des sédiments de la Rance, la campagne EPTB 2020-2021 repose sur la mesure en deux stations, l'une en aval du barrage devant la pointe de la Jument (secteur de la Vicomté), l'autre au cœur du bassin dans la cluse de Port St-Jean (Dynamocean, 2021). La figure 48 illustre pour la station aval la variabilité des MES mesurées près du fond (à environ 1.10 m) et dûment calibrées (Kervella et al., 2021) en même temps que les hauteurs d'eau, vagues et courants, de façon à mettre en relation les forçages (marée, vagues et courant) et la réponse du système en termes de resuspension des sédiments.



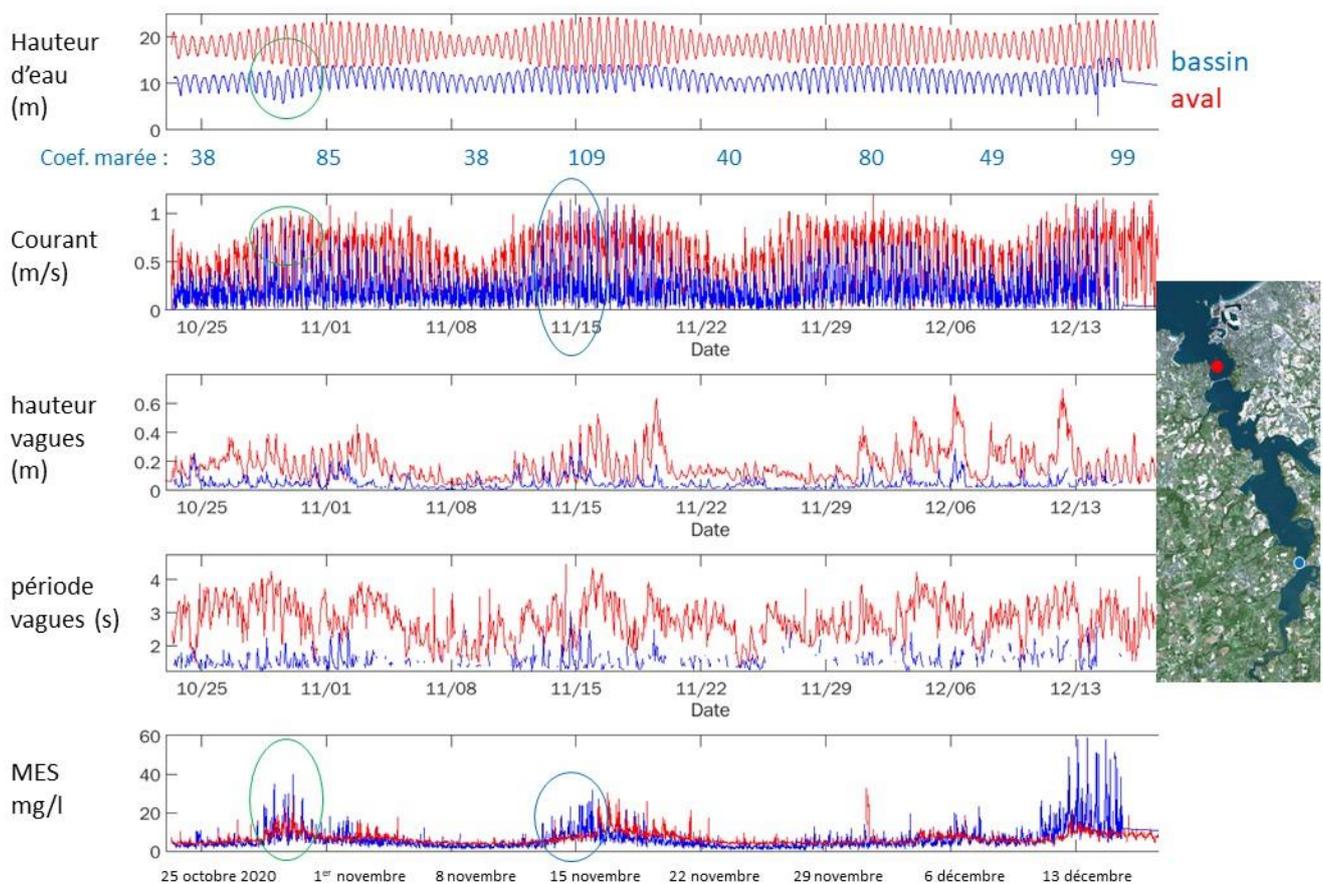
**Figure 48 : mesure en continu de hauteur d'eau, de courant, de hauteur et période des vagues et de MES près du fond à la station de la pointe de la Jument (données EPTB Rance), de février à avril 2021.**

La première observation est la faible valeur des MES une majorité du temps : autour de 5 mg/l. Malgré l'intensité des courants de marée, les eaux du golfe de St-Malo sont en général claires, probablement

parce qu'une majorité des sédiments sont sableux ou grossiers, justement en raison de l'intensité des courants. Il est remarquable que même en vive eau de coefficient 106 (vers le 28 février) les MES « décollent » à peine, et qu'il faille une vive eau exceptionnelle (coefficient 112, le 31 mars) pour que les MES approchent 10 mg/l.

Au contraire, les vagues ont une influence marquée comme le montre l'épisode du 12-15 mars. Les MES oscillent autour de 20 mg/l pour une hauteur de vague locale variant entre 20 cm à basse mer et 50 cm à pleine mer. A noter que la période des vagues est relativement plus élevée pendant cet épisode (3 à 4 s) pouvant laisser penser que ces vagues constituent des résidus d'une houle du large (les longues périodes n'apparaissent pas en ce point trop à l'intérieur des côtes, s'étant dissipées plus au large). L'accroissement des MES résulte probablement d'une resuspension dans les secteurs envasés à l'abri des forts courants de marée (par exemple, depuis le bas estran de la baie du Prieuré riche en vases et sables vaseux).

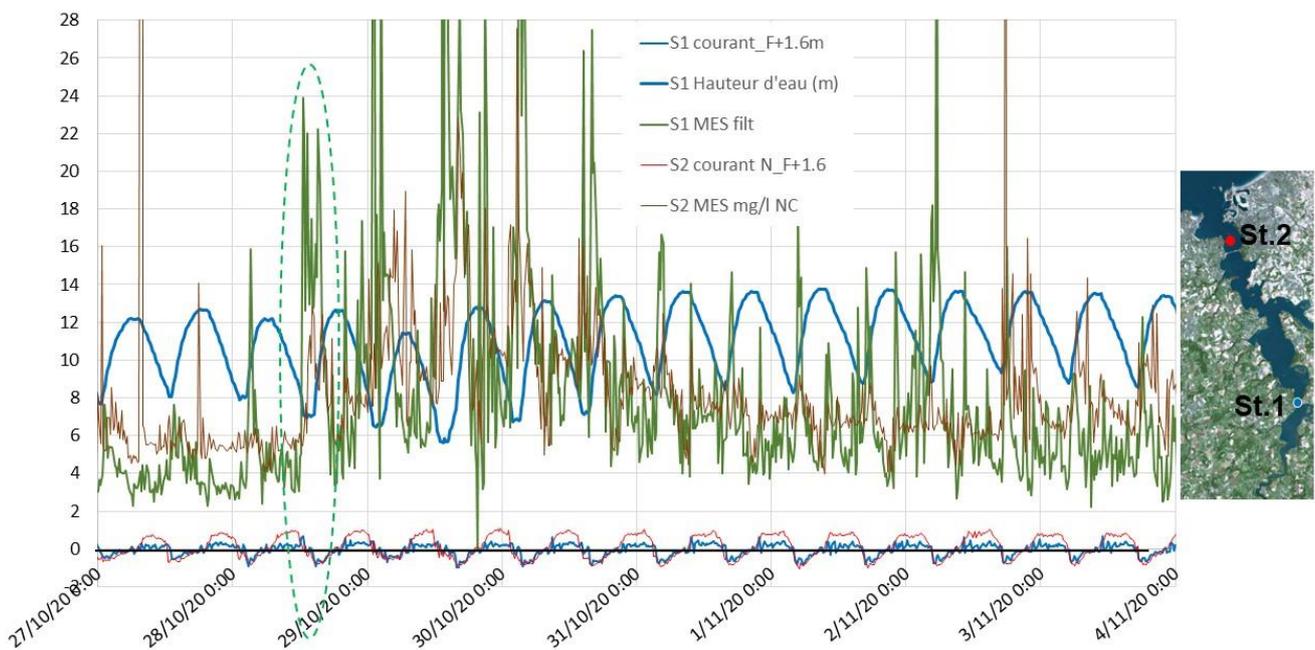
La figure 49 analogue à la figure 48 présente simultanément les MES dans le bassin (dans la cluse de Port-St-Jean) et en aval du barrage (station de la pointe de la Jument). Un premier constat est la similitude d'ensemble des MES dans le bassin et en mer, en aval du barrage. Les eaux y sont globalement aussi claires : une telle concentration est plutôt atypique des zones estuariennes où les concentrations en suspension sont couramment d'un ordre de grandeur au-dessus. La quasi simultanéité des augmentations de MES est aussi frappante, même si les MES dans le bassin semblent plus clairement sensibles aux vives eaux.



**Figure 49 : mesure en continu de hauteur d'eau, de courant, de hauteur et période des vagues et de MES près du fond à la station de la pointe de la Jument (rouge) et dans la cluse de Port St-Jean (bleu) (données EPTB Rance), d'octobre à décembre 2020.**

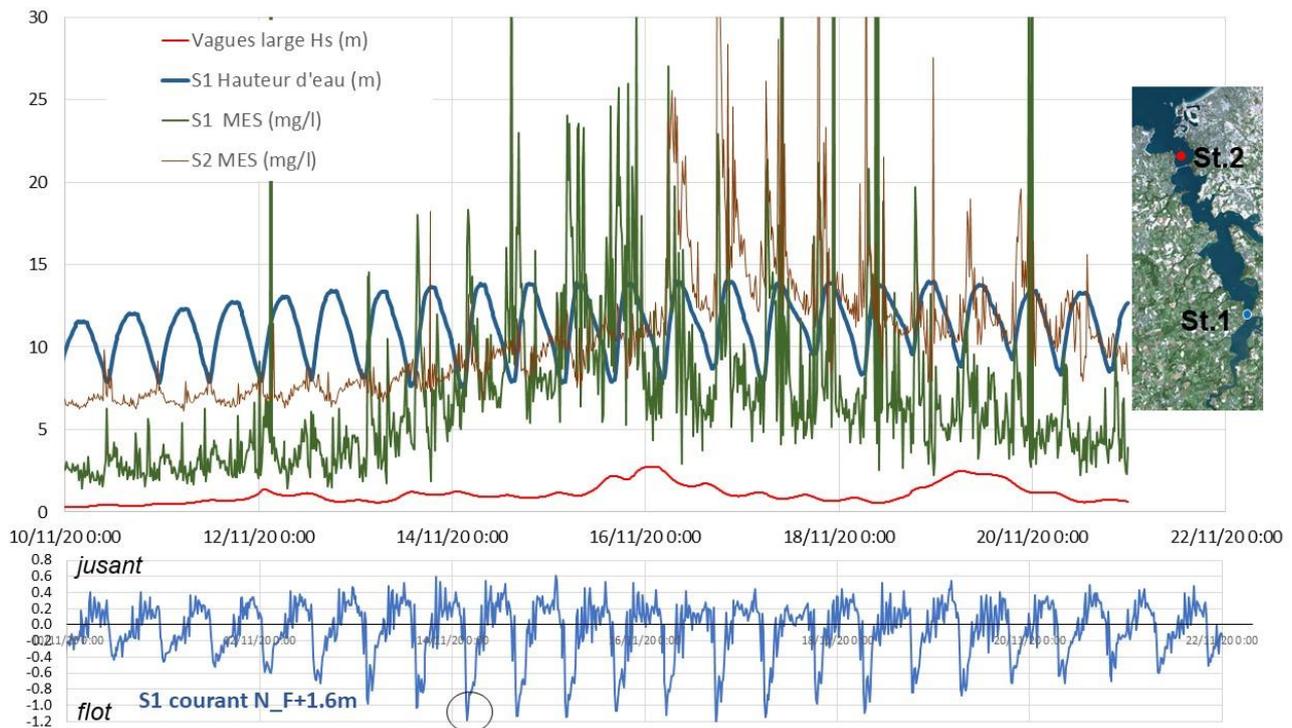
L'augmentation des MES vers le 29 octobre est étonnante : elle intervient par temps relativement calme (vagues modérées en aval) et pour une amplitude de marée moyenne. Elle correspond à un épisode de niveau très bas, bien apparent sur la figure (entouré d'un cercle vert). L'augmentation se fait sentir d'abord dans le bassin, mais est sensible également en aval. On peut constater qu'à cette occasion les courants sont augmentés, dans le bassin mais aussi en aval (Figure 49) et que l'augmentation des MES est soudaine, liée aux pics de fin de jusant et de début de flot générés dans le bassin (Figure 50).

L'effet de la pratique des niveaux très bas sur les courants dans le bassin a été souligné dans la section 4 : il apparaît qu'elle se traduit par une variation des courants également en aval du barrage (liée au fonctionnement de l'usine) et surtout par une remise en suspension significative dans le bassin. L'augmentation des suspensions en aval du bassin est vraisemblablement due à l'évacuation des suspensions du bassin pendant le jusant, et peut-être à des resuspensions localisées en raison de l'accroissement des courants de vidange et de remplissage du bassin. Le fait que l'opération niveau bas génère des resuspensions au moins jusqu'à la cluse d'une part, et en aval d'autre part, montre que la pratique des niveaux bas a un impact hydro-sédimentaire dans l'ensemble du bassin.



**Figure 50 : zoom temporel sur les mesures aux stations bassin (1) et aval (2) pendant un épisode de niveau bas. La resuspension démarre à la station 1 le 28 octobre, suite à un pic de fin de jusant (>0) suivi d'un pic de début de flot (<0). A la station 2, seule la composante nord/sud du courant est représentée.**

Enfin la resuspension visible le 15 novembre dans le bassin (Figure 49) intervient pendant le revif, avant le maximum d'amplitude de marée (coefficient 109 les 15-16 novembre), à un moment où des maxima de pic de flot se produisent (dès le 13 novembre, figure 51). Ces pics ne semblent pas liés à une baisse particulière du niveau d'eau mais restent générés par le fonctionnement de l'usine marémotrice (ouverture des vannes). Leur intensité très forte en dépit de l'amplitude de marée correspond peut-être à un ajustement du régime de fonctionnement de l'usine marémotrice (fin du pompage ?).



**Figure 51 : zoom temporel sur les mesures aux stations bassin (1) et aval (2) du 10 au 20 novembre 2020.**

Au cours de la dernière période présentée, c'est l'effet des vagues sur les resuspensions qui est notable (figure 52).

Le 25 décembre la hauteur des vagues au large est élevée, mais leur période est relativement courte de telle sorte que les MES en aval du barrage sont plutôt faibles. Il s'agit sans doute d'une mer de vent moins énergétique vis-à-vis du fond. A contrario, les MES sont fortes dans le bassin (à la cluse) où les vagues locales atteignent 25 cm de hauteur. Il s'agit d'un clapot tel qu'évoqué dans la section précédente, suffisant donc pour générer des resuspensions dans le bassin. Un examen attentif de la figure montre que les hauteurs des vagues sont très variables au cours de la marée, et maximales à pleine mer, comme cela a été supposé dans la section sur les évolutions topo-bathymétriques. Dans les jours qui suivent, les vagues du large deviennent plus longues (leur période augmente, indiquant l'incidence probable d'une houle) et cette fois-ci suffisantes pour générer des MES en aval du barrage, qui sont très vite advectées dans le bassin (autour du 1<sup>er</sup> janvier). Le phénomène se répète autour du 14 janvier, s'ajoutant à un épisode de niveau bas qui semble se manifester dans le bassin le 12 janvier.

Les campagnes réalisées par EDF entre 2019 et 2021 complètent les observations ci-dessus par des mesures en continu de turbidité en d'autres points du bassin, en surface ou au fond (Parquet, 2021). Si leur calibration en MES (mg/l) est trop incertaine, les valeurs brutes en turbidité de type NTU apportent des informations très intéressantes d'un point de vue relatif. La figure 53 en dresse une synthèse (pour plus de détails, se rapporter à Parquet, 2021 et Rtimi, 2022) et montre que les turbidités en amont (stations 1 et 2) sont plus élevées que celles en aval, de près d'un ordre de grandeur.

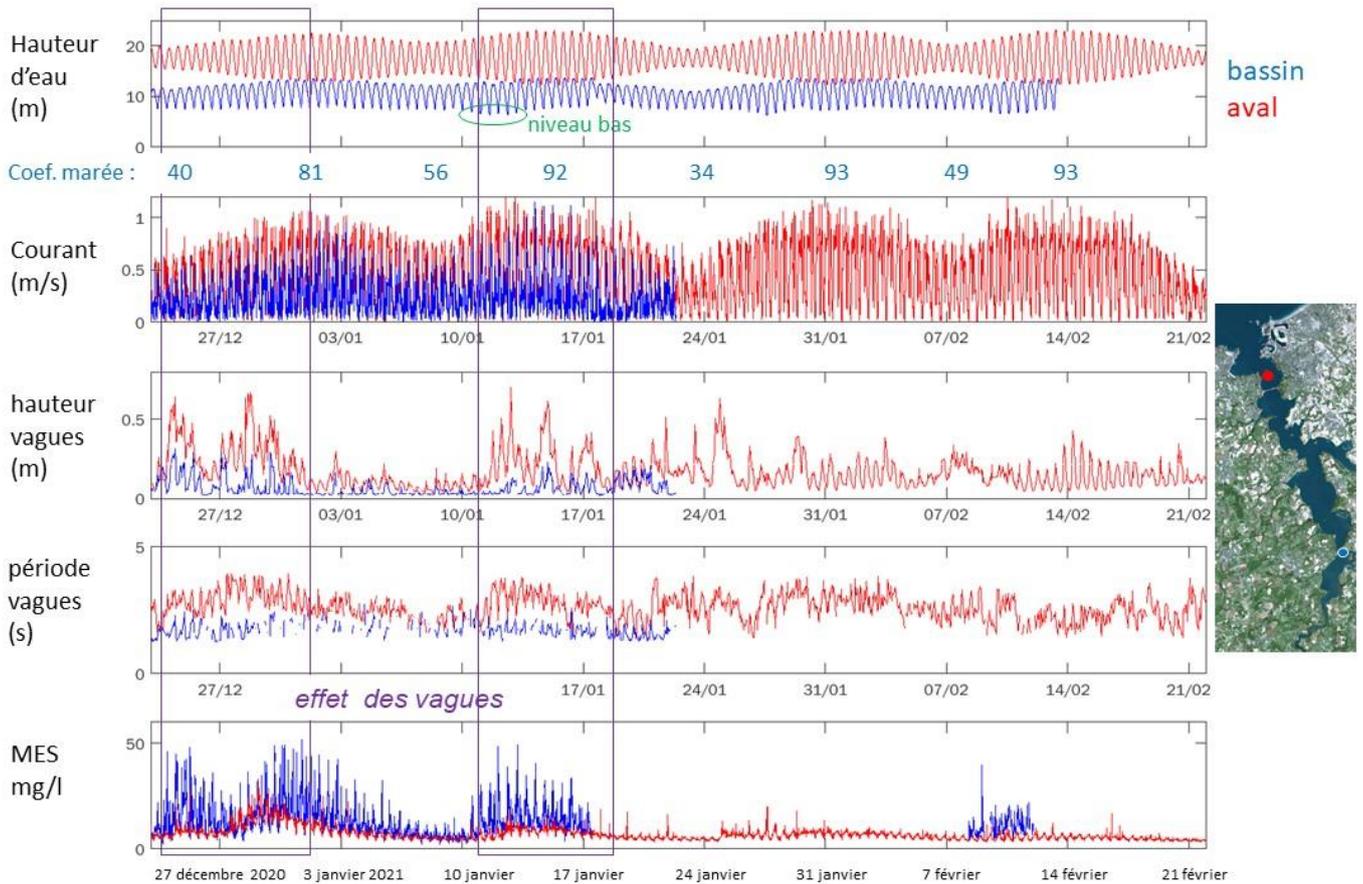


Figure 52 : mesure en continu de hauteur d'eau, de courant, de hauteur et période des vagues et de MES près du fond à la station de la pointe de la Jument (rouge) et dans la cluse de Port St-Jean (bleu) (données EPTB Rance), de décembre 2020 à février 2021.

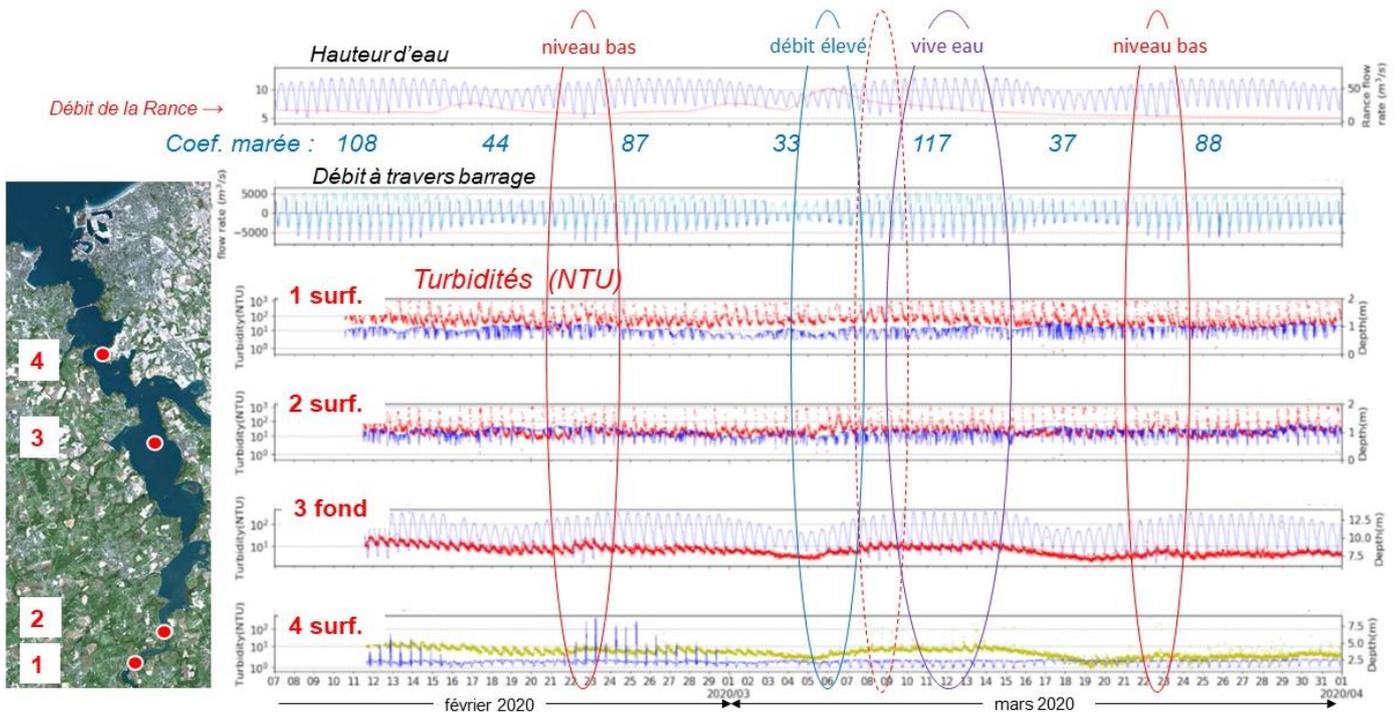
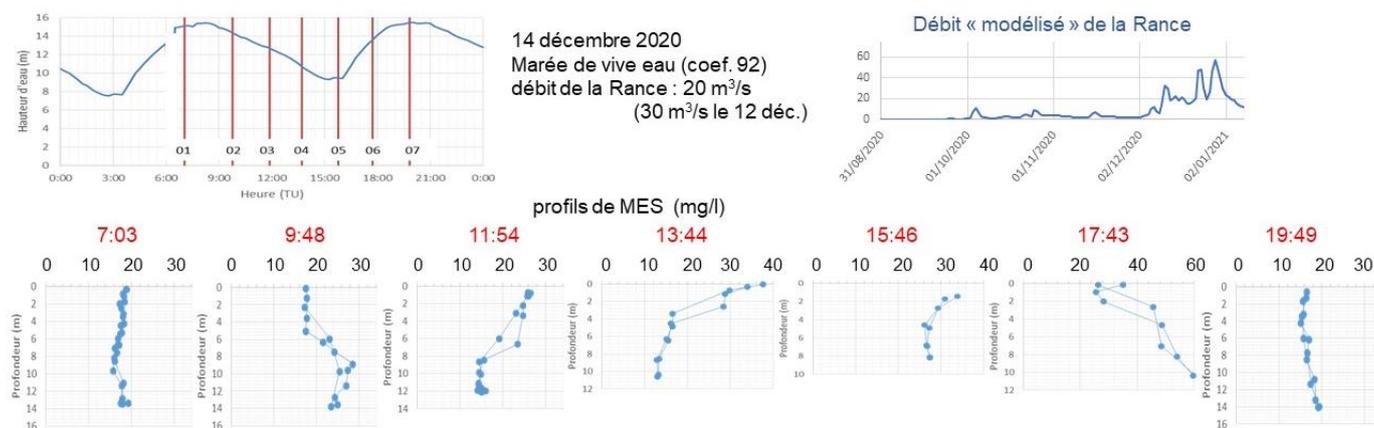


Figure 53 : Turbidité mesurée en continu en 4 points du bassin en février/mars 2020 (d'après Parquet, 2021). Les courbes bleues représentent les profondeurs d'immersion des capteurs.

La figure 53 montre que les épisodes de niveau bas augmentent la turbidité dans tout le bassin, de même que les marées de grande amplitude. La similitude entre les turbidités à St-Suliac (St.3 fond) et au sud de la pointe de Cancaval (St.4 surface) est remarquable.

Des mesures de profils de concentrations en MES ont également été réalisées en décembre 2020, à une période où le débit de la Rance était élevé (30 à 20 m<sup>3</sup>/s). Dans ces conditions stratifiées (cf. section 10) les MES étaient fréquemment plus élevées en surface (figure 54), ce qui est tout à fait inhabituel en estuaire. Cette turbidité de surface résulte probablement d'une concentration élevée dans les apports amont de la Rance par temps de pluie après une période d'étiage (eau douce, donc moins dense que les eaux du bassin).



**Figure 54 : Mesures de profils verticaux de MES dans la cluse Port St-Jean, le 14 décembre 2020 (d'après Kervella et al., 2021).**

### ***Distribution des matières en suspension***

Ces mesures de MES en stations fixes ne permettent pas de restituer la distribution spatiale des turbidités. Cela est aisément accessible par la modélisation numérique. La figure 55 en fournit une illustration, à partir de résultats du modèle MARS-3D de la Rance. Les valeurs n'ont pas fait l'objet d'une validation poussée, et peuvent apparaître un peu faibles, mais on peut penser que la distribution est respectée. Ces résultats confirment les observations de Bonnot-Courtois et al. (2002) qui évoquent un bouchon vaseux positionné à 2 km en aval de l'écluse du Châtelier (soit approximativement le coude du moulin du Prat) pour un débit « normal » en février 1993. Une simulation a été réalisée pour une configuration sans barrage marémoteur (et avec la bathymétrie de 2010) dans les mêmes conditions (Fig. 55 à droite) : les MES sont nettement plus élevées, et surtout le maximum de turbidité se dédouble entre un secteur amont et un secteur central (entre l'anse de la Souhaitier et le « camp viking »). En raison des courants de marée bien plus intenses, les MES sont nettement plus abondantes dans l'estuaire sans barrage, plus en accord avec ce qu'on observe dans d'autres rias macrotidales bretonnes (e.g. Aulne). Des distributions de MES tout à fait analogues ont été obtenues avec le modèle 3D d'EDF, également avec ou sans présence du barrage et de l'usine marémotrice (Rtimi, 2022).

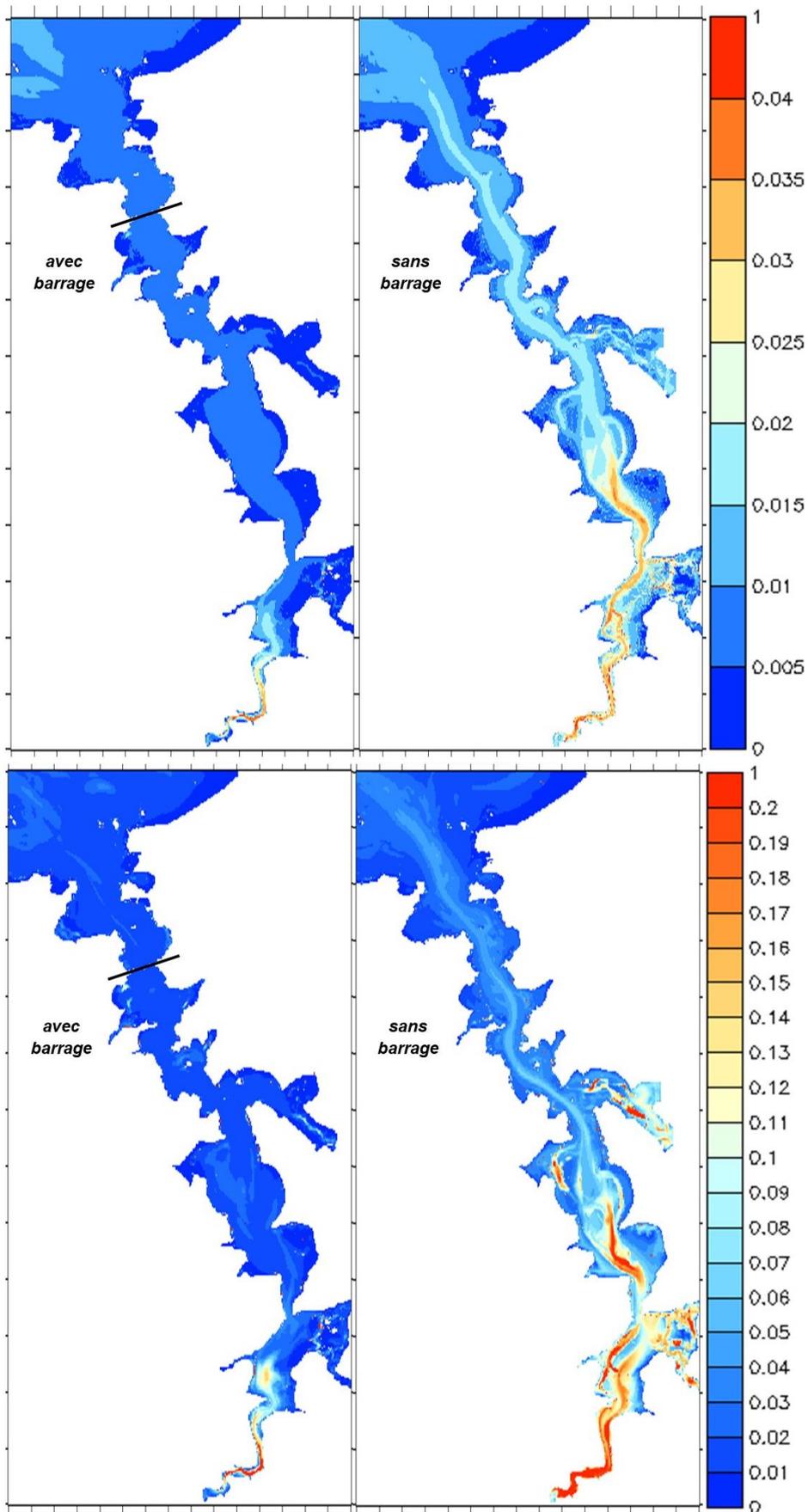
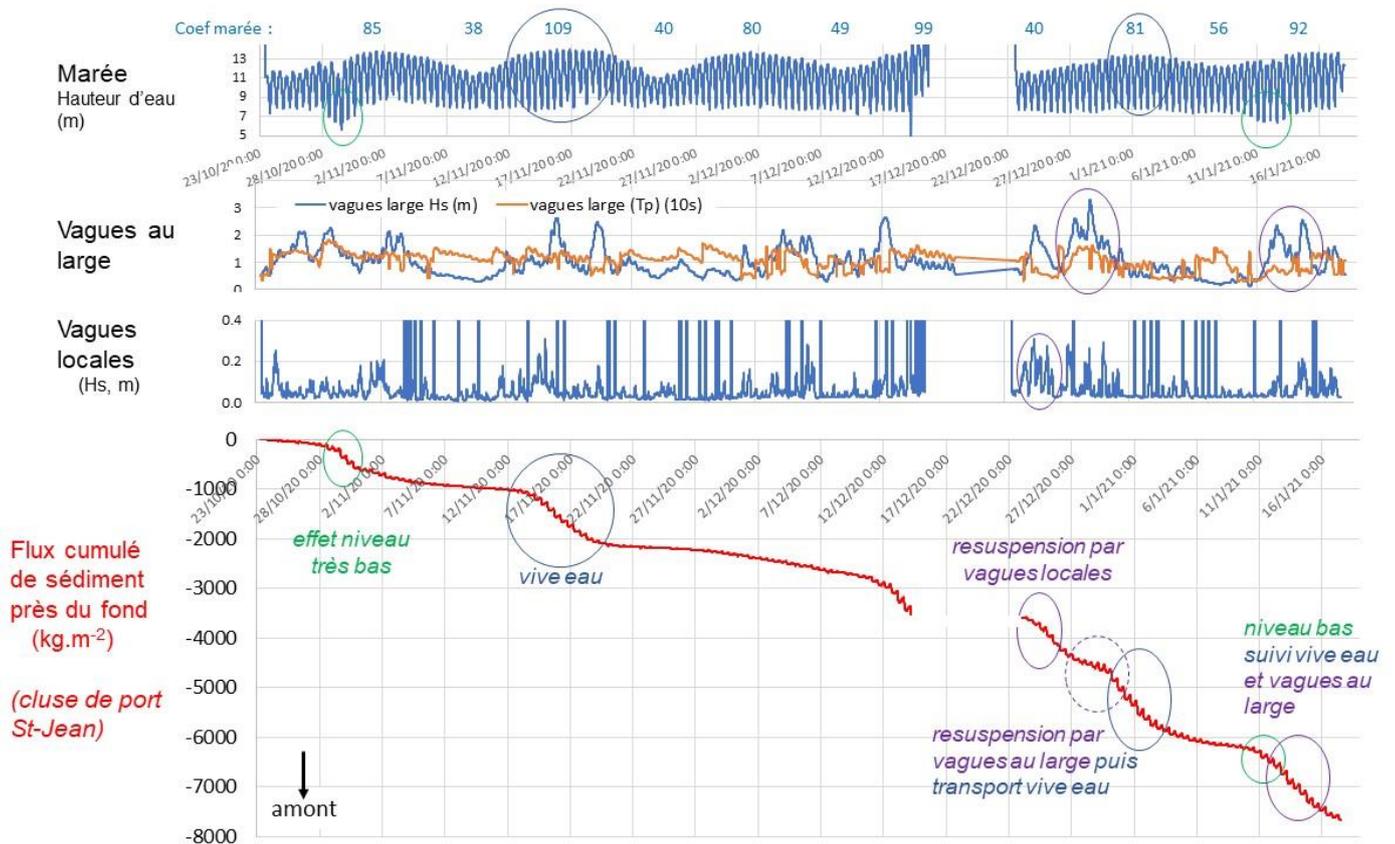


Figure 55 : concentration de vase en suspension simulée par le modèle Mars3D Rance, pour la configuration actuelle et pour une configuration sans barrage marémoteur. En haut concentration moyenne (g/l) en vive eau, en bas concentration max (g/l) en vive eau, pas de vagues.

### 13 - Flux de matières en suspension

La mesure simultanée du courant et des concentrations en MES permet de calculer un flux local. Compte tenu de la circulation de marée unidirectionnelle dans la cluse de Port St-Jean (nord-sud), il est aisé d'en déduire un flux cumulé intégrant les flots et jusants successifs. La figure 56 visualise ce flux cumulé, en relation avec les forçages majeurs que constituent l'amplitude de la marée et la hauteur des vagues, qu'elles soient locales ou qu'elles interviennent au large.



**Figure 56 : cumul du flux de MES calculé en station 1 (cluse de port St-Jean, à proximité du fond), en regard de la hauteur d'eau et de la hauteur des vagues locales et des vagues au large (mesures EPTB et simulation Homère-Ifrémer pour les vagues du large).**

Le premier constat est que si on perçoit des « aller-retours » du flux cumulé en vive eau (oscillations de la courbe rouge), le flux moyen est toujours négatif, c'est-à-dire toujours vers l'amont. On voit d'autre part que le flux « efficace » se produit par épisodes successifs qui sont donc les épisodes significatifs pour la dynamique des sédiments fins. On note successivement :

- le 29 octobre, un flux amont significatif lié à une intervention « niveau bas ».
- autour du 17 novembre, l'effet d'une vive eau, peut-être soutenu par une resuspension initiée en revif (cf fig.51) et par des épisodes de vagues
- vers le 25 décembre, des vagues locales « fortes » qui génèrent de la resuspension et un transport de MES vers l'amont, alors que la marée est une morte eau
- les 30-31 décembre, des vagues du large importantes qui provoquent une resuspension au large et une entrée de sédiment par le barrage (cf. fig.52), suivies d'une vive eau (1<sup>er</sup> janvier) qui favorise le transport de MES vers l'amont

- le 11 janvier, une intervention niveau bas en revif, suivie d'une vive eau accompagnée de vagues au large, qui entraînent un flux de sédiment, toujours vers l'amont.

Ainsi les forçages précédemment repérés comme facteurs de remise en suspension se retrouvent-ils responsables des principaux flux de sédiment près du fond dans la cluse, ces derniers étant largement renforcés en vive eau. En effet les courants de vive eau interviennent doublement dans la dynamique des sédiments fins : d'une part comme agents de remise en suspension (on a vu que ce n'était pas le cas dans la baie de St-Malo, mais que c'était vrai dans le bassin maritime), et d'autre part comme vecteurs des sédiments en suspension.

Les vagues du large sont extraites de la base de données de modèle 1994-2021 HOMERE produite par Ifremer ([http://marc.ifremer.fr/en/produits/rejeu\\_d\\_etats\\_de\\_mer\\_homere](http://marc.ifremer.fr/en/produits/rejeu_d_etats_de_mer_homere)). Une analyse statistique sommaire des vagues extraites de cette base en un point situé 14 km au nord-ouest de St-Malo a montré que le percentile 80 (qui est donc dépassé 20 % du temps) de la hauteur significative liée à la houle (vagues de longue période) était de 1.28 m, alors que le percentile 80 de la mer de vent (vagues courtes) était de 0.93 m. Typiquement, la houle de 1.28 m propagée à la côte se traduit par des vagues de 50 cm à la station de mesure située en aval du barrage, devant la pointe de la Jument. Ainsi les épisodes de vagues qui ont été enregistrés lors de la campagne de mesures EPTB, et responsables des resuspensions et flux ici discutés, sont-ils « normaux » pour une saison hivernale.

Le flux présenté en figure 56 atteint un cumul d'environ 8000 kg.m<sup>-2</sup> en 3 mois d'automne-hiver. On peut être tenté de le multiplier par 3 pour obtenir une estimation annuelle (les apports sont probablement moindres en été). Le calcul de ce flux est « ponctuel », mesuré à une hauteur de l'ordre de 1.1 m au-dessus du fond. Si l'on considère que ce flux est représentatif d'une section d'environ 1000 m<sup>2</sup> (c'est-à-dire la largeur de la cluse d'environ 200 m par une hauteur de l'ordre de 5 m au-dessus du fond), on déduit un flux à travers la cluse de l'ordre de 24.10<sup>6</sup> kg en une année. Considérant enfin que lorsque ces particules fines sédimentent, elles constituent une vase de concentration d'environ 500 kg.m<sup>-3</sup>, nous obtenons un apport sédimentaire annuel de 24.10<sup>6</sup>/500 = 48 000 m<sup>3</sup>, entièrement orienté vers l'amont de la cluse. Naturellement, il ne s'agit que d'une estimation très approximative. Mais cette estimation du flux a une certaine cohérence avec l'estimation de la sédimentation observée entre 2010 et 2018. En effet, la comparaison entre les bathymétries réalisées à ces moments a permis d'affecter un bilan sédimentaire positif de 530 000 m<sup>3</sup> pour les zones 1 et 2 situées en amont de la cluse (figure 35). Avec l'ajout des 65000 m<sup>3</sup> dragués dans le piège du Lyvet en 2014-2015, cela fait un apport moyen annuel de 74000 m<sup>3</sup>. Si l'on considère que 75 % de la masse sédimentée entre l'écluse du Châtelier et la cluse provient de l'aval (la fraction venant de la mer est sans doute plus grande à l'échelle du bassin, mais on peut considérer que dans le secteur amont les apports du bassin versant de la Rance ne sont pas négligeables), on déduit que pour obtenir un dépôt annuel de 75 % de 74000 m<sup>3</sup>, il faut un flux net dans la cluse de 55 500 m<sup>3</sup>, finalement proche de l'estimation ci-dessus de 48 000 m<sup>3</sup>, obtenue à partir des mesures de courant et de MES dans la cluse, donc de façon tout à fait indépendante. On peut sans doute retenir la valeur de 50 000 m<sup>3</sup>/an comme ordre de grandeur du flux net dirigé vers l'amont passant par la cluse, ce qui est élevé.

A l'échelle du bassin, le bilan net de 0.94 Mm<sup>3</sup> sur la période 2010-2018 (cf. section 11) conduit à un apport annuel moyen de 117 500 m<sup>3</sup>. Cet apport est celui du bassin versant, ajouté au flux net transitant par le barrage. On ne connaît pas les apports solides du bassin versant. L'apport liquide annuel de la Rance est de l'ordre de 190 Mm<sup>3</sup> (pour un débit moyen de 6 m<sup>3</sup>/s). On peut supposer que la concentration moyenne de la Rance au Châtelier se situe entre 10 et 50 mg/l. Cela conduit à un apport solide entre 1.9 M kg et 9.5 M kg. Converti en dépôt de vase de concentration égale à 500 kg.m<sup>-3</sup>, cela signifie un apport de vase équivalent compris entre 3800 m<sup>3</sup>/an et 19000 m<sup>3</sup>/an. L'apport par le barrage serait donc entre 117 500 – 3 800 = 113 700 m<sup>3</sup> et 117 500 – 19 000 = 98 500 m<sup>3</sup>. L'ordre de

grandeur que l'on peut retenir pour le flux annuel à travers le barrage est un équivalent de vase égal à 100 000 m<sup>3</sup>/an.

### Réponse d'une vase à des forçages hydro-sédimentaires

Les mesures de MES en quelques stations bien ciblées nous ont permis d'identifier les facteurs responsables des resuspensions et des flux particuliers. Il peut être intéressant de rechercher directement les conséquences de ces « forçages » sur la sédimentation. Des suivis en continu de l'élévation d'une vase permettent d'y accéder. C'est ce qui a motivé la pose d'altimètres ALTUS par EDF dans les années 2019-2021. Ces mesures ont soulevé de multiples difficultés (Parquet, 2021) mais nous avons sélectionné une période de mesure *a priori* valide, qui est représentée sur la figure 57.

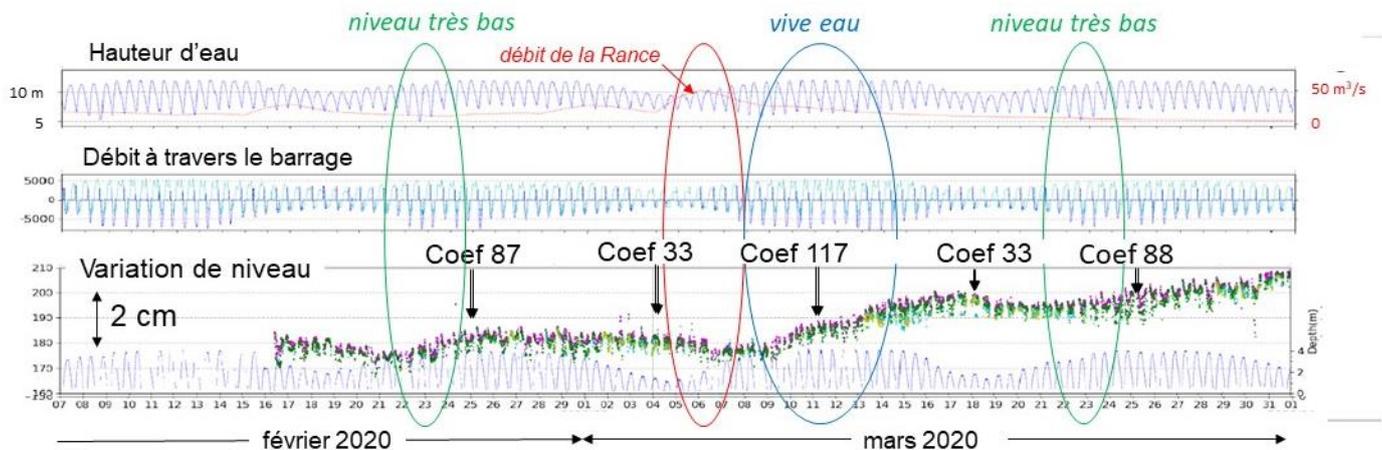


Figure 57 : Mesures EDF de niveau de sédiment sur le banc de la Moinerie (d'après Parquet, 2021)

La figure 57 révèle une réponse rapide du système sédimentaire aux forçages repérés en analysant les resuspensions. Ainsi la sédimentation lors des vives eaux apparaît clairement (de l'ordre de 2 cm autour d'une vive eau exceptionnelle), de même qu'une sédimentation supplémentaire au moment des niveaux très bas, de l'ordre du cm (épisodes entourés en vert sur la figure 57). Enfin on peut relever un affaissement du niveau altimétrique vers le 6 mars, synchrone avec un débit élevé de la Rance (de l'ordre de 50 m<sup>3</sup>/s), sans qu'il soit évident de pouvoir l'identifier à de l'érosion liée au fort débit qui aurait alors un effet de chasse jusqu'à Mordreuc, ou peut-être à du tassement résultant de la morte eau qui précède.

Naturellement, il ne faut pas généraliser ces résultats qui sont spécifiques du banc de la Moinerie, mais cette analyse permet de conclure à un effet quasi immédiat des forçages sur l'évolution sédimentaire, à une incidence des niveaux bas jusqu'en amont du bassin maritime et à la prééminence des vives eaux. On pourrait s'attendre à ce que ces dernières génèrent plutôt de l'érosion du fait des courants forts associés, c'est probablement le cas en certains secteurs pour expliquer les resuspensions, mais ces épisodes conduisent aussi à accentuer la dynamique d'ensemble, et donc la sédimentation en amont résultant d'un transport favorisé par l'asymétrie flot/jusant, elle-même renforcée en vive eau.

## 14 - Apports des modèles hydro-sédimentaires

Dans le cadre du plan de gestion expérimental des sédiments de la Rance, une version hydro-sédimentaire du modèle MARS-3D, déjà utilisé pour le diagnostic hydrodynamique, a été élaborée. Le fonctionnement de ce modèle est rustique, mais reprend les processus essentiels de sédimentation (avec une vitesse de chute tenant compte de la turbulence et de la concentration en MES), d'érosion et de transport en suspension. Une seule classe de sédiment est considérée : les particules fines, car ce sont elles qui génèrent l'envasement, enjeu primordial du plan de gestion. Le phénomène de consolidation n'est pas explicitement pris en compte mais, afin de le restituer pour partie, le dépôt des sédiments est entravé en fonction du niveau de turbulence (formulation de Krone).

### 14.1 Simulation de la dispersion des vases avec sédiment initial, sans vague

Le modèle a été utilisé dans des configurations-tests. Le premier test consiste à simuler la dispersion d'une vase initialement distribuée dans tout le bassin maritime, sur une épaisseur uniforme de 5 cm. Il n'y a pas de sédiment initial en mer en aval du barrage, considérant en première approximation que les courants de marée y sont trop intenses pour que la vase soit présente sur le fond. Le test est effectué dans la configuration actuelle et dans une configuration sans barrage, avec la bathymétrie de 2010. Les conditions de marée et de fonctionnement de l'usine marémotrice sont celles de l'année 2021. Le débit de la Rance est le débit moyen ( $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Les conditions aux limites choisies sont une concentration en MES de  $10 \text{ mg/l}$  d'une part pour les masses d'eau entrant par le large, et d'autre part pour l'eau douce arrivant par l'écluse du Châtelier.

La figure 58 montre l'état du sédiment après 9 mois. Le chenal est lessivé de son sédiment dans tout le bassin aval et de part et d'autre de la cluse, mais le dépôt reste étalé dans le reste du bassin, avec cependant des épaisseurs plus importantes en amont de Mordreuc jusqu'à l'écluse du Châtelier.

Dans une configuration sans barrage, tout le chenal est vidé de son sédiment, et celui-ci se dépose sur les bords du chenal, typiquement sur l'estran inférieur, sauf en amont à proximité de l'écluse où les dépôts sont nettement plus importants. En l'absence du barrage et de l'usine marémotrice, les courants plus intenses remanient plus de sédiment, et celui-ci se dépose en plus grande quantité là où les courants sont plus faibles, en particulier en amont. On remarque aussi de faibles épaisseurs de sédiment déposées en baie de Dinard/St-Malo, en dehors des chenaux.

La comparaison des résultats « avec barrage » avec le différentiel bathymétrique 2018-2010 n'est pas très bonne : les dépôts sont étalés sur l'ensemble des tranches bathymétriques et le dépôt amont n'est pas sensiblement supérieur. De fait cette simulation ne prend en compte que le forçage lié au courant, alors que les observations ont montré que les clapots étaient susceptibles de remettre en suspension les sédiments, et de les redistribuer.

modèle MARS-3D Rance  
Simulation de la dispersion  
des vases

État du sédiment après 9 mois

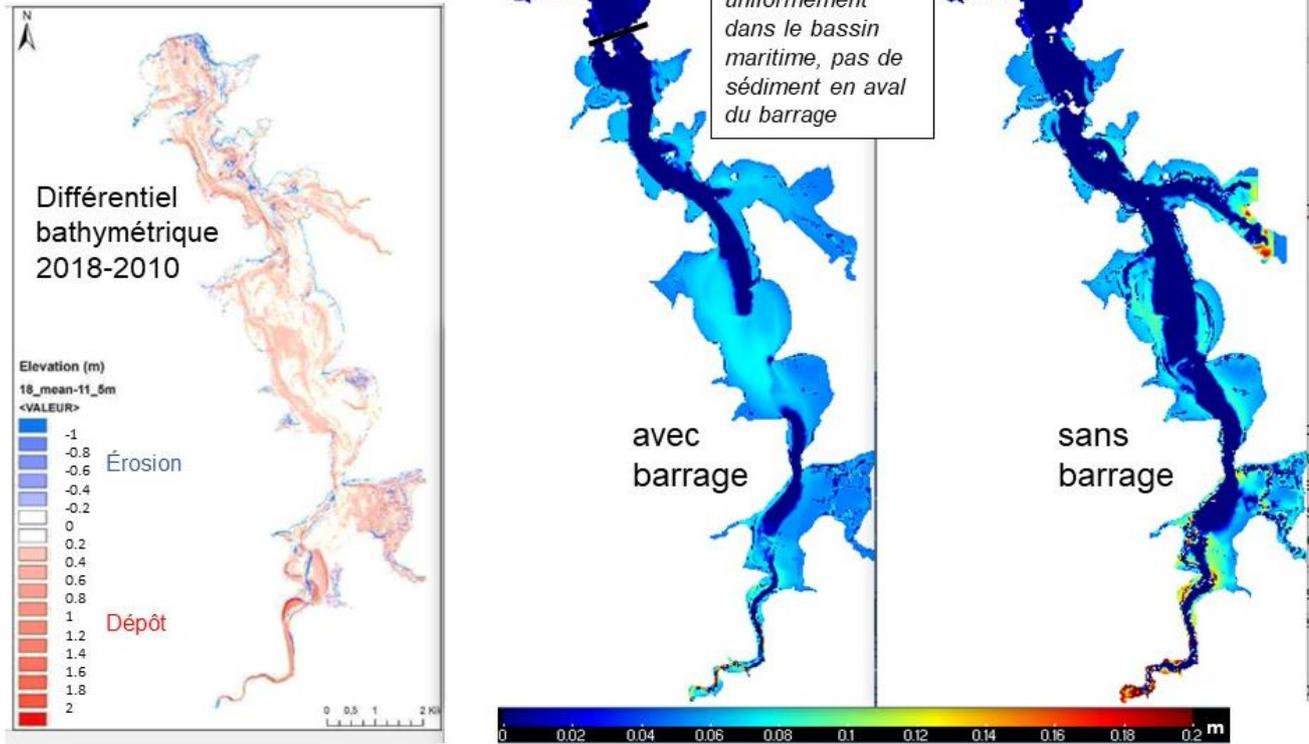


Figure 58 : simulation MARS-3D de la dispersion de 5 cm de vase initialement déposée dans le bassin.

#### 14.2 Simulation de la dispersion des vases avec sédiment initial, avec vagues schématiques

Un autre test a été effectué, en simulant des vagues de façon très schématique : en aval du barrage, des houles d'occurrence assez fréquente, caractérisées par une hauteur significative  $H_s$  comprise entre 1.2 m au large et 35 cm entre Dinard et St-Malo ; dans le bassin maritime, des clapots de hauteur 20 cm s'atténuant à partir de l'amont de Plouër/Rance et s'annulant en amont de Mordreuc/Chêne Vert, très abrité. Ces épisodes sont simulés tous les 10 jours pendant 10 heures. Les mesures de vagues dans le bassin (fig. 51 et 52) montrent que ce scénario est raisonnable.

Les résultats du test avec vagues sont présentés sur la figure 59 (attention au changement d'échelle des épaisseurs de sédiment). La comparaison avec le différentiel bathymétrique 2018-2010, utilisé ici pour visualiser les secteurs en sédimentation, est nettement meilleure. On retrouve en particulier une accumulation plus forte en amont à partir du secteur de Mordreuc, et des dépôts dans les secteurs d'élévation intermédiaire dans tout le centre du bassin.

modèle MARS-3D Rance  
Simulation de la dispersion  
des vases

État du sédiment après 9 mois

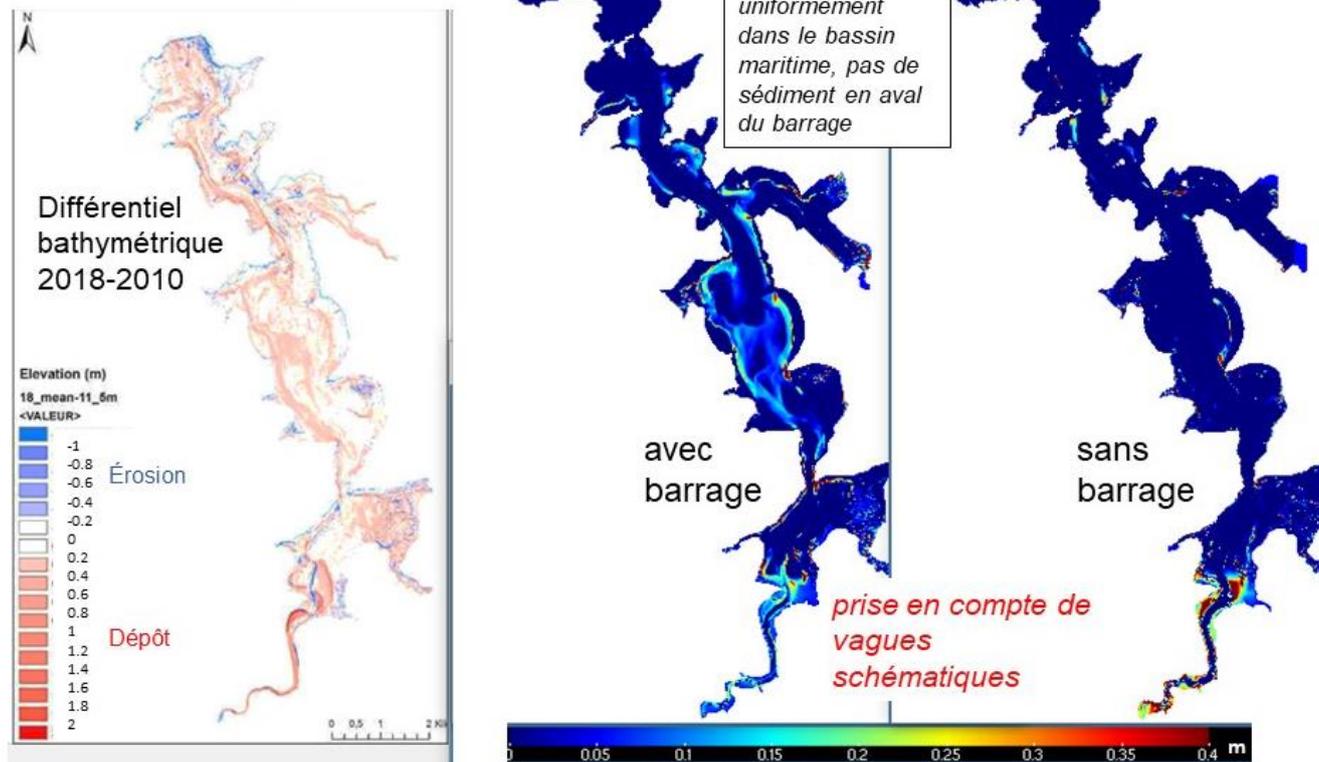


Figure 59 : simulation MARS-3D de la dispersion de 5 cm de vase initialement déposée dans le bassin, avec prise en compte de vagues schématiques.

Le résultat d'une simulation analogue pour la configuration sans barrage marémoteur (et bathymétrie 2010) est frappant : la sédimentation dans le bassin ne se produit que très localement, sauf en amont de Plouër où elle est renforcée. Dans ce scénario, les vagues (mer de vent) sont suffisantes pour remettre en suspension les sédiments qui avaient tendance à se déposer sur les rives et bords du chenal (figure 58) et les courants de marée suffisamment intenses pour retransporter les sédiments ainsi remaniés. Les simulations montrent bien le rôle important des vagues dans la distribution des sédiments, malgré leur faible intensité dans le bassin. Cela signifie la nécessité de les prendre en compte pour une modélisation réaliste des processus hydro-sédimentaires.

### 14.3 Estimation des flux à travers différentes sections du bassin

Il est intéressant de chercher à connaître les flux passant à travers différentes sections du bassin maritime (figures 60 et 61 pour les simulations sans vague et avec vagues, respectivement).

Dans les deux simulations de la configuration actuelle (avec barrage), avec ou sans vague, les flux sont orientés vers l'amont, assez réguliers, et maximaux à St-Suliac. Sans vague, à hauteur de la Ville Ger,

ils sont supérieurs à ceux de la cluse, signifiant une érosion progressive des sédiments entre les deux sections (de même que le flux à St-Suliac supérieur à celui à travers la cluse signifie une sédimentation résiduelle entre les deux). Avec vagues, les flux sont près de trois fois plus élevés. Mais dans ce cas le flux dans la cluse est supérieur à celui de la Ville Ger, ce qui signifie un dépôt résiduel de sédiment entre les deux, lié à la forte érosion qu'a connue le bassin central.

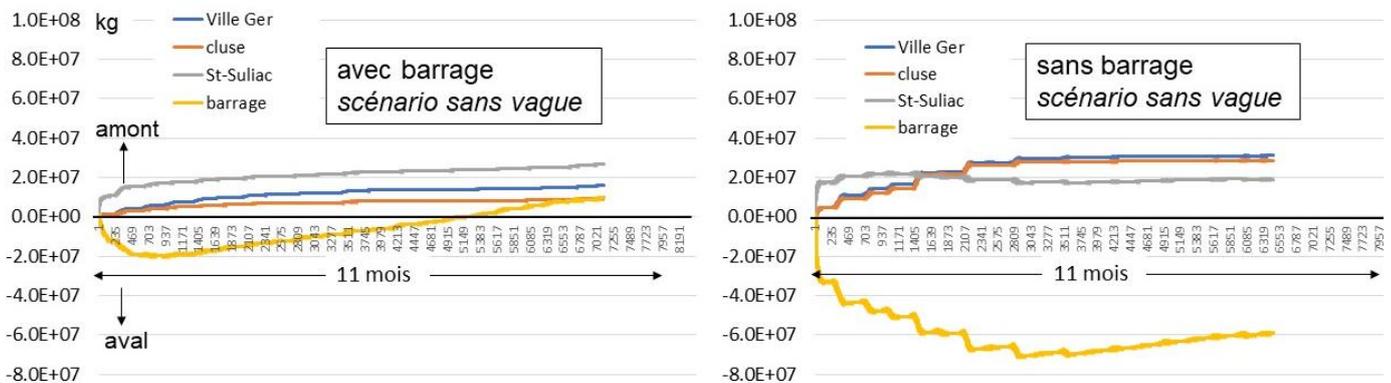


Figure 60 : flux cumulés (kg) de vase en suspension, simulés à travers 4 sections du bassin maritime. Scénario avec sédiment initial de 5 cm dans le bassin, sans vague. Flux positif vers l'amont. La position des sections est indiquée figure 61.

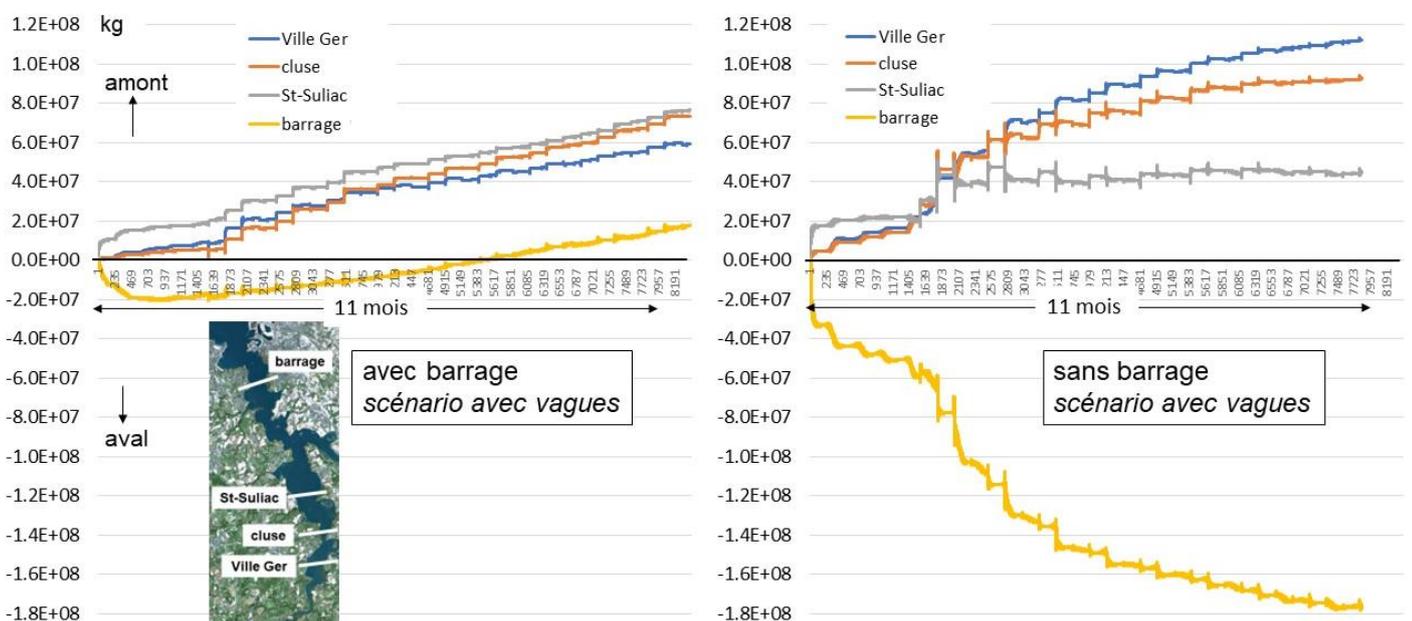


Figure 61 : flux cumulés (kg) de vase en suspension, simulés à travers 4 sections du bassin maritime. Scénario avec sédiment initial de 5 cm dans le bassin et vagues après 2 mois. Flux positif vers l'amont.

Au niveau du barrage, on observe d'abord un export de sédiment vers l'aval, pendant le premier mois, provoqué par la resuspension rapide des sédiments initialement placés dans le chenal où les courants sont forts. Puis, après une période de transition de l'ordre d'un mois, les flux à travers le barrage, très réguliers, sont orientés du large vers le bassin, et l'entrée de sédiment est de l'ordre de 40 000 tonnes

( $4 \cdot 10^7$  kg) en 9.5 mois environ (fig 61). Ramenés à l'année, cela ferait environ 50 000 t, et correspondrait à une entrée équivalente de vase de  $100\,000\text{ m}^3$ , si l'on considère qu'un fond vaseux moyennement consolidé a une concentration de  $500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . C'est justement l'ordre de grandeur du flux annuel qui a été déduit des observations, dans la section 13. La similitude des flux simulés à travers le barrage dans les scénarios avec et sans vague est remarquable. Cela veut dire que les sédiments remis en suspension par les clapots dans le bassin y restent, ou que la part qui en serait expulsée serait équivalente aux apports venant du large, eux-mêmes accentués par l'action des vagues au large. Naturellement, ce résultat est fortement dépendant de la condition initiale du sédiment en mer ouverte, où l'on a supposé qu'il n'y avait pas de vase au départ. Il faut rappeler que dans ces simulations un apport de sédiments fins venant du large est pris en compte (les masses d'eau qui entrent par le large sont supposées avoir une concentration en MES de  $10\text{ mg/l}$ ).

Les simulations *sans barrage* sont très différentes : sans vague, l'export initial de sédiment à travers le barrage est 3 fois et demi supérieur et dure plus de 4 mois, puis laisse place à un apport de vase du large vers l'estuaire, à un rythme de  $10\,000\text{ t}$  en 4.17 mois. Si on pouvait l'extrapoler sur une année, on obtiendrait un apport à l'estuaire de l'ordre de  $28\,000\text{ t}$ , à peu près deux fois moins que dans la configuration avec barrage. Au sein de l'estuaire les flux, toujours orientés vers l'amont, sont plus élevés qu'avec barrage de près d'un facteur 2, sauf à St-Suliac où la situation est intermédiaire. Lorsqu'une action des vagues est prise en compte (fig.61 *droite*), la resuspension suivie du transport par des courants plus intenses sont tels que les flux vers l'amont sont considérablement augmentés dans la cluse et à hauteur de Plouër / La Ville Ger, mais aussi les flux vers l'aval à travers le barrage, où l'on n'observe pas d'entrée de sédiment sur la durée de la simulation. Ces différences de flux entraînent une sédimentation amont accrue en l'absence de barrage, comme on pouvait le voir sur les figures 58 et 59.

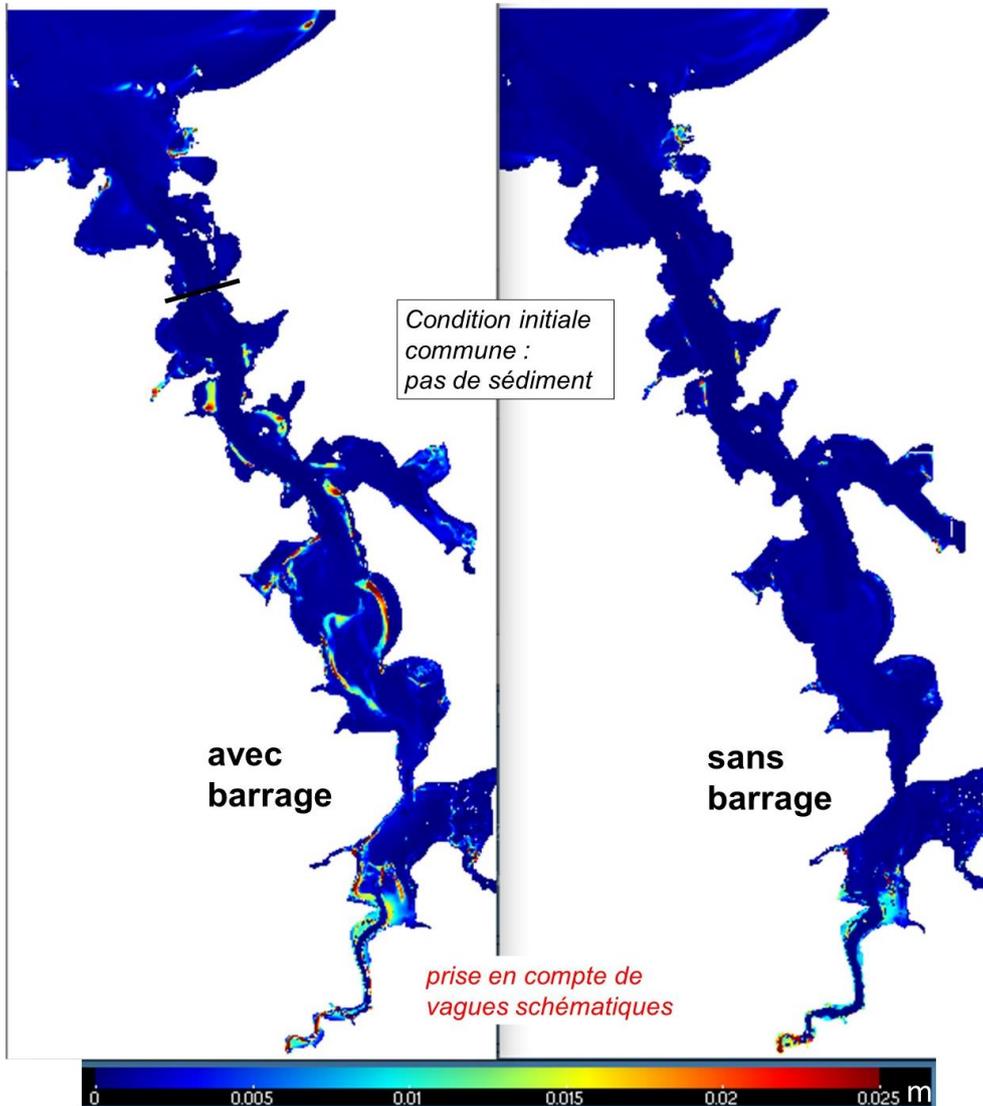
Naturellement ces flux simulés sont très dépendants de la condition initiale sur le sédiment, qui définit le stock de sédiment disponible, et ne restituent pas la réalité des échanges actuels, mais permettent de comprendre le comportement du système, et les conséquences des modifications générées par le barrage. Sans barrage, les courants supérieurs génèrent plus de resuspension, ce qui peut accentuer l'envasement amont *si un stock de vase est disponible*, mais aussi accroître la dispersion vers le large.

#### **14.4 Simulation de la dispersion des vases SANS sédiment initial, avec vagues schématiques**

A titre de test de sensibilité à la condition initiale, une autre configuration a été simulée, sans sédiment initial, mais toujours avec la succession de vagues schématiques qui rend le scénario de forçages plus réaliste. Les apports par le large sont maintenus au même rythme, ainsi qu'un petit apport amont de la Rance résultant d'un débit moyen ( $6\text{ m}^3/\text{s}$ ) et d'une concentration amont de  $10\text{ mg/l}$ . Cet apport amont existait aussi dans les précédentes simulations, mais son impact était négligeable devant celui de la resuspension du sédiment initial. Les résultats de ce test, avec ou sans barrage, sont illustrés par les figures 62 et 63.

Modèle MARS-3D Rance - Simulation de la dispersion des vases

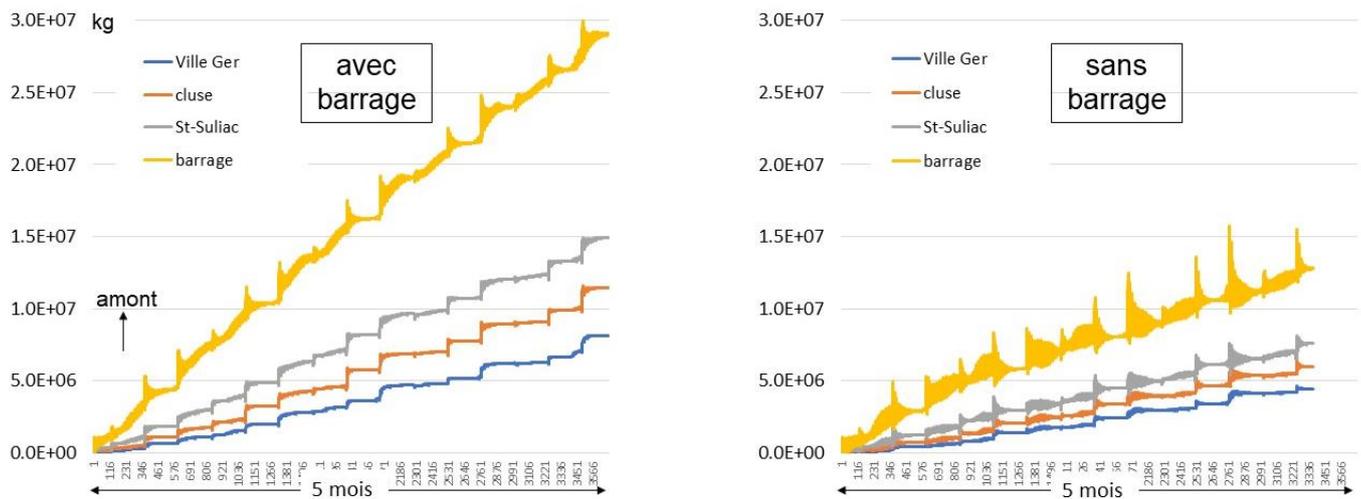
*État du sédiment après 5 mois*



**Figure 62 : simulation MARS-3D de la dispersion des MES venant du large (concentration à la limite de 10 mg/l), avec prise en compte de vagues schématiques.**

On voit qu'après 5 mois les patrons de dépôt dans le bassin maritime sont proches de ceux qu'on avait avec sédiment initial, et que les sédiments apportés par le large viennent surtout se piéger à l'amont de l'estuaire, à partir de Plouër/Rance (Fig.62).

Les flux de vase (Figure 63) sont tous orientés depuis la mer ouverte vers l'amont du bassin. Ils sont presque constants et leur intensité décroît depuis le site du barrage, pour les deux simulations (avec ou sans barrage).

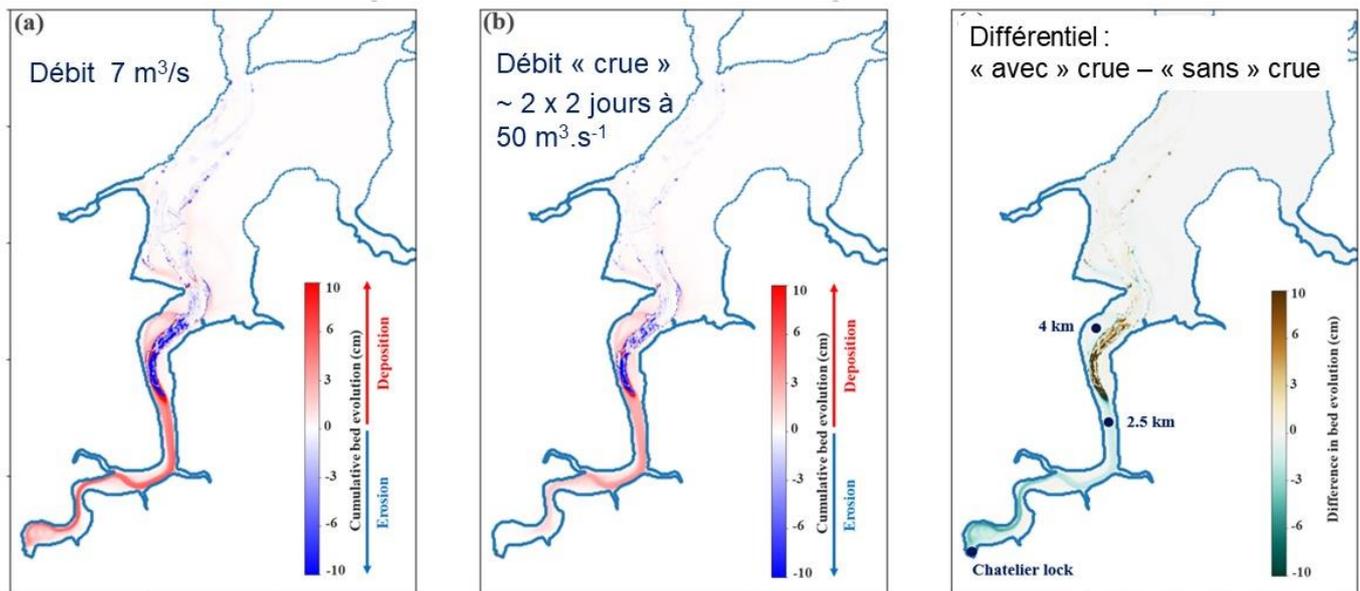


**Figure 63 : flux cumulés (kg) de vase en suspension, simulés à travers 4 sections du bassin maritime. Scénario sans sédiment initial, avec vagues. Flux positif vers l'amont. La position des sections est indiquée figure 61.**

Mais le flux à travers la section du barrage est beaucoup plus faible en l'absence de celui-ci et de l'usine marémotrice : après 140 jours (heure 3360 sur les graphes de la figure 63), il est de 12 800 t dans la simulation sans barrage, contre 26 600 t dans la simulation avec usine marémotrice, ce qui, extrapolé à une année, conduirait à un apport annuel de sédiment par la mer de 33370 t et de 69350 t sans et avec barrage, respectivement. Convertis en volumes de vase déposée à une concentration de  $500 \text{ kg.m}^{-3}$ , les apports simulés sont donc de  $66\,700 \text{ m}^3$  sans barrage, et  $138\,700 \text{ m}^3$  avec le barrage, les premiers représentant 48 % des apports simulés dans le second cas (en présence du barrage et de l'usine marémotrice). Ces flux sont naturellement dépendants de la condition imposée à la limite du large, qui reste approximative, mais conduisent pour la configuration actuelle (avec barrage) à un apport annuel du même ordre de grandeur que celui déduit des observations ( $100\,000 \text{ m}^3/\text{an}$ ). La différence entre les flux à l'embouchure de l'estuaire (au niveau du barrage) simulés avec ou sans barrage, et sans influence du stock de sédiments fins disponible dans l'estuaire, fournit une indication de la responsabilité du barrage et de l'usine marémotrice dans le flux entrant qui serait de 52 %. On peut noter que les flux des sections amont se retrouvent à peu près dans les mêmes proportions, de telle sorte que l'on peut attribuer la même responsabilité du barrage concernant la sédimentation constatée en amont.

#### 14.5 Effet d'une crue

Le modèle Telemac 3D d'EDF a été exploité pour simuler l'effet potentiel de chasse provoquée par une petite crue simulée comme deux épisodes de 2 jours à 2 jours d'intervalle, au cours desquels le débit amont de la Rance était d'environ  $40\text{-}50 \text{ m}^3/\text{s}$ . L'impact sur le sédiment après un cycle vive eau / morte eau est présenté sur la figure 64.



**Figure 64 : Simulation de l'effet d'une crue sur le sédiment amont, à l'aide du modèle hydro-sédimentaire d'EDF. D'après Rtimi, 2022.**

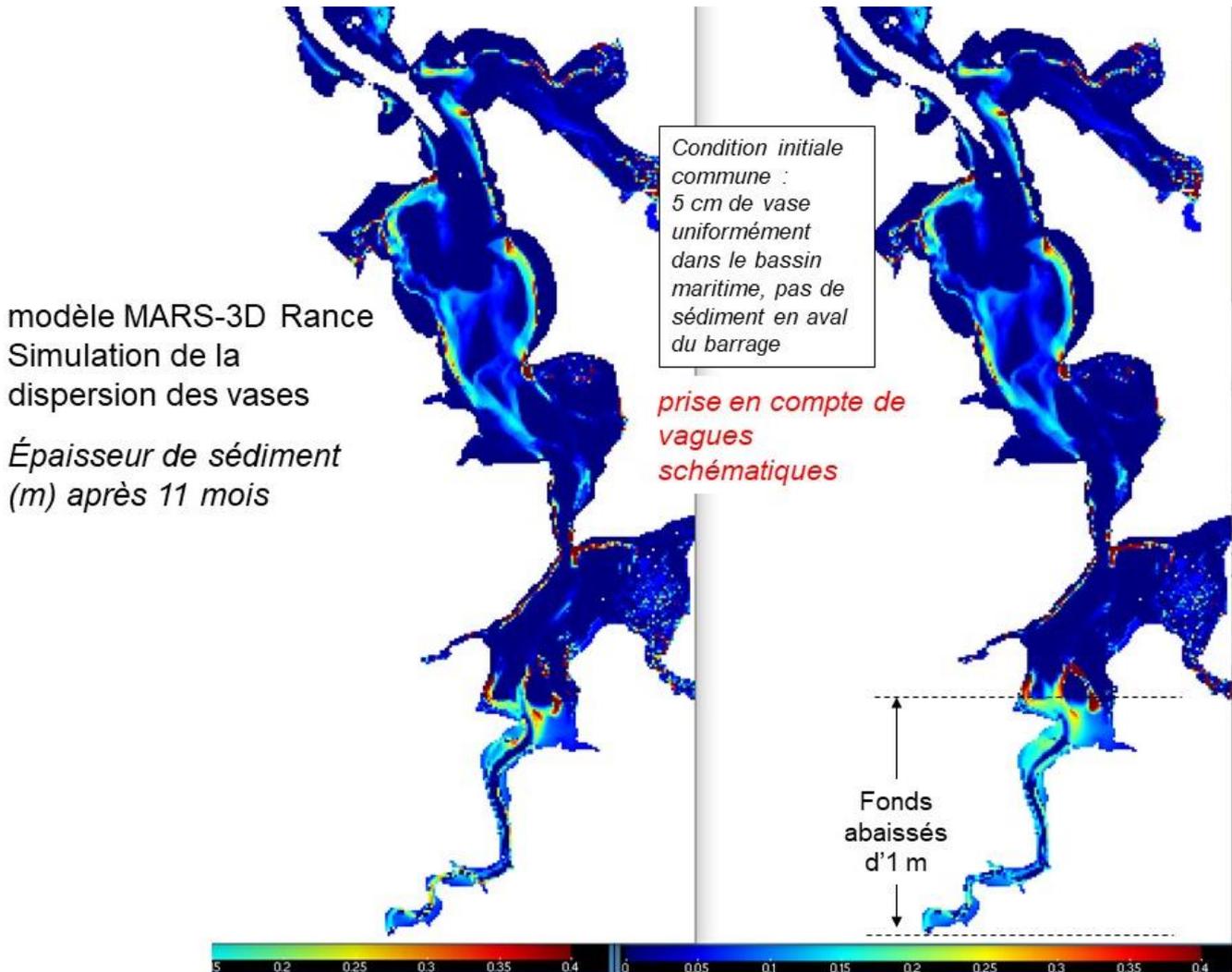
Il apparaît une différence assez sensible entre la simulation à débit constant moyen ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et la simulation de crue : celle-ci a pour effet de réduire la sédimentation amont, mais aussi de réduire l'érosion dans le chenal à hauteur de Mordreuc, ou d'y générer un dépôt relatif. On retient que l'impact d'une crue courante se fait sentir sur tout le bief amont jusqu'à Mordreuc, et qu'un effet de chasse peut être retenu à des fins de gestion sédimentaire, en fonction de ce qui est envisagé dans le secteur de Mordreuc ou plus en amont.

#### **14.6 Effet d'un abaissement du niveau du sédiment en amont, suite à une extraction massive**

Une extraction significative de sédiment pourrait être envisagée dans le bassin, pour réduire la sédimentation constatée, par exemple en amont. Une telle opération de dragage entraînerait une variation bathymétrique importante, modifiant le prisme tidal dans le bassin sud et les courants de marée responsables de la dynamique sédimentaire. De tels changements sont susceptibles de modifier les conditions de sédimentation dans tout le secteur amont de la cluse.

Pour tester l'effet d'une extraction massive de sédiment en amont du bassin, une simulation analogue à la dispersion de 5 cm de vase initialement distribuée de façon uniforme dans le bassin, présentée en section 14.2, a été refaite (à l'aide du modèle hydro-sédimentaire MARS-3D et dans les mêmes conditions), mais avec une bathymétrie modifiée en amont. Schématiquement, le niveau de sédiment a été abaissé d'1 m uniformément au sud de Plumazon (jusqu'au Chatelier ; figure 65) et d'une épaisseur diminuant vers le nord jusqu'à 0 m au niveau de Plouër. L'extraction ainsi reconstituée représente un volume de  $1.83 \text{ M m}^3$ , ce qui reste dans l'ordre de grandeur de la sédimentation observée depuis une dizaine d'années ( $530\,000 \text{ m}^3$  en 8 ans environ de la cluse de Port St-Jean à l'écluse du Châtelier, cf. section 11.2), extrapolée sur une trentaine d'années. Cette quantité est volontairement élevée pour que l'impact éventuel sur le taux de sédimentation ultérieur puisse être visible.

Partant d'une distribution de sédiment uniformément égale à 5 cm dans le bassin, la distribution obtenue après 11 mois est représentée sur la figure 50, à côté de celle obtenue avec la bathymétrie 2018 (sans extraction massive dans tout le bief amont).



**Figure 65 : simulation MARS-3D de la dispersion de 5 cm de vase initialement déposée dans le bassin, avec prise en compte de vagues schématiques. A gauche : bathy 2018, à droite : avec abaissement des fonds d'1 m au sud de Plouër.**

Les résultats sont proches, mais le nouveau calcul semble montrer une sédimentation accrue, depuis la plaine de Mordreuc. Ceci est confirmé par les flux passant à travers différentes sections du bassin (figure 66). Qu'il s'agisse d'une simulation avec vagues (à droite sur la fig.66) ou sans (à gauche), les flux à travers le barrage sont quasi identiques dans les deux cas (avec ou sans abaissement des fonds), restent très proches à St-Suliac (les flux sont légèrement supérieurs avec abaissement des fonds), mais à la cluse, et surtout à La Ville Ger, les flux vers l'amont sont clairement supérieurs (d'environ 30 %) dans le cas où on a procédé à une extraction massive de sédiment en amont de Plouër. Cela résulte d'une augmentation du prisme tidal en amont, et donc des courants. Le résultat dépend de la quantité de sédiment disponible, mal connue, et doit donc être considéré comme qualitatif. Néanmoins, il apparaît que l'extraction massive de sédiment entraînerait une tendance à la sédimentation ultérieure accrue, ce qui n'est pas recherché.

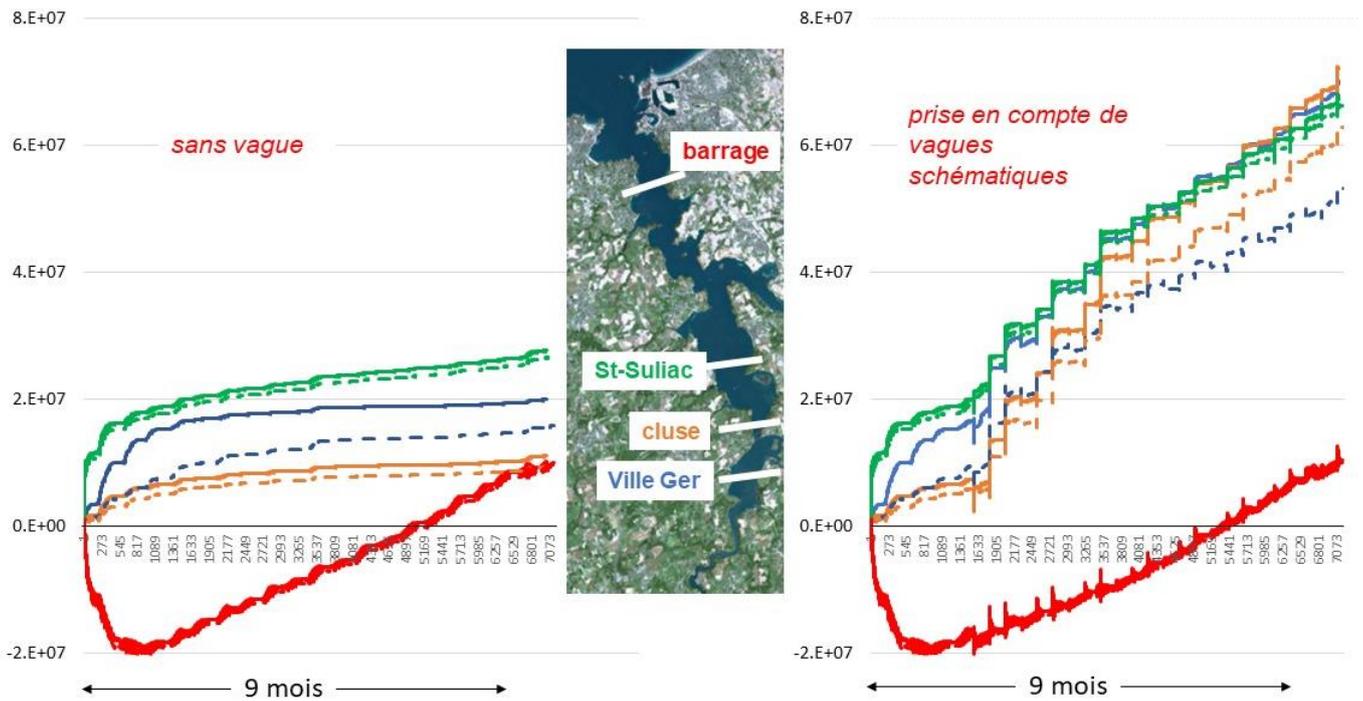
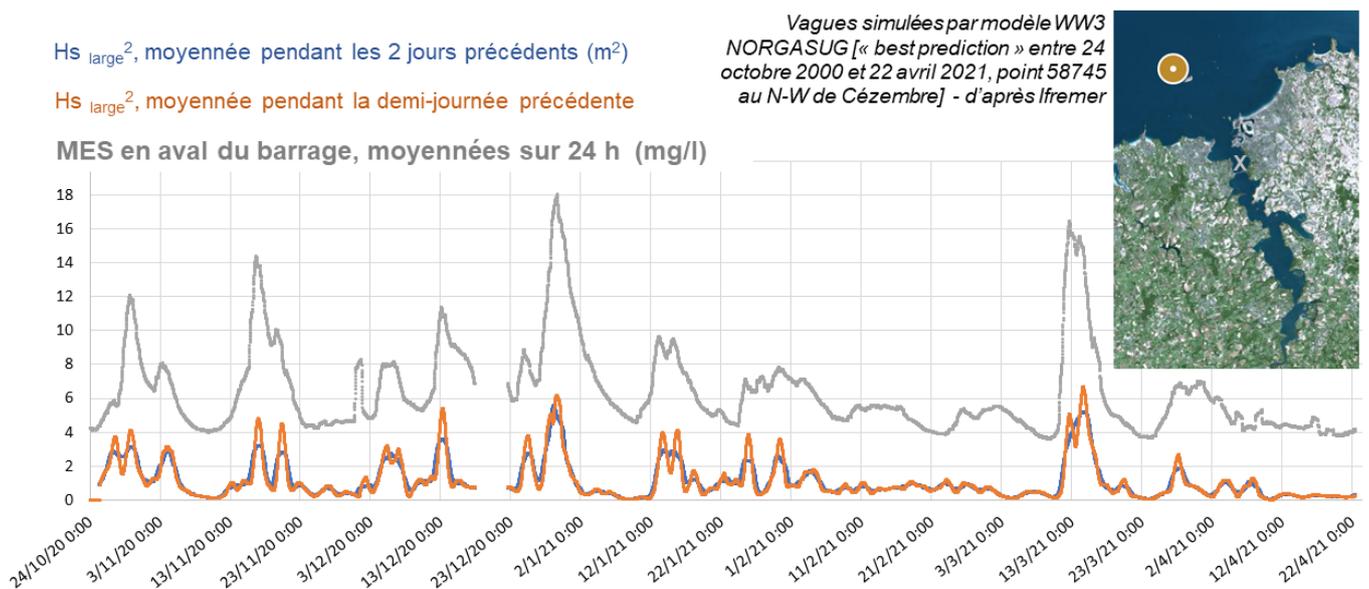


Figure 66 : flux cumulés (kg) de vase en suspension, simulés à travers 4 sections du bassin maritime. Scénario avec sédiment initial de 5 cm dans le bassin, bathymétrie 2018 avec abaissement d'1 m des fonds en amont, *sans vague* (à gauche) et *avec vagues après 2 mois* (à droite). Flux positif vers l'amont. En tiretés : rappel des résultats sans abaissement des fonds (Figs. 60 et 61).

## 15- Eléments complémentaires concernant le levier d'action N°1 : réduction des apports de sédiments venant de la mer

### 15.1 Lien entre turbidité en amont du barrage et hauteur des vagues au large

L'analyse des mesures de turbidité réalisées par l'EPTB et l'exploitation du modèle hydro-sédimentaire MARS ont d'une part confirmé la domination des apports de sédiments à l'estuaire en provenance de la mer, et d'autre part montré que cet apport avait lieu préférentiellement lors des tempêtes (Figures 48, 49, 52 et 56). Une corrélation entre les vagues au large<sup>19</sup> (estimées d'après une simulation opérationnelle et validée des vagues en Manche produite par Ifremer) et la mesure de MES réalisée par l'EPTB pendant l'automne-hiver 2020/2021 a été tentée (figure 67). Compte tenu du temps de réponse de la zone côtière au forçage des vagues, celles-ci ont été moyennées sur 24 h, tout comme les MES (filtrage de la marée) qui ont aussi été décalées d'un certain laps de temps. Des tentatives de corrélation ont été réalisées sur les vitesses orbitales des vagues près du fond, directement responsables des resuspensions, et restituant *a priori* mieux l'importance de la période des vagues et de leur direction, mais la relation n'était pas meilleure, tandis que l'information hauteur de vagues reste plus directement accessible...



**Figure 67 : corrélation entre Matière en Suspension (MES) mesurées en aval du barrage (source EPTB-Rance) et vagues au large (N. Chini, com. pers.)**

La figure 67 montre bien la très forte dépendance des suspensions à l'entrée du bassin de la Rance aux vagues au large, justifiant ainsi le principe du levier N°1, à savoir réduire ou même annuler les entrées de sédiment lors des épisodes de tempête.

Pour instruire la question de l'efficacité d'un tel levier, en rapport avec son coût (perte de production de l'UMR du fait des fermetures temporaires), deux analyses ont été menées, l'une cherchant à quantifier la réduction du flux net de sédiments fins à travers le barrage, l'autre intégrant une modélisation plus complète.

<sup>19</sup> C'est le carré de la hauteur des vagues qui est pris en compte, puisque les contraintes sur le fond, à l'origine des remaniements de sédiments fins, lui sont proportionnelles.

## 15.2 Effet d'un arrêt temporaire de l'usine marémotrice pendant une tempête sur le flux net de sédiment passant par le barrage, estimé à partir des mesures disponibles

On dispose d'une mesure de concentration de suspensions entrant par le barrage (vannes ou groupes) qui montre que cette dernière est très épisodique, liée à l'intensité des vagues au large. Pour en déduire un flux net de sédiments fins à travers le barrage, c'est-à-dire le flux résiduel après une marée (entrée en flot, sortie en jusant), il faut d'une part savoir si la concentration mesurée en aval pendant le jusant est représentative de la concentration sortant du barrage (donc en amont immédiat) et d'autre part connaître la variation des débits d'eau à travers le barrage, et enfin faire l'hypothèse d'une relative homogénéité des concentrations dans la section d'écoulement, en particulier sur la verticale. Cette dernière hypothèse n'est pas vérifiée lors des étales de courant, mais est d'autant plus satisfaite que les courants sont intenses, donc lorsque la contribution au flux est la plus importante. Par ailleurs, les débits d'eau à travers le barrage sont bien déterminés par la modélisation, lorsque celle-ci est validée en termes de variations de niveau dans le bassin (cas d'un modèle 0D comme AGRA ou d'un modèle 2D ou 3D comme MARS-3D ou Telemac).

Concernant l'écart potentiel des concentrations amont et aval du barrage, faute de mesure en amont du barrage<sup>20</sup> nous nous sommes appuyés sur le modèle MARS qui a fait l'objet d'une validation partielle (Chapitre 14). Auparavant, il était nécessaire de vérifier que le modèle simulait une concentration en MES comparable à la mesure en aval du barrage. Pour y parvenir, les remaniements sédimentaires dans la zone côtière incluse dans l'emprise du modèle (dont les fonds sont très grossiers compte-tenu des courants de marée intenses) ne pouvaient suffire à restituer les variations observées, qui résultent de remaniements sédimentaires bien plus au large. Un ajustement de la condition entrante supposée uniforme de long de la limite du modèle a donc été effectué et la relation suivante a été retenue :

$$\text{MES entrante (mg/l)} = 2 + 5 \times H_{\text{large}}^2$$

Où  $H_{\text{large}}$  (en m) est la hauteur significative des vagues au large de Cézembre, comme indiqué figure 67. Cette condition a permis de simuler le niveau de turbidité observé en aval du barrage, ainsi que sa variabilité, en particulier l'effet de la tempête survenue du 12 au 14 mars 2021 (Figure 68).

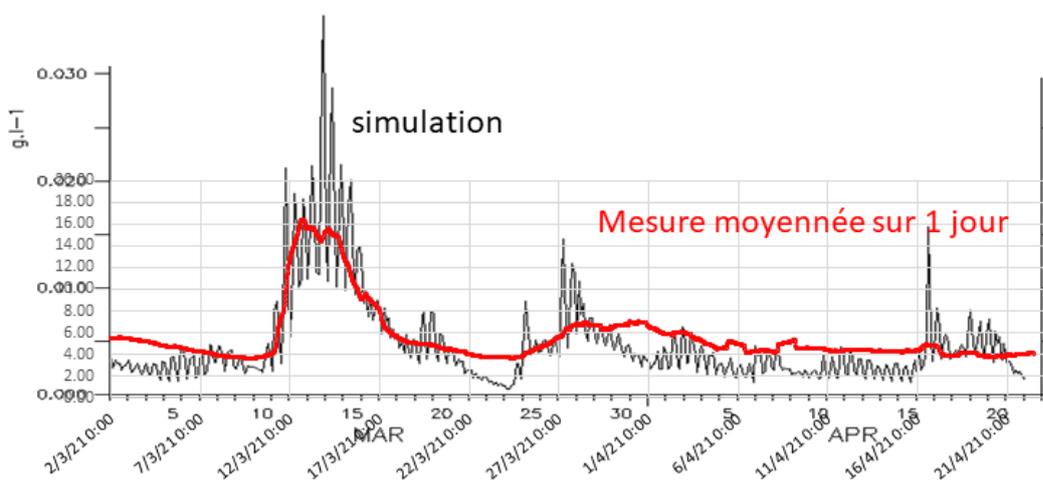
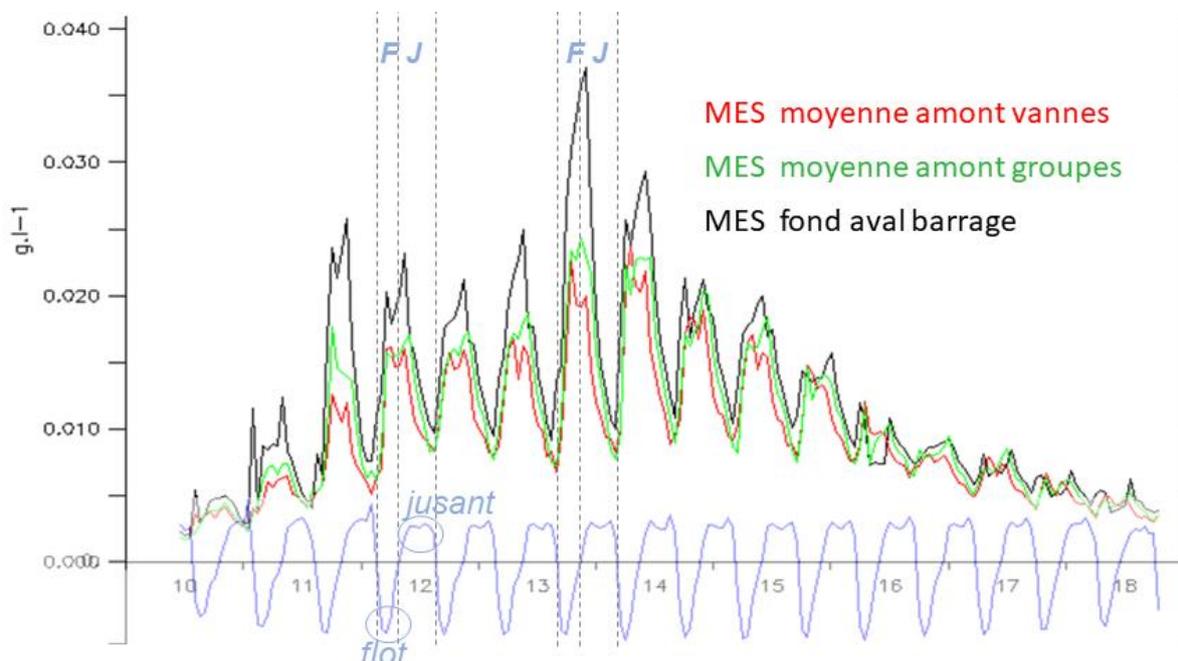


Figure 68 : comparaison entre MES mesurée à la station aval barrage et simulée au même endroit, près du fond (localisation figure 48 ou 67).

<sup>20</sup> Pendant l'hiver 2023, une mesure simultanée de concentration de MES en amont et en aval du barrage a été réalisée dans le cadre du suivi du rejet de dragage de l'opération Chêne Vert. Nous disposerons donc bientôt de cette information manquante sous forme d'observation *in situ*.

La fluctuation de marée apparaît distinctement sur la simulation. A noter que cette simulation a bénéficié d'une prise en compte de vagues réalistes telle que décrite dans la section §15.3.

Avec la modélisation ainsi validée, il devient possible d'examiner les gradients de concentration aval/amont du barrage, en flot comme en jusant. La figure 69 superpose la concentration près du fond au point de mesure « aval barrage » (en noir) et en moyenne sur la portion de section du bassin maritime immédiatement en amont des vannes (en rouge) ou des groupes (en vert).



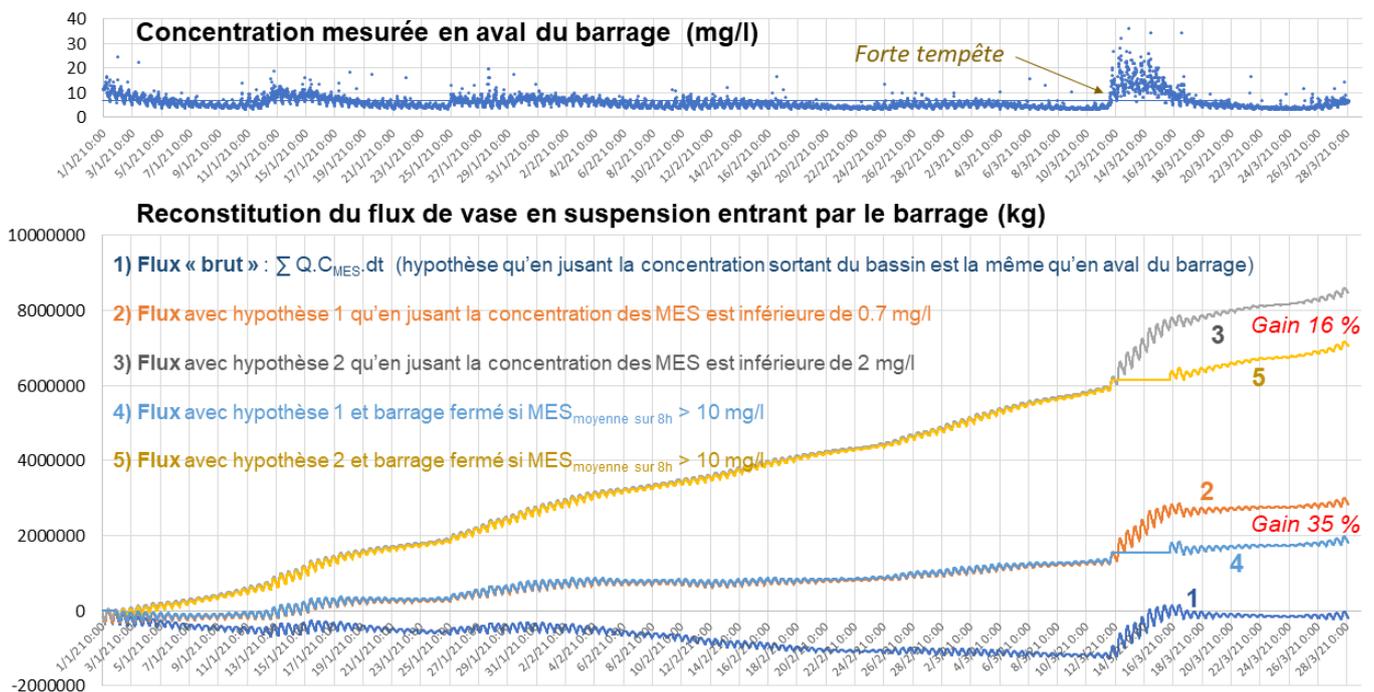
**Figure 69 : simulation numérique des MES en aval et en amont du barrage marémoteur, pendant la tempête de mi-mars 2021 (modèle MARS-3D de la Rance).** La courbe bleue représente les débits à travers le barrage (>0 en jusant, <0 en flot)

La simulation indique que les MES sont analogues en amont et en aval du barrage, suivant à peu près les mêmes fluctuations, en lien avec les tempêtes (en particulier celle du 12 au 15 mars). Plus précisément, on relève que pendant le jusant les MES sont plus proches des valeurs en aval barrage au droit des groupes-bulbes (justement là où transite l'essentiel du débit de vidange du bassin) qu'au droit des vannes, mais presque toujours inférieures, avec un écart de l'ordre de 1 à 3 mg/l (exceptionnellement 5 voire 10 mg/l lors des maxima en aval).

Ces résultats nous permettent de faire des hypothèses raisonnables sur les concentrations sortant du bassin de la Rance en jusant, et finalement de calculer des flux instantanés de MES à travers le barrage en prenant à chaque instant le débit d'eau total à travers le barrage (issu de la modélisation validée en niveau à St-Suliac) et en le multipliant soit par la concentration mesurée à l'aval du barrage en condition de flot (flux entrant dans le bassin), soit par une concentration amont « supposée » en condition de jusant. Cette concentration « supposée » a été prise égale à la concentration aval barrage, ou bien à celle-ci réduite d'une valeur constante de l'ordre de grandeur de l'écart constaté en jusant sur la figure 69.

Les résultats d'un tel calcul de flux net à travers le barrage, cumulé sur la période du 1<sup>er</sup> janvier au 28 mars 2021, et intégrant en particulier la tempête de mi-mars 2021, sont présentés sur la figure 70, où la concentration mesurée en aval du barrage est également rappelée. 3 calculs sont considérés, selon l'écart supposé entre concentration mesurée en aval et concentration sortant du bassin pendant le jusant. Dans le cas où l'on suppose que la concentration en amont est la même que celle observée

(près du fond) en aval, le calcul conduit à un flux résiduel faible (flux 1, fig. 70) mais sortant, sauf pendant l'épisode de tempête et en particulier celle de mi-mars. Si l'on suppose que la concentration amont en jusant est plus faible que la concentration aval de seulement 0.7 mg/l, le flux net est inversé, et cette fois-ci entrant (dans le bassin), avec une intensité accrue pendant les tempêtes (flux 2, fig. 70). Enfin, avec l'hypothèse d'une concentration amont inférieure à la concentration de fond en aval de 2 mg/l (également compatible avec les résultats de la modélisation, figure 69), le flux net entrant dans l'estuaire est considérablement augmenté (flux 3, fig. 70). Au bout de 3 mois d'hiver, il serait de 8 millions de kg, soit l'équivalent de 16 000 m<sup>3</sup> de vase à une concentration moyenne de 500 kg.m<sup>-3</sup>. Ramené à l'année, cela ferait 64 000 m<sup>3</sup>, ce qui est dans l'ordre de grandeur du flux annuel estimé entrant dans le bassin depuis la mer. Pour cette raison, ce troisième calcul très approximatif paraît le plus réaliste.



**Figure 70 : estimation du flux net de MES à travers le barrage marémoteur, cumulé pendant 3 mois.**

A partir de ces estimations de flux sédimentaires issus des mesures de 2021, des simulations de modification de flux induits par une fermeture du barrage pendant des marées de tempête (entre niveaux hauts successifs dans le bassin) ont été réalisées. Le critère retenu pour arrêter l'usine est le dépassement d'une concentration en MES à l'aval de 10 mg/l en moyenne pendant 8h, ce qui conduit à une fermeture pendant 9 marées consécutives (du 12 au 17 mars 2021) sur un total de 166 marées pour les 3 mois considérés. Comme cet épisode se produit plutôt en vive eau, une telle fermeture entraîne une perte de production électrique de l'ordre de 9 GWh. La réduction de flux de sédiments fins entrant dans le bassin serait équivalente à près de 3000 m<sup>3</sup> de vase (16 % de l'apport total), avec l'hypothèse d'une concentration amont inférieure de 2 mg/l à celle de l'aval. Mais un examen attentif de la figure 69 indique que cette hypothèse est peut-être (très) en dessous de la réalité pendant la tempête.

Il faut retenir de cet exercice la grande incertitude liée à l'hypothèse prise pour la concentration en MES immédiatement en amont de l'estuaire, hypothèse à laquelle le flux net est très sensible. D'où

l'intérêt de disposer dans un proche avenir d'une mesure simultanée de MES aval/amont du barrage, pour affiner l'estimation du flux.

### **15.3 Effet d'un arrêt temporaire de l'usine marémotrice pendant une tempête sur le flux net de sédiment passant par le barrage estimé par modélisation numérique**

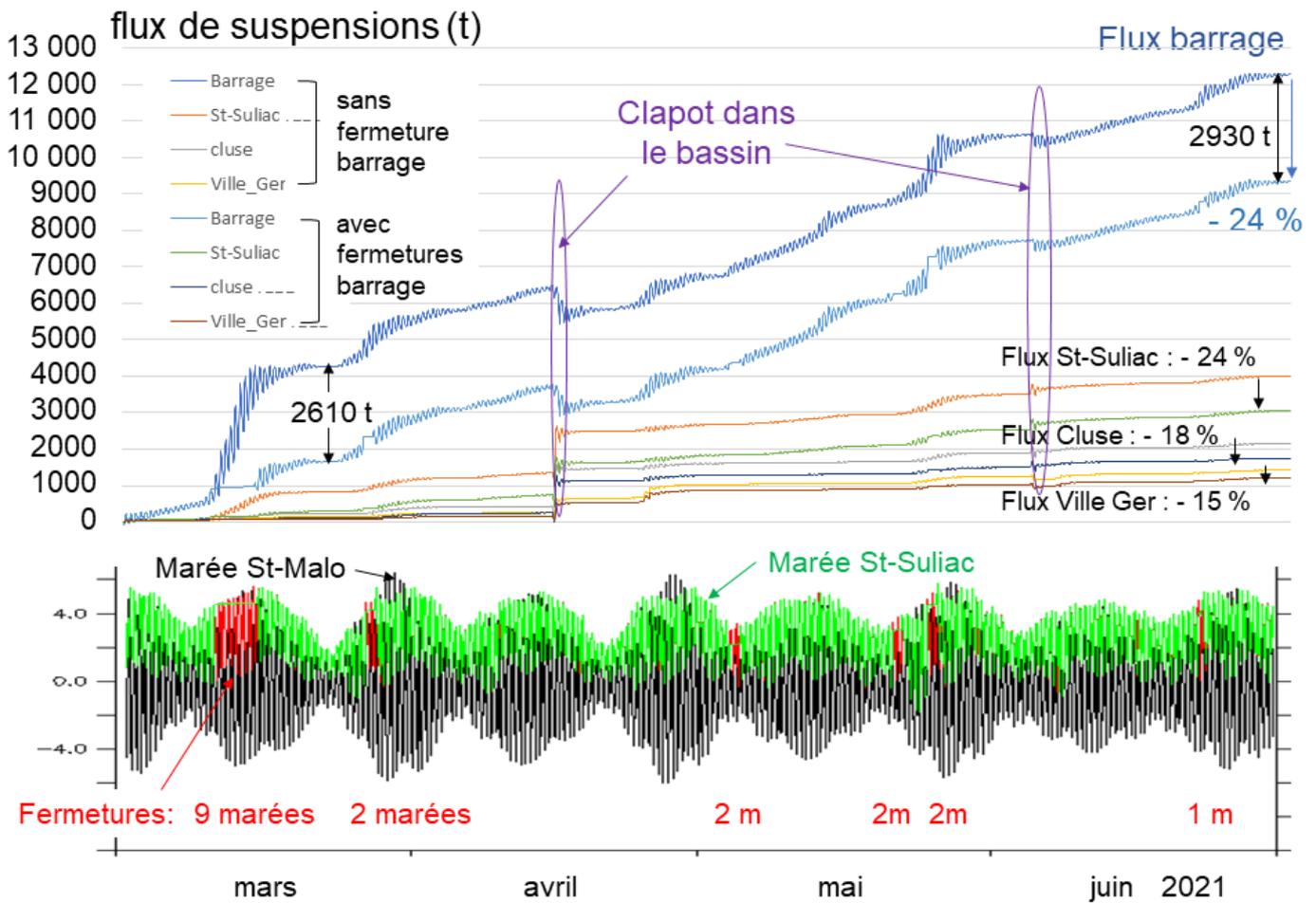
Une autre approche repose exclusivement sur la modélisation telle que présentée dans le chapitre 14. Les conditions de simulation reprennent la condition en MES à la limite [ $MES_{entrante} (mg/l) = 2 + 5 \times H_{s_{large}}^2$ ], telle que décrite dans la section précédente : elle a été ajustée pour retrouver une MES en aval du barrage très proche des mesures effectuées en 2021. Pour plus de clarté dans l'expression des flux et éviter la nécessité d'une période de spin up, il n'y a pas de sédiment initial. Les nouvelles modélisations mises en œuvre bénéficient d'une amélioration du modèle réalisée par la société ACRI-in dans le cadre de l'étude de dispersion du rejet de dragages menée pour l'opération « Chêne Vert » de 2023<sup>21</sup>. Les épisodes de vagues schématiques sont remplacés par un forçage de vagues réalistes issues d'une modélisation spécifique : il s'agit des données archivées du système de prévision opérationnel MARC, anciennement Prévimer (<https://marc.ifremer.fr/resultats/vagues>) calculées à l'aide du code WaveWatch 3. Ces informations sont interpolées sur la grille de calcul du modèle Rance.

Deux simulations se sont déroulées du 1<sup>er</sup> janvier au 30 septembre 2021. Pour l'une, le fonctionnement normal de l'UMR (tel que prévu par EDF fin 2020) a été respecté, tandis que pour la seconde, le barrage a été fermé (et l'usine arrêtée) au cours des marées (toujours entre 2 niveaux hauts dans le bassin) pour lesquelles la hauteur significative des vagues au large dépassait 1.60 m<sup>22</sup>, pendant les mois de mars, avril, mai et juin (la période de janvier et février a été conservée identique). Seulement deux épisodes de clapot schématique (cf. chapitre 14) dans le bassin ont été considérés (mi-avril et début juin ; durée de 10 h), afin de simplifier la lecture des résultats.

Les flux à travers le barrage et en 3 sections du bassin (>0 vers l'amont), cumulés pendant 4 mois, sont représentés sur la figure 71. La simulation de base (sans fermeture du barrage) fait apparaître un flux entrant depuis la mer de 12300 t en 4 mois, ce qui équivaut à environ 74 000 m<sup>3</sup> en extrapolant à l'année : c'est du même ordre de grandeur mais sensiblement moins que dans la simulation présentée en section §14.4, car ici la condition limite au large a été ajustée de façon à reconstituer une concentration en MES plus réaliste à l'aval du barrage. Environ l'équivalent d'un tiers de ce flux résiduel arrivant de la mer par le barrage transite vers l'amont de St-Suliac, et un quart remonte en amont de la cluse : en proportion c'est moins que ce qui apparaissait dans la simulation du §14.4 (respectivement 53 % et 42 %), parce que le nombre d'épisodes de clapot est très inférieur. En effet, ceux-ci ont pour effet de redistribuer les sédiments dans le bassin, en augmentant les flux vers l'amont au centre et au sud du bassin, mais aussi vers la mer au nord du bassin ce qui se voit clairement sur l'épisode de mi-avril (Figure 71) : le flux vers l'amont au barrage est sensiblement réduit sous l'effet du clapot, tandis que simultanément les flux à St-Suliac, dans la cluse et à la Ville Ger sont tous accentués vers l'amont. On note enfin que les flux sont renforcés en vive eau, mais surtout pendant les périodes de tempêtes au large qui apparaissent en rouge sur les courbes de marée (correspondant aux périodes de fermeture pour la 2<sup>ème</sup> simulation).

<sup>21</sup> Voir ACRI-in, 2022. Modélisation numérique du programme de gestion des sédiments du Chêne Vert et de la Moinerie : modélisation hydro-sédimentaire long terme. Rapport d'étude A1893-1601-L3 de décembre 2022 pour l'EPTB Rance-Frémur-baie de Beaussais, 49p.

<sup>22</sup> Soit un  $H_{s_{large}}^2$  de 2.56 m<sup>2</sup>, ce qui d'après la figure 67 correspond à peu près à un seuil de MES aval barrage de l'ordre de 10 mg/l



**Figure 71 : modélisation du flux net de sédiments fins (orienté vers l'amont) avec ou sans arrêt de l'usine marémotrice et fermeture du barrage pendant les tempêtes**

Au cours de la seconde simulation, le bassin est « fermé » pendant 18 marées (sur les 236 marées de la période de 4 mois), dont 9 marées consécutives mi-mars (toujours le même épisode que celui des figures 68 et 69), puis 4 périodes de 2 marées et enfin une marée isolée en juin. Ces phases se traduisent par un flux cumulé constant à travers les différentes sections (bien visible en mars sur la courbe bleu clair). Il en résulte une réduction du flux résiduel de 2930 t ( $\sim 5860 \text{ m}^3$  de vase), soit 24 % de l'import de sédiment de référence. On peut remarquer que la réduction est de 2610 t ( $\sim 5220 \text{ m}^3$  de vase) le 20 mars, après fermeture pendant les 9 marées de la longue tempête de mars, soit 21 % de l'import de sédiment pendant les 4 mois. Mais le « coût » de la fermeture est très différent : perte de production de 15.5 GWh dans le cas d'une fermeture pendant 18 marées, et 9.145 GWh dans le cas d'une fermeture pendant les 9 marées de mars seulement. La perte de production n'est pas proportionnelle au nombre de marées de fermeture, car supérieure en vive eau, tout comme l'entrée de sédiments est plus intense en vive eau. Il apparaît ainsi que le gain obtenu en réduisant l'import de sédiment n'a pas le même rendement (ramené à la perte de production électrique) selon le seuil de déclenchement de l'arrêt de l'usine. Pour une fermeture pendant les tempêtes les plus intenses, le rendement est naturellement meilleur.

On pourra remarquer que la procédure de fermeture temporaire du bassin pendant les tempêtes n'a guère d'incidence sur la distribution finale des dépôts dans le bassin, comme le montre la comparaison

des dépôts des deux simulations après 9 mois (Figure 72). Cette distribution résulte essentiellement des régimes des courants et des vagues à l'intérieur du bassin.

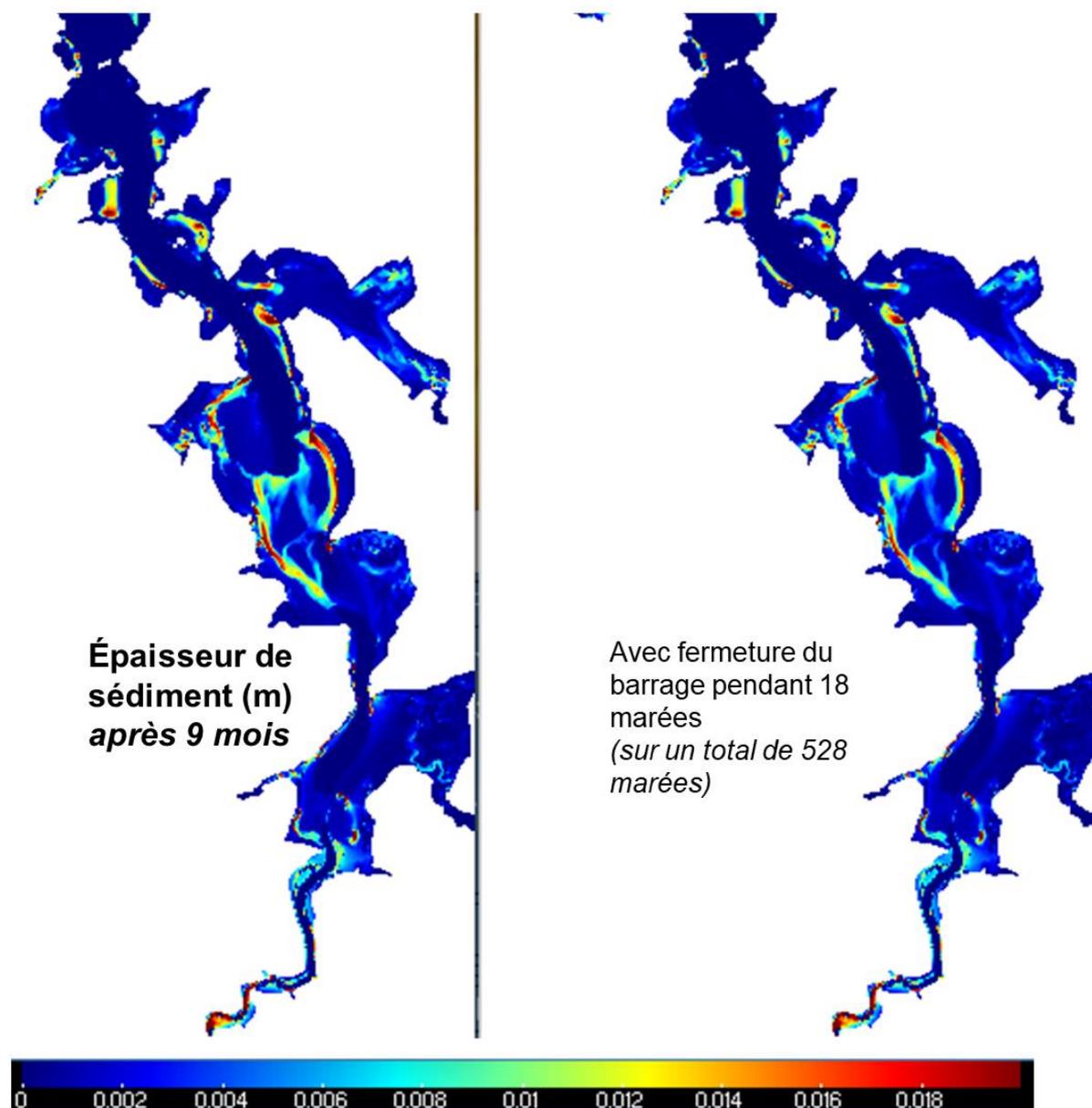


Figure 72 : Comparaison des dépôts simulés après 9 mois (pas de sédiment initial)

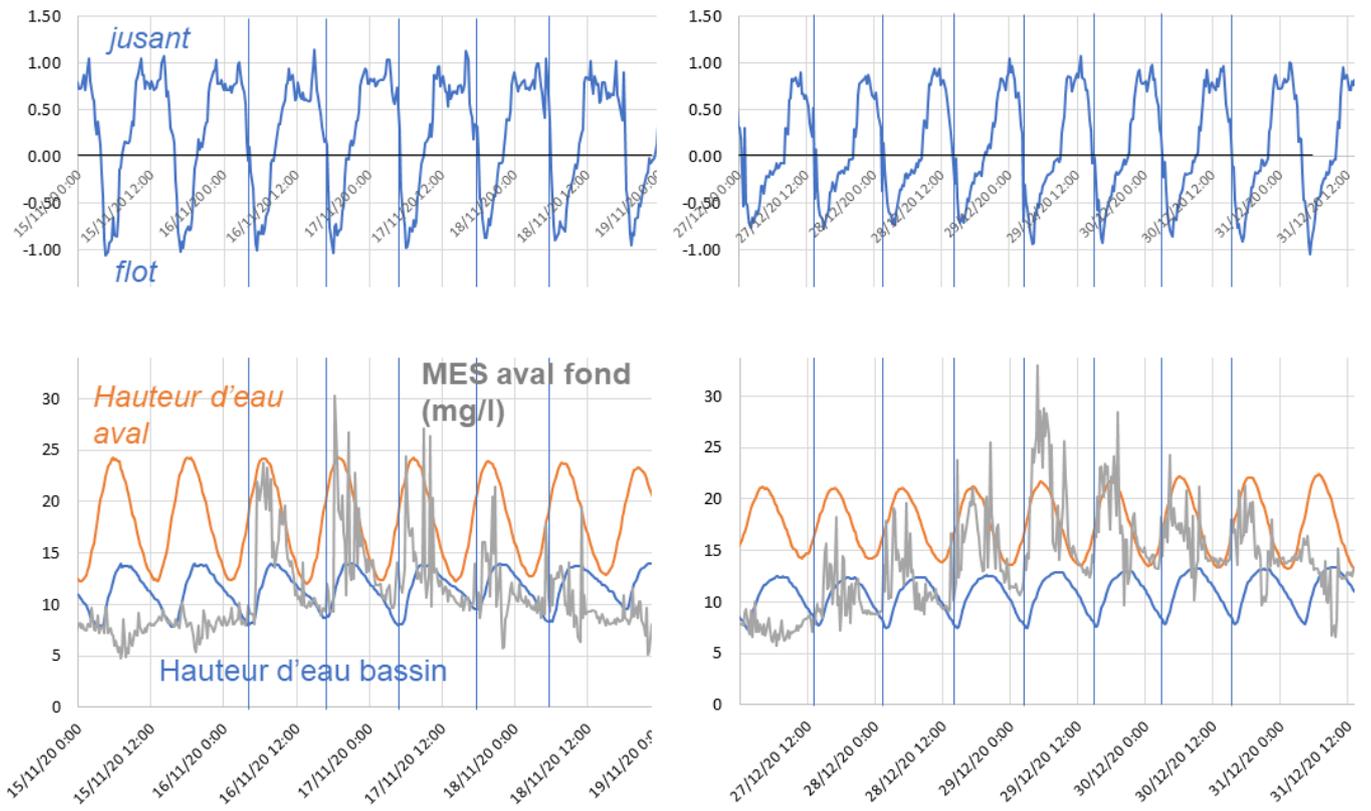
Des variantes à cette simulation de fermeture de l'UMR pendant les tempêtes ont été testées. Par exemple, si l'on supprime le « survidage » du bassin (procédure décidée dans le cadre du nouveau référentiel de niveaux, pour des motivations environnementales) pendant les 9 marées de la tempête de mars 2021, on réduit le flux cumulé entrant par le barrage de 140 t ( $\sim 280 \text{ m}^3$  de vase) sans aucune perte de production, donc sans coût. Par ailleurs, si en plus de la suppression du survidage on réduit le turbinage direct d'1 heure pendant chacune des 9 marées considérées, on économise une entrée de 720 t de MES ( $\sim 1440 \text{ m}^3$  de vase) avec une perte de production de « seulement » 0.773 GWh (au lieu de la perte de 9.145 GWh dans le cas d'une fermeture complète qui, elle, fait économiser une entrée de 2610 t soit environ  $5200 \text{ m}^3$  de vase).

#### **15.4 Synthèse et perspectives sur le levier N°1**

Deux approches différentes ont été menées pour évaluer l'intérêt de poursuivre l'instruction du levier N°1. La première repose sur la mesure de MES en aval du barrage. D'une part, la relation entre la MES entre Dinard et St-Malo et les vagues au large est clairement mise en évidence. Des calculs de flux à travers le barrage ont été tentés à partir de cette donnée, mais restent spéculatifs en raison de la méconnaissance des gradients de concentration dans le voisinage du barrage. Pour aller plus loin, il est nécessaire de disposer de mesures de MES simultanées en aval et en amont du barrage afin d'affiner le calcul du flux de sédiment, qui reposerait sur ces mesures et la bonne connaissance par EDF du débit d'eau à travers le barrage. Les mesures en cours dans le cadre du suivi de l'impact de l'opération 2023 de dragage au Chêne Vert constituent une très bonne opportunité.

La seconde approche repose sur la modélisation hydro-sédimentaire MARS-3D de la Rance, affinée en ce qui concerne sa condition limite et le forçage par les vagues en mer, et validée par la mesure de MES en aval du barrage. Les simulations montrent que 21 % de l'import de sédiments depuis la mer pourraient être évités en fermant le bassin pendant 9 marées au cours d'une période de 4 mois, entraînant une perte de 9.145 GWh. Extrapolée à l'année, on peut provisoirement conclure à une économie de 21 % (15660 m<sup>3</sup>) de sédiments apportés depuis la mer pour une perte de production de 27.4 GWh (soit 5.5 % des 500 GWh de production annuelle de l'usine). Les tests complémentaires consistant à modifier le fonctionnement de l'usine marémotrice sans complètement fermer le bassin montrent qu'il est possible de réduire l'entrée des sédiments lors des tempêtes en dégradant modérément la production électrique : par exemple en supprimant le survidage et en raccourcissant le turbinage direct d'1 heure, on réduirait l'entrée annuelle de sédiments de 4300 m<sup>3</sup> (5.8 % de l'apport par la mer) pour un coût de 2.3 GWh (soit 0.46 % de la production annuelle de l'usine).

L'optimisation possible du fonctionnement de l'usine en période de tempête pourrait être affinée en considérant la variation typique des MES en mer au cours de la marée, l'idée étant d'empêcher l'entrée de ces MES dans le bassin lorsqu'elles sont maximales. Il s'agirait d'examiner une série assez longue de mesures de MES à l'aval du barrage pour voir si ces maximums se produisent prioritairement à une heure donnée, afin d'éviter que les vannes soient ouvertes pour le remplissage du bassin à ce moment-là. La figure 73 donne un premier aperçu du phasage entre courants, niveaux d'eau et MES enregistrés pendant l'automne 2020.



**Figure 73 : enregistrement du courant (au point aval barrage, en haut), hauteur d'eau (en orange au point aval barrage, en bleu dans la cluse) et turbidité (au point aval barrage, en gris) pour deux périodes (mi-novembre et fin-décembre 2020). Les débuts de flot sont repérés en bleu.**

## **16- Eléments complémentaires concernant le levier d'action N°2 : recherche d'un fonctionnement alternatif de l'usine marémotrice**

Ce levier vise à rechercher un fonctionnement alternatif de l'usine marémotrice (phasage des ouvertures/fermetures des vannes, groupes en mode orifice direct ou inverse, pompage ou turbinage direct/inverse) susceptible de réduire l'asymétrie des courants aujourd'hui très favorable au flot, sans (trop) réduire la production électrique. Il pourrait s'agir de mesures pérennes, dans le cas où la perte de production serait faible et/ou compensée (soit par la tarification énergie verte de toute la production de l'UMR, soit par une compensation spécifique qui serait très probablement bien inférieure à un coût de dragages des sédiments non remaniés par les courants). On pourrait aussi envisager une baisse de production uniquement temporaire mais permettant un effet suffisamment conséquent sur le remaniement et le transport de sédiments. L'intensité des courants dans le bassin reste aussi un paramètre à considérer, puisqu'elle contrôle la dynamique sédimentaire.

Il est prévu de s'appuyer sur le modèle hydro-sédimentaire Telemac-Rance d'EDF pour tester les possibilités de fonctionnement alternatif et leurs conséquences sur la dynamique des sédiments. Ce modèle est en cours de validation et ne sera exploité que courant 2023. Mais la recherche de possibilités de fonctionnement alternatif peut être réalisée dans un premier temps avec le modèle OD<sup>23</sup> AGRA (EDF) qui fixe les rythmes de contrôle des groupes et des vannes en optimisant la production électrique et en respectant un certain nombre de contraintes fixées par le gestionnaire du barrage (EDF). Depuis fin octobre 2022, le modèle AGRA a été mobilisé par la société *KAIZEN Solutions*, sous-traitant d'EDF, pour tester des scénarios définis au sein d'un groupe de travail [CS-Rance, EDF, KAIZEN Solutions, EPTB], qui s'est réuni 5 fois.

Pour cadrer cette recherche de fonctionnements alternatifs, plusieurs questions ont été considérées : (1) quelles sont les pistes à explorer ? (2) quels indicateurs peut-on proposer pour qualifier les résultats de la modélisation OD ? (3) quels scénarios ou configurations choisit-on pour appliquer le modèle ?

### **16.1 Les leviers d'action**

La puissance électrique croît avec la chute d'eau (différence de niveau de part et d'autre du barrage) et le débit passant à travers les groupes, mais ce dernier est freiné en raison de la réduction de section de l'estuaire et du couplage des alternateurs aux turbines, qui créent des pertes de charge. Le rendement est meilleur dans le sens du jusant (sens d'écoulement appelé « direct », du bassin vers la mer). Pour cette raison, le niveau de pleine mer est conservé assez longtemps dans le bassin pour disposer d'une chute importante lors du jusant (permettant le turbinage direct) alors que le niveau de la mer baisse. Au cours du remplissage par les courants de flot, dont la brièveté est renforcée par le fait qu'il ne peut commencer que lorsque le niveau mer dépasse celui du bassin, le débit qui pourrait transiter par les groupes produisant l'électricité ne pourrait suffire à remplir le bassin avant que la marée ne s'inverse en mer. Les vannes sont donc ouvertes en flot pour accélérer le remplissage, et c'est à ce moment-là que la pointe de débit à travers le barrage est atteinte, à l'origine des maxima de courants de flot qui sont largement supérieurs aux courants de jusant mieux étalés dans le temps.

---

<sup>23</sup> OD parce que le modèle ne discrétise aucune dimension de l'espace : le bassin est considéré comme une boîte où le niveau d'eau est le même à chaque instant (propagation de la marée très rapide à l'échelle du bassin), ce qui n'est pas loin de la réalité. Ce modèle ne fournit pas la distribution des courants dans le bassin, et ne simule pas le transport de sédiments.

Quel que soit le scénario choisi, les sommes des débits de flot et des débits de jusant, sur une période prise suffisamment longue, sont identiques (au débit-près de la rivière Rance en amont du bassin, qui est négligeable devant le débit de marée à travers le barrage). Mais les maximums de vitesse dépendent de l'étalement de ces débits au cours du temps, et partiellement du phasage de ces débits par rapport au niveau d'eau (bien que niveaux et débits soient bien sûr liés) : pour un débit donné, les vitesses dans le bassin sont d'autant plus fortes que les niveaux d'eau sont faibles (sections d'écoulement plus petites). On peut aussi imaginer d'accroître le jusant sur une marée, et s'autoriser une remontée moindre du niveau haut suivant, et ainsi d'attendre plusieurs marées pour retrouver un niveau haut suffisant pour optimiser la production en turbinage direct. L'intérêt d'une telle procédure serait de constituer un effet de chasse dans le bassin, à l'occasion d'un jusant exceptionnellement fort qui serait d'autant plus efficace pour le transport de sédiment (conséquence de la non linéarité des transports sédimentaires sous l'action d'un courant).

Pour réduire l'asymétrie des courants dans le bassin, on peut accroître les pointes de jusant ou réduire celles de flot. Une manière d'accroître le jusant est d'ouvrir une ou plusieurs vannes pendant la séquence de vidage du bassin, avec le risque de réduire la puissance des groupes pour la production électrique. Mais cela permet aussi de faire baisser le niveau plus vite côté bassin, et de pouvoir anticiper le remplissage à suivre car la croisée des niveaux lors de la marée montante intervient plus tôt, permettant d'allonger la durée du flot. Concernant l'intensité du flot, elle varie en fonction du nombre de vannes ouvertes, et du mode de fonctionnement des groupes (en mode turbinage, nécessité d'attendre que la chute soit significative, ce qui retarde le début de flot, réduit sa durée et augmente donc le maximum... en mode orifice, on allonge la durée du flot mais on ne produit pas d'électricité...).

Tous les ajustements imaginables ne pourraient être appliqués aujourd'hui, car il y a des contraintes à respecter. Ces contraintes sont techniques, ou bien relèvent de consignes de sécurité. Certaines pourraient être levées, nécessitant des frais parfois importants s'il s'agit de reconfigurer des installations, ou des modifications d'arrêtés et d'autorisations, nécessitant d'en débattre. Pour l'instant, la démarche consiste à balayer les possibles, avant d'envisager les transformations éventuelles. La liste des principales contraintes actuelles est rappelée ci-après :

- les vannes doivent pouvoir être fermées à tout moment, pour raison de sécurité
- on ne peut aujourd'hui refermer les vannes que si la chute est inférieure à 4,50 m, donc pas de vanne ouverte si chute > 4,50 m (quel que soit le sens) ; on ne peut également ouvrir une vanne si la chute est > 3,00 m ; ces contraintes techniques pourraient être levées au prix d'une modification des vannes, de l'ordre de 1 à 2 M€/vanne
- hormis à chute quasi-nulle, les vannes ne s'ouvrent / se ferment que séquentiellement (une par une toutes les 5 minutes) pour éviter de trop fortes variations de débit
- les vannes ne doivent pas être ouvertes si niveau mer < 2,5 mCM, et si niveau bassin < 5.5 mCM, pour raison de sécurité
- pour un groupe en mode « orifice », la chute ne doit pas dépasser 2,50 m, pour éviter une survitesse et des vibrations excessives de la turbine, sauf à passer en mode « déchargeur », avec une débitance environ deux fois plus faible
- le niveau bas dans le bassin ne doit pas diminuer trop vite d'une marée à l'autre (guère plus de 80 cm), pour des raisons écologiques.

## **16.2 Proposition d'indicateurs pour qualifier les fonctionnements alternatifs, en l'absence de simulations sédimentaires**

Les sorties du code AGRA se présentent sous forme de chronologies des modes de fonctionnement de l'usine (état des groupes) et des vannes, des niveaux d'eau en mer et dans le bassin, des débits à travers vannes et groupes, des puissances électriques produites, et de quelques autres variables annexes. Pour hiérarchiser l'intérêt des différentes variantes qui seront testées, plusieurs indicateurs ont été produits pour simplifier la comparaison entre ces variantes.

Un indicateur de base reste la production nette d'électricité (différence entre la production en turbinage direct ou indirect, et la consommation pour le pompage éventuel) : P1. Une variante de cet indicateur est l'écart relatif (en %) de production nette par rapport à une référence, a priori l'optimum énergétique pour un nombre donné de groupes et de vannes disponibles.

Les autres indicateurs portent sur l'hydrodynamique dans le bassin. Une analyse succincte des courants de marée dans le bassin (simulés avec le modèle MARS3D) montre une bonne corrélation entre le courant dans le secteur aval et le débit à travers le barrage, corrélation qui dépend du niveau d'eau dans le bassin (Figure 74) : plus bas est le niveau dans l'estuaire, plus fort est le courant pour un débit donné (car les sections sont alors plus faibles). Cette corrélation s'observe lorsqu'on remonte vers l'amont, avec une dégradation progressive.

Ainsi, il est proposé de formuler la corrélation empirique suivante entre le débit à travers le barrage et un courant "représentatif" dans le bassin de la façon suivante :

$$\text{Courant (m/s)} \sim 0.0001 \times (2.39 - 0.12 Z_{\text{bassin}} \text{ (mCM)}) \times Q_{\text{barrage}} \text{ (m}^3\text{/s)}$$

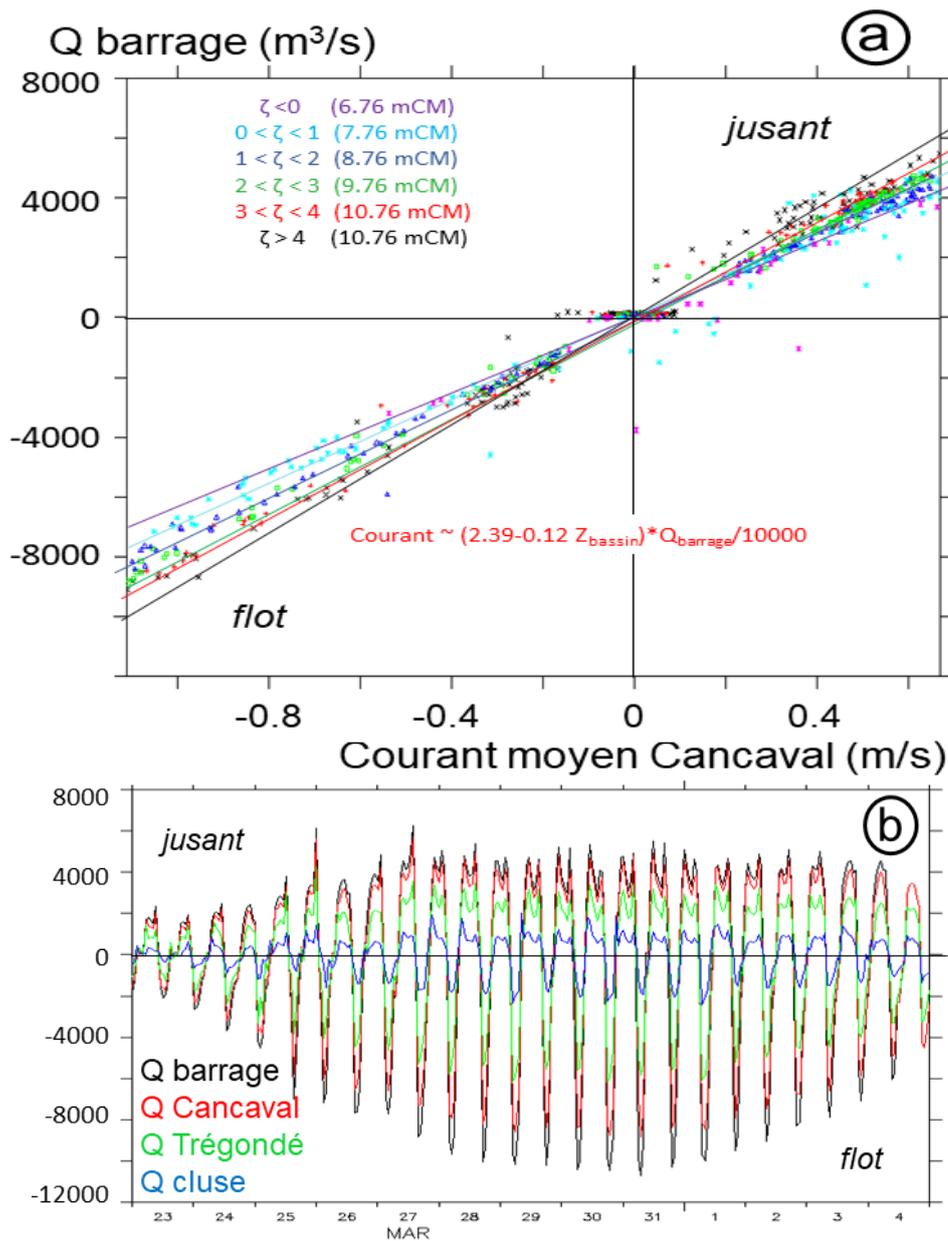


Figure 74 : a) relation entre débit total à travers le barrage et courant moyen à travers une section du bassin devant la pointe de Cancaval, pour différentes classes de niveau d'eau  $\zeta$

b) homothétie des débits à travers différentes sections du bassin pendant un cycle morte eau / vive eau

Les indicateurs proposés peuvent être regroupés par catégories, selon qu'ils considèrent les niveaux d'eau, les courants déduits des débits à travers le barrage par la formule ci-dessus et les durées d'étales. S'agissant des courants, on introduit la notion de remaniement sédimentaire dont un proxy est le carré de l'intensité du courant, qui varie comme la contrainte de cisaillement sur le fond.

Indicateurs basés sur les niveaux :

N1 Niveau haut bassin [max, min et moyenne]

N2 Niveau bas bassin [max, min et moyenne]

M **Marnage bassin** [max, min et moyenne] ; *a priori, on préfère une valeur élevée pour se rapprocher d'un fonctionnement naturel estuarien*

*Indicateurs basés sur les durées d'étales dans le bassin (a priori, on cherche à les réduire, car elles sont favorables à la sédimentation)*

D1 **Durée d'étales bas** [max, min, moyenne]

D2 **Durée d'étales haut** [max, min, moyenne]

*Indicateurs basés sur les courants représentatifs dans le bassin (a priori, on cherche des valeurs fortes pour accroître les remaniements de sédiments) :*

C1 intensité de **flot max**, ou percentile 90 des courants de flot

C2 intensité de **jusant max**, ou percentile 90 des courants de jusant

C3 **max(flots, jusants)<sup>2</sup>** : il s'agit de caractériser la probabilité de remaniement sédimentaire, qu'il ait lieu en flot ou en jusant

C4 **flot<sub>moyen</sub> x jusant<sub>moyen</sub>** : caractérise également la probabilité de remaniement sédimentaire, en flot comme en jusant, mais de façon plus intégratrice sur une période donnée

C5 **somme(flots<sup>2</sup>) / nb dt** (= intégrale de flots<sup>2</sup> / durée du test) : efficacité des remaniements de flot

C6 **somme(jusants<sup>2</sup>) / nb dt** (= intégrale de jusants<sup>2</sup> / durée du test) : efficacité des remaniements de jusant

*Indicateurs d'asymétrie (a priori, on cherche à les réduire, sauf le A4) :*

A1 **rapport flot max / jusant max** : asymétrie des courants

A2 **rapport moyenne(flots<sup>2</sup>) / moyenne(jusants<sup>2</sup>)** : asymétrie des remaniements sédimentaires

A3 **rapport somme(flots<sup>2</sup>) / somme(jusants<sup>2</sup>)** : asymétrie de l'efficacité des remaniements sédimentaires, qui compense un peu l'indicateur précédent en tenant compte de la durée plus courte du flot

A4 **rapport durée de flot significatif / durée de jusant significatif**, en considérant que le flot ou le jusant n'est significatif qu'au-delà d'un seuil (typiquement 0.1 m/s)

*Indicateurs permettant de préciser si les courants max se produisent à des niveaux intéressants :*

*De façon générale il vaut mieux que le jusant intense se manifeste en début de jusant (donc vers les niveaux hauts) pour accroître la probabilité de dispersion en mer des sédiments expulsés, et que le flot intense se manifeste en fin de flot (donc aussi vers les niveaux hauts) pour réduire leur remontée vers l'amont dans le bassin. Les indicateurs suivants situent donc les niveaux pour lesquels se produisent les max de courant (flot et jusant) par rapport au niveau moyen du scénario considéré (a priori, on cherche des valeurs positives élevées) :*

N3 **différence niveau du max de flot + niveau du max de jusant – (niveau haut moyen + niveau bas moyen)**

*Et sa variante plus « intégratrice », où les niveaux des courants max sont remplacés par la moyenne des niveaux pondérée par l'intensité des vitesses) :*

N4  $\sum (|u| \cdot \text{niveau}) / \sum |u| - (\text{niveau haut moyen} + \text{niveau bas moyen})/2$

*Il est possible que certains de ces indicateurs soient redondants, et c'est l'analyse des résultats qui permettra de le vérifier et éventuellement d'en éliminer.*

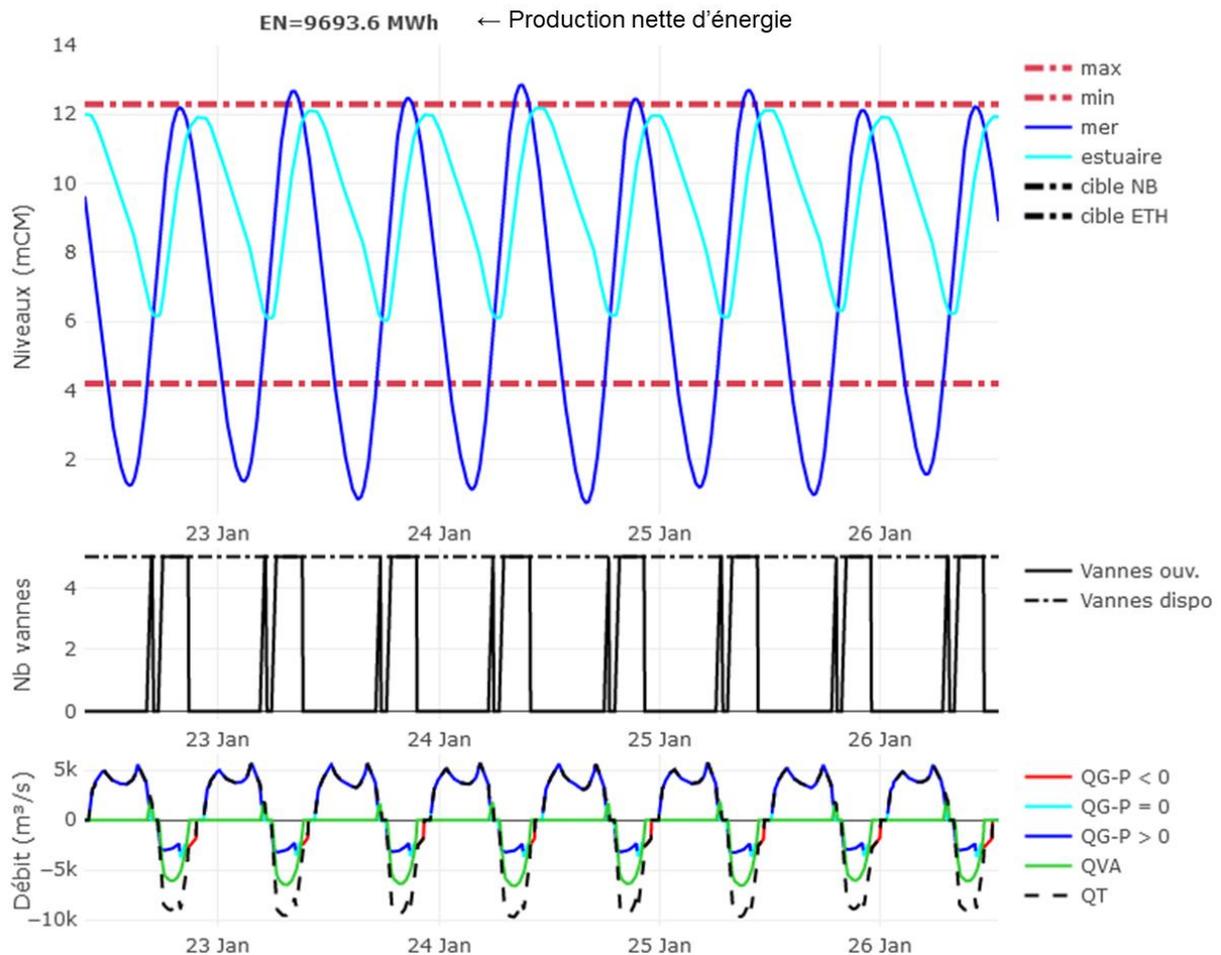
### **16.3 Choix des scénarios à tester**

Une première série de tests a porté sur un cycle de marée de 14 jours, commençant par une marée de morte eau de coefficient 44, passant par une vive eau de 105 et se terminant par une morte eau de 40. Elle avait l'avantage de couvrir une variabilité presque totale des conditions de marée et donc de donner une indication des conséquences d'un fonctionnement alternatif qui serait appliqué de façon permanente. Mais l'analyse de cette série a fait ressortir des scénarios pour lesquels certains indicateurs (par exemple l'asymétrie) étaient très avantagés en morte eau, alors que la dynamique des sédiments se concentre plutôt en vive eau. Pour cette raison, il a été préféré de considérer d'abord une période de vive eau pour laquelle les courants de marée sont plus efficaces, et de hiérarchiser les performances respectives de ces scénarios en actionnant les leviers cités plus haut. Dans un deuxième temps, il est prévu de mobiliser les scénarios de 14 jours pour évaluer l'intérêt de poursuivre ou non sur des périodes plus longues les fonctionnements alternatifs sélectionnés.

La période de vive eau choisie va du 22 au 26 janvier 2023, avec des coefficients de marée variant de 100 à 91, et passant par un maximum à 105.

La configuration de l'usine prise comme référence est la disponibilité de 22 groupes et 5 vannes, tenant compte des maintenances régulières qui sont menées au sein de l'usine. Toutefois, une référence supplémentaire sera considérée, à savoir 23 groupes et 6 vannes (cas également fréquent en exploitation). Pour la référence, le niveau estuaire maximum est de 12.30 m, en accord avec le nouveau référentiel adopté en 2020, et un survidage du bassin par l'ouverture des vannes en fin de turbinage direct (vidage de jusant) est pratiqué lorsque la chute devient inférieure à 2m20. Le scénario de référence correspond à l'optimum de production électrique pour les consignes ci-dessus.

La figure 75 présente la simulation 0D du scénario de référence.



**Figure 75 : résultats du code AGRA pour la simulation de référence (22 groupes, 5 vannes, niveau haut 12.3 m, survidage).**

*En haut* : niveaux mer et bassin, + consignes.

*Au milieu* : nombre de vannes ouvertes.

*En bas* : débits à travers le barrage (vert : à travers les vannes, bleu foncé : à travers les groupes en turbinage, bleu clair : à travers les groupes en orifice, rouge : à travers les groupes en pompage). D'après KAIZEN Solutions pour EDF.

#### 16.4 Analyse succincte des scénarios testés

La figure 76 donne un aperçu des performances de la plupart des scénarios testés à l'aide des principaux indicateurs retenus. Ces indicateurs montrent peu de redondance et se révèlent sensibles, sauf l'indicateur N4 qui apparaît peu pertinent car les différences entre scénarios sont très faibles.

La référence apparaît à gauche (N°1), et est répétée dans la comparaison « simple effet / TIVO<sup>24</sup> » (scénario PT-22G5V1230-TIVO N°15). Le 2<sup>ème</sup> scénario à gauche se distingue de la référence par une consigne supplémentaire : celle d'atteindre un niveau bas à 5 m (au lieu d'environ 6 m pour la référence, fig.75). La perte de production est de 0.27 GWh (-2.8 %) et les efficacités du flot et du jusant sont augmentées. L'asymétrie est légèrement atténuée (indicateurs A2 et A3), le marnage (N2-N1) est augmenté, mais l'indicateur de niveau N1 est un peu inférieur (pas favorable en termes d'inondation des herbues).

Le scénario 4 qui comporte une ouverture des vannes en flot dès la croisée des niveaux, en plus d'un niveau bas ciblé à 5m50 est un peu décevant, car il présente le même gain sur l'asymétrie que le

<sup>24</sup> TIVO : turbinage inverse (en flot) vannes ouvertes

scénario 2, mais il a une efficacité moindre en flot comme en jusant et la perte d'énergie est de 0.36 GWh (-3.8 %).

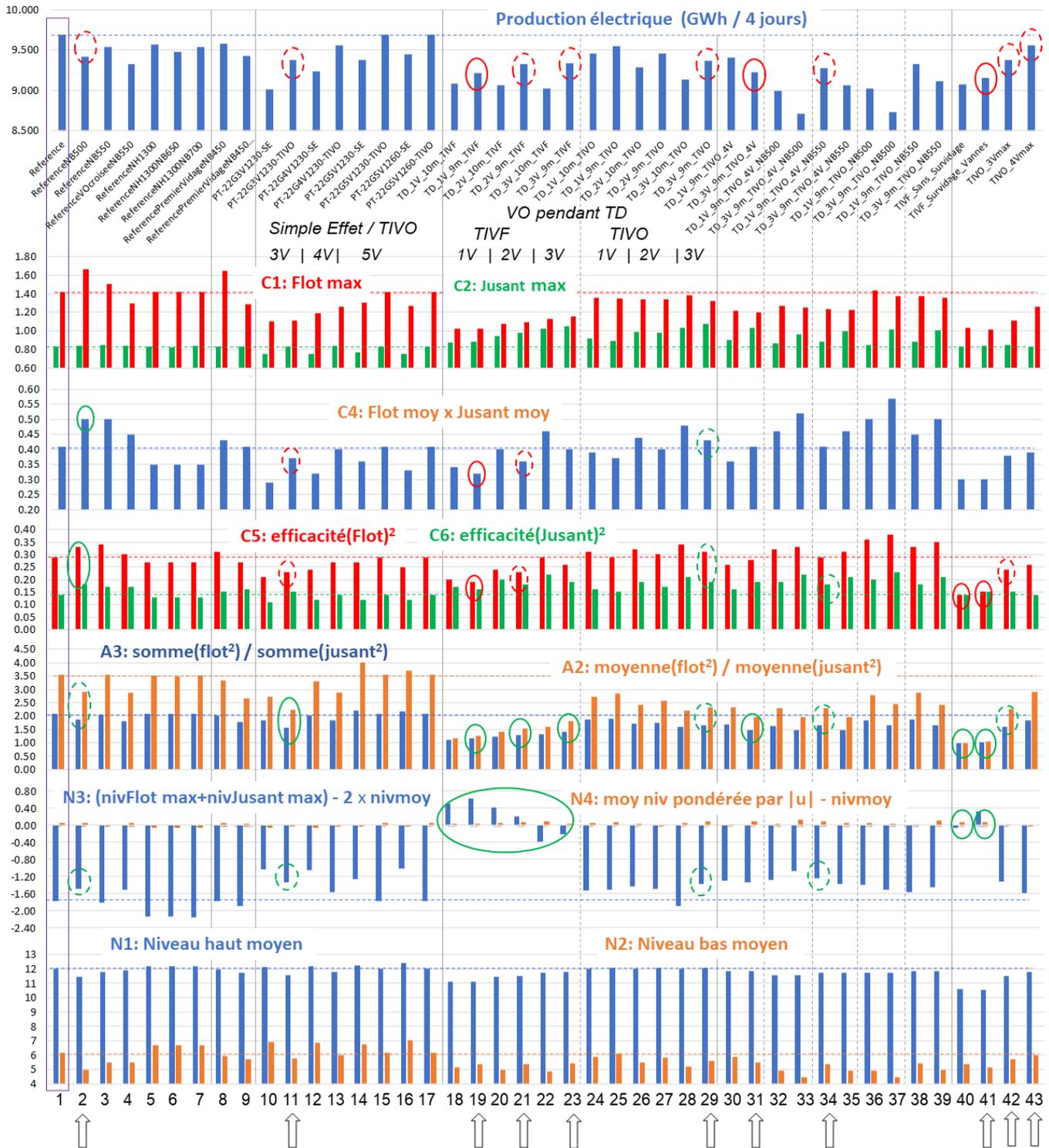


Figure 76 : performances de 43 scénarios de fonctionnement alternatif au regard des indicateurs. Les valeurs d'indicateurs sont cerclées de vert (ou de rouge) lorsque ces indicateurs sont clairement meilleurs (ou pires) que pour la référence.

Les scénarios 5 à 7 ciblent un niveau haut à 13 m (alors que le niveau de pleine mer au large est de 12.85 m) et montrent la possibilité de provoquer l'inondation des schorres sans trop perdre en

production (0.125 GWh, soit -1.3 % pour le scénario 5). Les tests 8 et 9 cherchaient à simuler un effet de chasse en renforçant un courant de jusant mais sont à refaire, en contraignant le flot qui suit...

La série suivante (scénarios 10 à 17) considère l'effet de la suppression du turbinage inverse (qui se produit en flot, dans le cas d'un fonctionnement *double effet*) tel qu'il est pratiqué aujourd'hui en vive eau (TIVO), en utilisant 3, 4 ou 5 vannes (pour toujours 22 groupes). On observe que systématiquement le simple effet entraîne une perte de production significative, une perte d'efficacité et accentue l'asymétrie flot/jusant : ce résultat étonnant vient du fait que l'optimisation du code AGRA allonge dans ce cas le jusant pour renforcer le turbinage direct, et retarde ainsi la croisée des niveaux, avec un flot finalement raccourci. Pour l'éviter, il faudrait imposer un niveau assez bas dans le bassin de façon à anticiper la croisée des niveaux (la mer descend toujours plus bas). Mais cette série de tests montre que la réduction du nombre de vannes a un effet bénéfique sur l'asymétrie des vitesses au prix, il est vrai, d'une perte de production, mais aussi d'une réduction de l'efficacité du flot et du jusant. Ainsi, avec 3 vannes (scénario 11) au lieu de 5, la perte de production est de 0.32 GWh (-3.3 %), tandis que les indicateurs d'asymétries A2 et A3 sont améliorés, passant à 2.24 et 1.58 au lieu de 3.54 et 2.08 respectivement pour la référence. Les indicateurs N3 et N4 sont également meilleurs, car les courants max se produisent à des niveaux relativement plus hauts que pour la référence, donc sont mieux phasés avec la marée. Seul l'indicateur d'efficacité du flot est diminué (mais pas celui du jusant). Le dernier test de la série concerne une augmentation des niveaux hauts max (scénario 17) : il n'y a guère de différence avec la référence (scénario 1 ou 15).

La série de tests suivante repose sur un renforcement des courants de jusant pendant le turbinage direct, en ouvrant 1, 2 ou 3 vannes lorsque le niveau d'eau bassin passe en-dessous d'une certaine cote (soit 10 mCM, soit 9 mCM). Ces vannes restent ouvertes pendant toute la marée basse et pendant le turbinage inverse en flot. Les vannes restantes sont ouvertes en flot dès le début du turbinage inverse (tests désignés « TIVO » dans leur intitulé, N°s 24 à 29), soit seulement à la fin du TI (tests désignés TIVF dans leur intitulé, N°s 18 à 23). L'ouverture des vannes en jusant dès que le niveau descend en-dessous de 10 mCM est pénalisante pour la production électrique, sans faire de différence sur les autres indicateurs. Le seuil de 9 mCM est donc préféré. Les effets positifs sur l'asymétrie des vitesses et sur le niveau d'eau lors des vitesses max est spectaculaire dans le cas « TIVF », avec une efficacité supérieure si seulement une vanne est ouverte en jusant (car le remplissage ne commence aussi qu'avec une seule vanne), mais au détriment de la production électrique. Celle-ci est diminuée de 0.47 GWh (-4.9 %), 0.37 GWh (-3.8 %) et 0.355 GWh (-3.7 %) selon qu'on ouvre 1, 2 ou 3 vannes. A noter que les courants sont globalement plus faibles lorsqu'on diminue le nombre de vannes, et donc l'efficacité des courants (indicateurs C5 et C6). Un compromis doit donc être recherché, mais surtout ce sont les tests complets intégrant la modélisation hydro-sédimentaire qui permettront d'affiner la sélection. Les tests « TIVO », qui permettent une moindre réduction de la production d'énergie, sont nettement moins performants pour l'asymétrie (A2, A3) et pour le positionnement des courants max dans la marée (N3), mais sont globalement plus efficaces pour le remaniement des sédiments (par le flot, surtout C5). De cet ensemble, on peut retenir le scénario 29, à 3 vannes ouvertes en fin de jusant, qui présente des performances assez proches du scénario 11 (*idem* Référence avec 3 vannes au lieu de 5) pour une perte énergétique équivalente (0.325 GWh, - 3.35 %), mais doté d'une efficacité supérieure pour le remaniement sédimentaire (C5, C6).

Les 2 scénarios 30 et 31 constituent des variantes des scénarios 25 et 29, pour lesquelles le nombre de vannes disponibles en fin de flot est réduit de 5 à 4. L'asymétrie est améliorée (avec 3 vannes ouvertes en fin de jusant, on se rapproche de l'indice du scénario 23), mais avec une perte énergétique supérieure (de 0.47 GWh, soit -4.8 %), et une efficacité sédimentaire un peu meilleure.

Les 2 scénarios 36 et 37 (respectivement 38 et 39) constituent des variantes des scénarios 25 et 29, pour lesquelles un niveau bas à 5.0 mCM (respectivement 5.5 mCM) a été ciblé. Cet abaissement des niveaux bas amplifie la marée et l'efficacité du transport sédimentaire, et les scénarios 37 (surtout) et 39 améliorent en particulier les performances du scénario 29, mais au prix d'une perte de production significative (0.96 GWh, soit -9.9 %, pour le 37 et 0.58 GWh, soit -5.95 %, pour le N°39, au lieu de 0.325 GWh (-3.35 %) pour le scénario 29).

Les 2 scénarios 32 et 33 (respectivement 34 et 35) constituent des variantes des scénarios 25 et 29 pour lesquelles à la fois un niveau bas de 5.0 mCM (respectivement 5.5 mCM) a été ciblé et le nombre de vannes disponibles en fin de flot a été réduit de 5 à 4 (cf scénarios 30 et 31). La recherche d'un niveau bas à 5 mCM présente peu d'intérêt car elle pénalise la production électrique sans gagner significativement sur les indicateurs, tandis que la combinaison niveau bas 5.5 mCM / 4 vannes disponibles et 1 vanne ouverte en fin de jusant et pendant le turbinage inverse (scénario 34) se révèle un compromis potentiellement intéressant, avec une perte de production de 0.42 GWh (-4.3 %).

Les 4 derniers scénarios ne comportent plus d'ouverture de vannes en fin de turbinage direct, se rapprochant donc de la référence en jusant, mais réduisent le nombre de vannes pendant le flot : 3 ou 4 vannes depuis le début du turbinage inverse (TI) jusqu'à la fin du flot pour les scénarios 42 et 43, 0 vanne pendant le TI puis 5 vannes jusqu'à la fin du flot pour les scénarios 40 et 41, le 40 se déroulant sans survidage en fin de jusant. Ce scénario, plus pénalisant pour la production électrique, ne présente pas d'intérêt devant le scénario 41 avec survidage, pour lequel le flot est très réduit et se produit tard, conduisant à des indicateurs d'asymétrie (A2, A3) et de positionnement dans la marée (N3) très performants. Mais la forte réduction du flot réduit l'efficacité du transport sédimentaire globalement. Ce scénario mérite d'être considéré, car le plus performant pour l'asymétrie, malgré une perte de 0.53 GWh (-5.5 %). Enfin les scénarios 42 et 43 sont moyennement performants pour l'asymétrie et l'efficacité de remaniement sédimentaire, mais aussi moins pénalisant d'un point de vue énergétique. On remarquera que le scénario 42 est très proche du scénario 11 (seul le nombre de vannes au survidage change).

Finalement, cet examen des scénarios testés nous fait sélectionner 11 d'entre eux pour un examen plus poussé (indiqués par une flèche sur la figure 76). La figure 77 permet de visualiser les résultats de ces scénarios alternatifs selon la même présentation que la figure 75.

Les différents tests effectués montrent donc des possibilités d'intervention sur le fonctionnement de l'usine marémotrice, dont l'efficacité reste à démontrer par une modélisation hydro-sédimentaire. Mais la production d'indicateurs, dont la pertinence semble confirmée par les résultats contrastés présentés figure 76, a déjà permis d'identifier les pistes à creuser, et de quantifier l'impact de ces fonctionnements alternatifs sur la production d'électricité. Ces tests entraînent des pertes de production qui se situent entre 2 et 5 % de la production pendant 4 jours de vive eau. Or pour le scénario de référence, cette production représente 44 % de la production sur l'ensemble du cycle de 14 jours : on peut donc déduire que si un fonctionnement alternatif associé à une perte de production de 5 % en vive eau était systématiquement, mais seulement, appliqué à toutes les vives eaux, cela induirait une perte de production de l'ordre de 2.2 % sur l'année. Une fois de plus il nous faut souligner que l'application des prix "énergie verte" à la production de l'UMR couvrirait largement cette baisse de production. Cette tarification est déjà pleinement justifiée par le principe même de fonctionnement de ce barrage hydro-électrique mais elle le sera encore plus par toute nouvelle adaptation de son fonctionnement pour participer à la diminution de l'envasement de la Rance."

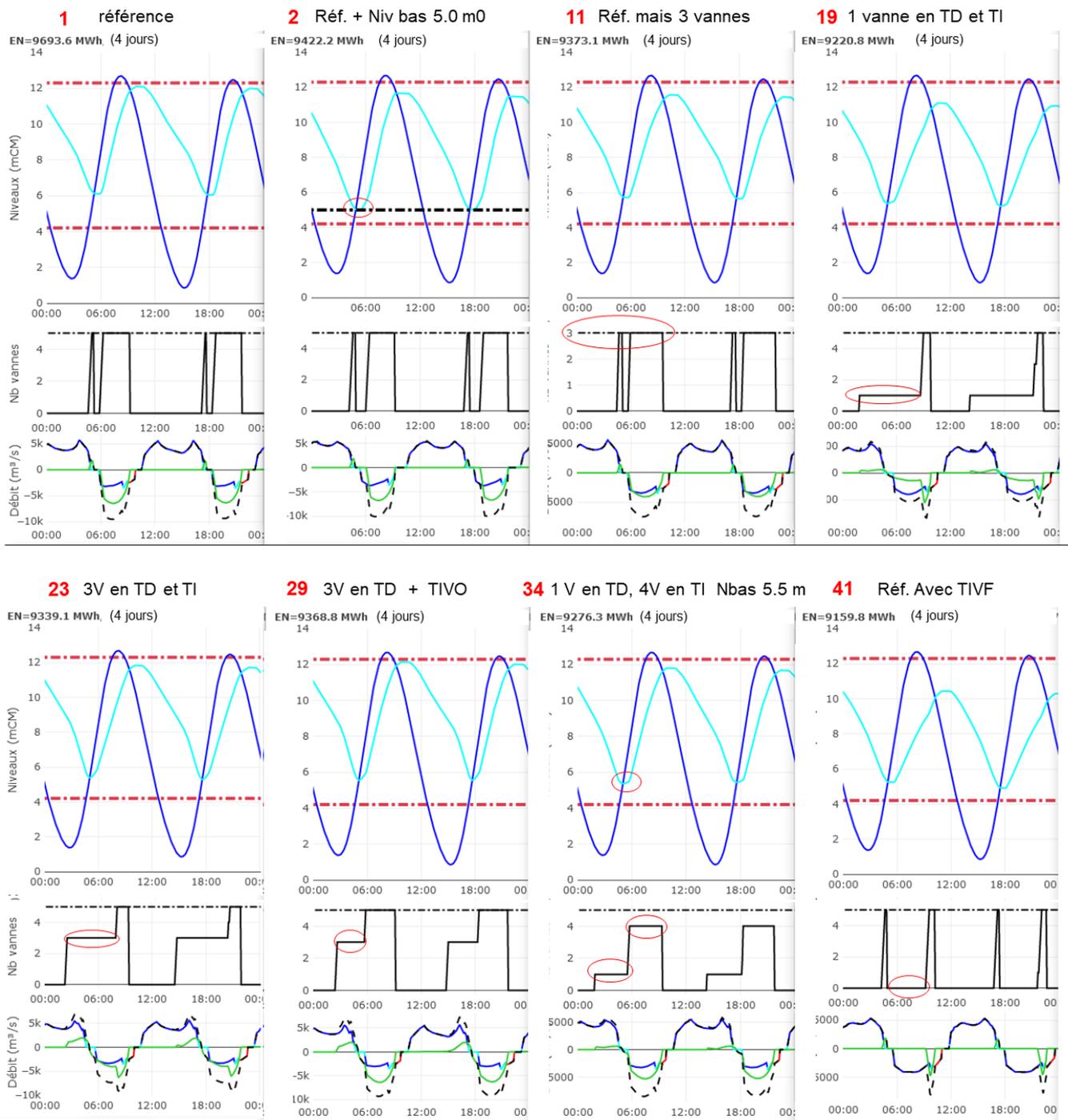


Figure 77 : résultats de 8 scénarios pour la journée du 23 janvier 2023 (coefficient de marée : 103-105).  
Même légende que figure 75. Les numéros des scénarios de la figure 76 figurent en rouge.

## 17- Références bibliographiques

ACRI-IN, 2022. Modélisation numérique du programme de gestion des sédiments du Chêne Vert et de la Moinerie ; modélisation hydro-sédimentaire. Etude pour l'EPTB Rance-Frémur-baie de Beaussais, 98p.

Bonnot-Courtois C., Caline B., L'Homer A., Le Vot M., 2002. La Baie du Mont-Saint-Michel et l'Estuaire de la Rance. *Mémoire CNRS/EPHE/TotalFinaElf N° 26, 256p.*

DynamOcean, 2021. Campagne de mesures hydro-sédimentaires en Rance maritime. Volets 1 et 2 : mesures et analyses. *Rapport P.252 pour l'EPTB, 85p.*

Goguel A., 2017. Niveaux en Rance : note du 20 juillet 2017, 5 p.

Goguel A., 2019. Variation des niveaux dans l'estuaire de la Rance : étude comparative sur quelques années contrastées. Note du 18 mars 2019, 16 p.

Goguel A., 2020. Graphes / statistiques des niveaux en mer et dans le bassin de la Rance. Note « annexe 6 » du 7 mars 2020, 8p.

Ifremer, 2021a. Analyse des circulations dans le bassin maritime de la Rance à partir de simulations avec le modèle MARS-3D. I Note de validation. *Rapport Ifremer pour l'EPTB, 13p.*

Ifremer, 2021b. Analyse des circulations dans le bassin maritime de la Rance à partir de simulations avec le modèle MARS-3D. II Diagnostics eulériens. *Rapport Ifremer pour l'EPTB, 25p.*

Ifremer, 2021c. Analyse des circulations dans le bassin maritime de la Rance à partir de simulations avec le modèle MARS-3D. III Diagnostics lagrangiens. *Rapport Ifremer pour l'EPTB, 12p.*

Jouon, Aymeric, Pascal Douillet, Sylvain Ouillon, et Philippe Fraunié. 2006. «Calculations of hydrodynamic time parameters in a semi-opened coastal zone using a 3D hydrodynamic model.» *Continental Shelf Research* **26(2006)** 1395-1415.

Kervella S., Piantanida A., Chapalain M., Detandt G., 2021. Campagne de mesures hydro-sédimentaires en Rance maritime. *Rapport de synthèse i-Sea/EPOC pour l'EPTB, 128p.*

Maneux E., Schmidt S., Etienne S., 2022. Prélèvements de sédiment par carottage, suivi et interprétation des analyses dans l'Estuaire de la Rance - Rapport final pour l'EPTB Rance-Frémur-baie de Beaussais. [5 rapports]

Nidzieko N.J., Ralston D.K., 2012. Tidal asymmetry and velocity skew over tidal flats and shallow channels within a macrotidal river delta. *Journal of Geophysical Research, Vol 117, C03001*, doi:10.1029/2011JC007384.

Parquet L., 2021. Hydro-sedimentary behavior of the Rance estuary (France) influenced by a tidal power plant : an experimental approach based on field measurements. *Projet de fin d'études, Ec. Des Ponts paris-Tech et EDF, 83p.*

Retière C., 1989, Energie marémotrice et environnement aquatique. *La Houille Blanche*, 2. 133-147.

Retière C., 1996. Energie marémotrice et environnement aquatique. *Penn Ar Bed*, N° 160-161, 31-44.

Rtimi R., Sottolichio A., Tassi P., 2021. Hydrodynamics of a hyper-tidal estuary influenced by the world's second largest tidal power station (Rance estuary, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 250 (2021) 107143.

Rtimi R., Sottolichio A., Tassi P., Bertier C., Le Brun M., Vandenhove M., Parquet L., 2022. Three-dimensional hydrodynamic model of the Rance estuary (France) influenced by the world's second largest tidal power plant. *Hydroscience Journal – La Houille Blanche*, jan. 2022.

Rtimi R., 2022. Dynamique hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Rance : fonctionnement, évolution et gestion. Mémoire de thèse de l'Université de Bordeaux, 220p.

Vandenhove M., 2021. Etude de la circulation et de la dynamique sédimentaire dans un estuaire barré par une usine. Mémoire de Master 2 Sciences de la Mer, Université de Bordeaux, 30p.

## 18 - Glossaire

**BM** : basse mer

**CS** : Conseil Scientifique du plan de gestion des sédiments de la Rance

**Déchet** : désigne une période de marées d'amplitude décroissante.

**EPTB** : Etablissement Public Territorial de Bassin  
dans le présent contexte, employé pour : EPTB « Rance, Frémur et baie de Beausseis »

**Estran** : secteur alternativement découverte ou recouverte par la marée.

**Marnage** : différence entre niveau de pleine mer et niveau de basse mer.

**ME** : morte eau

**MES** : sigle pour Matières En Suspension.

**Percentile 95** : valeur au-dessous de laquelle se situent 95 % des données.

**Prisme de marée** : pour un bassin, volume d'eau qui entre et qui sort du bassin à chaque marée (le bassin peut être une baie, un estuaire entier, ou une fraction amont de l'estuaire) ; pour un bassin « petit » devant la longueur d'onde de la marée, le prisme de marée est proche de la différence de volume entre pleine mer et basse mer.

**PSU** : « Practical Salinity Unit », unité adoptée récemment pour la salinité, très proche en valeur du g/l utilisés auparavant.

**PM** : pleine mer

**Revif** : désigne une période de marées d'amplitude croissante.

**Stratification** : état de la masse d'eau comportant des différences selon la verticale ; souvent stratification de densité liée à la salinité (eaux douces en surface, eau salée au fond) ou à la température (eau plus chaude en surface), entraînant une stratification des courants.

**Subtidal** : qualifie un secteur côtier ou estuarien toujours recouvert par la marée.

**Turbidité** : grandeur mesurant le caractère plus ou moins trouble d'un liquide

**UMR** : Usine Marémotrice de la Rance

**VE** : vive eau