

*Rapport final*

## Mise en place d'un suivi des dépôts sédimentaires en baie Kwé

L. BLOC'H  
Editeur : OEIL.

Avril 2024



**OEIL**  
Observatoire de  
l'environnement  
Nouvelle-Calédonie

## Table des matières

<b>Chapitre I - Contexte et objectif de la mission .....</b>	<b>9</b>
<b>Chapitre II - Etat de référence topo bathymétrique et acquisition orthophotos et Lidar.....</b>	<b>11</b>
II.1. Levé topo-bathymétrique.....	11
II.1.1. Méthodologie employée .....	11
II.1.1.a. Levé bathymétrique.....	12
i. Moyens navigants.....	12
ii. Système de positionnement.....	12
iii. Système d'acquisition bathymétrique.....	13
iv. Profils d'acquisition .....	14
II.1.1.b. Levé topographique.....	15
v. Système de positionnement.....	15
vi. Profils d'acquisition .....	15
II.1.1.c. Optimisation de la méthodologie d'acquisition .....	15
II.1.1.d. Calendrier des interventions .....	16
II.1.2. Résultats .....	17
II.2. Photos du lit de la rivière Kwé.....	20
II.3. Levé LiDAR et acquisition orthophoto.....	22
II.3.1. Moyens techniques et matériels mobilisés.....	22
II.3.2. Moyens humains .....	23
II.3.3. Mode opératoire .....	23
II.3.3.a. Phase pré-vol : étude de site (aéronautiques et réglementaire), démarches réglementaires .....	23
II.3.4. Traitement des données.....	29
II.3.4.a. LiDAR.....	29
II.3.4.b. Orthophotographie .....	30
II.3.5. Résultats .....	31
II.3.5.a. LiDAR.....	31
II.3.5.b. Orthophotographie .....	32
II.4. Bilan et enseignements sur la méthodologie mise en œuvre .....	33
II.4.1. Levé topo-bathymétrique.....	33
II.4.2. Acquisition orthophotos.....	33
II.4.3. Acquisition Lidar .....	34
<b>Chapitre III - Appréciation des phénomènes de sédimentation .....</b>	<b>35</b>
III.1. Levé topobathymétrique de décembre 2013.....	35

III.2. Analyse 2013-2022 .....	35
III.3. Analyse 2022-2023 .....	39
<b>Chapitre IV - Programme de suivi des dépôts sédimentaires .....</b>	<b>41</b>
IV.1. Panorama des méthodologies et techniques de suivi envisageables .....	41
IV.1.1. Méthodologies de mesure du transport solide.....	41
IV.1.2. Evolutions des fonds : localisation et ampleur des dépôts sédimentaires .....	44
IV.1.2.a. Analyse diachronique .....	44
IV.1.2.b. Techniques d'acquisition topo bathymétriques au sol .....	45
vii. Levé topographique terrestre .....	45
viii. Levé bathymétrique .....	48
IV.1.2.c. Techniques d'acquisition topo bathymétriques aéroportées .....	51
ix. Photogrammétrie .....	51
x. Lidar .....	53
IV.1.3. Description des matériaux .....	55
IV.1.3.a. Description de l'origine des matériaux (terrigène/marine) .....	56
IV.1.3.b. Analyse de traceurs métalliques considérés comme représentatifs des différentes strates d'altération du régolithe .....	57
IV.1.3.c. Description de la granulométrie des sédiments de surface .....	57
IV.1.4. Bilan : objectifs d'un programme de suivi et méthodes associées .....	58
IV.2. Conclusions et retours d'expérience sur campagnes d'acquisition déjà conduites dans la zone d'étude .	60
IV.2.1. Etat de référence IRD (2007).....	60
IV.2.2. Etude de l'engravement de la rivière Kwé, de son estuaire et de la baie (EMR, 2010) .....	62
IV.2.3. Etude de faisabilité technique, économique et environnementale de désengravement de l'estuaire de la rivière Kwé et de la baie (Littoralys, 2014) .....	72
IV.2.4. Retours d'expérience SEACOAST 2022.....	73
IV.3. Propositions de programmes de suivi des dépôts sédimentaires .....	74
IV.3.1. Suivi bathymétrique de l'évolution des fonds .....	74
IV.3.1.a. Approche surfacique : levé bathymétrique de l'ensemble de la zone d'étude .....	74
xi. Programme d'acquisition proposé .....	74
xii. Recommandations opérationnelles .....	75
xiii. Budget prévisionnel.....	76
IV.3.1.b. Approche par profils.....	77
xiv. Programme d'acquisition proposé .....	77
xv. Recommandations opérationnelles .....	78
xvi. Budget prévisionnel.....	79
IV.3.2. Description de la dynamique hydrosédimentaire de la rivière Kwé .....	80

IV.3.3. Suivi de la qualité des sédiments (traceurs métalliques et granulométrie).....	81
IV.3.3.a. Description exhaustive de la zone d'étude .....	82
xvii. Programme d'acquisition proposé.....	82
xviii. Recommandations opérationnelles .....	82
xix. Budget prévisionnel.....	83
IV.3.3.b. Description limitée aux stations de suivi des communautés benthiques.....	85
xx. Programme d'acquisition proposé .....	85
xxi. Recommandations opérationnelles .....	85
xxii. Budget prévisionnel .....	85
IV.3.4. Recommandations du groupe d'experts consultés.....	86
<b>Chapitre V - Conclusion .....</b>	<b>87</b>
<b>Chapitre VI - Bibliographie.....</b>	<b>89</b>

## Table des illustrations

Figure 1 : Localisation des installations industrielles en amont de la zone d'étude (Source : CEIL, Google Earth)....	9
Figure 2 : Vue de la baie Kwé (Source : Google Earth) .....	10
Figure 3 : Vue de l'embarcation mobilisée pour le levé bathymétrique (Source : SEACOAST).....	12
Figure 4 : Localisation et coordonnées des sites d'implantation de la station de base (Source : Google Earth) ....	13
Figure 5 : Vue de la base GPS (localisation « Kwé ») (Source : SEACOAST).....	13
Figure 6 : Localisation des profils d'acquisition prédéfinis.....	14
Figure 7 : Complémentarité et recouvrement des acquisitions bathymétriques (bleu) et topographiques (rouge) .....	16
Figure 8 : Horaires de marées en baie de Prony pour la période d'acquisition (Source : SHOM) .....	17
Figure 9 : Bilan du levé topo-bathymétrique SEACOAST (Octobre 2022) .....	18
Figure 10 : Localisation et orientation des clichés du cours de la rivière Kwé (Octobre 2022) (Image de fond : Google Earth).....	21
Figure 11 : Vue du drone DJI Pilot 2 RTK (Source : ECOTONE) .....	22
Figure 12 : Zone d'étude pour l'acquisition des données LIDAR et d'orthophotos (Source : ECOTONE, Google Earth) .....	23
Figure 13 : Points de contrôle au sol (GCP) (Source : ECOTONE) .....	23
Figure 14 : Localisation et coordonnées des points de contrôle au sol (GCP) (Source : ECOTONE, Google Earth) .	24
Figure 15 : Sites de décollage/atterrissage et de télépilotage retenus pour couvrir entièrement la zone d'étude par drone .....	25
Figure 16 : Plans de vol (en jaune PV 1 et vert PV 2) réalisés pour cette étude avec position du télépilote (Source : ECOTONE, Google Earth) .....	27
Figure 17 : MNT à 15 cm de la zone d'étude (Source : ECOTONE).....	31
Figure 18 : Orthophotographie de la zone d'étude (Source : ECOTONE).....	32
Figure 19 : Levé topo-bathymétrique DELVAR (Déc 2013) (Source : DELVAR) .....	36
Figure 20 : Localisation et ampleur des phénomènes d'érosion et d'accumulation constatés au cours de la période 2013-2022 .....	37
Figure 21 : Localisation et ampleur des phénomènes d'érosion et d'accumulation constatés au cours de la période Octobre 2022 – Juillet 2023 .....	40
Figure 22 : Diagramme de Hjulström-Sundborg.....	42
Figure 23 : Préleveurs de charriage (type Helley-Smith à gauche et Ehrenberger à droite).....	43
Figure 24 : Trappe à sédiment et dispositifs de relève (photos : F.Liebault) .....	43
Figure 25 : Principe de fonctionnement d'un GPS différentiel (source : Wikipédia) .....	45
Figure 26 : Principe du tachéomètre (Jaud, 2011) .....	47
Figure 27 : Principe de fonctionnement d'un lidar sur drone (Source : escadrone.com) .....	53
Figure 28 : Comparaison données obtenues par photogrammétrie et par Lidar (Source : escadrone.com) .....	54
Figure 29 : Stations d'échantillonnage de sédiments de surface prélevées par l'IRD en février 2007 .....	60
Figure 30 : Stations de carottage sédimentaire et de collecte des matières en suspension (rouge) (IRD, 2006) ...	61
Figure 31 : Profils de densités sèche et humide, pourcentage en fraction pélitique et radioactivité du <sup>210</sup> Pb dans les sédiments de la carotte KW-1 (IRD, 2006).....	62
Figure 32 : Stations d'échantillonnage estuaire et baie Kwé (EMR, 2010) .....	63
Figure 33 : Distribution des pélites (<63µm) dans les sédiments superficiels de l'estuaire et de la baie Kwé en septembre 2009 (EMR).....	66
Figure 34 : Distribution des arénites (<2mm) (dans les sédiments superficiels de l'estuaire et de la baie Kwé en septembre 2009 (EMR).....	67

Figure 35 : Carte des unités géomorphologiques et biocénoses marines (carte bionomique) au sein de la baie Kwé en Septembre 2009 (EMR) .....	68
Figure 36 : Zones d'accumulation sédimentaires à l'embouchure et dans la baie de la rivière Kwé en 2002 (EMR) .....	69
Figure 37 : Zones d'accumulation sédimentaires à l'embouchure et dans la baie de la rivière Kwé en 2005 (EMR) .....	70
Figure 38 : Zones d'accumulation sédimentaires à l'embouchure et dans la baie de la rivière Kwé en 2009 (EMR) .....	70
Figure 39 : Stations de carottage et de prélèvement de sédiment en 2013 (Littoralys 2014).....	72
Figure 40 : Profils proposés pour un suivi bathymétrique par profils.....	78
Figure 41 : Stations de suivi de la granulométrie des sédiments (base échantillonnage EMR 2010).....	84

## Résumé exécutif

<b>Titre de l'étude</b>	<b>Mise en place d'un suivi des dépôts sédimentaires en baie Kwé</b>		
<b>Auteurs</b>	SEACOST (Laurent BLOCH)		
<b>Collaborateurs</b>	Membres du conseil scientifique de l'ŒIL, Prony ressources New Caledonia		
<b>Editeurs</b>	Observatoire de l'environnement en Nouvelle-Calédonie - OEIL		
<b>Année d'édition du rapport</b>	2024	<b>Année des données</b>	2022 et 2023

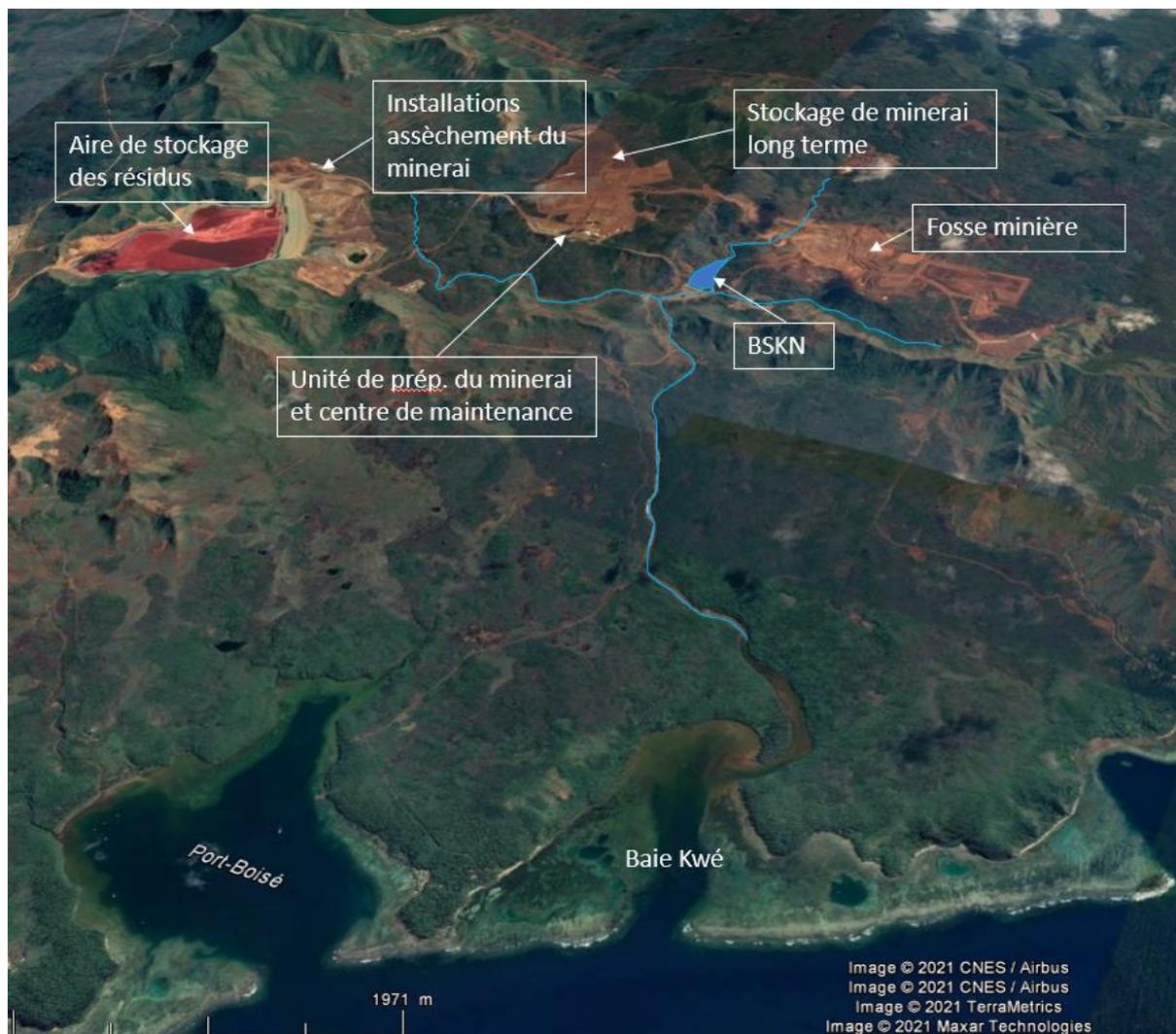
<b>Objectif</b>	<p>L'objectif de l'étude est double :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fournir une description topo-bathymétrique des dépôts sédimentaires présents dans l'estuaire et le fond de la baie Kwé afin de disposer d'un état initial précis de la répartition spatiale des dépôts sédimentaires ;</li> <li>2. Mener une expertise pour la définition d'une stratégie de suivi des dépôts sédimentaires sur le moyen terme.</li> </ol>
<b>Contexte</b>	<p>Le bassin versant de la rivière Kwé (environ 3 500 ha), qui trouve son exutoire dans la baie Kwé, accueille diverses installations minières et industrielles de Prony Ressources Nouvelle-Calédonie (PRNC) (fosse d'extraction minière, aire de stockage des résidus, zones de verser et de stockage de minerai, unité de préparation du minerai, installations d'assèchement des résidus, bassins de sédimentation et de gestion des eaux, réseau de pistes, ...).</p> <p>Si ce bassin versant avait déjà subi des dégradations historiques (incendies, activités forestières, minières et industrielles, ...), la population riveraine exprime depuis l'installation du complexe industriel et minier des inquiétudes concernant une hausse des apports en sédiments et témoigne régulièrement d'un envasement du fond de baie.</p> <p>Malgré l'existence de différentes études et suivis déjà conduits dans la zone, les méthodologies mises en œuvre ont varié, ne facilitant pas une exploitation conjointe permettant de disposer de moyens d'appréciation et de suivi fiables.</p> <p>Dans ce contexte, l'Observatoire de l'environnement en Nouvelle-Calédonie (OEIL) a initié la mise en place d'un suivi spatial des dépôts sédimentaires dans la baie Kwé. Un groupe de travail composé d'experts en dynamique hydro-sédimentaire et érosive impliquant des membres du conseil scientifique de l'OEIL et d'autres partenaires techniques a ainsi été impliqué dans l'élaboration du cahier des charges de l'étude, la sélection du prestataire et la participation à l'établissement d'un plan de suivi à moyen terme.</p>
<b>Méthodologie</b>	<p>L'étude réalisée a couvert 2 volets distincts :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Levé topobathymétrique au 1/500<sup>ème</sup> afin de fournir un état de référence précis de la répartition spatiale des dépôts sédimentaires. Ce levé a été réalisé en octobre 2022 en combinant des moyens topographiques terrestres et des moyens bathymétriques. Les données obtenues ont été confrontées à des données : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Topobathymétriques historiques (2013),</li> <li>- Topographiques collectées par drone (LiDAR) (mission spécifique conduite en juillet 2023).</li> </ul> <p>Cette analyse a permis de présenter une première description des évolutions constatées et des volumes de matériaux associés.</p> </li> <li>2. Proposition d'un programme de suivi des dépôts sédimentaires dans la zone d'étude basée sur : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Un panorama des méthodes envisageables avec leurs avantages et inconvénients ;</li> <li>- Un bilan des études déjà conduites dans la zone d'étude, afin de rappeler les conclusions de ces travaux et de présenter les limites et contraintes associées aux différentes méthodologies mises en œuvre dans la zone d'étude ;</li> </ul> </li> </ol>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Des propositions de programmes de suivi des dépôts sédimentaires dans la zone d'étude. Le descriptif méthodologique des différents volets de prestation proposés est volontairement détaillé afin de fournir les éléments à intégrer dans un éventuel cahier des charges en vue de la consultation des prestataires. Une estimation budgétaire prévisionnelle est également fournie pour chaque type de prestation.</li> </ul> <p>La proposition définitive d'un programme théorique a été élaborée avec la contribution des experts en dynamique hydro-sédimentaire sollicités par l'OEIL.</p>				
<p><b>Résultats et conclusions</b></p>	<p>L'étude menée a permis d'atteindre l'ensemble des objectifs fixés. Les activités menées ont permis de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fournir une description topo-bathymétrique des dépôts sédimentaires présents dans l'estuaire et le fond de la baie Kwé au 1/500ème.</li> </ul> <p>Cette caractérisation constitue un état initial à une résolution inédite et qui offre une description fine des caractéristiques morphologiques des dépôts sédimentaires dans le fond de la baie Kwé. Les acquisitions d'images et de données topographiques par drone (LiDAR aéroporté) ont permis de disposer de données complémentaires et d'apprécier les forces et faiblesses de cette technique en vue d'un éventuel suivi de la zone. Ces acquisitions ont par ailleurs permis une première caractérisation de la zone de forêt d'Araucaria située au nord immédiat de l'embouchure qui semble composée de dépôts alluvionnaires (à confirmer) en apportant de nouveaux éléments de compréhension du fonctionnement hydro-sédimentaires de la baie.</p> <p>Enfin, l'exploitation des relevés passés effectués en décembre 2013 par le cabinet DELVAR (étude Litorallys, Safège 2014) a indiqué une accumulation de sédiments sur la surface étudiée (36,35 ha) pour de la période 2013-2022. En considérant une incertitude de <math>\pm 10</math> cm dans les mesures, le bilan des volumes indique 4 299 m<sup>3</sup> d'excédant correspond à une accumulation moyenne de près de 1 cm de matériaux par m<sup>2</sup>. Le groupe de travail consulté considère toutefois que ces résultats ne peuvent être interprétés correctement sans une véritable connaissance du fonctionnement hydro-sédimentaire de la baie.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mener une expertise pour la définition d'une stratégie de suivi des dépôts sédimentaires sur le moyen terme.</li> </ul> <p>Il a été proposé une description technique et financière des différentes approches envisageables pour atteindre différents objectifs de suivi avec 1) des approches dédiées au suivi de l'évolution des fonds, visant à caractériser les dynamiques spatio-temporelles hydro-sédimentaires de la baie et 2) des approches de suivi de la qualité physico-chimique des matériaux accumulés afin de disposer d'informations permettant de préciser leur origine (terrigène/océanique).</p> <p>L'enveloppe budgétaire prévisionnelle associée à ces suivis a été fournie afin de permettre de solliciter les fonds nécessaires.</p> <p>Enfin, la nature, la fréquence et la chronologie des interventions qu'il serait pertinent d'intégrer dans un programme de suivi a été établi en concertation avec le groupe de travail et les experts sollicités par l'OEIL.</p>				
<p><b>Limites de l'étude</b></p>	<p>Si l'étude menée a permis d'atteindre les différents objectifs fixés, elle ne permet pas de répondre aux interrogations des riverains concernant les dynamiques de dépôt sédimentaire dans la baie Kwé à ce stade. C'est la mise en œuvre du programme de suivi recommandé qui devrait permettre d'apporter des réponses concrètes.</p>				
<p><b>Evolutions</b></p>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Version :</td> <td style="width: 30%;">finale</td> <td style="width: 20%;">Date de la version :</td> <td style="width: 20%;">Avril 2024</td> </tr> </table>	Version :	finale	Date de la version :	Avril 2024
Version :	finale	Date de la version :	Avril 2024		

## Chapitre I - Contexte et objectif de la mission

Sur une surface d'environ 3 500 hectares, le bassin versant de la rivière Kwé accueille diverses installations minières et industrielles de Prony Ressources Nouvelle-Calédonie (PRNC) parmi lesquelles on identifie :

- ⇒ L'aire de stockage des résidus ;
- ⇒ Les installations d'assèchement des résidus (projet LUCY) ;
- ⇒ L'unité de préparation du minerai ;
- ⇒ Un centre de maintenance des engins miniers ;
- ⇒ Une fosse d'extraction minière ;
- ⇒ Des zones de verser et de stockage de minerai ;
- ⇒ Un réseau de gestion des eaux : bassins de sédimentation, dont le plus important, le Bassin de Sédimentation de la Kwé Nord (BSKN) ;
- ⇒ Un réseau de pistes et quelques carrières.



**Figure 1 : Localisation des installations industrielles en amont de la zone d'étude (Source : ŒIL, Google Earth)**

A l'exutoire de ce bassin versant se trouve la baie Kwé, d'une surface proche de 170 ha.



**Figure 2 : Vue de la baie Kwé (Source : Google Earth)**

Si ce bassin versant avait déjà subi des dégradations historiques, associées aux incendies et aux activités économiques et industrielles qui l'ont concernées par le passé (exploitation forestière, activités minières, ...), la population riveraine exprime depuis l'installation du complexe industriel et minier sur le plateau de Goro des inquiétudes concernant l'effet des activités minières relatif aux apports en sédiments et ils rapportent régulièrement un envasement du fond de baie.

Dans le cadre de la réglementation imposée, PRNC met en œuvre des suivis physicochimiques de la colonne d'eau, des flux sédimentaires et des sédiments dans la baie Kwé (Station O6 ; AEL, opérateur des suivis), mais ces suivis ne permettent pas de caractériser précisément les évolutions spatio-temporelles des dépôts sédimentaires dans la baie.

Plusieurs travaux sur la description de la sédimentation dans la baie ont déjà été conduits. On peut ainsi citer :

- ⇒ L'état de référence de la distribution superficielle des sédiments, des flux sédimentaires et des taux d'accumulation dans la baie du Prony et la baie Kwé (IRD, 2007),
- ⇒ L'étude de l'engravement de la rivière Kwé, de son estuaire et de la baie (EMR, 2010),
- ⇒ L'étude de faisabilité technique, économique et environnementale de désengravement de l'estuaire de la rivière Kwé et de la baie (Littoralys, 2014).

Cependant, les méthodologies mises en œuvre ont varié, ne facilitant pas une exploitation conjointe permettant de disposer d'un suivi fiable.

Dans ce contexte, le plan d'action 2021 de l'Observatoire de l'environnement en Nouvelle-Calédonie (OEIL) prévoit d'initier la mise en place d'un suivi spatial des dépôts sédimentaires dans la baie Kwé visant à répondre aux questions suivantes :

- ⇒ Quelle est l'évolution spatio-temporelle des dépôts sédimentaires dans le fond de la baie Kwé ?
- ⇒ Quelle est l'origine des dépôts sédimentaires observés ?

Ainsi, un groupe de travail composé d'experts en dynamique hydro-sédimentaire et érosive impliquant des membres du conseil scientifique de l'OEIL et d'autres partenaires techniques est impliqué dans :

- ⇒ L'élaboration du cahier des charges de l'étude. Il a ainsi été défini que la présente étude avait pour objectifs de :
  - Fournir une description topo-bathymétrique des dépôts sédimentaires présents dans l'estuaire et le fond de la baie Kwé afin de disposer d'un état initial précis de la répartition spatiale des dépôts sédimentaires,
  - Mener une expertise pour la définition d'une stratégie de suivi des dépôts sédimentaires sur le moyen terme,
- ⇒ La sélection du prestataire en charge de mener l'étude,
- ⇒ L'établissement du plan de suivi à moyen terme.

Considérant la complexité à traiter ces questions, et en particulier celle de l'origine des apports terrestres<sup>1</sup>, la présente étude vise à :

- ⇒ Fournir une description topo-bathymétrique des dépôts sédimentaires présents dans l'estuaire et le fond de la baie Kwé afin de disposer d'un état initial précis de la répartition spatiale des dépôts sédimentaires,
- ⇒ Mener une expertise pour la définition d'une stratégie de suivi des dépôts sédimentaires sur le moyen terme.

## Chapitre II - Etat de référence topo bathymétrique et acquisition orthophotos et Lidar

### II.1. Levé topo-bathymétrique

#### II.1.1. Méthodologie employée

Le levé topo bathymétrique de la zone d'étude a été réalisé en combinant :

- ⇒ Une acquisition bathymétrique des zones en eau à l'aide d'une embarcation de petite taille,
- ⇒ Une acquisition topographique des berges accessibles de la rive droite de la Kwé, du nord de la baie Kwé et des zones de très petits fonds par un topographe à l'aide de moyens terrestres (acquisition au GPS avec une cane télescopique permettant de s'adapter aux contraintes induites par le couvert végétal).

Par ailleurs, ces données ont été confrontées à des données altimétriques des espaces exondés obtenues à l'aide d'un Lidar (*Light Detection and Ranging*) embarqué sur un drone par grande marée basse.

---

<sup>1</sup> Les sources des apports terrestres provenant de la rivière Kwé sont multiples : sols mis à nu par l'activité minière et industrielle actuelle, décapages liés aux anciennes activités minières, figures d'érosion naturelles ou liées aux incendies, érosion des berges de la rivière, phénomène de déstockage des sédiments de la rivière.

### **II.1.1.a. Levé bathymétrique**

#### ***i. Moyens navigants***

Afin de s'adapter aux contraintes associées aux caractéristiques de la rivière Kwé (faibles profondeurs et largeur réduite dans la partie nord de la zone d'étude), il a été mobilisé notre embarcation de petite taille (4,00 m, 25 cv), offrant les meilleures capacités d'intervention en termes de manœuvrabilité et de tirant d'eau.



**Figure 3 : Vue de l'embarcation mobilisée pour le levé bathymétrique (Source : SEACOAST)**

#### ***ii. Système de positionnement***

L'acquisition bathymétrique a été réalisée à l'aide d'un GPS embarqué sur l'embarcation (Trimble R8) connecté par radio à une base émettant des corrections différentielles en temps réel et permettant d'atteindre un positionnement centimétrique lors de l'acquisition.

En raison des contraintes induites par l'étendue et la topographie de la zone d'étude, le GPS utilisé comme base de correction différentielle (Trimble R8) a été implanté sur un trépied au niveau de 3 points successifs distincts afin de garantir une bonne réception radio des corrections différentielles émises.

Il a ainsi été exploité 3 implantations successives de la base GPS, correspondant à 3 zones d'acquisition :

- ⇒ « Nord Kwé » pour le cours amont de la Kwé,
- ⇒ « Kwé » pour le cours aval de la Kwé,
- ⇒ « Embouchure Kwé » pour l'embouchure de la rivière et la baie Kwé.

La localisation des emplacements successifs retenus pour la base est présentée à la figure suivante. Les coordonnées planimétriques et altimétriques de ces points ont été établies au GPS en utilisant la correction différentielle fournie par le réseau « Banian » et diffusée via le réseau GSM.

L'incertitude associée à l'exploitation des corrections différentielles fournies en temps réel par le réseau « Banian » telle que décrite par la DITTT<sup>2</sup> est de :

- ⇒ 1 à 2 cm en planimétrie,
- ⇒ 3 à 4 cm en altimétrie.

<sup>2</sup> <https://dittt.gouv.nc/information-geographique/pour-les-professionnels/service-de-positionnement-banian>



**Figure 4 : Localisation et coordonnées des sites d'implantation de la station de base (Source : Google Earth)**  
 Une vue de la base au niveau de l'implantation pour le cours de la Kwé est présentée à la figure suivante.



**Figure 5 : Vue de la base GPS (localisation « Kwé ») (Source : SEACOAST)**

*iii. Système d'acquisition bathymétrique*

L'acquisition bathymétrique a été réalisée à l'aide d'un sondeur monofaisceau SIMRAD EA400 200 kHz couplé à la suite logicielle d'acquisition bathymétrique HYPACK Max.

Le paramétrage du sondeur est associé à l'ajustement de la célérité du son dans l'eau au niveau de la zone d'étude. Cet ajustement est réalisé à partir de l'équation d'état de l'eau de mer (« Equation d'Etat Internationale 1980 » (IES 80)) :

$$c = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,010T)(S - 35) + 1,58 \times 10^{-6} p$$

c : célérité du son dans l'eau (m.s<sup>-1</sup>),

T : température de l'eau (°C),

S : salinité de l'eau (UPS),

p : pression (Pa).

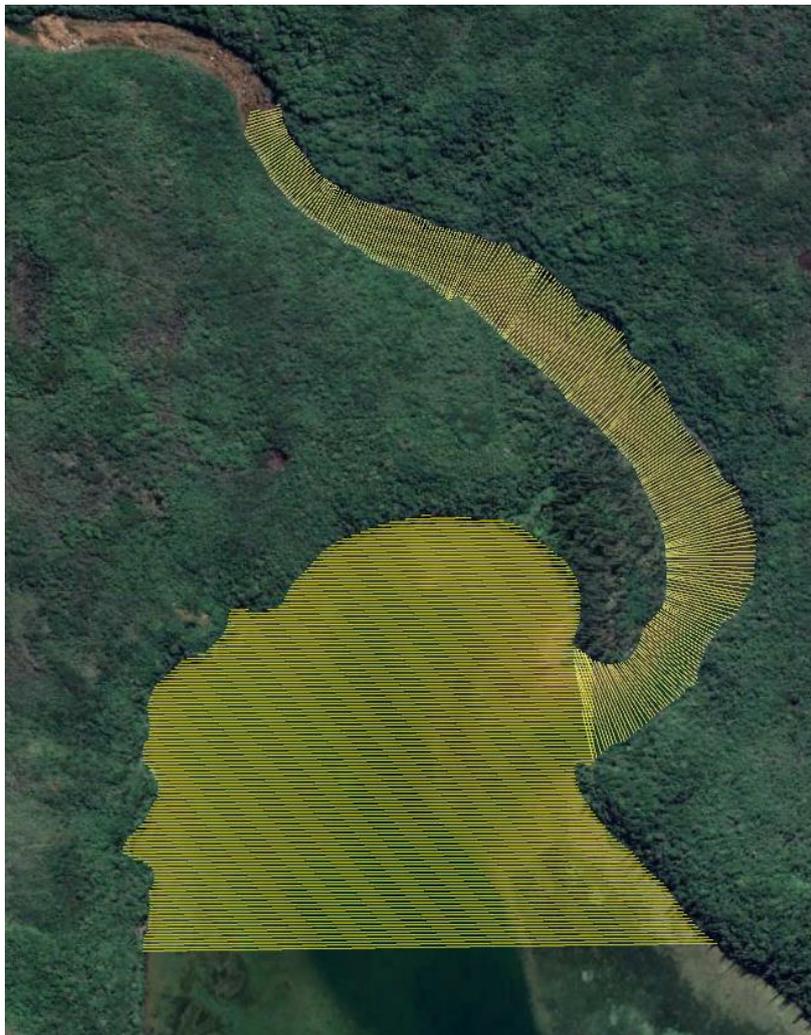
Ainsi, la mesure *in situ* des paramètres T° et salinité permet d'ajuster la célérité du son au niveau du site d'acquisition.

Selon la documentation technique des matériels mobilisés, l'incertitude associée à la chaîne d'acquisition bathymétrique est estimée entre 1 et 3 cm.

#### iv. Profils d'acquisition

Le levé bathymétrique a été réalisé le long de profils prédéfinis et espacés de 5 m. Il a ainsi été renseigné 280 profils transversaux dans la rivière Kwé et 135 profils dans la baie Kwé.

La localisation des profils d'acquisition prédéfinis est présentée à la figure suivante.



**Figure 6 : Localisation des profils d'acquisition prédéfinis**

### **II.1.1.b. Levé topographique**

#### **v. Système de positionnement**

L'acquisition des points topographiques a été réalisée à l'aide d'un rover GPS Trimble R8 connecté par radio à la station de base pour obtenir un positionnement centimétrique dans les 3 dimensions.

En raison des contraintes induites par la végétation (masque créé par le couvert végétal dégradant la réception par le GPS des signaux satellites), le levé a été réalisé avec une cane télescopique (0 - 4 m) afin de permettre, lorsque cela était possible, la saisie de point en plaçant le GPS au-dessus du couvert végétal.

#### **vi. Profils d'acquisition**

Le levé topographique a été réalisé le long des profils prédéfinis pour la bathymétrie et décrits précédemment. Ces profils ont ainsi été chargés dans le contrôleur du topographe afin de le guider lors de la saisie des points.

Il a été saisi des points topographiques espacés tous les 3 à 4 m le long des différents profils prédéfinis.

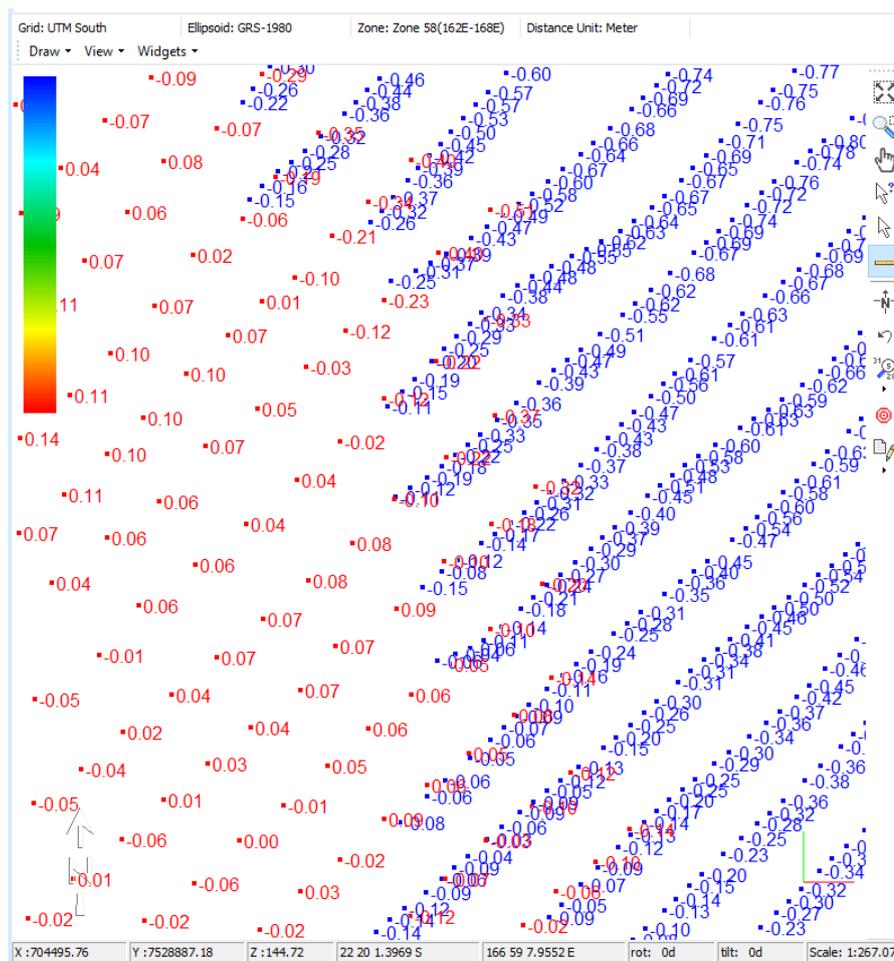
En raison de la densité du couvert végétal contraignant de manière forte la progression à pied, les acquisitions topographiques n'ont été conduites qu'au niveau des espaces praticables, correspondant à la rive droite de la rivière Kwé et au littoral nord de la baie Kwé.

### **II.1.1.c. Optimisation de la méthodologie d'acquisition**

Afin de s'assurer de la bonne complémentarité des acquisitions bathymétriques et topographiques et de garantir ainsi l'exhaustivité du levé réalisé, des dispositions ont été prises pour maximiser le recouvrement des deux campagnes. Ainsi :

- ⇒ La campagne de terrain conjointe a été programmée durant des jours présentant une marée haute à la mi-journée, maximisant ainsi l'étendue des espaces pouvant être décrits par la méthode d'acquisition bathymétrique,
- ⇒ Les acquisitions bathymétriques ont été conduites jusqu'en limite d'évolution de l'embarcation (tirant d'eau) et des capacités opérationnelles du sondeur (mesures jusqu'à 40 cm sous la sonde),
- ⇒ Les acquisitions topographiques ont été conduites jusqu'en limite de progression à pied dans la rivière ou au littoral. Ainsi, lorsque les conditions de saisie étaient réunies pour ne pas risquer de dégrader le matériel mobilisé, le topographe a saisi des points sur les profils en marchant dans l'eau jusqu'à la taille,
- ⇒ A l'issue de chaque journée d'acquisition bathymétrique, il a été réalisé un traitement rapide afin d'établir les limites d'extension de la zone déjà couverte et de les intégrer dans le contrôleur afin de guider le topographe et garantir la bonne saisie du complément topographique.

Un exemple du recouvrement ainsi obtenu est présenté à la figure suivante. Les données issues de l'acquisition bathymétrique sont présentées en bleu, celles provenant de l'acquisition par les moyens topographiques en rouge.



**Figure 7 : Complémentarité et recouvrement des acquisitions bathymétriques (bleu) et topographiques (rouge)**

### II.1.1.d. Calendrier des interventions

La période d'acquisition a été choisie afin de bénéficier de la conjonction de conditions de marée favorables à l'acquisition bathymétrique (marée haute à la mi-journée) et de conditions météoro-océanologiques calmes.

La recherche et l'implantation des points d'implantation de la station de base GPS a été réalisée le 14 octobre 2022.

Les campagnes d'acquisition bathymétriques et topographiques ont été conduites de manière conjointe les 15, 16 et 17 octobre 2022. Les acquisitions ont été réalisées pour ces trois jours de manière continue de 7h30 à 17h00 en raison de l'éloignement de la zone d'étude depuis le site d'hébergement et des délais d'installation et de démontage des équipements (station de base GPS).

Les conditions de marée fournies par le SHOM pour la période d'acquisition au niveau de la baie de Prony sont présentées à la figure suivante.



**Figure 8 : Horaires de marées en baie de Prony pour la période d'acquisition (Source : SHOM)**

Lors des trois jours d'acquisition, nous n'avons pas subi de précipitations et les conditions de vent ont été relativement calmes (vent d'est sud-est inférieur à 10 nds).

### II.1.2. Résultats

Le plan obtenu par la compilation des données bathymétriques et topographiques collectées lors des campagnes de terrain et leur interpolation (méthode TIN (*Triangular irregular network*)) est présenté à la figure suivante.

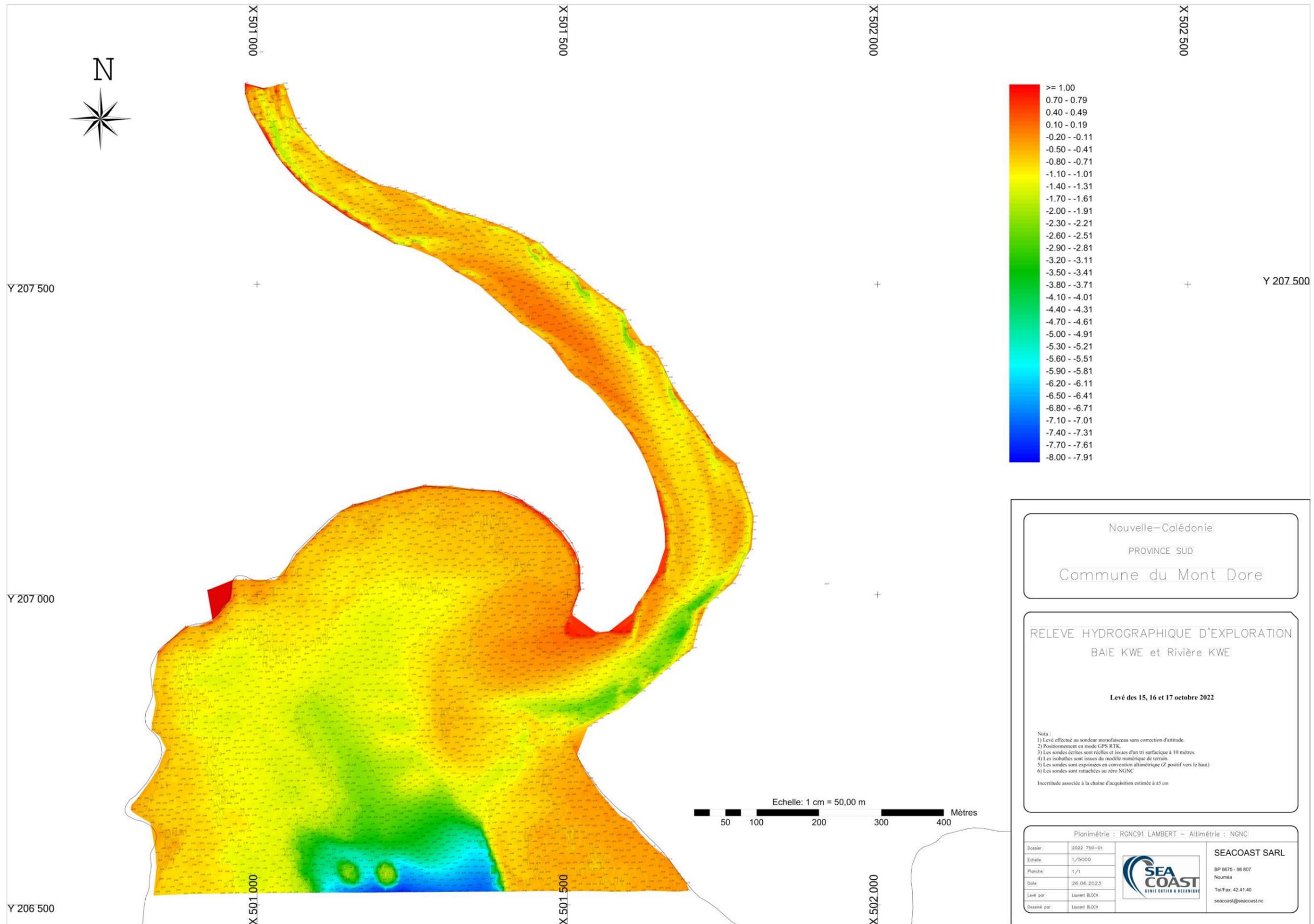


Figure 9 : Bilan du levé topo-bathymétrique SEACOAST (Octobre 2022)

A la lecture de ce plan, on constate que la zone d'étude présente des zones à la morpho bathymétrie bien distincte. Ainsi, de l'amont vers l'aval, on peut distinguer :

- ⇒ L'extrémité nord de la zone d'étude (limite amont du cours de la rivière Kwé), occupée par des fonds indurés (substratum et blocs rocheux). Située immédiatement en aval d'un ressaut rocheux où les vitesses d'écoulement des eaux de la rivière sont accélérées, cette zone ne semble pas être sujette à des phénomènes de sédimentation,
- ⇒ Immédiatement en aval de cette zone, la rivière prend une courbe vers la gauche, induisant :
  - Une accélération des courants en bordure de la rive droite (substratum et blocs) avec conservation de cotes inférieures à -1,2 m NGNC,
  - Un ralentissement de la vitesse d'écoulement des eaux au niveau de la rive gauche, se traduisant par une zone de dépôt de sédiment présentant des cotes altimétriques voisines de -0,6 m NGNC,
- ⇒ La rivière trace ensuite une courbe vers la droite qui induit le même phénomène :
  - Une accélération des courants en bordure de la rive gauche avec conservation de zones relativement profondes (cotes voisines de -1,0 m NGNC). On note que la présence de blocs rocheux au niveau de la rive gauche participe à des accélérations locales des courants qui induisent un granoclassement des sédiments. On constate au niveau de ces espaces des cotes pouvant atteindre -1,5 à -2,0 m NGNC<sup>3</sup>,
  - Au niveau de la rive droite, on constate la présence d'une vaste zone d'accumulation de sable découvrant à marée basse (cotes altimétriques de l'ordre de -0,15 m NGNC)
- ⇒ Plus en aval, la rivière prend à nouveau une courbe vers la droite mais son cours s'élargit, induisant un ralentissement général des vitesses d'écoulement et donc des conditions plus favorables à la sédimentation des matériaux. Cela se traduit notamment par la présence d'une zone d'accumulation dans le méandre de la rivière, à proximité de la rive gauche (cotes altimétriques de +0,3 à +0,45 m NGNC),
- ⇒ Peu avant l'embouchure, la largeur du lit du cours d'eau se resserre tandis que le tracé de la rivière poursuit la courbe vers la droite. Cela induit une accélération des vitesses d'écoulement le long de la rive gauche, où il est observé des cotes altimétriques inférieures à -2 m NGNC. Le long de la rive droite, les cotes sont voisines de -0,10 m NGNC,
- ⇒ Au niveau de l'embouchure de la rivière dans la baie Kwé, on constate :
  - La présence d'une vaste zone d'accumulation de matériaux sableux au nord de l'embouchure, au niveau des espaces situés au nord de l'axe principal de sortie des eaux de la rivière,
  - L'existence d'un « bouchon » de matériaux à environ 200 m de l'embouchure qui marque vraisemblablement la limite de la zone de dépôt des matériaux potentiellement charriés par la rivière en situation de crue,
- ⇒ Dans la baie Kwé, on distingue 3 zones :
  - Au sud-est, un platier peu profond délimité par un tombant corallien qui ne semble pas être soumis à l'influence d'éventuels apports solides transportés par la rivière,
  - Au nord, une vaste zone peu profonde (-1 m NGNC),
  - Au sud, soit au centre de la baie, une zone profonde (cotes altimétriques inférieures à -6 m NGNC) présentant des patates coralliennes de grande taille.

<sup>3</sup> A Port Boisé, 0 m NGNC = 0,583 m hydro (Source : SHOM)

## II.2. Photos du lit de la rivière Kwé

Des photos de la rivière Kwé ont été prises à la fin des interventions de terrain (17 octobre 2022 entre 15h15 et 15h35). Leur emplacement et leur orientation sont indiqués à la figure suivante.

Ces photos, prises à marée haute, montrent la densité de la végétation qui couvre les berges de la rivière et rend particulièrement difficile voire impossible la progression à pied au niveau de ces espaces.

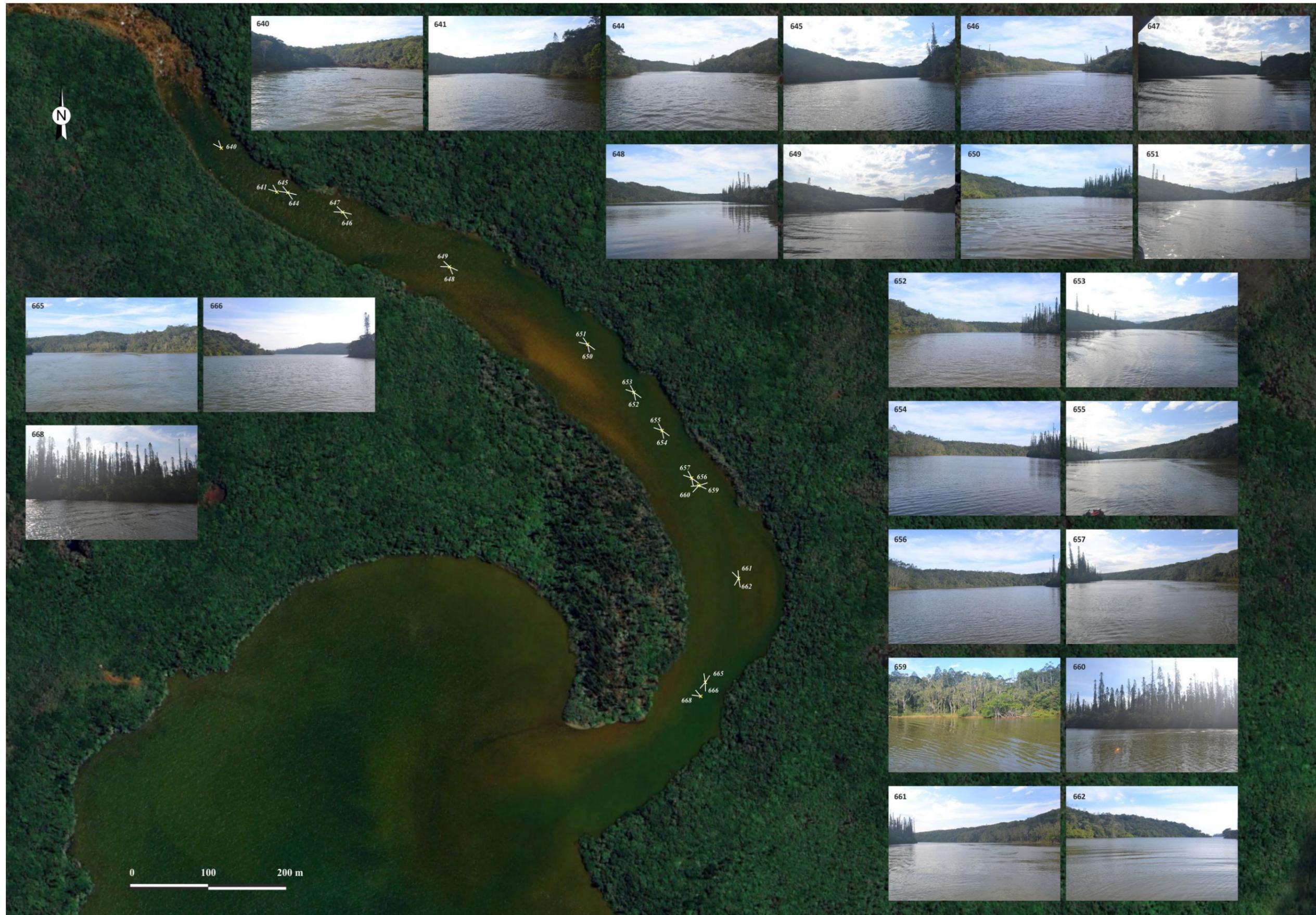


Figure 10 : Localisation et orientation des clichés du cours de la rivière Kwé (Octobre 2022) (Image de fond : Google Earth)

## II.3. Levé LiDAR et acquisition orthophoto

### II.3.1. Moyens techniques et matériels mobilisés

Pour les campagnes d'acquisition LiDAR et orthophoto, il a été mobilisé les moyens matériels suivants :

- ⇒ Drone DJI Pilot 2 RTK,
- ⇒ Capteur LiDAR Zenmuse L1= nacelle dédiée au DJI Matrice 300, incorporant un LiDAR (*Light Detection and Ranging*) et deux capteurs photos/vidéos.

Permettant une reconstitution 3D très précise de l'environnement, elle offre une précision et une densité de points particulièrement qualitatives. Sa rapidité de mise en œuvre et de captation (240 000 points par seconde) permet une adaptation dans différents types de missions.



**Figure 11 : Vue du drone DJI Pilot 2 RTK (Source : ECOTONE)**

- ⇒ Capteur photogrammétrique de haute définition Zenmuse P1 : Capteur CMOS plein format de 45 mpx, Global shutter mécanique, TimeSync 2.0, Objectif 35 mm ;
- ⇒ Ordinateur pour contrôle et transfert des données acquises sur le terrain ;
- ⇒ Piste de décollage/atterrissage ;
- ⇒ Radio VHF aérienne pour écoute des fréquences aériennes de la zone ;
- ⇒ Radios VHF Talkie-Walkie (X8) pour communications entre télépilote et spotters ;
- ⇒ Station de charge + batteries (X12) ;
- ⇒ Station GPS mobil D-RTK 2 ;
- ⇒ EPI de sécurité (Casque, chasuble, chaussure de sécurité) ;
- ⇒ Télémètre laser optique True Pulse II ;
- ⇒ Anémomètre.
- ⇒ Cibles (x12) pour mise en place de GCP (Points de contrôle au sol) ;
- ⇒ Bateau et skipper pour déplacement sur les zones de décollage par la mer/rivière.

Il est important de noter que, pour cette prestation, le LiDAR utilisé n'est pas un LiDAR bathymétrique mais terrestre. Il ne permet donc pas de collecter les données au travers de zones en eau (artefacts liés à la réflectance du laser sur l'eau). Pour cette étude, le drone LiDAR vient en complément des relevés bathymétriques pour avoir un relevé topographique sur les zones émergées.

### **II.3.2. Moyens humains**

Pour les opérations, il a été mobilisé une équipe de 3 personnes :

- ⇒ Chef de projet drone, ingénieur hydrobiologiste et Télépilote drone professionnel : ALLIOD Romain (Gérant Ecotone NC)
- ⇒ Géomaticien pour traitement de la donnée LiDAR : Naseur Cherif (Associé Ecotone NC)
- ⇒ Spotter + skipper : Personnel Ecotone NC.

### **II.3.3. Mode opératoire**

#### **II.3.3.a. Phase pré-vol : étude de site (aéronautiques et réglementaire), démarches réglementaires**

La zone d'étude au niveau de l'embouchure de la Kwé s'étant sur une superficie totale d'environ 120 ha (voir figure suivante).



**Figure 12 : Zone d'étude pour l'acquisition des données LIDAR et d'orthophotos (Source : ECOTONE, Google Earth)**

La prospection terrain préliminaire a été réalisée de manière autonome par ECOTONE les 14 et 15 octobre 2022. Les moyens nautiques de SEACOAST ont été utilisés pour atteindre la rive gauche de la rivière Kwé et implanter le point de contrôle P5 (voir figure suivante).

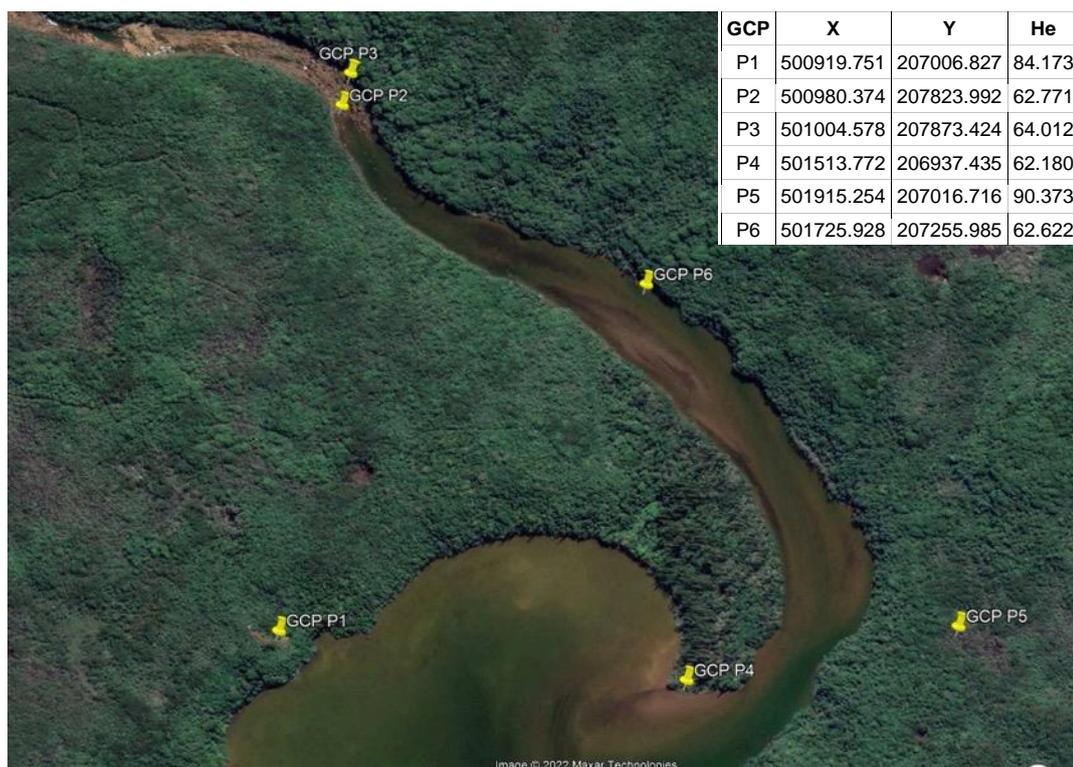
Durant celle-ci, des points de contrôle (GCPs) ont été positionnés et relevés avec une canne de précision GNSS par le topographe mobilisé par SEACOAST afin de vérifier et recalibrer en cas de déviation les résultats obtenus suite aux acquisitions drones.

Ils ont été matérialisés par des cibles, marquages à la bombe et fers à béton.



**Figure 13 : Points de contrôle au sol (GCP) (Source : ECOTONE)**

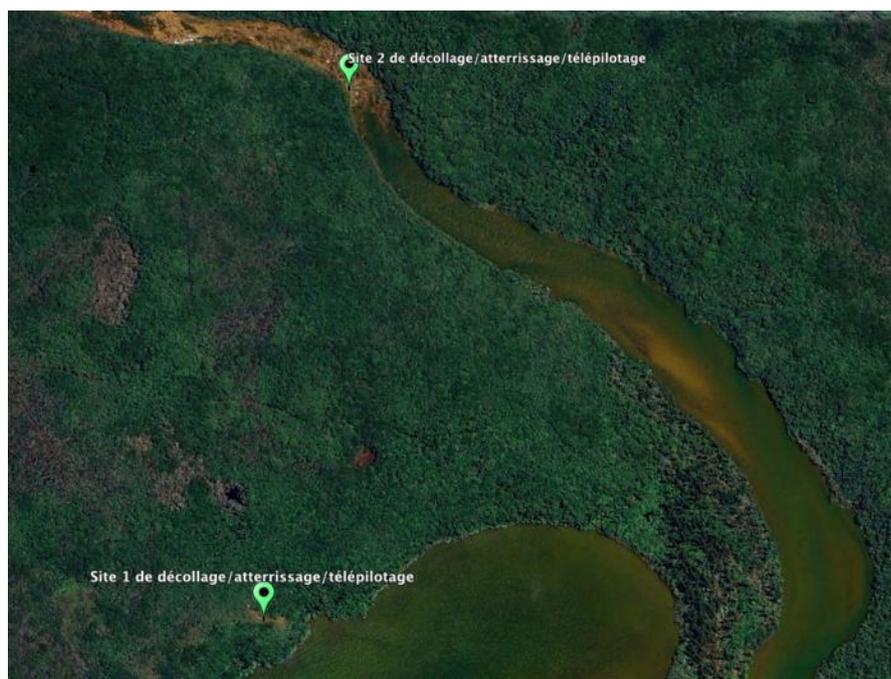
Les emplacements des différents GCPs ainsi que leurs coordonnées sont présentés à la figure suivante.



**Figure 14 : Localisation et coordonnées des points de contrôle au sol (GCP) (Source : ECOTONE, Google Earth)**

Des sites de décollage/atterrissage et télépilotage pour le drone ont aussi été recherchés durant cette phase de prospection. Ils tiennent compte de l'intervisibilité et de la distance entre le drone et le télépilote pour la sécurité des vols et afin d'être conforme à la réglementation drone en vigueur sur le territoire mais aussi pour maintenir la communication entre le drone et la radiocommande qui peut être rompue selon le relief et la végétation (mission de vol n'étant plus réalisable une fois la communication perdue).

D'après notre expérience en acquisition drone depuis plusieurs années sur le terrain, cette prospection terrain nous a permis rapidement de voir que la mission devait être scindée en 2 plans de vol. 2 points de décollage ont donc été stratégiquement recherchés. Ces derniers sont représentés à la figure suivante.



**Figure 15 : Sites de décollage/atterrissage et de télépilotage retenus pour couvrir entièrement la zone d'étude par drone**

A la base, la mission d'acquisition LiDAR et orthophoto était demandée par le client à cette même période, à la suite de la phase de prospection.

Cependant, une fois sur le terrain pour placer les GCPs et rechercher les sites de décollage/atterrissage, nous nous sommes vite rendus compte que très peu de zones émergeaient à marée basse.

Rappelons que le LiDAR utilisé dans cette étude, vient en complément des relevés bathymétriques. Les moyens matériels mis en œuvre ne permettent pas de traverser l'eau. De ce fait, toutes les parties en eau (immergées) ne peuvent être relevées par ce moyen.

Pour avoir un maximum de zones relevables dans ce genre d'étude, il est préférable d'être dans l'optimum de marée selon la technique de relevé utilisée (marées basses extrêmes pour le LiDAR terrestre).

Il a donc été proposé au client d'attendre la période avec les plus forts marnages qui correspond à la période de Juillet-août (hiver). Durant cette période, les marées les plus basses, à 0,1m, sont attendues, soit un delta de 40 cm comparativement à la période de prospection (marée basse de 0,5m).

Dans le cadre de cette étude, il a été impératif de respecter la réglementation drone en vigueur sur le territoire.

La réglementation distingue trois régimes :

- ⇒ L'aéromodélisme (loisir et compétition),
- ⇒ L'expérimentation (développement et mise au point d'appareils),
- ⇒ Les « activités particulières » pour toutes les autres utilisations.<sup>4</sup>

Afin d'appréhender cette réglementation et les droits d'un télépilote drone pour chaque régime d'activité, plusieurs documents bien détaillés sont accessibles directement en ligne comme :

<sup>4</sup> Voir aussi le dossier « drones » paru en 2019 dans le numéro 65 la revue Espaces naturels, à télécharger sur le lien <http://www.espaces-naturels.info/espaces-naturels-65>

- ⇒ Piloter un drone : règles à respecter:
- ⇒ <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F34630>
- ⇒ Modèles réduits et drones de loisir :
- ⇒ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/modeles-reduits-et-drones-loisir>
- ⇒ Drones - Usages professionnels :
- ⇒ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/drones-usages-professionnels>
- ⇒ Drones – activités particulières :

[https://www.ecologiquesolidaire.gouv.fr/sites/default/files/Guide\\_drones\\_activites\\_particulieres.pdf](https://www.ecologiquesolidaire.gouv.fr/sites/default/files/Guide_drones_activites_particulieres.pdf)

Une fois en connaissance de la réglementation, les activités particulières comme cette étude peuvent sortir de ces différents cadres mais nécessitent très souvent dans ce cas des autorisations spécifiques et des dérogations à cette législation drone. Par exemple :

- ⇒ L'utilisation d'un capteur LiDAR nécessite une autorisation spécifique d'acquisition d'images hors spectre visible (demande à effectuer auprès de la DGAC),
- ⇒ Les vols en S2 à une hauteur supérieure à 50 m sont interdits avec notre drone (poids > 2 kg). Afin de pouvoir voler au-dessus de cette limite (comme dans la présente étude), les intervenants doivent systématiquement se trouver dans le cadre des « activités particulières » (et non des drones de loisir) et doivent transmettre et faire valider aux autorités compétentes (DGAC) une demande de dérogation spécifique,
- ⇒ La réglementation limite la distance entre le drone et le télépilote à 1 000 m pour les vols hors zones peuplées et hors vus (scénario dit S2), une dérogation de la distance horizontale peut être demandée,
- ⇒ Etc...

Ces demandes de dérogations ont été transmises pour validation auprès des autorités compétentes 2 à 3 semaines avant les interventions drones, comme demandées dans la réglementation.

Par ailleurs, bien qu'elle ne soit pas toujours prise en compte, l'utilisation d'un drone, même à des fins scientifiques, peut être réglementée dans des zones protégées. Pour des suivis envisagés dans des réserves naturelles, des parcs nationaux, des parcs naturels marins, des sites bénéficiant d'un arrêté de protection de biotope, des zones Natura 2000, il peut s'avérer nécessaire de respecter un certain nombre de restrictions ou de recommandations en vigueur sur le site. Certains pays ont même interdit leur usage dans les sites sensibles suite à de nombreux dérangements constatés (Islande ; Scher 2019).

Le site Géoportail de Nouvelle-Calédonie (Georep NC) propose une cartographie des zones ouvertes à la pratique du drone de loisirs en Nouvelle-Calédonie <https://georep.nc/explorateur-cartographique>.

Remarque : L'intérêt de faire appel à un prestataire professionnel pour réaliser un suivi par drone est qu'il maîtrise parfaitement toute la partie administrative relative aux autorisations de survol et au dossier à déposer pour les obtenir.

À défaut, il faut veiller à bien respecter la réglementation (voir sites internet cités ci-dessus).

Pour cette phase de l'étude, les besoins sont sortis des scénarios classiques (S1, S2, S3). De ce fait, plusieurs démarches réglementaires, soumises à validation auprès de la Direction de l'aviation civile DGAC, ont été nécessaires afin de procéder aux vols drone sur la zone d'étude en toute sécurité et selon la réglementation en vigueur, soit :

- ⇒ Une autorisation de vol hors spectre visible pour l'acquisition de données en LIDAR ;
- ⇒ Une dérogation pour voler à une hauteur sol jusqu'à 120 m en vol. Pour information, les vols avec notre drone en S2 (poids supérieurs à 2 kg) au-dessus de 50 m sont interdits et soumis à dérogation ;
- ⇒ Une dérogation de distance horizontale pour pouvoir voler à 1 500 m entre le drone et le télépilote dans le but de couvrir en un point une surface optimum selon la topographie et la surface d'étude du site ;
- ⇒ Une information aéronautique (NOTAM : Notice to AirMen « messages aux navigateurs aériens ») a été émise durant toute la phase de l'étude afin que tous les usagers de l'espace aérien soient en connaissance directe de l'activité drone sur la zone et qu'ils aient un moyen de communication avec le télépilote (coordonnées téléphoniques) en cas de nécessité ;
- ⇒ Autorisations des propriétaires et coutumiers des zones d'étude pour l'accès et les survols drone des zones.

Comme expliqué précédemment, la zone d'étude a dû être compartimentée en 2 plans de vol distincts. Ces derniers sont représentés à la figure suivante.



**Figure 16 : Plans de vol (en jaune PV 1 et vert PV 2) réalisés pour cette étude avec position du télépilote (Source : ECOTONE, Google Earth)**

Pour l'acquisition LiDAR, un balayage de zone avec un recouvrement de 52 % pour chaque passe, à une hauteur de 80 m, à vitesse de vol de 7 m/s, en triple échos 160 kHz et en balayage linéaire répétitif ont été automatisés en suivi de terrain sur les 2 plans de vol avec l'application du drone (DJI Pilot 2).

Pour l'acquisition de l'orthophoto (Capteur Zenmuse P1), un balayage de zone avec un recouvrement de 75 % entre chaque passe, à une hauteur de 120 m et à vitesse de vol de 10 m/s a été automatisé en suivi de terrain avec l'application du drone (DJI Pilot 2).

Il est important de préciser que la programmation des missions de vol en suivi de terrain pour des acquisitions de données drone précises est primordiale lorsque la zone d'étude présente un dénivelé important, comme dans le contexte de cette étude.

Du fait des contraintes de marées basses discutées précédemment dans ce rapport, la mission d'acquisition LiDAR et d'orthophotogrammétrie de la zone a été opérée le 3 et 4 juillet 2023, soit près de 7 mois après la phase de prospection. Pour ces campagnes, ECOTONE est intervenu de manière totalement autonome pour atteindre les sites de décollage identifiés lors de la prospection préliminaire.

Durant ces 2 journées, les marées basses étaient parmi les plus basses de l'année, entre +0,1 et +0,15 m hydro, et en plein milieu de journée (vers 13h). Ces conditions de marée basse ont été idéales pour les relevés drone.

De plus les conditions météorologiques ont été très favorables pour les vols (grand soleil sans nuage avec très peu de vent).

Remarque : Avant de commencer les missions de vol drone, les GCPs, laissés sur place lors de la phase de prospection, ont été contrôlés afin de vérifier qu'ils n'avaient pas bougé depuis.

L'acquisition des données s'est réalisée en 2 temps. En effet, un créneau de 2 h seulement (1h avant et après l'étalement de marée) a été privilégié pour le levé LiDAR dans le but d'avoir des données sur le maximum de parties émergées. L'acquisition des orthophotos de haute qualité sur chaque plan de vol a du coup été planifiée une heure avant de lancer l'acquisition LiDAR.

Par exemple pour la première journée, soit le 3 juillet avec l'étalement de marée à 13h00 à Prony, le vol LiDAR a débuté à 12h00 et l'acquisition de l'orthophoto a donc été opérée 1h avant soit vers 11h00.

Ainsi, du fait de la contrainte de marée basse et ne pouvant pas nous déplacer facilement entre les 2 sites de décollage/atterrissage pour réaliser l'ensemble de la zone d'étude, le premier jour de terrain a été consacré à l'acquisition des Orthophotos et LiDAR sur le plan de vol 1 et le deuxième jour sur le plan de vol 2.

L'ensemble des vols a été réalisé en utilisant le RTK (*Real Time Kinematic*) du drone. La cinématique en temps réel (RTK) est une technique précise de positionnement par satellite qui permet d'obtenir des résultats avec une précision au centimètre près, ce qui en fait un outil efficace pour les géomètres.

La méthode de calcul prend en compte les données GPS du drone ainsi que les données d'une base fixe, pour obtenir un positionnement précis en temps réel. Dans le cas de cette étude, du fait d'une couverture 4 G sur les 2 sites de télépilotage, nous avons été en mesure de nous connecter au réseau banian de la DITTT et utiliser la correction en temps réel à partir de leurs bases fixes.

### II.3.4. Traitement des données

#### II.3.4.a. LiDAR

Les données brutes LiDAR acquises par le drone (Format spécifique DJI) ont été converties en format LAS avec le logiciel DJI terra.

Les fichiers de nuage de points au format LAS converti par DJI Terra ont ensuite essentiellement été traité au moyen des logiciels : ArcGIS PRO avec l'extension 3D Analyst et Global Mapper v.22.1 avec le module LiDAR.

Des opérations de vérification des traitements ont été réalisées au moyen de LAStools, MCC-LiDAR et FUSION.

Les traitements du nuage de points ont consisté à vérifier le positionnement du nuage de points, identifier le bruit des données, réaliser la classification des points et effectuer un contrôle des résultats.

Lors du contrôle du nuage de point obtenu (voir tableau suivant), une déviation en altitude au-delà des limites de tolérance en Z (6 cm) a été relevée pour le P1. Ce delta peut s'expliquer par le fait que le levé de ce point de contrôle a été réalisé le jour d'après comparativement aux autres qui ont été levés le même jour. En effet, le réseau Banian utilisé dans la méthode de correction RTK présente des faiblesses : " Dans de bonnes conditions d'utilisation (absence de masques et de multi-trajets, faible GDOP) [coefficient d'affaiblissement de la précision], la précision absolue attendue est de 1 à 2 centimètres en planimétrie et 3 à 4 centimètres en altimétrie. " (source : Service de positionnement BANIAN | DITTT (gouv.nc)).

Selon l'heure (nbre de satellites différents) et la couverture nuageuse, des déviations plus ou moins importantes d'une journée sur l'autre peuvent être enregistrées du fait d'un signal perturbé et ce qui accentue cette imprécision tout spécialement en Z.

Pour les autres points GCP, les déviations restent dans la limite tolérable de précision en Z ( $\leq 4$  cm).

Les données PT LIDAR du tableau ont été relevées en prenant le point LIDAR de l'acquisition le plus proche du centre du GCP de référence.

Au final, le nuage de point n'a pas eu besoin d'être recalé au vu du résultat du contrôle car le delta entre les GCPs (Hormis P1) et l'acquisition reste dans les limites de tolérance ( $\leq 4$  cm).

ID	GCP				PT LIDAR			DELTA (m)		
	X	Y	He	Z (m)	X	Y	Z (m)	X	Y	Z
P1	500919,751	207006,827	84,173	22,768	500919,737	207006,851	22,683	0,014	-0,024	0,085
P2	500980,374	207823,992	62,771	1,366	500980,366	207823,971	1,408	0,008	0,021	-0,042
P3	501004,578	207873,424	64,012	2,607	501004,582	207873,427	2,605	-0,004	-0,003	0,002
P4	501513,772	206937,435	62,180	0,793	501513,816	206937,415	0,761	-0,044	0,020	0,032
P5	501915,254	207016,716	90,373	28,986	501915,211	207016,756	28,975	0,043	-0,040	0,011
P6	501725,928	207255,985	62,622	1,235	501725,931	207255,968	1,193	-0,003	0,017	0,042

**Tableau 1 : Comparaison (Delta en m) entre les coordonnées GPS et l'altitude de chaque GCP avec le point LIDAR la plus proche constituant le centre de la cible sur le nuage de point**

Une fois ce contrôle réalisé et validé, différents produits ont été générés à partir du nuage de points traité soit :

- ⇒ Modèle numérique de terrain ;
- ⇒ Modèle numérique de hauteur ;
- ⇒ Modèle numérique de surface à des résolutions de 15 cm et 10 cm ;
- ⇒ Nuage de points avec classification du sol ;
- ⇒ Nuage de points brut ;
- ⇒ Un modèle numérique de terrain au format XYZ résolu à 25 cm et 50 cm a été également produit.

Remarque : comme souligné plusieurs fois dans ce rapport, le LiDAR utilisé ne permet pas d'acquérir de l'information au niveau des zones en eau. Les zones en eau perturbent les relevés LiDAR. Pour limiter ce biais, un masque des eaux a été saisi afin de ne traiter que les points hors des eaux.

Pour saisir ce masque, une orthophotographie réalisée à partir des clichés pris en même temps que l'acquisition LiDAR a été générée. Cela garanti une homogénéité entre les données par rapport au moment de l'acquisition.

Néanmoins, la discrimination zones en eau/hors eau n'a pas été optimale, sur l'orthophotographie il est parfois relativement délicat de délimiter les espaces en eau. Les données traitées pour la génération des produits peuvent inclure des points LiDAR captés sur des zones en eau. Il est donc important lors de l'interprétation et de la comparaison avec les données bathy d'établir un buffer de quelques centimètres en limites de zones émergées/immergées.

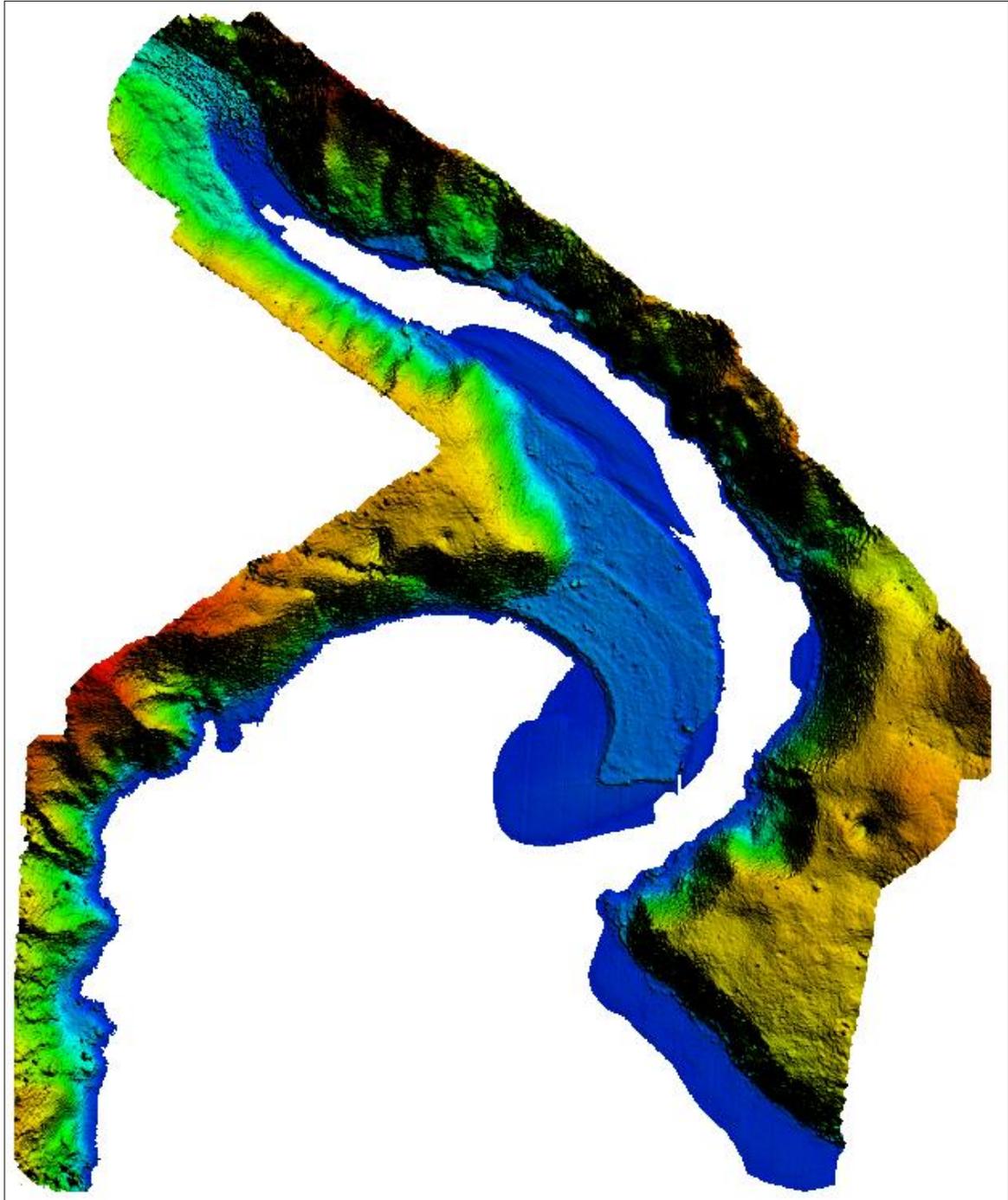
#### ***II.3.4.b. Orthophotographie***

A partir des photos très hautes définitions acquises avec le capteur Zenmuse P1, plusieurs orthophotographies de la zone de qualité différentes (Haute, moyenne, basse définitions) ont été générées avec le logiciel DJI terra.

### **II.3.5. Résultats**

#### **II.3.5.a. LiDAR**

Il est présenté ci-dessous le MNT à 15 cm obtenu à partir des acquisitions LiDAR.



**Figure 17 : MNT à 15 cm de la zone d'étude (Source : ECOTONE)**

### ***II.3.5.b. Orthophotographie***

Il est présenté ci-dessous l'orthophotographie obtenue à partir des acquisitions photogrammétriques.



***Figure 18 : Orthophotographie de la zone d'étude (Source : ECOTONE)***

## II.4. Bilan et enseignements sur la méthodologie mise en œuvre

### II.4.1. Levé topo-bathymétrique

L'objectif de la prestation était de disposer d'un état de référence topo-bathymétrique de la zone en vue de la mise en place d'un programme de suivi. Il ressort de la réalisation de cet état initial que :

- ⇒ La zone d'étude peut être décrite à l'aide de moyens bathymétriques seuls : il y a très peu voire pas d'espaces exondés à marée haute,
- ⇒ La bathymétrie de la zone permet de ne pas avoir à planifier les campagnes d'acquisition pour des conditions de marées bien spécifiques. Une acquisition par marées hautes de vives eaux permet de couvrir l'ensemble de la zone d'étude avec des moyens bathymétriques,
- ⇒ La conduite d'un levé bathymétrique avec un maillage à 5 m (profils d'acquisition espacés tous les 5 m) nécessite 3 jours d'acquisition si les conditions météo-océanologiques sont optimales comme celles nous avons eu la chance de rencontrer en octobre 2022.
- ⇒ Dans le cas d'une analyse surfacique de la zone d'étude, la description de la bathymétrie de la rivière Kwé avec un maillage à 5 m apparaît justifiée en raison du nombre et de la complexité des zones de dépôts et d'érosion constatées dans le cours aval de la rivière. En revanche, la surface de la baie Kwé et la relative homogénéité de la bathymétrie qui y est observée permet d'envisager de réduire l'effort d'échantillonnage dans cette zone (maillage à 10 voire 15 m (profils d'acquisition espacés de 10 à 15 m)).

### II.4.2. Acquisition orthophotos

Il convient de noter que les traitements n'ont pas permis de réaliser une orthophotographie sur l'intégralité de la zone d'intérêt. Les outils utilisés (DJI terra et d'autres logiciel de photogrammétrie comme Pix4D, MicMac par la suite) n'ont pas été en mesure d'identifier des points homologues en nombre suffisant pour permettre la création d'une orthophotographie sur les zones en eau relativement éloignées des berges.

Trois causes majeures durant l'acquisition, liées à l'environnement, sont suspectées dans le biais d'identification des points homologues sur cette partie en pleine eau, soit :

- ⇒ La hauteur d'eau à ce niveau, fond très peu visible avec uniformité des pixels contrairement aux zones moins profondes,
- ⇒ Les vaguelettes à ce niveau lié à une brise légère de Sud Est qui rentrée dans la baie,
- ⇒ La position du soleil au zénith (vol en plein milieu de journée) entraînant une réverbération importante et donc une surexposition sur ces photos.

Pour éviter à nouveau ce problème, il sera important dans une mission similaire (Acquisition LiDAR + ortho) de planifier les orthophotos en dehors des journées de vol LiDAR et lorsque l'heure de marée basse se situera plus en début ou fin de journée (soleil non au zénith).

### ***II.4.3. Acquisition Lidar***

Pour la zone strictement définie pour la présente étude, l'acquisition par LiDAR n'apparaît que peu pertinente car réduite à de très faibles surfaces exondées.

En revanche, la mise en œuvre de cette technique d'acquisition a révélé la topographie particulière de la zone de la forêt à araucaria, sur la rive droite de l'embouchure. Si un intérêt venait à être porté à cette zone, une acquisition LiDAR serait la seule envisageable en raison du couvert végétal et de la nature marécageuse des sols (très grande difficulté de progression à pied).

## Chapitre III - Appréciation des phénomènes de sédimentation

Afin d'apprécier le fonctionnement hydrosédimentaire du site, une analyse préliminaire des phénomènes de sédimentation a été réalisée en comparant les données issues du levé topobathymétrique réalisé dans le cadre de cette étude avec deux autres jeux de données :

- ⇒ Données issues du levé topobathymétrique de la rivière et de la baie réalisé en décembre 2013 par le cabinet Delvar pour le compte de Lyttoralys dans le cadre d'une étude commanditée par le Comité Consultatif Coutumier Environnemental (CCCE)<sup>5</sup>,
- ⇒ Données lidar présentées précédemment.

### III.1. Levé topobathymétrique de décembre 2013

L'OEIL a transmis à SEACOST le plan issu d'une campagne d'acquisition topo-bathymétrique réalisée en décembre 2013 par le cabinet Delvar pour le compte de Lyttoralys.

Le plan issu de ce levé est présenté à la figure suivante.

### III.2. Analyse 2013-2022

Dans l'incapacité d'obtenir les données brutes issues du levé de 2013, il n'a pu être exploité que les données 3D fournies sur le plan Autocad présenté à la figure suivante :

- ⇒ Points de sonde,
- ⇒ Isobathes.

Les données ainsi recueillies ont été exploitées pour générer un MNT (Modèle Numérique de Terrain) de la situation de la zone d'étude telle que décrite en 2013.

Ce MNT a été comparé à celui généré sur la base des données topobathymétriques collectées en octobre 2022.

Le bilan de la comparaison des deux MNT (2013-2022) est présenté à la Figure 20.

Afin de considérer l'imprécision altimétrique associée aux chaînes d'acquisition mises en œuvre en 2013 et en 2022 (estimée à environ  $\pm 5-7$  cm), il a été choisi de représenter en grisé à la Figure 20 les écarts altimétriques situés dans la gamme -10 à +10 cm. Ces écarts sont en effet considérés comme non significatifs car situés dans l'incertitude associée à la méthode d'acquisition.

---

<sup>5</sup> Etude de faisabilité de désengrèvement de l'estuaire de la rivière « Kwé » et de la baie (Littoralys, Safege, 2014)

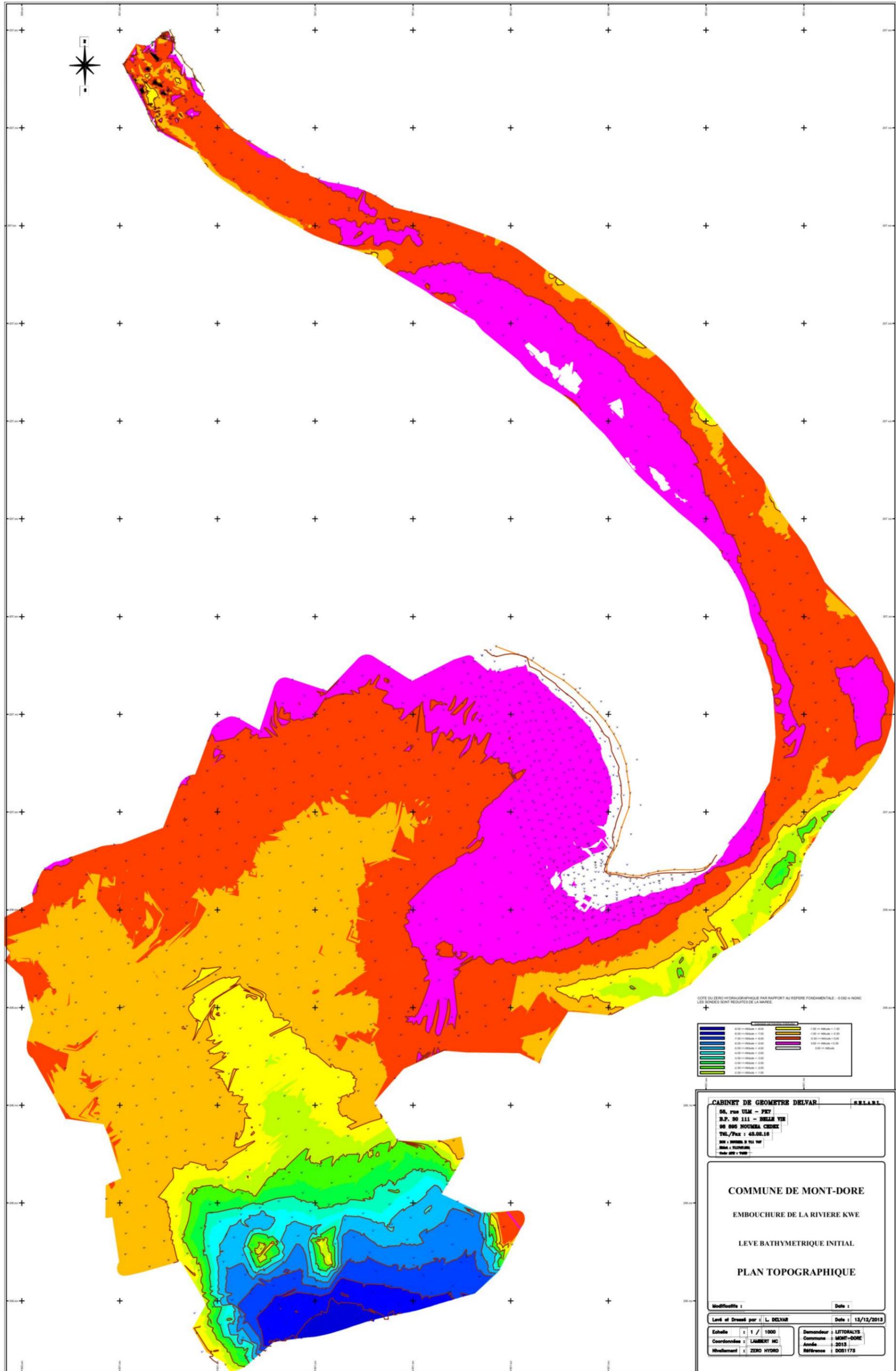


Figure 19 : Levé topo-bathymétrique DELVAR (Déc 2013) (Source : DELVAR)

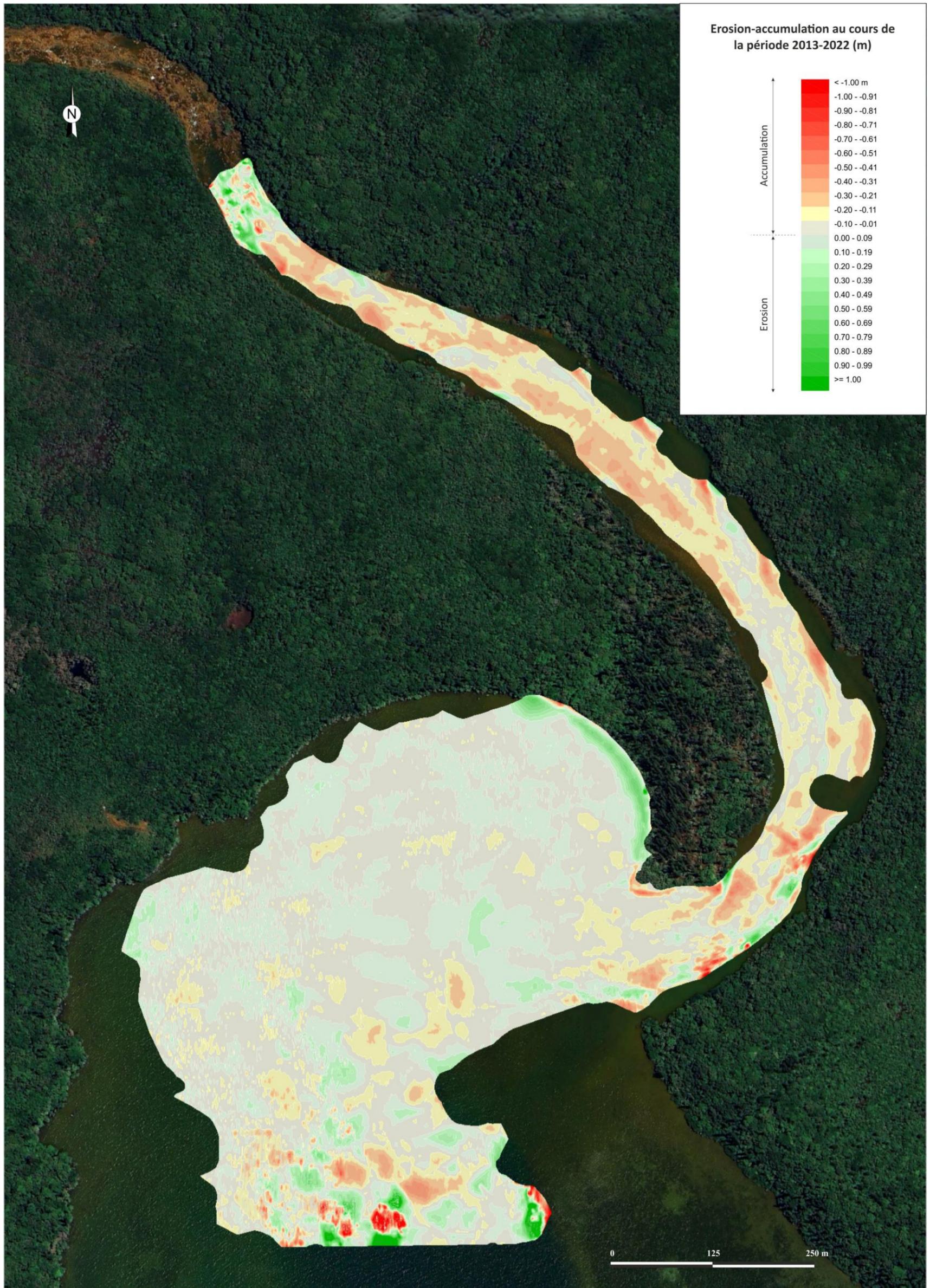


Figure 20 : Localisation et ampleur des phénomènes d'érosion et d'accumulation constatés au cours de la période 2013-2022

Il ressort de cette figure que :

- ⇒ Le nord de la zone d'étude, immédiatement en aval d'une zone de « rapides » de la Kwé, avec un lit marqué par la présence de dénivelés relativement forts dans le substratum rocheux affleurant, a connu une érosion entre 2013 et 2022. Ainsi, il est constaté dans cette zone « énergétique » des abaissements de la cote altimétrique du fond atteignant localement jusqu'à 1,23 m. Ceci résulte vraisemblablement des effets érosifs locaux induits en aval d'une zone de ressauts lors d'épisodes de crue (écoulements localement accélérés),
- ⇒ Sur le cours aval de la Kwé, on constate une tendance générale à l'accumulation de matériaux entre 2013 et 2022. Les cotes altimétriques du fond de la rivière ont ainsi augmenté selon les zones de +10 à +50 cm,
- ⇒ Au niveau de l'embouchure de la rivière, on constate :
  - Une accumulation de matériaux au niveau de l'embouchure proprement dite, avec une hausse de 3 à 40 cm des cotes altimétriques de la vaste plage affleurante présente au niveau du débouché de la rivière dans la baie Kwé,
  - Une érosion du bouchon sédimentaire situé à environ 200 m à l'ouest de l'embouchure. On observe ainsi des abaissements de 3 à 20 cm des cotes altimétriques du fond dans cette zone entre 2013 et 2022. Ceci résulte vraisemblablement d'un effet de « chasse » induit par un épisode de crue postérieur à 2013 et ayant fourni l'énergie suffisante pour redistribuer une partie du stock de sédiments préalablement accumulés à l'issue d'événement(s) pluvieux de moindre intensité. Ces matériaux semblent avoir été pour partie transportés vers le sud-ouest où on observe des zones d'accumulation.
- ⇒ Dans la baie Kwé, on note :
  - Une érosion verticale de la plage située au nord-est de la baie. Dans cette zone, on observe que les cotes altimétriques de la plage ont été abaissées de 20 à plus de 50 cm entre 2013 et 2022, sans que l'arrière-plage ne connaisse d'évolution altimétrique significative,
  - Une stabilité de la partie nord de la baie, avec des variations constatées globalement comprises dans la gamme  $\pm 5$  cm,
  - Un approfondissement d'environ 20 cm au niveau de la partie centrale de la baie, dans la zone située entre les 2 platiers littoraux,
  - La présence de 2 zones d'accumulation au sud de la zone d'étude. Après analyse, il apparaît que ces espaces correspondent aux deux « patates » identifiées lors du levé bathymétrique. L'accumulation constatée dans ces zones semble vraisemblablement liée à :
    - Un manque de détail dans les données issues du levé de 2013 (densité insuffisante au niveau de ces espaces présentant de fortes variations bathymétriques (habitat complexe)),
    - La croissance potentielle des formations coralliennes présentes sur ces patates : il est observé des variations des cotes altimétriques de 0,80 à 1,15 m, qui pourraient en partie s'expliquer par la croissance de colonies coralliennes branchues sur une période de presque 10 ans.

En termes de volumes, la comparaison brute des MNT (maillage à 1 m) indique, pour la zone délimitée à la Figure 20 :

- ⇒ 26 465 m<sup>3</sup> de matériaux accumulés,
- ⇒ 12 130 m<sup>3</sup> de matériaux évacués,

- ⇒ Soit une résultante accumulative de **14 335 m<sup>3</sup>** pour la période considérée. Pour la surface étudiée (36,35 ha), cela correspond à une accumulation moyenne de 4 cm de matériaux par m<sup>2</sup>.

Si l'on prend en compte une incertitude liée à la méthode d'acquisition estimée à  $\pm 10$  cm, c'est à dire en ne considérant pas les écarts mesurés dans cette gamme, les calculs de volumes sont les suivants :

- ⇒ 10 183 m<sup>3</sup> de matériaux accumulés,
- ⇒ 5 884 m<sup>3</sup> de matériaux évacués,
- ⇒ Soit une résultante accumulative de **4 299 m<sup>3</sup>** pour la période 2013-2022. Pour la surface étudiée (36,35 ha), cela correspond à une accumulation moyenne de près de 1 cm de matériaux par m<sup>2</sup>.

### III.3. Analyse 2022-2023

L'exploitation des données Lidar recueillies en juillet 2023 a permis de réaliser une analyse de l'évolution des fonds au cours de la période octobre 2022 – juillet 2023.

Comme déjà évoqué, la qualité des données Lidar au niveau des zones en eau n'est pas satisfaisante avec le matériel mobilisé. Ainsi, l'analyse n'a pu porter que sur les espaces exondés communs aux deux campagnes d'acquisition.

Le bilan de la comparaison des deux MNT produits pour ces espaces est présenté à la figure suivante.

Il ressort de cette figure que l'ensemble des zones considérées a globalement subi une érosion au cours de la période considérée avec une diminution des cotes altimétriques variant selon les endroits de 5 à plus de 40 cm :

- ⇒ Au niveau de la plage au nord-est de la baie Kwé, la tendance à l'érosion déjà mise en évidence pour la période 2013-2022 est confirmée pour la période 2022-2023 avec une érosion verticale de la zone d'estran de l'ordre de 15 cm et atteignant par endroit jusqu'à 44 cm,
- ⇒ Au niveau de l'embouchure, la vaste zone d'accumulation et le banc de sable situé en rive droite de la rivière a globalement connu une érosion, avec des variations altimétriques comprises entre -6 et +15 cm sur la période considérée,
- ⇒ Dans le cours de la rivière Kwé, la zone d'accumulation principale située en rive droite a elle aussi subi une érosion globale avec une diminution des cotes altimétriques de 5 à 38 cm,
- ⇒ Les deux autres zones exondées à marée basse et situées dans le cours aval de la Kwé ont elles aussi connu une érosion avec une diminution des cotes altimétriques de 7 à 18 cm.

En termes de volumes, la comparaison des MNT indique une balance déficitaire des espaces exondés considérés avec une perte de 4 500 m<sup>3</sup> de matériaux pour la période octobre 2022 – juillet 2023 pour une surface étudiée de 3,07 ha (soit une moyenne globale de presque 15 cm d'érosion verticale).

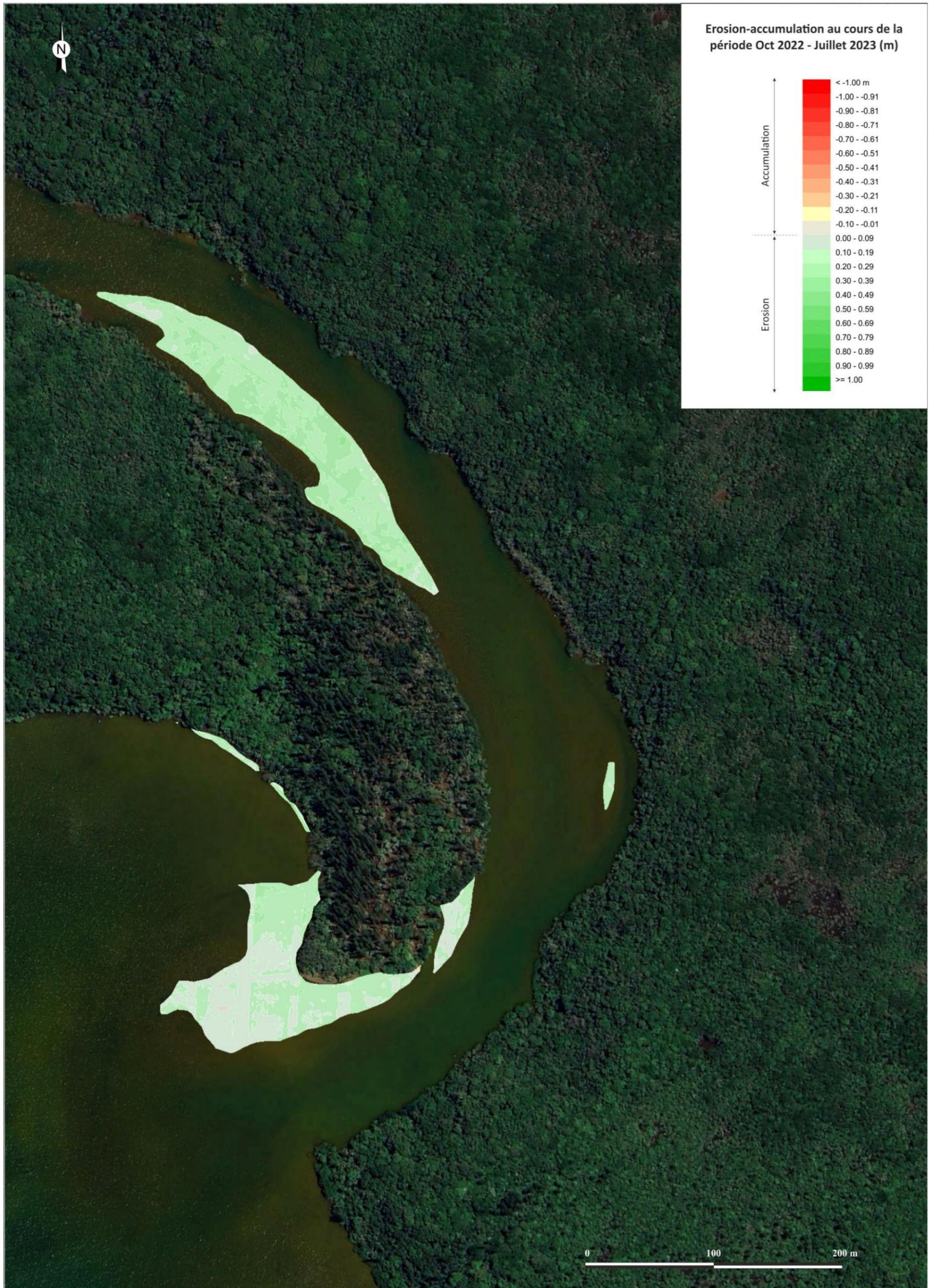


Figure 21 : Localisation et ampleur des phénomènes d'érosion et d'accumulation constatés au cours de la période Octobre 2022 – Juillet 2023

## Chapitre IV - Programme de suivi des dépôts sédimentaires

Ce chapitre a pour objet la définition d'un futur programme de suivi d'action pour le suivi des dépôts sédimentaires dans la zone d'étude. Ce chapitre est organisé en 3 parties :

- ⇒ Un panorama des méthodes envisageables avec leurs avantages et inconvénients,
- ⇒ Un bilan des études déjà conduites dans la zone d'étude, afin de rassembler :
  - Les conclusions obtenues à l'issue de ces différents travaux,
  - Les limites et contraintes associées aux différentes méthodologies mises en œuvre dans la zone d'étude,
- ⇒ Des propositions de programmes de suivi des dépôts sédimentaires dans la zone d'étude. Le descriptif méthodologique des différents volets de prestation proposés est volontairement détaillé afin de fournir les éléments à intégrer dans un éventuel cahier des charges en vue de la consultation des prestataires.

### IV.1. Panorama des méthodologies et techniques de suivi envisageables

#### ***IV.1.1. Méthodologies de mesure du transport solide***

La dynamique sédimentaire d'un cours d'eau peut être représentée comme une fluctuation permanente autour d'un équilibre entre les variables de contrôle (débit liquide  $Q$  et débit solide  $Q_s$ ) et les variables d'ajustement (diamètre des sédiments  $d$  et pente moyenne du fond du cours d'eau  $I$ ) (Malavoi et al. 2011).

Ces grandeurs déterminent en effet le potentiel de transport d'une charge solide par le cours d'eau et donc le transfert et/ou la remobilisation de matériaux au sein de la zone d'étude.

La dynamique sédimentaire d'une zone se trouve donc dépendante de :

- ⇒ L'importance des apports en matières solides parvenant depuis l'amont (flux « entrants »),
- ⇒ Les conditions d'écoulement qui déterminent la distribution des zones d'érosion et d'accumulation des matériaux meubles présents dans le système selon la répartition spatiale des vitesses d'écoulement en fond selon les principes présentés par le diagramme de Hjulström-Sundborg (voir figure suivante),
- ⇒ L'importance des charges solides sortant du domaine (flux « sortant ») en cas d'étude d'un tronçon de cours d'eau.

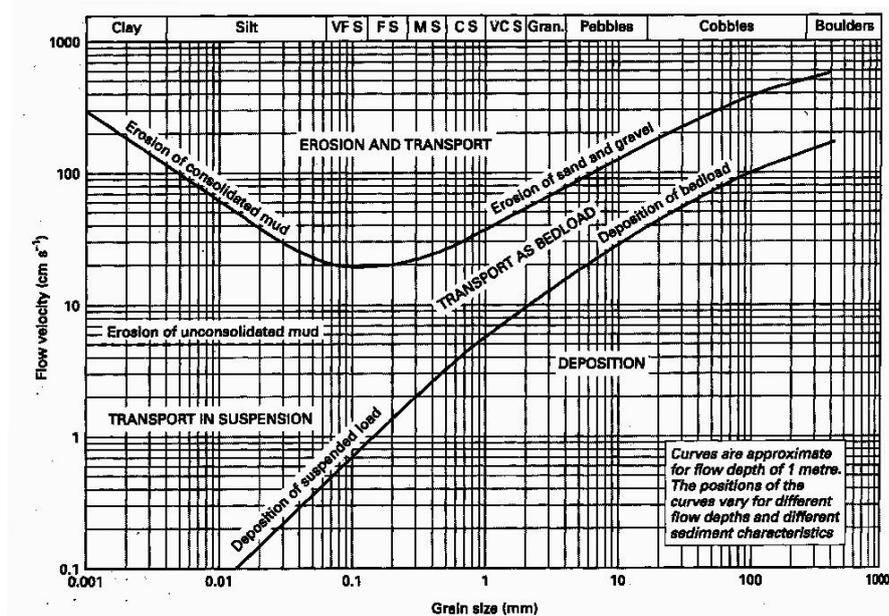


Figure 22 : Diagramme de Hjulström-Sundborg

Ainsi, le suivi de la dynamique sédimentaire au niveau d'une zone d'étude peut avoir pour objet d'apprécier et de quantifier les différents phénomènes impliqués dans le transport solide par le cours d'eau :

- ⇒ L'existence et l'importance des apports amont (flux « entrants »),
- ⇒ La dynamique hydrologique de la zone d'étude à l'origine de la distribution spatiale des zones d'érosion et d'accumulation,
- ⇒ L'existence et l'importance des flux solides « sortants ».

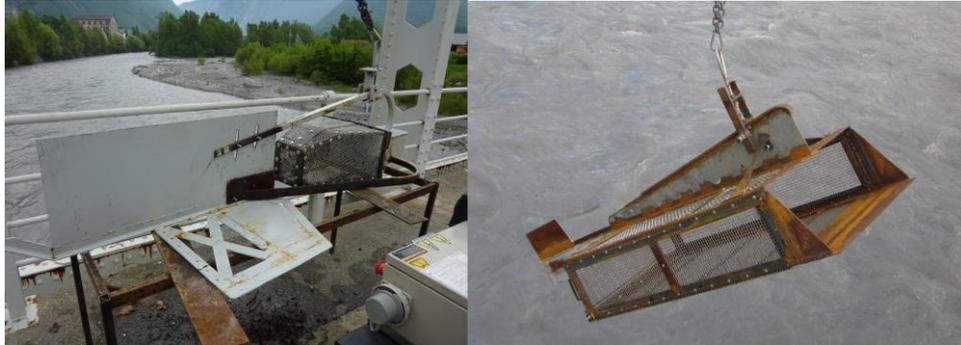
Dès lors, les mesures possibles et les méthodologies associées doivent être sélectionnées afin de correspondre aux besoins spécifiques relatif au projet.

Nous ne parlerons pas ici de la mesure des taux de sédimentation mesurés par exemple à l'aide de tubes à sédiments car cette méthode ne permet de quantifier que le flux de particules en suspension dans la colonne d'eau, sans considérer le charriage de fond.

La mesure des flux sédimentaires consiste en l'estimation de la quantité de sédiments (en volume ou masse) se déplaçant au travers d'une section d'un cours d'eau pendant un temps donné. Il existe plusieurs méthodologies de mesures de ces flux selon la nature du paramètre étudié. On peut ainsi distinguer :

- ⇒ La mesure du charriage, défini comme l'ensemble des sédiments se déplaçant sur le fond du lit de la rivière par glissement, roulement, ou petits sauts (saltation). Le charriage, exprimé en m<sup>3</sup>/s/m peut être mesuré par :
  - Des préleveurs de charriage assurant le prélèvement d'une charge solide sur une surface et pendant un temps donné. Il existe de nombreux types de préleveurs adaptés à différentes conditions de site :
    - Granulométrie des matériaux à échantillonner (diamètre d'entrée et maille du panier de stockage),
    - Nature et forme du fond afin de garantir la bonne efficacité du préleveur (collecter l'intégralité de la charge solide transitant au niveau du point de mesure),
    - Importance des flux solides pressentis (volume du panier de stockage),

Les préleveurs ont le double avantage de permettre une mesure directe du charriage et une estimation de la granulométrie transportée, qui peut être différente de la granulométrie de fond (transport partiel). Néanmoins, elle présente des incertitudes associées à son caractère intrusif (notamment lors de la pose sur le fond et de la récupération) et ponctuel à l'échelle de la section hydraulique.



**Figure 23 : Préleveurs de charriage (type Helley-Smith à gauche et Ehrenberger à droite)**

- Des trappes à sédiment, permettant de mesurer en continu la masse déposée à l'aide de capteurs de pression disposés au fond de la trappe (Reid et al. 1980, 1995, Habersack et al. 2001). Il est ainsi possible d'estimer en continu le transport solide instantané du fait de la mesure instantanée du poids cumulé. Cette méthode reste cependant très coûteuse car sa mise en œuvre est lourde (travaux de génie civil) y compris la mise en place d'un système pour retirer la trappe. Elle nécessite aussi une position stable du fond pour ne pas biaiser la mesure, idéalement sur un seuil.



**Figure 24 : Trappe à sédiment et dispositifs de relèvement (photos : F.Liebault)**

- Le suivi du fond par courantomètre profileur (ADCP). L'ADCP est un appareil couramment utilisé pour la mesure de vitesse (effet Doppler). Couplé à un GPS (ou utilisé en position fixe), ce dernier peut aussi permettre d'estimer le mouvement du fond et donc le charriage (Rennie et al. 2002, Rennie & Millar 2004).

La méthode de suivi de fond ADCP ("*bottom tracking*") reste cependant encore en développement car il est difficile de connaître exactement à quel niveau la vitesse de fond est estimée (suspension de fond ou charriage) selon la fréquence de l'appareil et les concentrations de sédiments au fond. De plus, il existe une inconnue qui est l'épaisseur de la couche en mouvement (en supposant que cette dernière bouge de façon homogène).

Il existe donc une forte incertitude sur l'estimation quantitative du charriage en particulier selon la fréquence de l'ADCP. Par contre, cette méthode permet d'avoir une bonne vision qualitative des variations dans l'espace du charriage et ainsi aider à l'intégration transversale du flux.

#### ***IV.1.2. Evolutions des fonds : localisation et ampleur des dépôts sédimentaires***

La méthode ou technique de suivi à adopter dépend des objectifs que l'on cherche à atteindre et des résultats attendus des mesures. En effet, la disponibilité des équipements et du personnel, le coût des opérations ou des investissements constituent des facteurs déterminants à considérer pour orienter les choix par rapport aux attentes et aux moyens financiers disponibles. Il est donc nécessaire d'identifier les besoins avant d'opter pour une méthode ou une technique de mesure.

Dans le cas présent, il s'agit de collecter les éléments permettant de localiser et d'apprécier l'ampleur des accumulations de matériaux dans la zone d'étude. Pour ce faire, plusieurs méthodologies sont envisageables :

- ⇒ Analyse diachronique par exploitation de photos aériennes,
- ⇒ Suivi topobathymétrique.

##### ***IV.1.2.a. Analyse diachronique***

Cette méthode consiste à exploiter des photos aériennes ou satellites géoréférencées afin de digitaliser sur chacune d'elle les contours des zones d'accumulation de matériaux.

Avantages :

- ⇒ Disponibilité d'importantes bases de données avec de nombreux clichés satellites,
- ⇒ Coûts réduits.

Inconvénients :

- ⇒ Qualité de l'information et de l'interprétation dépendante de la qualité du cliché exploité (résolution, couverture nuageuse, position du soleil),
- ⇒ Difficulté d'exploiter des clichés satellites en zone littorale en raison de niveaux d'eau variables entre les acquisitions,
- ⇒ Au niveau d'une zone en eau, ajout de contraintes additionnelles susceptibles de dégrader l'exploitabilité du cliché : turbidité du plan d'eau, reflets sur le plan d'eau potentiellement induits par l'agitation de la surface du plan d'eau en cas de vent ou par un soleil non placé au zénith lors de la prise de vue,
- ⇒ Absence de référentiel altimétrique ne permettant de fournir qu'une information surfacique,
- ⇒ Incertitudes associées à la donnée surfacique collectée induites par la qualité du cliché (voir précédemment) ainsi que par les conditions de marée influençant l'altimétrie du plan d'eau et donc la surface des espaces exondés.

Modalités de limitation des incertitudes inhérentes à la méthode :

- ⇒ Sélection des clichés offrant les meilleures caractéristiques intrinsèques (résolution, conditions météorologiques),
- ⇒ Si possible, sélectionner les clichés obtenus pour des conditions de marée similaires,

Coûts :

- ⇒ Le prix d'achat d'un cliché satellite couvrant l'ensemble de la zone d'étude est de l'ordre de 60 000 XPF HT.

#### IV.1.2.b. Techniques d'acquisition topo bathymétriques au sol

##### vii. Levé topographique terrestre

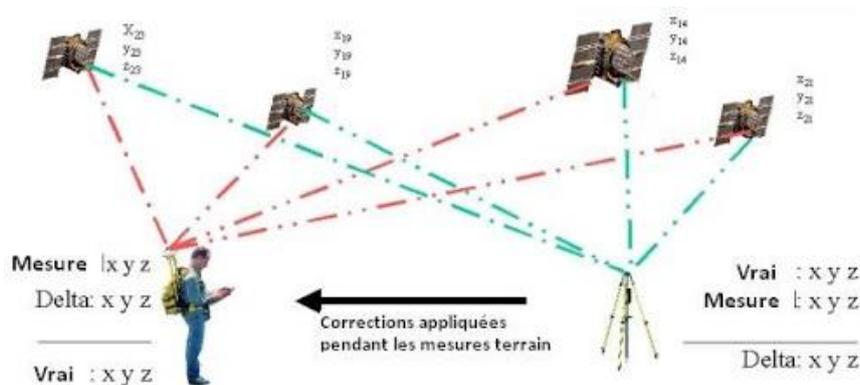
Le levé topographique terrestre peut être réalisé avec deux techniques d'acquisition :

- ⇒ A l'aide d'un GPS différentiel (positionnement centimétrique),
- ⇒ A l'aide d'un tachéomètre (station totale).

#### **GPS différentiel (DGPS)**

Le GPS différentiel implique la mobilisation d'au moins deux antennes GPS (*Global Positioning System*) :

- ⇒ Une station de référence (base) est installée au niveau d'un point fixe dont les coordonnées ont été définies avec précision. Le récepteur GPS installé au niveau de cette station de référence calcule sa position à l'aide des signaux fournis par les satellites disponibles. Cette position calculée en temps réel est comparée à la position connue du point de référence, ce qui permet d'obtenir en temps réel les écarts constatés. Les corrections à appliquer afin de compenser ces écarts sont émises en temps réel par radio à destination des antennes GPS en acquisition,
- ⇒ Une ou plusieurs antennes ambulantes (rovers) transportées par le(s) topographe(s) pour collecter les points d'acquisition. La correction différentielle transmise par radio par la station de base permet d'affiner la position calculée par chaque rover sur la base de la réception des seuls signaux satellites.



**Figure 25 : Principe de fonctionnement d'un GPS différentiel (source : Wikipédia)**

Avantages :

- ⇒ Moyens techniques répandus et nombreux topographes équipés localement (facilité de mobilisation),
- ⇒ Précision centimétrique si station de base établie au niveau d'un point de référence de qualité topographique.

Inconvénients :

- ⇒ Méthode tributaire des conditions de progression à pied dans la zone d'étude (dénivelé, cours d'eau, couvert végétal, ...),
- ⇒ Fastidieux pour de grandes étendues, surtout s'il est attendu une forte densité de points d'acquisition,
- ⇒ Méthodologie soumise à des contraintes de réception des différents signaux par le ou les rovers :
  - Signaux satellites : dégradation voire perte de la réception des signaux provenant des satellites sous couvert végétal dense (masque, multi-trajet, ...),
  - Signal radio transmettant les corrections différentielles : le relief peut constituer un obstacle à la bonne couverture radio de la zone d'étude. Ainsi, en cas de zone encaissée/accidentée, il peut être nécessaire de déplacer la station de référence afin de garantir une couverture radio de l'ensemble de la zone à lever,
- ⇒ Possible biais induit par l'enfoncement de la canne support du rover lors de l'acquisition de point topographique au niveau de sols meubles ou non stabilisés (sable, boue, ...).

Modalités de limitation des incertitudes inhérentes à la méthode :

- ⇒ Pré-enregistrement dans le contrôleur des profils/points d'acquisition pour garantir :
  - Une homogénéité de la densité des points d'acquisition par le topographe (guidage sur le terrain),
  - Une bonne complémentarité des données topographiques terrestres collectées avec celles recueillies dans le cours d'eau,
  - Une meilleure précision de l'analyse ultérieure par comparaison de MNT.
- ⇒ Matérialisation et enregistrement de points de référence et de points de contrôle de qualité topographique (support métallique à tête hémisphérique avec pointe compatible avec l'utilisation d'un plan optique ou laser) sur lesquels :
  - Implanter la station de référence (points de référence),
  - Effectuer les vérifications de la bonne qualité du positionnement GPS (points de contrôle).

Ces bornes devront être implantées de manière durable dans un sol induré (scellé dans un rocher) afin de constituer les points de calage fixes à partir desquels seront réalisées les campagnes d'acquisition dans la zone.

Les coordonnées XYZ de chacun de ces points seront établies de manière précise par un rattachement statique rapide au DGPS prévoyant à minima 2 périodes d'enregistrement statiques d'au moins 15 min séparées de 3 heures,

- ⇒ Mise en œuvre de pointe de canne topographique à bout plat pour utilisation sur terrain meuble.

Coûts :

- ⇒ Le prix d'achat d'un GPS centimétrique est de plusieurs millions de francs,
- ⇒ Le prix de location d'un couple GPS centimétrique (base + rover) est de 25 à 30 000 XPF/j hors paramétrage,
- ⇒ Le cout d'intervention d'un topographe équipé est généralement de l'ordre de 120 000 XPF HT par jour de terrain hors déplacement, incluant la production du plan correspondant.

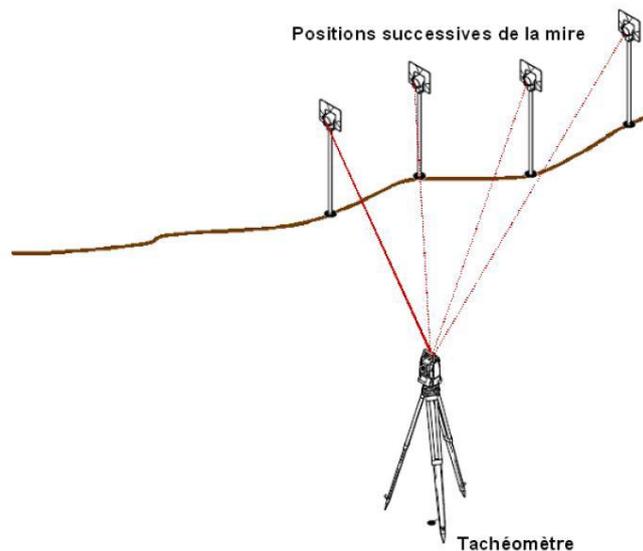
## **Tachéomètre (station totale)**

Le tachéomètre est un appareil servant à mesurer les angles horizontaux et verticaux entre deux cibles, ainsi que la distance entre ces cibles. Les mesures prises permettent de caractériser un triangle géodésique, et donc soit d'établir une carte ou un plan, soit de vérifier la cohérence entre un plan et la réalité du terrain.

La mesure des distances se fait grâce à un télémètre à visée infrarouge ou laser intégré dans le tachéomètre. La mesure se fait à l'aide d'un prisme réflecteur tétraédrique donc catoptrique, placé à la verticale du point que l'on souhaite mesurer à l'aide d'une nivelle sphérique. L'utilisation d'un système laser permet aussi d'effectuer une mesure de distance par télémétrie laser, ce qui permet d'utiliser comme cible des endroits inaccessibles.

La mesure de la position relative de la mire, placée à une hauteur connue à la verticale du point à localiser, est obtenue par calcul polaire. Il s'agit d'une mesure relative par rapport à la position du tachéomètre. Au-delà de 200 à 300 m, la visée devient imprécise.

Aujourd'hui, les appareils actuels sont robotisés et intègrent une télécommande à liaison hertzienne permettant au topographe de travailler seul (déplacement avec la mire avec suivi automatique par le tachéomètre).



**Figure 26 : Principe du tachéomètre (Jaud, 2011)**

Avantages :

- ⇒ Moyens techniques répandus et nombreux topographes équipés localement (facilité de mobilisation),
- ⇒ Précision millimétrique si tachéomètre établi au niveau d'un point de référence de qualité topographique,
- ⇒ Acquisition non soumise à la réception de signaux satellites ou radio,

Inconvénients :

- ⇒ Nécessité de positionner le tachéomètre sur un/des point(s) de référence préalablement levé(s) au DGPS,
- ⇒ Méthode ne permettant de lever que les espaces visibles depuis le tachéomètre (nécessité d'une absence de masque visuel entre le tachéomètre et la mire). Ceci :
  - Rend l'acquisition délicate voire impossible en cas de couvert végétal développé,

- Peut conduire à devoir multiplier les points d'implantation du tachéomètre et donc les points de référence à établir au préalable en cas d'acquisition dans une zone au relief accidenté,
- ⇒ Méthode tributaire des conditions de progression à pied dans la zone d'étude (dénivelé, cours d'eau, couvert végétal, ...),
- ⇒ Fastidieux pour de grandes étendues, surtout s'il est attendu une forte densité de points d'acquisition,
- ⇒ Possible biais induit par l'enfoncement de la canne support du rover lors de l'acquisition de point topographique au niveau de sols meubles ou non stabilisés (sable, boue, ...).

Modalités de limitation des incertitudes inhérentes à la méthode :

- ⇒ Pré-enregistrement dans le contrôleur des profils/points d'acquisition pour garantir :
  - Une homogénéité de la densité des points d'acquisition par le topographe (guidage sur le terrain),
  - Une bonne complémentarité des données topographiques terrestres collectées avec celles recueillies dans le cours d'eau,
  - Une meilleure précision de l'analyse ultérieure par comparaison de MNT,
- ⇒ Matérialisation et enregistrement de points de référence et de points de contrôle de qualité topographique (support métallique à tête hémisphérique avec pointe compatible avec l'utilisation d'un plan optique ou laser) sur lesquels :
  - Implanter la station de référence (points de référence),
  - Effectuer les vérifications de la bonne qualité du positionnement (points de contrôle).

Ces bornes devront être implantées de manière durable dans un sol induré (scellé dans un rocher) afin de constituer les points de calage fixes à partir desquels seront réalisées les campagnes d'acquisition dans la zone.

Les coordonnées XYZ de chacun de ces points seront établies de manière précise par un rattachement statique rapide au DGPS prévoyant à minima 2 périodes d'enregistrement statiques d'au moins 15 min séparées de 3 heures,

- ⇒ Mise en œuvre de pointe de canne topographique à bout plat pour utilisation sur terrain meuble.

Coûts :

- ⇒ Le prix d'achat d'une station totale est de plusieurs millions de francs,
- ⇒ Le cout d'intervention d'un topographe équipé est généralement de l'ordre de 120 000 XPF HT par jour de terrain hors déplacements, incluant la production du plan correspondant.

#### *viii. Levé bathymétrique*

Le levé bathymétrique des espaces en eau est réalisé à l'aide d'un sondeur acoustique établissant la hauteur de la colonne d'eau par la mesure du temps de trajet d'un signal acoustique réfléchi par le fond. Il existe 2 types de sondeur acoustiques :

- ⇒ Sondeur monofaisceau,
- ⇒ Sondeur multifaisceaux.

Quel que soit le sondeur, celui-ci doit être couplé à un système de positionnement DGPS centimétrique fournissant les coordonnées XYZ du porteur au moment de la mesure de la profondeur. Pour les zones soumises à l'influence de la marée, les variations de la cote altimétrique du plan d'eau sont prises en compte par la mesure de l'altitude du porteur par le GPS.

### **Sondeur monofaisceau**

Les sondeurs monofaisceau émettent un signal acoustique émis vers le fond par un transducteur dont l'ouverture est variable (généralement 5 à 10°) et réceptionne l'écho de ce signal réfléchi sur le fond. Connaissant la célérité moyenne du son dans la colonne d'eau à partir de la mesure in situ des paramètres température et conductivité de l'eau, la mesure du temps de parcours permet d'accéder à la profondeur minimale entre l'émetteur/récepteur et le fond.

Le principe du levé bathymétrique monofaisceau est le suivant : Le navire instrumenté se déplace sur la zone à lever. La station d'acquisition installée à bord, récupère les informations en provenance des divers instruments de mesure, c'est-à-dire :

- ⇒ La position (latitude, longitude et élévation de la mer) indiquée par le GPS différentiel,
- ⇒ La profondeur sous le bateau donnée par le sondeur.

Le système analyse et traite les informations, et à une latitude et une longitude il associe une profondeur.

La récurrence des impulsions du sondeur proposé, et donc des mesures, est généralement supérieure à 10 Hz (10 mesures par seconde). La distance entre deux mesures consécutives le long d'un profil (ou radiale) de mesure est donc très faible.

La vitesse du navire est ajustée à la densité de points souhaitée le long du profil.

L'acquisition est donc réalisée de manière ponctuelle, à la verticale du transducteur. Le levé bathymétrique est donc réalisé le long de profils d'acquisition prédéfinis dont l'espacement est établi selon la finesse du maillage attendu. Pour des raisons de manœuvrabilité du navire porteur, il est délicat de réaliser correctement un levé au sondeur mono faisceau le long de profils dont l'espacement est inférieur à 1,5 m.

La précision en altimétrie de la chaîne d'acquisition (GPS + sondeur) est généralement de  $\pm 10$  cm, voire moins selon les spécifications techniques du sondeur mis en œuvre.

Avantages :

- ⇒ Moyens techniques répandus et plusieurs hydrographes équipés localement (facilité de mobilisation),
- ⇒ Simplicité d'installation permettant l'utilisation d'un navire porteur de petites dimensions pour les zones de faibles fonds ou présentant des espaces de manœuvre réduits,

Inconvénients :

- ⇒ Mobilisation d'un système de positionnement DGPS avec les inconvénients associés aux contraintes de réception des corrections différentielles,
- ⇒ Méthode ponctuelle ne pouvant fournir de levé à une densité inférieure au 1/150<sup>ème</sup> (profils d'acquisition espacés tous les 1,5 m),
- ⇒ Méthode tributaire des conditions d'évolution sur le plan d'eau (profondeur suffisante, courants, agitations, ...).

Modalités de limitation des incertitudes inhérentes à la méthode :

- ⇒ Matérialisation et enregistrement de points de référence et de points de contrôle de qualité topographique (support métallique à tête hémisphérique avec pointe compatible avec l'utilisation d'un plan optique ou laser) sur lesquels :
  - Implanter la station GPS de référence (points de référence),
  - Effectuer les vérifications de la bonne qualité du positionnement GPS (points de contrôle).

Ces bornes devront être implantées de manière durable dans un sol induré (scellé dans un rocher) afin de constituer les points de calage fixes à partir desquels seront réalisées les campagnes d'acquisition dans la zone.

Les coordonnées XYZ de chacun de ces points seront établies de manière précise par un rattachement statique rapide au DGPS prévoyant à minima 2 périodes d'enregistrement statiques d'au moins 15 min séparées de 3 heures,

- ⇒ Réalisation de profils de contrôle au niveau d'espaces occupés par des fonds indurés non soumis à des phénomènes d'accumulation ou d'érosion (vérification de la qualité de la mesure de la profondeur),
- ⇒ Détermination des coordonnées des extrémités des profils d'acquisition pour standardisation des campagnes d'acquisition et limitation de l'incertitude associée à la génération du MNT (interpolation).

Coûts :

- ⇒ Le prix d'achat d'un sondeur monofaisceau et du logiciel d'acquisition bathymétrique est de plusieurs millions de francs,
- ⇒ Le cout d'un levé bathymétrique au sondeur monofaisceau est généralement de l'ordre de 200 000 XPF HT par jour de terrain hors déplacements, incluant la production du plan correspondant.

### **Sondeur multifaisceaux**

Les sondeurs multifaisceaux émettent un signal acoustique depuis un ensemble de transducteurs à large ouverture angulaire latérale. Ceci permet en un seul passage de décrire la bathymétrie d'une bande du fond large d'environ 4 à 6 fois la hauteur d'eau.

Les sondeurs multifaisceaux sont interfacés avec un système de positionnement DGPS comprenant deux rovers embarqués afin de disposer d'une description la plus fine possible du cap du navire porteur.

Ces sondeurs disposent également de centrales d'attitude inertielles permettant de connaître la position du bateau dans les trois axes, afin de corriger au mieux la position de la fauchée par rapport à la verticale du lieu.

Avantages :

- ⇒ Très grande densité des points de sonde (insonification complète du fond) permettant l'établissement de MNT d'une très grande précision,
- ⇒ Grande largeur d'acquisition par profil, permettant d'optimiser les temps d'acquisition, notamment par grands fonds,

Inconvénients :

- ⇒ Système d'acquisition complexe et exploité par un faible nombre de prestataires locaux (impliquant un investissement technique et financier conséquent à l'achat),
- ⇒ Complexité d'installation et d'interfaçage des différents constituants de la chaîne d'acquisition qui ne rend pas aisée une installation temporaire sur un porteur de petites dimensions,
- ⇒ Méthode tributaire des conditions d'évolution sur le plan d'eau (profondeur suffisante, courants, agitations, ...).

Modalités de limitation des incertitudes inhérentes à la méthode :

- ⇒ Matérialisation et enregistrement de points de référence et de points de contrôle de qualité topographique (support métallique à tête hémisphérique avec pointe compatible avec l'utilisation d'un plan optique ou laser) sur lesquels :
  - Implanter la station GPS de référence (points de référence),
  - Effectuer les vérifications de la bonne qualité du positionnement GPS (points de contrôle).

Ces bornes devront être implantées de manière durable dans un sol induré (scellé dans un rocher) afin de constituer les points de calage fixes à partir desquels seront réalisées les campagnes d'acquisition dans la zone.

Les coordonnées XYZ de chacun de ces points seront établies de manière précise par un rattachement statique rapide au DGPS prévoyant à minima 2 périodes d'enregistrement statiques d'au moins 15 min séparées de 3 heures,

- ⇒ Réalisation de profils de contrôle au niveau d'espaces occupés par des fonds indurés non soumis à des phénomènes d'accumulation ou d'érosion (vérification de la qualité de la mesure de la profondeur),

Coûts :

- ⇒ Le prix d'achat des différents constituants d'une chaîne d'acquisition multifaisceaux est de plusieurs dizaines de millions de francs,
- ⇒ Le coût d'un levé bathymétrique au sondeur multifaisceaux est généralement de l'ordre de 600 000 XPF HT par jour de terrain hors déplacements, n'incluant pas systématiquement le traitement des données et la production du plan correspondant.

#### ***IV.1.2.c. Techniques d'acquisition topo bathymétriques aéroportées***

##### *ix. Photogrammétrie*

La photogrammétrie est une technique qui consiste à effectuer des mesures dans une scène, en utilisant la parallaxe obtenue entre des images acquises selon des points de vue différents. Cette technique repose sur une modélisation rigoureuse de la géométrie des images et de leur acquisition afin de reconstituer une copie 3D exacte de la réalité.

Pour le principe d'acquisition d'une imagerie aérienne, un objet volant (avion, drone, ...) équipé d'une caméra survole à altitude constante la zone d'intérêt. Il suit des axes de vols rectilignes prédéfinis par un plan de vol. Pour l'imagerie satellitaire, les constructeurs utilisent certaines lois physiques pour choisir parmi les différents types d'orbites possibles celle qui sera la plus adaptée aux capacités d'acquisition attendues.

Les éléments embarqués pour l'imagerie aérienne sont la centrale inertielle qui enregistre les altitudes du porteur et le DGPS pour enregistrer les coordonnées de chaque cliché. Pour l'imagerie satellitaire, les instruments embarqués à bord des satellites sont généralement les centrales inertielles, les antennes GPS, les disques durs de stockage, les antennes pour communiquer avec les stations au sol et les capteurs d'acquisition d'images.

Auparavant tributaire de la mobilisation de moyens relativement lourds (avion pilotés, satellites, ...), la photogrammétrie désormais réalisée selon la technique « *Structure from Motion (SfM)* » permet d'intervenir à l'aide de moyens très légers (drones) exactement sur la zone d'étude. La SfM permet de reconstruire un modèle 3D d'une zone à partir de plusieurs images superposées prises avec la même caméra sous différents angles.

Il peut ainsi être produit :

- ⇒ Une orthophoto mosaïque géoréférencée couvrant la zone d'étude,
- ⇒ Un modèle numérique d'élévation issue du calcul de l'altitude correspondant à chacun des pixels de l'ortho mosaïque.

C'est la méthode de photogrammétrie qui paraît la plus adaptée pour les besoins identifiés dans le cas présent.

Avantages :

- ⇒ Méthode permettant de couvrir de grandes surfaces dans un temps très court, (budget limité),
- ⇒ Technique SfM permettant de mobiliser des moyens volants très légers (drone) offrant une grande facilité d'intervention par rapport à l'organisation d'une campagne aéroportée ou à la commande d'images satellites,
- ⇒ Très grande densité des points de mesure permettant l'établissement de MNT d'une très grande précision,

Inconvénients :

- ⇒ Méthode ne permettant pas la description des espaces en eau,
- ⇒ Précision altimétrique finale dépendante de la précision des coordonnées des points de contrôle au sol (GCP), notamment dans un objectif de suivi temporel des changements d'élévation d'une surface d'étude.

Modalités de limitation des incertitudes inhérentes à la méthode :

- ⇒ Matérialisation et enregistrement de points de référence et de points de contrôle de qualité topographique (support métallique à tête hémisphérique avec pointe compatible avec l'utilisation d'un plan optique ou laser) sur lesquels :
  - Implanter la station GPS de référence (points de référence),
  - Effectuer les vérifications de la bonne qualité du positionnement GPS (points de contrôle).

Ces bornes devront être implantées de manière durable dans un sol induré (scellé dans un rocher) afin de constituer les points de calage fixes à partir desquels seront réalisées les campagnes d'acquisition dans la zone.

Les coordonnées XYZ de chacun de ces points seront établies de manière précise par un rattachement statique rapide au DGPS prévoyant à minima 2 périodes d'enregistrement statiques d'au moins 15 min séparées de 3 heures,

Coûts :

- ⇒ Le cout d'une campagne d'intervention par drone et de restitution photogrammétrique est généralement de l'ordre de 400 000 XPF HT par jour de terrain hors déplacements, mais est directement dépendant de la surface de la zone d'étude (traitement photogrammétrique).

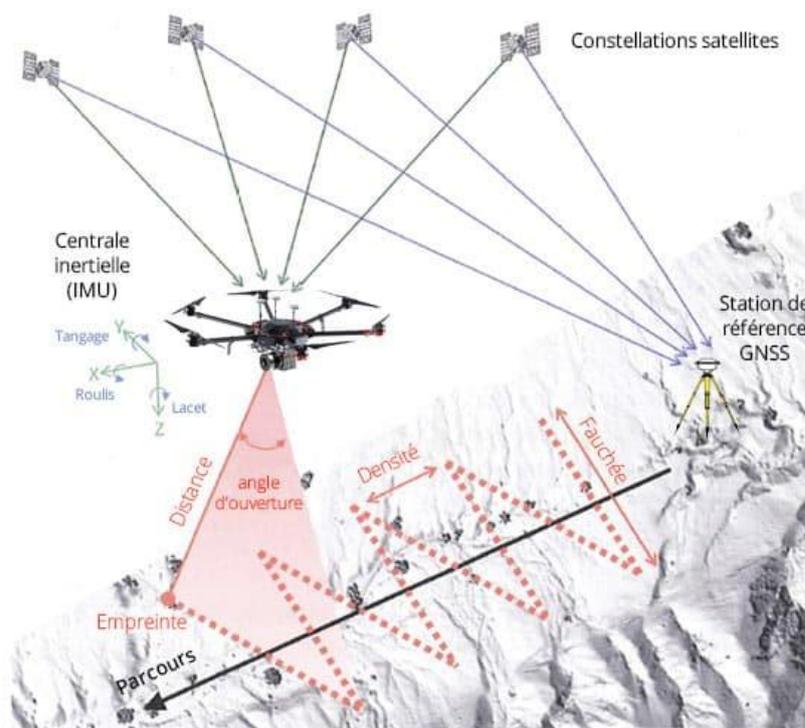
x. Lidar

Le Lidar est une technologie basée sur la mesure de distances par l'intermédiaire d'un scanner laser embarqué à bord d'un avion, d'un hélicoptère ou désormais d'un drone.

Fixé à bord de celui-ci, le système calcule le temps d'aller-retour d'une impulsion laser entre l'instant de son émission au niveau de la tête laser et sa réflexion sur la surface terrestre.

Un LiDAR est composé de 4 éléments principaux :

- ⇒ Un capteur laser actif : c'est la source qui émet les impulsions lasers et qui les envoie dans différentes directions. Le plus souvent ce capteur est composé d'une ou plusieurs sources qui vont envoyer des faisceaux de lumière concentrés sur un miroir en rotation pour couvrir 360°,
- ⇒ Une centrale inertielle de précision : elle enregistre chacun des mouvements (roulis, tangage et lacet) en temps réel et avec une fréquence très élevée pour comprendre quelle est l'orientation, la direction et les mouvements ou vibration produits afin de pouvoir corriger la position des mesures acquises dans l'espace,
- ⇒ Un système de positionnement GPS qui enregistre les informations de position du capteur dans l'espace (en x, y et z) grâce à la récupération de données GNSS de précision qui seront par la suite couplées ou non avec une base au sol pour le positionnement en absolu du nuage de points,
- ⇒ Un micro-ordinateur qui sert à récupérer, stocker et partager les données acquises.



**Figure 27 : Principe de fonctionnement d'un lidar sur drone (Source : escadrone.com)**

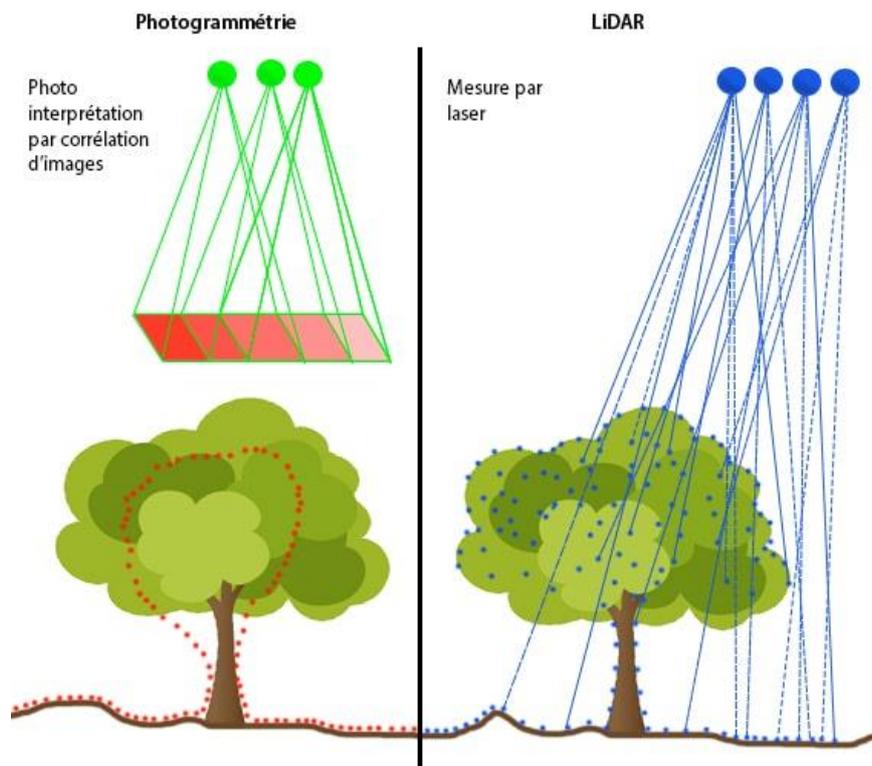
Par rapport à la photogrammétrie, l'intérêt du relevé Lidar par drone (lasergrammétrie) est de réaliser directement de la mesure :

- ⇒ Chaque distance mesurée est connue avec une certaine précision, qui est relative au laser émis et relative à la distance de l'objet,
- ⇒ Y associer des données d'orientation grâce à la centrale inertielle de précision (qui lui permet de connaître l'orientation du faisceau envoyé et sa direction),
- ⇒ De le coupler avec un GPS de précision (pour connaître la position relative ou absolue de chacun des lasers émis par le système).

L'agrégation de ces trois éléments fait que l'on est capable de maîtriser dans une certaine mesure la précision du relevé.

A l'inverse, la photogrammétrie est une technique de mesure par interprétation ; un ensemble d'images est analysé informatiquement pour repérer des points de concordance entre les images et positionner ces points dans l'espace en prenant compte de différents éléments comme la position et l'orientation des images ainsi que la couleur de chaque pixel.

L'approche est donc bien différente entre d'un côté de la mesure par laser avec le LiDAR et de l'autre de l'interprétation logicielle d'images pour la photogrammétrie



**Figure 28 : Comparaison données obtenues par photogrammétrie et par Lidar (Source : escadron.com)**

Avantages :

- ⇒ Méthode permettant de couvrir de grandes surfaces dans un temps très court, (budget limité),
- ⇒ Technique permettant de mobiliser des moyens volants très légers (drone) offrant une grande facilité d'intervention,
- ⇒ Très grande densité des points de mesure permettant l'établissement de MNT d'une très grande précision,

Inconvénients :

- ⇒ Les surfaces réfléchissantes (eau) peuvent poser problème car le laser peut être :
  - Réfléchi par la surface et ainsi générer des erreurs dans le positionnement de certains points.
  - Diffracté à l'interface air-eau, dont l'état de surface est directement dépendant des conditions météo-océanologiques (agitation), induisant une imprécision des mesures au-delà quelques centimètres sous l'eau. Il existe des lidars conçus pour la bathymétrie qui semblent pouvoir mesurer jusqu'à 40 m de profondeur. Cependant, leur encombrement et leur poids implique la mobilisation de porteurs de grande taille (avion, hélicoptère) et leur capacité de mesure reste toujours dépendante de la turbidité de l'eau,
- ⇒ La précision de la donnée : un lidar cumule un certain nombre de capteurs pour déterminer la position de chaque point et cela amène une erreur cumulée incompressible que l'on va considérer comme du « bruit ». Il est ainsi difficile de descendre en deçà de 1 à 2 cm d'erreur avec les systèmes présentés.

Modalités de limitation des incertitudes inhérentes à la méthode :

- ⇒ Matérialisation et enregistrement de points de référence et de points de contrôle de qualité topographique (support métallique à tête hémisphérique avec pointe compatible avec l'utilisation d'un plan optique ou laser) sur lesquels :
  - Implanter la station GPS de référence (points de référence),
  - Effectuer les vérifications de la bonne qualité du positionnement GPS (points de contrôle).

Ces bornes devront être implantées de manière durable dans un sol induré (scellé dans un rocher) afin de constituer les points de calage fixes à partir desquels seront réalisées les campagnes d'acquisition dans la zone.

Les coordonnées XYZ de chacun de ces points seront établies de manière précise par un rattachement statique rapide au DGPS prévoyant à minima 2 périodes d'enregistrement statiques d'au moins 15 min séparées de 3 heures,

Coûts :

- ⇒ Le cout d'une campagne d'intervention par drone et d'acquisition lidar est généralement de l'ordre de 400 000 XPF HT par jour de terrain hors déplacements, mais est directement dépendant de la surface de la zone d'étude (traitement Lidar).

#### ***IV.1.3. Description des matériaux***

Une fois la balance des volumes de matériaux établie ou évaluée, il peut s'avérer pertinent de mener les analyses permettant d'apprécier l'origine et la nature de ces matériaux.

Plus précisément, il peut s'agir de :

- ⇒ Identifier leur origine (terrigène ou marine),
- ⇒ Pour des matériaux d'origine terrigène, apprécier la nature des sols érodés en amont à partir des caractéristiques physico-chimiques des sédiments accumulés (teneurs en métaux considérés comme représentatifs de strates d'altération du régoilite),

- ⇒ Décrire la granulométrie des sédiments de surface, notamment à proximité d'habitats benthiques sensibles afin de corréliser cette information à d'éventuelles évolutions de l'état de santé de ces espaces (hyper sédimentation).

#### **IV.1.3.a. Description de l'origine des matériaux (terrigène/marine)**

Il s'agit d'apprécier si les sédiments présents dans la zone d'étude sont d'origine :

- ⇒ Terrigène, c'est-à-dire issus des phénomènes d'érosion des sols,
- ⇒ Organogène, c'est-à-dire constitués par des débris d'organismes.

Cette distinction est généralement effectuée en analysant en laboratoire la proportion de carbonate de calcium d'origine biologique dans les sédiments prélevés dans la zone d'étude puisque la précipitation biologique de carbonate de calcium se fait de diverses façons :

- ⇒ Fixation du calcium dans le squelette d'animaux qui édifient des constructions carbonatées (bioconstruction) : coraux, certaines éponges, ...
- ⇒ Fabrication de coquilles ou tests calcaires par des animaux benthiques : mollusques littoraux (gastéropodes, bivalves), oursins, foraminifères benthiques, ...
- ⇒ Accumulation par des micro-organismes et organismes planctoniques de carbonate de calcium dans leur test ou leur coquille qui tombent sur le fond après la mort : foraminifères planctoniques, ...

Si les matériaux accumulés dans la zone d'étude sont composés majoritairement de particules d'origine marine (organogène), il s'agit d'une sédimentation « naturelle », ne pouvant être associée aux conséquences d'éventuelles activités anthropiques menées en amont.

Avantages :

- ⇒ Méthode rapide d'appréciation de la proportion de la sédimentation exogène (origine terrigène).

Inconvénients :

- ⇒ Technique ponctuelle impliquant de multiplier les points d'échantillonnage pour dresser une description robuste, notamment en cas de complexité de la zone et d'hétérogénéité des faciès sédimentaires observés,
- ⇒ Paramètre fluctuant dans le temps et directement associé aux modalités locales de sédimentation marine (courantologie, agitation). Cette variabilité spatiale et temporelle est susceptible de biaiser les conclusions relatives à l'importance des apports d'origine terrigène.

Modalités de limitation des incertitudes inhérentes à la méthode :

- ⇒ Densification du programme d'échantillonnage (maillage horizontal) afin de collecter des informations pour les différents faciès sédimentaires éventuellement présents,
- ⇒ Prélèvement par carottage permettant de multiplier les échantillons disponibles en un point et de comparer des horizons présentant des caractéristiques granulométriques homogènes.

Coûts :

- ⇒ Le cout d'une analyse de la fraction carbonatée est de 10 000 XPF HT hors campagne de prélèvement et conditionnement des échantillons mais la mesure de ce paramètre est généralement associée à l'analyse d'autres paramètres physico-chimiques.

#### **IV.1.3.b. Analyse de traceurs métalliques considérés comme représentatifs des différentes strates d'altération du régolithe**

Il s'agit de préciser l'origine sédimentaire des matériaux terrigènes accumulés par l'analyse de métaux reconnus comme des traceurs des différentes strates d'altération du régolithe. Pour les sols latéritiques présents dans le bassin versant de la Kwé, on peut distinguer les éléments suivants :

- ⇒ Fer généralement présent de manière significative dans les horizons de surface (cuirasse et latérites superficielles),
- ⇒ Nickel et magnésium marquant la « signature » physico-chimique des horizons plus profonds.

Ainsi la mesure des teneurs en métaux puis l'analyse de ratios Fe/Ni ou Fe/Mg peut fournir des éléments sur l'origine stratigraphique des matériaux accumulés :

- ⇒ Si dominance du Fer, matériaux préférentiellement issus d'une érosion des horizons de surface,
- ⇒ Si dominance du Nickel ou du Magnésium, matériaux préférentiellement issus d'une érosion des horizons plus profonds, mis au jour à l'issue d'activités anthropiques (extraction minière).

Avantages :

- ⇒ Méthode rapide d'appréciation de l'origine stratigraphique des matériaux d'origine terrigène accumulés.

Inconvénients :

- ⇒ Technique ponctuelle impliquant de multiplier les points d'échantillonnage pour dresser une description robuste, notamment en cas de complexité de la zone et d'hétérogénéité des faciès sédimentaires observés.

Modalités de limitation des incertitudes inhérentes à la méthode :

- ⇒ Densification du programme d'échantillonnage (maillage horizontal) afin de collecter des informations pour les différents faciès sédimentaires éventuellement présents,
- ⇒ Prélèvement par carottage permettant de multiplier les échantillons disponibles en un point et de comparer des horizons présentant des caractéristiques granulométriques homogènes.

Coûts :

- ⇒ Le coût d'une analyse des teneurs en métaux dans les sédiments est de 20 000 XPF HT par échantillon, hors campagne de prélèvement, conditionnement et interprétation.

#### **IV.1.3.c. Description de la granulométrie des sédiments de surface**

La description de la granulométrie des particules peut être exploitée de plusieurs manières :

- ⇒ Le profil granulométrique des sédiments fournit une information sur l'intensité de l'hydrodynamique locale : plus la proportion de particules fines sera importante, plus cela indiquera l'existence de courants faibles à nuls, favorables à la sédimentation des flux solides entrants et à l'accumulation de matériaux. Cette information peut être exploitée pour confirmer la localisation des zones d'accumulation préférentielle identifiées par la description naturaliste de la zone d'étude,

- ⇒ Si la sédimentation observée dans la zone est principalement d'origine terrigène, la proportion de la fraction pélitique (<63 µm) présente dans les sédiments de surface est associée à la part la plus fine des apports solides parvenant au milieu. Ces particules les plus fines sont celles qui sont les plus difficiles à contenir par les dispositifs de gestion et de sédimentation des eaux de ruissellement au niveau des zones d'activités minières. Dès lors, l'interprétation conjointe du profil granulométrique et des traceurs métalliques présentés précédemment pourrait confirmer l'hypothèse d'une origine latéritique ou saprolitique des matériaux prélevés.
- ⇒ De plus, la proportion de particules fines (diamètre <63 µm) dans les sédiments constitue un descripteur pouvant éventuellement aider à l'interprétation d'un suivi des communautés benthiques. Ainsi, en cas de suivi quantitatif d'habitats benthiques (formations coralliennes, herbiers, ...), et plus particulièrement en cas de constat d'une dégradation de l'état de santé des communautés faisant l'objet d'un suivi, la connaissance de la granulométrie des sédiments de surface peut s'avérer pertinente pour envisager ou infirmer l'hypothèse d'un éventuel effet induit par un épisode ponctuel ou par une aggravation du phénomène d'hyper sédimentation.

Avantages :

- ⇒ Méthode rapide de description du profil granulométrique précis des sédiments prélevés.

Inconvénients :

- ⇒ Technique ponctuelle impliquant de multiplier les points d'échantillonnage pour dresser une description robuste, notamment en cas de complexité de la zone et d'hétérogénéité des faciès sédimentaires observés.

Modalités de limitation des incertitudes inhérentes à la méthode :

- ⇒ Densification du programme d'échantillonnage (maillage horizontal) afin de collecter des informations pour les différents faciès sédimentaires éventuellement présents,
- ⇒ Prélèvement par carottage permettant de multiplier les échantillons disponibles en un point et de comparer des horizons présentant des caractéristiques granulométriques homogènes.

Coûts :

- ⇒ Le coût d'une description laser de la granulométrie des sédiments est de 30 000 XPF HT par échantillon, hors campagne de prélèvement, conditionnement et interprétation.

#### ***IV.1.4. Bilan : objectifs d'un programme de suivi et méthodes associées***

La ou les méthodes/techniques de suivi à adopter dépendent des objectifs que l'on cherche à atteindre, des moyens disponibles et des résultats attendus des mesures. En effet, la disponibilité des équipements et du personnel, le coût des opérations ou des investissements constituent des facteurs déterminants à considérer pour orienter les choix par rapport aux attentes et aux moyens financiers disponibles.

Il est donc nécessaire d'identifier les besoins ou les objectifs avant d'opter pour la mise en œuvre d'une méthode ou d'une technique de mesure.

Le tableau suivant propose un bilan des méthodes et techniques présentées précédemment ainsi qu'une évaluation préliminaire des coûts associés à leur mise en œuvre dans le cas du suivi de la zone d'étude.

Objectifs	Méthode	Type de mesure envisageable	Réalisable pour la zone d'étude	Commentaires	Durée prévisionnelle d'acquisition	Montant unitaire prévisionnel (XPF HT)	Montant prévisionnel (XPF HT)
Appréciation des apports sédimentaires (flux "entrants" dans le système)	Mesure de flux sédimentaire en amont de la zone d'étude	Mesure du charriage (préleveurs à sédiment)	Non	Lit du cours d'eau induré et accidenté en amont de la zone d'étude (impossibilité de positionner les dispositifs d'acquisition. Mesure éventuellement réalisable 3 400 m en amont (pont CR9))	-	-	-
		Suivi du fond par ADCP	Non	Cours d'eau impraticable en bateau en amont de la zone d'étude (lit encaissé avec blocs). Mesure éventuellement réalisable 3 400 m en amont (pont CR9))	-	-	-
Appréciation des flux charriés dans la zone d'étude	Mesure de flux sédimentaire	Mesure du charriage (préleveurs à sédiment)	Oui	Pertinence a priori limitée dans le cas présent, Mesure ponctuelle (nécessité de prévoir un maillage de mesures)	-	-	-
		Suivi du fond par ADCP	Non	Pertinence a priori limitée dans le cas présent, Nécessité de prévoir une phase préparatoire potentiellement longue et couteuse pour calibrer la chaîne d'acquisition et réduire les incertitudes associées à la méthode	-	-	-
Description des zones d'érosion et d'accumulation de matériaux	Analyse diachronique	Exploitation (digitalisation) de photos aériennes ou satellites géoréférencées	Oui	Information globale ne fournissant qu'une donnée subjective associée à une forte imprécision	-	60 000	
	Acquisition de données topo-bathymétrique pour constitution d'un MNT (approche surfacique)	Levé bathymétrique monofaisceau	Oui	Durée d'acquisition dépendante de la densité du levé (espacement interprofils)	Profils bathymétriques espacés de 5 m : 5 j Profils bathymétriques espacés de 10 m : 3 j	250 000	- Profils bathymétriques espacés de 5 m : 1 500 000 XPF HT - Profils bathymétriques espacés de 10 m : 900 000 XPF HT
		Levé bathymétrique multifaisceau	Oui A confirmer si porteur de petites dimensions mobilisable sur zone	Très petits fonds impliquant des profils d'acquisition rapprochés pour une insonification quasi-complète de la zone d'étude	Hypothèse profils bathymétriques espacés de 5 m : 4 j	700 000	2 800 000 XPF HT
		Levé topographique des espaces exondés	Oui	Faible surface des espaces exondés accessibles à pied (couvert végétal) limitant l'emprise des zones décrites, Possibilité de recouvrement avec données bathymétriques pour consolidation du MNT final produit.	Profils topographiques espacés de 5 m : 5 j Profils topographiques espacés de 10 m : 3 j	180 000	- Profils topographiques espacés de 5 m : 900 000 XPF HT - Profils topographiques espacés de 10 m : 540 000 XPF HT
		Levé Lidar (drone) des espaces exondés	Oui	Densité de points supérieure à 150/m², Faible surface des espaces exondés et couverture végétale dense limitant l'emprise des zones décrites, Pas de possibilité de recouvrement avec données bathymétriques pour consolidation du MNT final produit.	1 j (acquisition drone : 2 h pour une zone de 100 ha)	400 000	400 000 XPF HT
	Acquisition de données topo-bathymétriques au niveau de profils	Levé bathymétrique monofaisceau	Oui	Durée d'acquisition dépendante du nombre de profils bathymétriques à lever	Si profils bathymétriques distants de 50 m (env 40 profils) : 2 j Si profils bathymétriques espacés de 100 m (env 20 profils) : 1 j	250 000	- Environ 40 profils bathymétriques distants de 50 m : 500 000 XPF HT - Environ 20 profils bathymétriques distants de 100 m : 250 000 XPF HT
		Levé bathymétrique multifaisceau	Oui A confirmer si porteur de petites dimensions mobilisable sur zone	Durée d'acquisition dépendante du nombre de profils bathymétriques à lever	Si profils bathymétriques distants de 50 m (env 40 profils) : 2 j Si profils bathymétriques espacés de 100 m (env 20 profils) : 1 j	700 000	- Environ 40 profils bathymétriques distants de 50 m : 1 400 000 XPF HT - Environ 20 profils bathymétriques distants de 100 m : 700 000 XPF HT
	Description des matériaux	Description de la proportion de matériaux d'origine terrigène/océanique	Analyse géochimique des sédiments (fraction carbonatée)	Oui	Peu de doute sur l'origine terrigène des matériaux susceptibles de s'accumuler dans le lit de la rivière. Paramètre susceptible de préciser l'importance des éventuels dépôts sédimentaires d'origine terrigène dans la baie Kwé	Dépendante du nombre d'échantillons prélevés. Hypothèse préliminaire : 10 échantillons par jour de terrain)	10 000
Description de l'origine stratigraphique des matériaux d'origine terrigènes accumulés		Analyse des traceurs métalliques (Fe, Mg, Ni, ...)	Oui	Paramètre susceptible de préciser l'origine des matériaux terrigènes parvenant dans la zone d'étude	Dépendante du nombre d'échantillons prélevés. Hypothèse préliminaire : 10 échantillons par jour de terrain)	20 000	Si prélèvement de 10 échantillons : 450 000 XPF HT
Description de la granulométrie des matériaux accumulés		Analyse granulométrique des sédiments	Oui	Pertinence éventuelle de réaliser ces mesures au niveau des stations de suivi des communautés benthiques implantées dans la baie (ST31 et ST32) (aide à l'interprétation des évolutions temporelles éventuellement constatées)	Dépendante du nombre d'échantillons prélevés. Hypothèse préliminaire : 5 à 10 échantillons par jour de terrain)	30 000	Si prélèvement de 4 échantillons (2 par station de suivi des communautés benthiques) : 200 000 XPF HT

Tableau 2 : Bilan des méthodes et mesures envisageables selon les objectifs retenus pour le suivi des dépôts sédimentaires

## IV.2. Conclusions et retours d'expérience sur campagnes d'acquisition déjà conduites dans la zone d'étude

Outre les données bibliographiques descriptives de la qualité physico-chimique des sédiments, plusieurs études de description des dépôts sédimentaires ont été conduites au niveau de la rivière et de la baie Kwé. On peut ainsi lister :

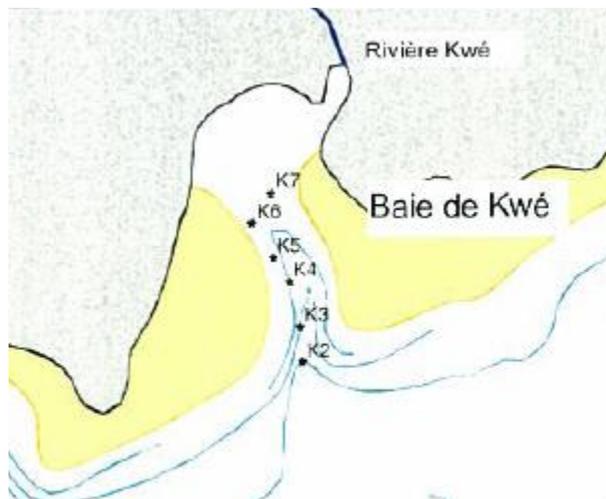
- ⇒ L'état de référence de la distribution superficielle des sédiments, des flux sédimentaires et des taux d'accumulation dans la baie du Prony et la baie Kwé (IRD, 2007),
- ⇒ L'étude de l'engravement de la rivière Kwé, de son estuaire et de la baie (EMR, 2010),
- ⇒ L'étude de faisabilité technique, économique et environnementale de désengravement de l'estuaire de la rivière Kwé et de la baie (Littoralys-Safege pour le compte du CCCE, 2014).

### IV.2.1. Etat de référence IRD (2007)

Source : IRD

En ce qui concerne la zone d'étude, l'état de référence réalisé par l'IRD a mobilisé les moyens d'acquisition suivants :

- ⇒ Prélèvement de 6 échantillons de sédiment de surface (K2 à K7) à l'aide d'une benne preneuse (type Van Veen) dans le chenal de la baie Kwé (voir figure suivante). Sur ces échantillons, il a été mesuré la proportion de la fraction pélitique (<40 $\mu$ m) et la fraction carbonatée de ces pélites (origine biogène),



**Figure 29 : Stations d'échantillonnage de sédiments de surface prélevées par l'IRD en février 2007**

- ⇒ Extraction de carotte sédimentaire en plongée à l'aide d'un carottier de 1 m de profondeur (KW1) (voir figure suivante). Les couches bi-centimétriques de la carotte obtenue ont été conditionnés pour analyse à des fins de datation par la méthode du  $^{210}\text{Pb}$ .
- ⇒ Collecte des matières en suspension par piège à sédiment à l'aide de pièges à particules séquentiels permettant un suivi temporel des flux particulaires minéraux et description de leur granulométrie (analyse laser). Chaque piège, d'une section de 0,05 m<sup>2</sup>, permet d'échantillonner les particules qui sédimentent pendant un cycle programmé de 48h. Pour la baie Kwé, la mesure a été réalisée au niveau de la station KW1 (voir figure suivante).

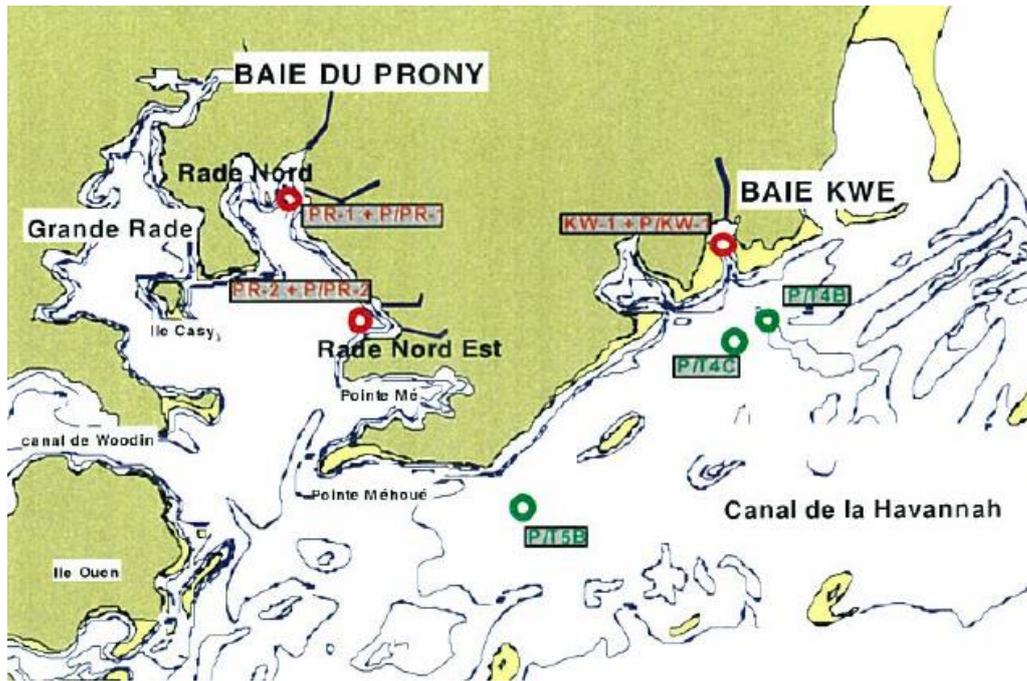
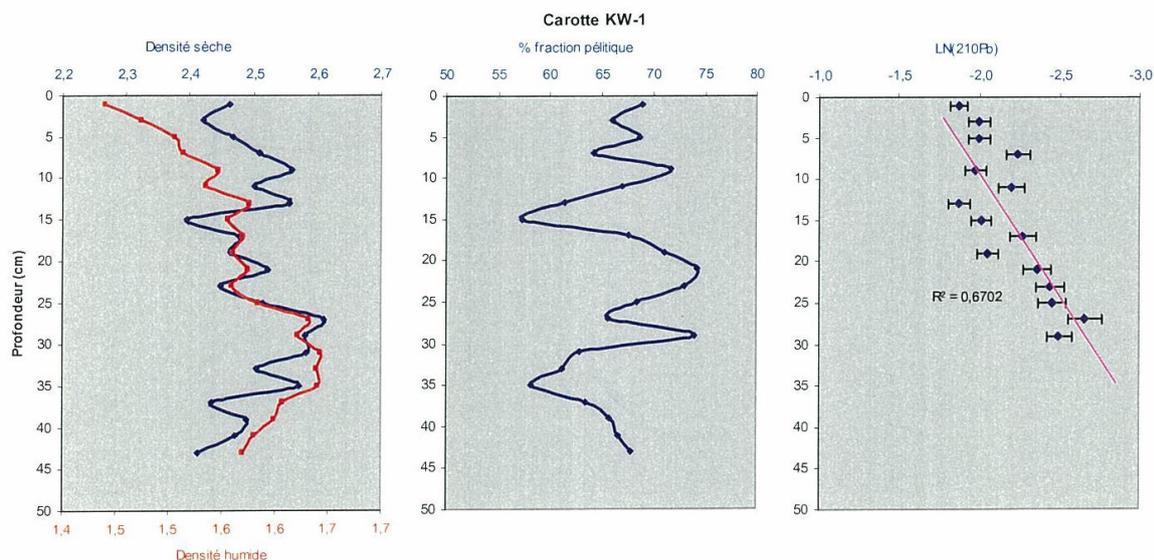


Figure 30 : Stations de carottage sédimentaire et de collecte des matières en suspension (rouge) (IRD, 2006)

Pour ce qui concerne la baie Kwé, il ressort de cette étude que :

- ⇒ Les sédiments contenaient de 38,8% de pélites près de la sortie de la baie (K3) à 74,2% au centre du chenal (K5). Il était observé en fond et en sortie de la baie des teneurs en pélites bien plus faibles, respectivement 14,9% (K7) et 22,9% (K2). La répartition de la fraction terrigène augmente elle aussi depuis la sortie de la baie (15,7% en K2) vers le fond (63,2% en K7),
- ⇒ En termes de flux de particules, la baie Kwé se différencie du nord-est de la baie de Prony par des valeurs 10 à 30 fois plus élevées. Les masses collectées sont en moyennes deux fois plus faibles en saison sèche ( $12,774 \pm 4,218 \text{ g/m}^2/\text{j}$ ) qu'en saison humide ( $28,298 \pm 9,196 \text{ g/m}^2/\text{j}$ ). Les valeurs de flux mesurées sont comprises entre 6,863 et 34,457  $\text{g/m}^2/\text{j}$  en saison sèche et entre 14,511 et 168,402  $\text{g/m}^2/\text{j}$  en saison humide.
- ⇒ En ce qui concerne la carotte sédimentaire prélevée dans le chenal de la baie Kwé, il est observé deux strates :
  - Entre 0 et 10 cm, un horizon composé de vase sableuse,
  - Entre 10 et 100 cm, des vases sableuses devenant progressivement plus riches en sable.

La représentation semi-logarithmique des mesures de  $^{210}\text{Pb}$  permet de mettre en évidence un gradient de décroissance radioactive linéaire relativement net en fonction de la profondeur. En effet, la radioactivité du  $^{210}\text{Pb}$  décroît régulièrement avec toutefois des valeurs élevées en milieu de carotte qui laissent supposer que des phénomènes catastrophiques se sont produits. Il est cependant possible d'extraire une courbe de tendance dont le coefficient de détermination est encore significatif ( $R^2=0,670$ ). Les paramètres de cette régression linéaire permettent de calculer un taux d'accumulation dont la valeur est très élevée ( $1,2 \text{ g/cm}^2/\text{an}$ ).



**Figure 31 : Profils de densités sèche et humide, pourcentage en fraction pélitique et radioactivité du <sup>210</sup>Pb dans les sédiments de la carotte KW-1 (IRD, 2006)**

Pour la baie Kwé, l'ensemble des données montrent que les phénomènes d'accumulation sédimentaire sont importants dans cette baie semi-fermée. Si les quantités de particules ne semblent pas avoir beaucoup évolué avec le temps, en revanche la nature des apports a fortement varié et les fractions sablo-vaseuses ont progressivement été remplacées par des fractions pélitiques plus homogènes, en surface. Toutefois, les pélites de surface contiennent une forte proportion de carbonates (environ 60%) ce qui leur confère une origine à dominante marine.

En conclusion, il est indiqué que la baie Kwé se distingue par sa sensibilité aux événements pluvieux. Ainsi, les forts taux de sédimentation et les mesures de flux élevées expriment des phénomènes de transport de matière plus importants. Si une fraction de ces particules en suspension est carbonatée, c'est-à-dire d'origine marine, la fraction terrigène est cependant conséquente puisqu'elle est proche de 30% en masse. Dans ce secteur, la quantité de particules produites forme une couche turbide qui oscille plusieurs jours le long de la côte au gré des marées jusqu'à la sédimentation ou l'évacuation du matériel particulaire.

A ce stade des études, il semble judicieux de mettre en place un complément analytique pour préciser le « degré d'anthropisation » des sédiments déposés et des matières en suspension collectées. Ces analyses devront être basées sur les déterminations de traceurs chimiques terrigènes (métaux) et marins (carbonates).

#### **IV.2.2. Etude de l'engravement de la rivière Kwé, de son estuaire et de la baie (EMR, 2010)**

Source : EMR

Cette étude a concerné la rivière Kwé, ainsi que son cours aval, son estuaire et la baie Kwé. Les échantillonnages conduits au niveau de la rivière Kwé se situent en dehors de la zone d'étude, ils ne seront donc pas présentés ici.

En ce qui concerne l'estuaire et la baie, il a été mobilisés les moyens d'acquisition suivants :

- ⇒ Mesures de flux de sédimentation par pose et suivi de 6 stations de tubes à sédiments (4 tubes de 5 cm de diamètre et 30 cm de long disposés à 1,5 m au-dessus du fond par station) répartis dans l'estuaire et la baie (voir figure suivante) entre octobre 2009 et août 2010. Ces tubes ont été relevés tous les mois,

- ⇒ Prélèvement de sédiments de surface en plongée à l'aide d'un carottier de 15 cm de diamètre et 40 cm de long au niveau de 36 stations (voir figure suivante). La granulométrie des échantillons prélevés a été mesurée (fraction pélitique (<63µm) et fraction arénitique (<2 mm)).



Figure 32 : Stations d'échantillonnage estuaire et baie Kwé (EMR, 2010)

- ⇒ Analyse diachronique des zones de dépôt sédimentaire par exploitation de photographies aériennes disponibles et exploitables (digitalisation puis comparaison des plages sédimentaires ou zones d'accumulation).
- ⇒ Cartographie des biocénoses marines et des unités géomorphologiques de la baie sur la base d'une photo-interprétation préliminaire puis d'une campagne de terrain conduite en plongée (28 points et 2 radiales du chenal vers la côte).

Il ressort de cette étude que :

- ⇒ En termes de flux sédimentaires, les flux observés dans la zone grâce à l'ensemble des relevés (octobre 2009 à août 2010), sont conformes à ceux que l'on peut observer dans des zones de fonds de baie sous l'influence d'une rivière. Les valeurs qui ont été relevées dans la bibliographie avec la même méthodologie confirment la fourchette acceptable des flux sédimentaires mesurés en baie Kwé entre octobre 2009 et février 2010 :
  - Discovery Bay en Jamaïque, lagon de récif de 4 m de profondeur : 0,5 à 1,1 mg/cm<sup>2</sup>/j (Dodge et al, 1974 In Rogers, 1990) ;
  - Saint Thomas aux Iles Vierges, zones récifales de 3 à 5 m de profondeur : 0,1 ± 0,1 à 1,6 ± 0,7 mg/cm<sup>2</sup>/j (Rogers, 1982 In Rogers, 1990) ;
  - Puerto Rico : 2,5 +/- 0,9 à 2,6 +/- 1,2 mg/cm<sup>2</sup>/j au niveau d'un arrière récif de 4 m de profondeur (Rogers, 1983 In Rogers, 1990) ;

A partir de mars 2010 et jusqu'en août 2010 les flux sédimentaires moyens dans la baie sont compris entre 3,32 mg/cm<sup>2</sup>/jour (±0,35 mg/cm<sup>2</sup>/jour) et 5,15 mg/cm<sup>2</sup>/jour (± 0,69 mg/cm<sup>2</sup>/jour) Les flux sédimentaires moyens au niveau de récifs non soumis à des stress liés aux activités anthropiques sont de

moins de 1 jusqu'à 10 mg/cm<sup>2</sup>/j (Rogers, 1990). Des flux sédimentaires chroniques supérieurs à 10 mg/cm<sup>2</sup>/jour peuvent être létaux pour les coraux<sup>6</sup>. Dans le cadre de la présente étude, les valeurs moyennes dans la baie Kwé sont inférieures à 10mg/cm<sup>2</sup>/jour. Par contre il a été mesuré au niveau de la station KWE5-M (milieu du chenal de la baie Kwé) :

- Des valeurs supérieures à 10mg/cm<sup>2</sup>/jour au cours de 2 campagnes :
  - En mai 2010, il y a été relevé une moyenne de 13,66 ± 1,43 mg/cm<sup>2</sup>/jour pour le flux sédimentaire global, ce dernier étant essentiellement dû aux apports d'origine marine avec 13,39 ± 1,4 mg/cm<sup>2</sup>/jour,
  - En août 2010 le flux sédimentaire total moyen a été de 11,62 ± 0,48 mg/cm<sup>2</sup>/jour, ce flux est cette fois dû à l'apport d'origine terrigène avec 10,72 ± 0,44 mg/cm<sup>2</sup>/jour.
- Des flux sédimentaires globaux proches de 10 mg/cm<sup>2</sup>/jour :
  - En mars 2010, dus à des apports d'origine terrigène (7,33 ± 0,48 mg/cm<sup>2</sup>/jour),
  - En juillet 2010, dus à des apports d'origine marine (8,94 ± 0,35 mg/cm<sup>2</sup>/jour).

Au niveau de la station KWE1-M (embouchure Kwé), le flux sédimentaire global semble tout au long de la période d'étude principalement constitué par un flux d'origine terrigène.

Afin de pouvoir préciser et compléter les informations recueillies (évolution du flux en fonction des stations, des campagnes, des conditions météorologiques rencontrées, des saisons...), il serait nécessaire de poursuivre le suivi mensuel sur une durée totale d'au moins 2 ans. Cela permettrait de comparer les données sur des durées plus importantes et de présenter d'éventuelles tendances.

⇒ En ce qui concerne l'analyse de la granulométrie des sédiments, il est constaté que celle-ci se diversifie à l'embouchure et devient de plus en plus fine vers le chenal de la baie Kwé. En fonction de la localisation des échantillons dans l'embouchure, de l'hydrodynamisme, de l'influence des marées, on rencontre :

- Des graves alluvionnaires silteuses, avec des concentrations variables en argile,
- Des sables silteux, avec des concentrations variables en argile,
- Des sols fins type argile,
- Une absence de matériaux grossiers de diamètre supérieur à 50 mm.

Tous ces faciès de matériaux sont typiques d'une zone d'embouchure. L'apport en matériaux fins provient à la fois de la rivière mais aussi de la remobilisation de particules fines dans le lagon par les courants marins et les marées.

Les pélites sont communément définies en sédimentologie, comme étant la fraction sédimentaire inférieure à 63 µm. Les arénites sont celle qui correspond aux particules comprises entre 63 µm et 2 mm. Compte tenu de leur faible taille, les pélites sont facilement mobilisées et transportées loin de leurs sources, les grosses particules sablonneuses ou graveleuses se déposant aux abords immédiats des embouchures. Néanmoins, dans le cas d'un régime de type plutôt torrentiel, les particules plus grosses de type arénites peuvent être transportées plus en aval, dans le cas présent, être acheminées dans la baie. La répartition des pélites fournit donc une vision de l'intensité de l'hydrodynamisme local, celle des arénites apporte un complément d'information dans le cas d'un régime hydrologique plus soutenu.

On note une faible représentation des pélites dans la rivière (R1 à R6) avec des pourcentages inférieurs à 15% (valeur issue de l'interpolation, à noter que pour R2 on note 16,8% dans les données brutes). On

---

<sup>6</sup> Un taux de sédimentation total est létaux pour les coraux quand on obtient des valeurs supérieures ou égales à 10mg/cm<sup>2</sup>/j (Rogers, 1990)

note des pourcentages de pélites inférieurs à 15% au sein de la majorité des stations de profondeur inférieure ou égale à 2 mètres, exception faite des stations KWE10-M et KWE9-M qui présentent des pourcentages plus élevés (respectivement 32,3% et 42,1%). L'ensemble de ces stations est situé dans la partie estuarienne de la rivière ainsi que dans la partie ouest de la baie.

Depuis le centre de la baie (KWE10-M) et jusqu'au chenal, on note une augmentation du pourcentage des pélites de plus de 30% jusqu'à plus de 80% (KWE5-M). Les pourcentages de pélites les plus importants sont rencontrés dans les zones de profondeur moyenne, ici, le centre du chenal, avec un effet « bordures » au sein duquel les pourcentages sont plus faibles qu'au centre du chenal (KWE3-M, KWE21-M, K7).

De la station K3 aux stations KWE20-M et KWE19A-M le pourcentage de pélites diminue (5 à 38%).

Les résultats obtenus lors de cet échantillonnage concordent avec ceux obtenus par l'IRD, la présence d'un plus grand nombre de prélèvements permet d'affiner l'analyse faite 2 ans plus tôt. On note en effet que dans l'ensemble du fond de baie, les pélites sont peu représentées avec des teneurs inférieures à 15%. On relève également une meilleure limite des zones contenant plus de 55% de pélites. L'augmentation du nombre de relevés a permis une description plus complète de la zone.

La répartition des arénites est complémentaire à celle des pélites. On note une forte proportion d'arénites dans deux zones précises de la baie (voir figure suivante), au niveau de l'engravement maximal observé à partir des photographies aériennes :

- Dans la partie nord-est du fond de Baie on relève des pourcentages en arénites de 77,5 et 81,7% respectivement pour les stations KWE16-M et KWE14-M,
- Dans sa partie extrême ouest les valeurs atteignent 89,2% et les 94,1% respectivement pour les stations KWE11-M et KWE12-M.

En revanche, le centre du chenal où s'était accumulée une fraction importante de pélites, concentre moins de 30% d'arénites (27,2% pour KWE25-M et 15,3% pour KWE5-M).

On observe un gradient décroissant du pourcentage des arénites de la baie (57,2% pour KWE9-M) vers le centre du chenal (10,5% pour KWE4-M). Ce pourcentage est faible jusqu'à la station KWE5-M (15,3%), puis augmente jusqu'à KWE20-M (78,3%).

Le gradient observé dans le chenal qui s'inverse en sortie de chenal n'est pas lié à la bathymétrie qui augmente régulièrement de la côte vers le large. Il n'est pas possible à l'heure actuelle de réaliser une comparaison avec les données de l'IRD car nous ne sommes pas en possession de leurs données brutes. Par ailleurs, cette analyse des arénites n'avait pas été abordée par l'IRD dans l'étude précédente.

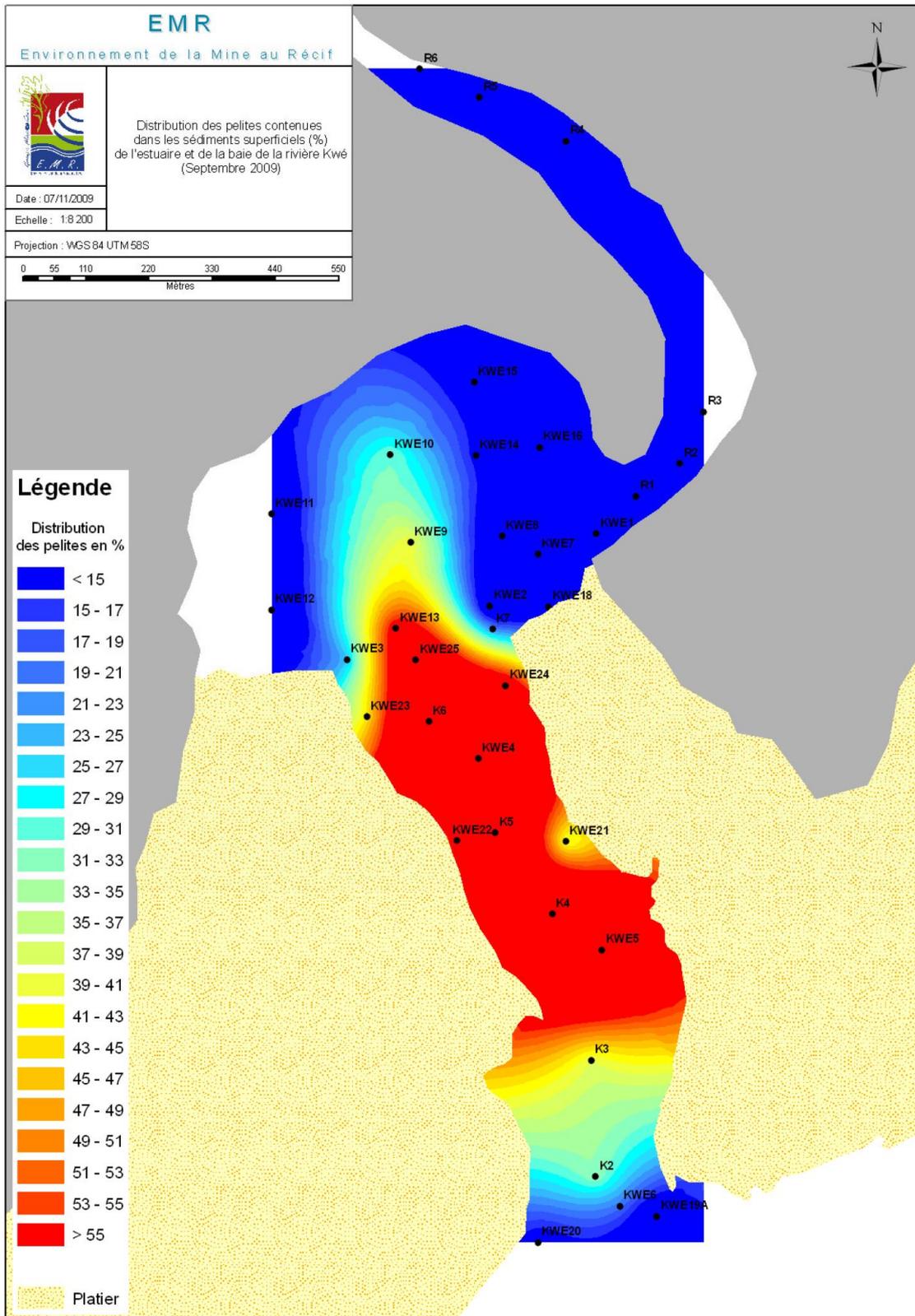


Figure 33 : Distribution des pélites (<63µm) dans les sédiments superficiels de l'estuaire et de la baie Kwé en septembre 2009 (EMR)

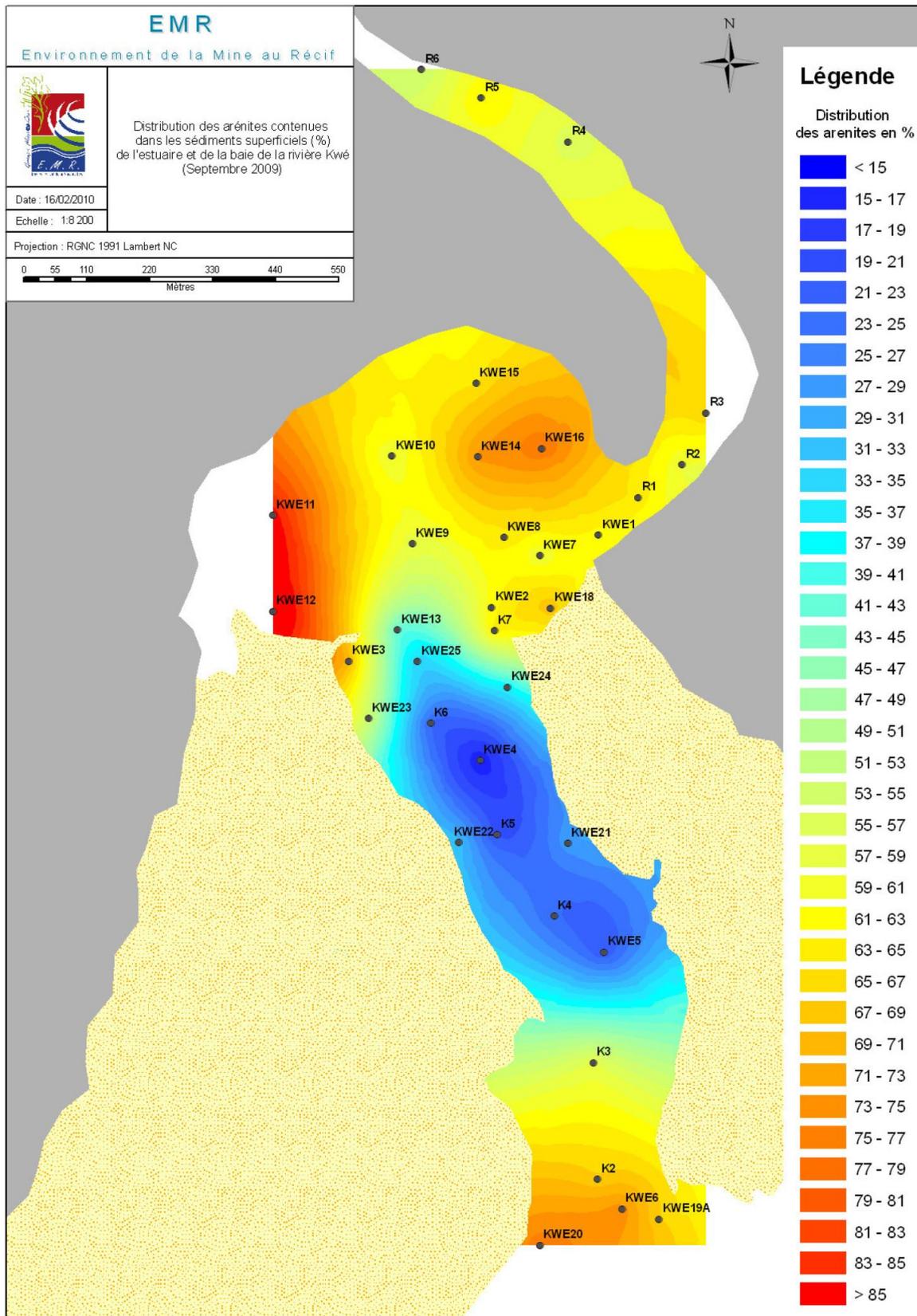
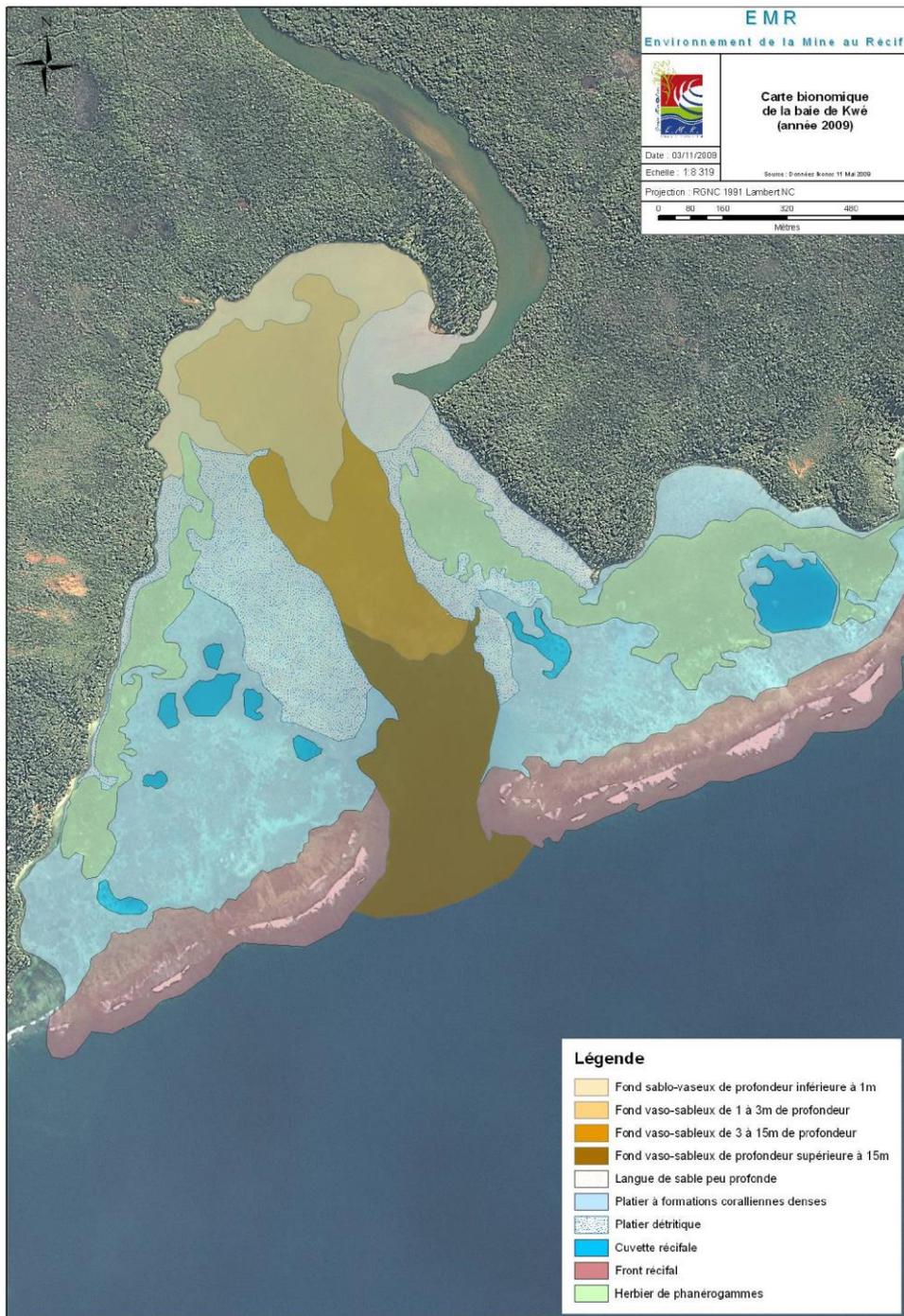


Figure 34 : Distribution des arénites (<2mm) (dans les sédiments superficiels de l'estuaire et de la baie Kwé en septembre 2009 (EMR))

- ⇒ En ce qui concerne les biocénoses marines et es unités géomorphologiques de la baie, il a été décrit deux grandes unités géomorphologiques marines sur la zone d'étude :
- Un récif frangeant : récif directement accolé à la côte, qui présente une extension de  $\pm 1,2$  km depuis le fond de la baie jusqu'à la crête récifale. Le récif frangeant s'étend de part et d'autre de la passe,
  - Une passe dans le prolongement de la rivière Kwé, qui présente une largeur de 250 à 300 m.

La carte des unités géomorphologiques et des biocénoses marines issues de ces investigations est présentée à la figure suivante.

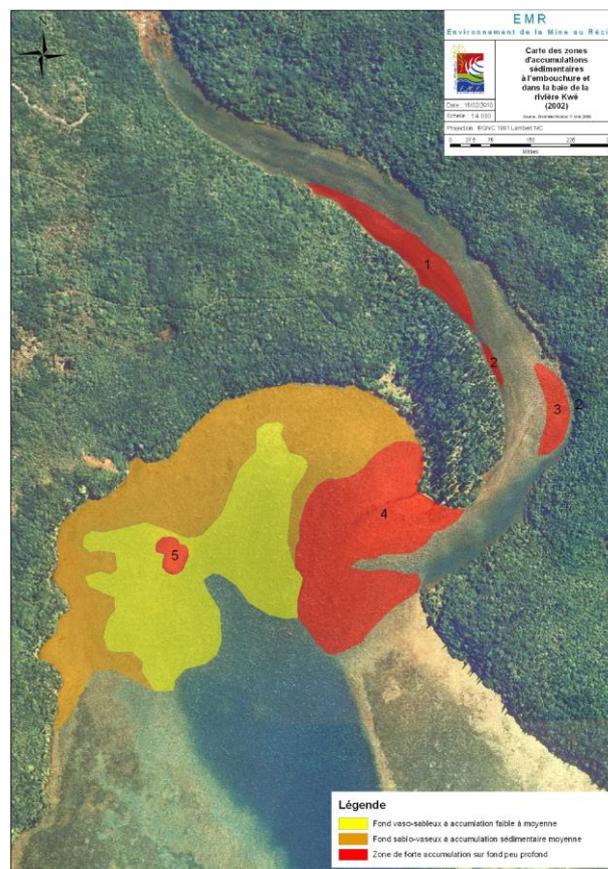


**Figure 35 : Carte des unités géomorphologiques et biocénoses marines (carte bionomique) au sein de la baie Kwé en Septembre 2009 (EMR)**

En termes d'analyse diachronique, parmi les images mises à disposition de EMR (2002, 2005, 2007 et 2009), seules les photographies des années 2002, 2005 et 2009 ont été conservées pour l'analyse diachronique, les photographies de 2007 présentant une trop grande réflexion et étant donc ininterprétables.

L'analyse diachronique met en évidence une faible évolution des principales plages sédimentaires entre 2002 et 2009 ainsi qu'entre 2005 et 2009, tant en termes de localisation que de superficie.

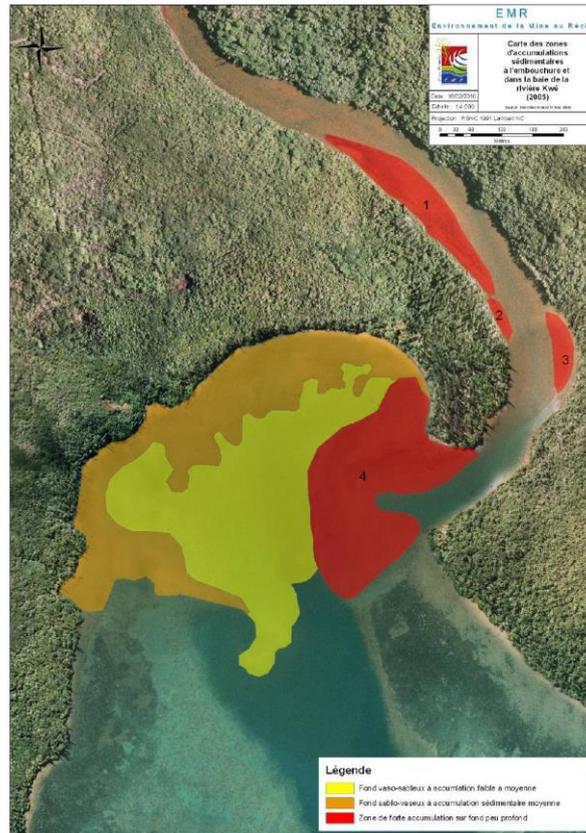
En 2002 on observe 5 principales zones de forte accumulation, 3 dans la rivière proche de l'embouchure, une dans le prolongement de la rive droite au niveau de l'embouchure (polygone 4) et une en fond de baie ouest (polygone 5). En 2005 le polygone 5 a disparu, il est toujours absent en 2009. Dans le fond de la baie, une grande zone d'accumulation moyenne se situe le long de la côte alors qu'une zone d'accumulation moins importante est localisée en milieu de baie. Cette disposition des principales zones d'accumulation se retrouve entre 2002, 2005 et 2009.



**Figure 36 : Zones d'accumulation sédimentaires à l'embouchure et dans la baie de la rivière Kwé en 2002 (EMR)**

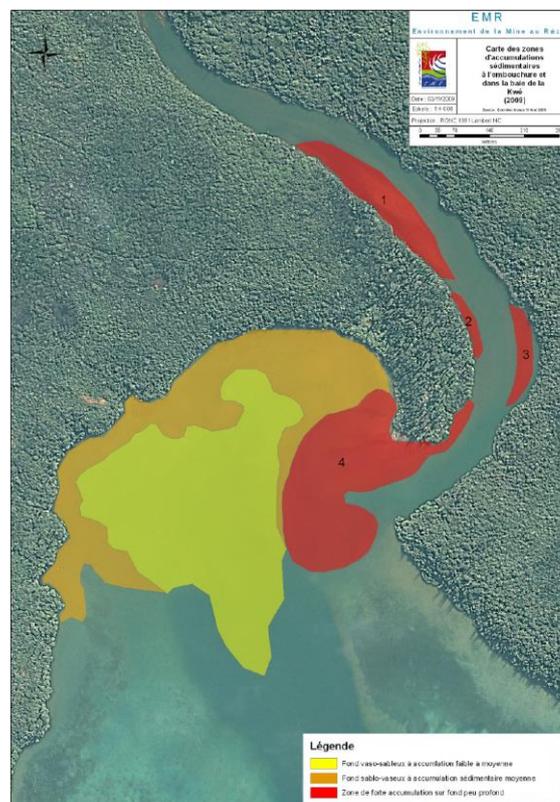
Entre 2002 et 2005 les variations les plus fortes sont celles de deux zones de forte accumulation avec 25 et 61% et de la zone de faible accumulation avec 33%.

Il semble que la zone d'accumulation faible s'étende vers le sud en direction du chenal.



**Figure 37 : Zones d'accumulation sédimentaires à l'embouchure et dans la baie de la rivière Kwé en 2005 (EMR)**

Entre 2005 et 2009 les écarts ne dépassent pas 14% sauf pour le polygone 2 avec 35% de différence entre les deux dates.



**Figure 38 : Zones d'accumulation sédimentaires à l'embouchure et dans la baie de la rivière Kwé en 2009 (EMR)**

Ces résultats sont donnés à titre indicatif, il est important de souligner de nouveau que la qualité moyenne des photographies peut engendrer un biais dans la photo interprétation. En effet les limites des zones d'accumulation sont fixées en partie de façon subjective car les photographies n'ont pas été prises dans les mêmes conditions de marées notamment. En 2005, la marée était basse lors de la prise du cliché alors qu'en 2009 la marée semblait plus haute, couvrant nettement une grande partie des plages sédimentaires de l'embouchure notamment. Les conditions de marées de la photo de 2002 sont encore différentes. La qualité de la photo de 2002 est moins bonne que celle des photographies de 2005 et 2009, elle présente des pixels blancs rendant l'interprétation des limites des zones d'accumulation encore plus délicate.

De même l'interprétation des zones d'accumulation sous-marines plus profondes peut être sujette à caution pour les mêmes raisons de conditions différentes de marée mais également du fait de limites très floues liées à la qualité des photos et à la profondeur des zones étudiées.

Si l'analyse diachronique des zones d'accumulations sédimentaires comporte inévitablement certains risques d'erreurs dus notamment au processus de correction des photographies aériennes, aux sources différentes des images prises à des périodes différentes (saison, marée) et à des résolutions différentes, il n'en demeure pas moins qu'elle permet de les comparer quantitativement par superposition.

A l'issue de cette étude, les préconisations et propositions de voies d'amélioration formulées par EMR pour la zone de l'estuaire et de la baie étaient de :

⇒ Réaliser un suivi de l'estuaire et de la baie avec :

- Suivi de la sédimentation dans la colonne d'eau par la poursuite du déploiement de tubes à sédiment pour une durée de 2 ans afin d'intégrer les effets d'éventuels événements climatiques paroxystiques,
- Suivi des flux de sédimentation dans la rivière par l'installation d'un préleveur automatique permettant de suivre les flux de MES,
- L'utilisation des relevés météorologiques avec mise en place d'une station pluviométrique dans le bassin versant de la Kwé,
- Es investigations de terrain après les événements pluvieux afin d'apprécier l'extension de la dispersion de panaches turbides et donner une idée de la localisation possible des zones d'accumulation sédimentaires après les épisodes pluvieux. Il pourrait être intéressant d'effectuer un cliché aérien pour mieux appréhender les limites du panache turbide.

⇒ Acquérir des informations descriptives des phénomènes affectant la baie avec :

- Description de la courantologie par 3 campagnes de lâcher de flotteurs dérivants conduites pour les 3 principaux régimes de vents afin de mieux comprendre la répartition des zones d'accumulation sédimentaires en fonction des caractéristiques hydrologiques de la baie,
- Analyse diachronique réalisée tous les 2 ans à partir de nouveaux clichés pris annuellement pour les mêmes conditions de marée. Cette méthode apporte des informations sur l'évolution des zones d'accumulation sédimentaires en termes de localisation et de superficie mais celles-ci restent subjectives du fait de la différence de la qualité de prises de vue.

#### IV.2.3. Etude de faisabilité technique, économique et environnementale de désengrèvement de l'estuaire de la rivière Kwé et de la baie (Littoralys, 2014)

L'objectif de la prestation confiée au groupement Littoralys/Safège était la réalisation d'une étude permettant de déterminer la faisabilité technique d'une opération d'enlèvement des sédiments dans la Kwé, en prenant en considération les aspects et les impacts environnementaux associés à ce type de travaux sur le milieu concerné.

Ces travaux n'avaient donc pas pour objectif de suivre les phénomènes de sédimentation de la baie mais de fournir une description des matériaux présents (granulométrie, qualité, volume) en vue de leur éventuelle extraction.

Afin de caractériser les sédiments en place, il a été réalisé cinq carottes et 3 analyses de sédiments.



Figure 39 : Stations de carottage et de prélèvement de sédiment en 2013 (Littoralys 2014)

Trois analyses granulométriques ont été réalisées sur la couche superficielle au niveau des carottages 1, 4 et 5.

La granulométrie est en majorité du sable grossier compris entre 200-2000  $\mu\text{m}$ . En revanche, on note une diminution de sédiments grossiers d'amont en aval : 70 % d'arénites dans la baie et 90 % en amont de l'estuaire.

Les résultats des analyses physico-chimique conduites sur les sédiments sont présentés dans le tableau suivant.

Element	Unité	Arrêté du 14 juin 2000		Valeurs références CEIL, 2011		Prélèvements de 2013		
		N 1	N2	Milieu sous influence marine	Milieu sous influence terrigène modérée	Point 1 (baie)	Point 2 (estuaire)	Point 3 (Amont Estuaire)
Cobalt	mg/kg/MS			73.0±8.6	176.3±7.7	67,2	36,5	26,4
Chrome	mg/kg/MS	90	180	2608±1014	7820 ±3520	10600	10400	9390
Fer	mg/kg/MS			86280 ±37080	193900±74900	407000	342000	395000
Manganèse	mg/kg/MS			662.5±6.4	1668±83	2560	2540	3340
Nickel	mg/kg/MS	37	74	1080±50	2300 ±535	4720	2700	4580
Arsenic	mg/kg/MS	25	50			27,1	9,81	7,08
Cadmium	mg/kg/MS	1,2	2,4			0,44	0,43	0,4
Mercuré	mg/kg/MS	0,4	0,8			0,11	0,11	0,1
Plomb	mg/kg/MS	100	200			12,6	10,2	13
Cuivre	mg/kg/MS	45	90			17,3	33	22
Zinc	mg/kg/MS	276	552			154	118	136
Indice Hydrocarbures	mg/kg/MS					<15	<15	<15

**Tableau 3 : Résultats des analyses physico-chimiques des sédiments (Littoralys, 2014)**

Les paramètres analysés sont ceux du cortège généralement retenus pour la description des matériaux de dragage pour lesquels on dispose de valeurs de référence métropolitaines. Confrontées à ces valeurs, on retrouve dans ces résultats les spécificités géochimiques propres à la Nouvelle Calédonie avec des teneurs élevées en chrome, fer, manganèse, nickel et arsenic.

#### IV.2.4. Retours d'expérience SEACOAST 2022

Les campagnes d'acquisition topo bathymétriques conduites dans le cadre de cette étude permettent de disposer des retours d'expériences suivants :

- ⇒ La zone d'étude se caractérise par une couverture végétale dense sur l'ensemble du littoral. Ceci :
  - Rend la progression à pied particulièrement contraignante au niveau des espaces exondés,
  - Réduit de manière significative la pertinence de l'utilisation de mesures topographiques terrestres ou aéroportées au niveau de ces espaces :
    - Difficulté de saisie de points topographiques en raison du masque généré par le couvert végétal en cas d'acquisition mettant en œuvre des moyens topographiques terrestres (GPS, tachéomètre),
    - Travail important de traitement du signal pour identifier la cote altimétrique du sol de manière certaine en cas de mise en œuvre d'un Lidar aéroporté.
- ⇒ La quasi absence d'espaces exondés en permanence et présentant une végétation rase ou clairsemée réduit la pertinence de la mise en œuvre de moyens d'acquisition topographiques, qu'ils soient terrestres (GPS, tachéomètre) ou aéroportés (photogrammétrie, Lidar),
- ⇒ La bathymétrie de la zone permet d'envisager de renseigner l'essentiel de la surface d'étude à l'aide de moyens bathymétriques,

Sur ces bases, il n'apparaît pas pertinent d'envisager la mobilisation de moyens d'acquisition topographiques terrestres ou aéroportés en suivi d'un suivi des dépôts sédimentaires.

### IV.3. Propositions de programmes de suivi des dépôts sédimentaires

Il convient de rappeler ici que les programmes de suivi proposés visent dans un premier temps à répondre aux objectifs fixés dans le cahier des charges de la prestation :

- ⇒ Indiquer si la zone est concernée ou non par des phénomènes d'accumulation de matériaux et apprécier la localisation et l'ampleur des éventuels apports ou pertes,
- ⇒ Tenter de préciser l'origine des matériaux éventuellement accumulés.

A partir d'une base initiale, il est ensuite être proposé des variantes destinées à approfondir l'acquisition de connaissance ou à compléter le besoin initialement exprimé par l'OEIL.

#### ***IV.3.1. Suivi bathymétrique de l'évolution des fonds***

Il est proposé deux approches de suivi bathymétrique de l'évolution des fonds permettant d'apprécier les phénomènes d'accumulation et/ou de remobilisation des matériaux meubles selon les moyens financiers disponibles :

- ⇒ Une approche « surfacique », couvrant l'ensemble de la zone d'étude de manière homogène afin de produire un MNT,
- ⇒ Une approche par profils, permettant de réduire l'effort d'acquisition en limitant l'analyse au suivi de l'évolution temporelle de profils transversaux des fonds de la rivière et de la baie Kwé.

##### ***IV.3.1.a. Approche surfacique : levé bathymétrique de l'ensemble de la zone d'étude***

###### *xi. Programme d'acquisition proposé*

La méthodologie d'acquisition proposée est basée sur :

- ⇒ Une acquisition à l'aide d'un sondeur monofaisceau en raison des incertitudes associées à la faisabilité de l'installation d'un système multifaisceaux sur un navire porteur de petites dimensions adapté pour évoluer dans les espaces restreints du cours de la rivière Kwé,
- ⇒ Afin de maîtriser le budget associé aux campagnes de terrain, il est proposé 2 programmes d'acquisition :
  - Programme A : Profils d'acquisition espacés de 5 m sur l'ensemble de la zone d'étude (profils identiques à ceux de la campagne d'octobre 2022),
  - Programme B : Profils d'acquisition espacés de :
    - 5 m dans le cours aval de la rivière Kwé (profils identiques à ceux de la campagne d'octobre 2022),
    - 10 m dans la baie Kwé (moitié des profils levés en octobre 2022),
- ⇒ Une fréquence d'acquisition optimisée.

De manière évidente, plus la fréquence d'acquisition est importante, plus la description des phénomènes sera fine. Ainsi, pour apprécier l'effet d'une crue dans les apports et la remobilisation des matériaux dans la zone d'étude, il serait souhaitable de conduire une campagne d'acquisition bathymétrique à l'issue de chaque épisode pluvieux intense, soit plusieurs acquisitions par an.

Le choix d'une telle fréquence se heurte à des contraintes non seulement financières mais également logistiques puisqu'une campagne d'acquisition nécessite la conjonction pendant plusieurs jours successifs de :

- Conditions de marée favorables à l'acquisition bathymétrique (marée haute de grande amplitude à la mi-journée),
- Conditions météo-océanologiques favorables : temps calme nécessaire pour la qualité de la mesure et pour la sécurité des intervenants (atteindre sans risque le site depuis Port Boisé avec une embarcation de petites dimensions).

C'est pourquoi il est proposé d'associer :

- Des campagnes programmées sur une base semestrielle, annuelle ou bi annuelle (tous les 2 ans), selon les capacités financières disponibles. On notera que la fréquence retenue pour ces campagnes programmées pourra être revue à la baisse ultérieurement si les évolutions constatées sont homogènes (tendance évolutive nette) ou considérées comme non significatives (balance sédimentaire insuffisante entre deux campagnes),
- D'éventuelles campagnes additionnelles ponctuelles. Celle(s)-ci pourraient être réalisées au plus tôt après un événement cyclonique ou dépressionnaire intense afin d'apprécier l'ampleur des éventuels apports et remobilisations des matériaux en situation de crue.

#### *xii. Recommandations opérationnelles*

Comme indiqué précédemment, la qualité d'un suivi des dépôts sédimentaire par analyse de l'évolution des fonds implique la production de MNT de qualité. Pour atteindre cet objectif, il conviendra d'appliquer les préconisations opérationnelles suivantes :

⇒ En préparation de la première campagne d'acquisition :

- Matérialisation et enregistrement de points de référence et de points de contrôle de qualité topographique (support métallique à tête hémisphérique avec pointe compatible avec l'utilisation d'un plan optique ou laser) sur lesquels :
  - Implanter la station GPS de référence (points de référence),
  - Effectuer les vérifications de la bonne qualité du positionnement GPS (points de contrôle).

Ces bornes devront être implantées de manière durable dans un sol induré (scellées dans un rocher) afin de constituer les points de calage fixes à partir desquels seront réalisées les campagnes d'acquisition dans la zone.

4 ou 6 bornes devront ainsi être implantées afin de garantir une couverture radio satisfaisante de la zone d'étude. Par exemple :

- Un point d'installation de la base GPS et un point de contrôle associé en amont de la zone d'étude pour couvrir le cours de la rivière Kwé,
- Un autre point d'installation de la base GPS et un point de contrôle à proximité au niveau de l'embouchure de la Kwé pour couvrir l'embouchure et la baie Kwé.
- Si nécessaire, un éventuel autre site d'implantation intermédiaire dans le cours de la rivière Kwé (point d'implantation de la base GPS et point de contrôle).
- Les coordonnées XYZ de chacun de ces points seront établies de manière précise par un rattachement statique rapide au DGPS prévoyant à minima 2 périodes d'enregistrement statiques d'au moins 15 min séparées de 3 heures,

⇒ Lors de chacune des campagnes d'acquisition bathymétrique :

- Installation de la station de base au niveau des points de référence matérialisés et vérification de la qualité du positionnement GPS au niveau des points de contrôle associés,
  - Acquisition le long des profils établis lors de la campagne d'octobre 2022 afin d'améliorer la précision de la comparaison des MNT qui seront issus de chaque campagne de levé,
  - Organisation de l'acquisition pour permettre le levé de l'ensemble de la zone d'étude avec des moyens bathymétriques (levé des zones peu profondes à marée haute),
- ⇒ A l'issue de l'acquisition et du traitement des données :
- Création du MNT et comparaison de celui-ci avec le ou les MNT antérieurs :
    - Carte(s) de comparaison des MNT (localisation et ampleur des évolutions constatées de l'altimétrie des fonds),
    - Calcul du volume de matériaux accumulés ou érodés dans la zone d'étude pour la période considérée.
  - Transmission à l'OEIL des données suivantes pour archivage et exploitation éventuelle ultérieure :
    - MNT et isobathes issus de l'interpolation des données dans un plan bathymétrique au format Autocad 3D,
    - Fichiers des points de sonde triés à 1 m au format texte (fichier XYZ).

*xiii. Budget prévisionnel*

Le montant estimatif associé à la réalisation d'une campagne de suivi bathymétrique « surfacique » telle que définie précédemment est présenté dans le tableau suivant.

Levé bathymétrique surfacique (sondeur monofaisceau)	
Prestation initiale unique : installation et levé de points de référence et de contrôle	Montant (prestation unique) (XPF HT)
Fourniture d'une embarcation instrumentée (plate, carburant, pilote)	610 000
Installation bornes et implantation (topographe)	
Fourniture et matériel	
Déplacements et frais divers	
Campagne levé bathymétrique "surfacique" <b>Programme A</b> (profils espacés de 5 m en rivière et baie Kwé)	Montant pour 1 campagne (XPF HT)
Fourniture d'une embarcation instrumentée (plate, carburant, pilote)	1 800 000
Fourniture matériel d'acquisition (sondeur EA 400)	
Fourniture GPS + installation base	
Levé bathymétrique	
Traitement des données et représentation cartographique	
Déplacements et frais divers	
Rapport d'intervention	
Campagne levé bathymétrique "surfacique" <b>Programme B</b> (profils espacés de 5 m en rivière Kwé et 10 m en baie Kwé)	Montant pour 1 campagne (XPF HT)
Fourniture d'une embarcation instrumentée (plate, carburant, pilote)	1 200 000
Fourniture matériel d'acquisition (sondeur EA 400)	
Fourniture GPS + installation base	
Levé bathymétrique	
Traitement des données et représentation cartographique	
Déplacements et frais divers	
Rapport d'intervention	

**Tableau 4 : Montant estimatif des prestations associées à un suivi bathymétrique « surfacique »**

#### IV.3.1.b. Approche par profils

##### xiv. Programme d'acquisition proposé

Il s'agit d'un programme d'acquisition « allégé » par rapport au programme surfacique présenté précédemment, nécessitant donc une enveloppe budgétaire plus réduite. La méthodologie proposée est basée sur :

- ⇒ Une acquisition à l'aide d'un sondeur monofaisceau en raison des incertitudes associées à la faisabilité de l'installation d'un système multifaisceaux sur un navire porteur de petites dimensions adapté pour évoluer dans les espaces restreints du cours de la rivière Kwé,
- ⇒ Des profils d'acquisition répartis dans la zone d'étude au niveau de zones représentatives des évolutions observées/attendues. Sur la base des évolutions constatées entre 2013 et 2022 on peut proposer à ce stade un suivi au niveau des 21 profils présentés à la figure suivante.
- ⇒ Dans un objectif d'optimisation du budget d'acquisition, on peut envisager dans un premier temps, une fréquence annuelle ou bi-annuelle (tous les 2 ans). Celle-ci pourra être revue à la baisse (levé bathymétrique tous les 5 ans) si les évolutions constatées sont homogènes (tendance évolutive nette) ou considérées comme non significatives.

On notera que, comme évoqué précédemment, il peut être pertinent d'envisager d'ajouter aux campagnes de suivi bathymétrique programmées de manière régulière d'éventuelles campagnes

additionnelles ponctuelles. Celle(s)-ci pourraient notamment être réalisées au plus tôt après un événement cyclonique ou dépressionnaire intense afin d'apprécier l'ampleur des éventuels apports et remobilisations des matériaux en situation de crue.

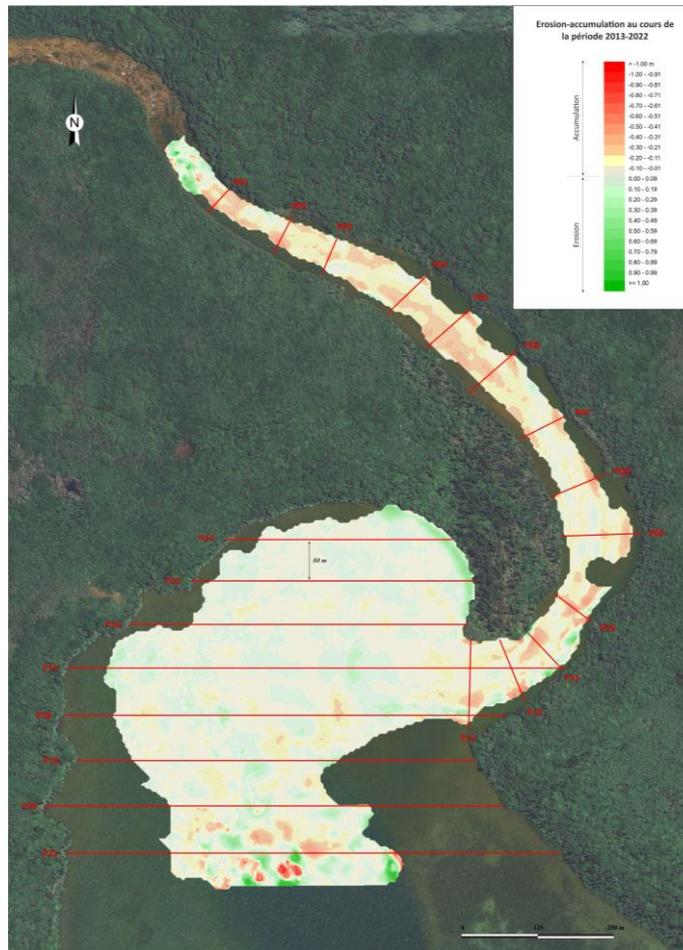


Figure 40 : Profils proposés pour un suivi bathymétrique par profils

#### xv. Recommandations opérationnelles

Comme déjà évoqué, la qualité d'un suivi des dépôts sédimentaire par analyse de l'évolution des fonds implique la réduction des incertitudes associées à la mesure. Pour atteindre cet objectif, il conviendra d'appliquer les préconisations opérationnelles suivantes :

- ⇒ En préparation de la première campagne d'acquisition :
  - Matérialisation et enregistrement de points de référence et de points de contrôle de qualité topographique (support métallique à tête hémisphérique avec pointe compatible avec l'utilisation d'un plan optique ou laser) sur lesquels :
    - Implanter la station GPS de référence (points de référence),
    - Effectuer les vérifications de la bonne qualité du positionnement GPS (points de contrôle).

Ces bornes devront être implantées de manière durable dans un sol induré (scellées dans un rocher) afin de constituer les points de calage fixes à partir desquels seront réalisées les campagnes d'acquisition dans la zone.

4 ou 6 bornes devront ainsi être implantées afin de garantir une couverture radio satisfaisante de la zone d'étude. Par exemple :

- Un point d'installation de la base GPS et un point de contrôle associé en amont de la zone d'étude pour couvrir le cours de la rivière Kwé,
  - Un autre point d'installation de la base GPS et un point de contrôle à proximité au niveau de l'embouchure de la Kwé pour couvrir l'embouchure et la baie Kwé.
  - Si nécessaire, un éventuel autre site d'implantation intermédiaire dans le cours de la rivière Kwé (point d'implantation de la base GPS et point de contrôle).
- Les coordonnées XYZ de chacun de ces points seront établies de manière précise par un rattachement statique rapide au DGPS prévoyant à minima 2 périodes d'enregistrement statiques d'au moins 15 min séparées de 3 heures,
- ⇒ Lors de chacune des campagnes d'acquisition bathymétrique :
- Installation de la station de base au niveau des points de référence matérialisés et vérification de la qualité du positionnement GPS au niveau des points de contrôle associés,
  - Acquisition le long des profils prédéfinis pour permettre une analyse comparative,
  - Organisation de l'acquisition pour permettre le levé de l'ensemble de la zone d'étude avec des moyens bathymétriques (levé des zones peu profondes à marée haute),
- ⇒ A l'issue de l'acquisition et du traitement des données :
- Analyse comparative des profils obtenus pour chaque campagne d'acquisition avec mesures des écarts altimétriques observés (érosion ou accrétion),
  - Transmission à l'Œil des données suivantes pour archivage et exploitation éventuelle ultérieure :
    - MNT et isobathes issus de l'interpolation des données dans un plan bathymétrique au format Autocad 3D,
    - Fichiers des points de sonde triés à 1 m au format texte (fichier XYZ).

*xvi. Budget prévisionnel*

Le montant estimatif associé à la réalisation d'une campagne de suivi bathymétrique par profils telle que définie précédemment est présenté dans le tableau suivant.

<b>Levé bathymétrique par profils (sondeur monofaisceau)</b>	
<b>Prestation initiale unique : installation et levé de points de référence et de contrôle</b>	<b>Montant (XPF HT)</b>
Fourniture d'une embarcation instrumentée (plate, carburant, pilote)	610 000
Installation bornes et implantation (topographe)	
Fourniture et matériel	
Déplacements et frais divers	
<b>Campagne de levé bathymétrique (21 profils)</b>	
	<b>Montant (XPF HT)</b>
Fourniture d'une embarcation instrumentée (plate, carburant, pilote)	700 000
Fourniture matériel d'acquisition (sondeur EA 400)	
Fourniture GPS + installation base	
Levé bathymétrique	
Traitement des données et représentation cartographique	
Déplacements et frais divers	
Rapport d'intervention	

**Tableau 5 : Montant estimatif des prestations associées à un suivi bathymétrique par profils (21 profils)**

#### **IV.3.2. Description de la dynamique hydrosédimentaire de la rivière Kwé**

Il s'agit d'un objectif qui n'avait pas été exprimé dans le cahier des charges établi par l'OEIL. Les échanges menés avec certains membres du conseil scientifique de l'OEIL lors de la restitution intermédiaire des travaux menés dans le cadre de cette étude ont fait apparaître qu'un objectif de compréhension des phénomènes hydrosédimentaires de la zone pouvait être ajouté au programme de suivi.

Pour répondre à cette objectif, il apparaît nécessaire de collecter des informations additionnelles relatives :

- ⇒ A l'importance des précipitations qui concernent le bassin versant.  
Pour cela, il conviendrait d'exploiter les données des capteurs déjà installés dans la zone par PRNC et, si nécessaire, de les compléter par l'instrumentation d'une ou plusieurs stations météorologiques supplémentaires.
- ⇒ Aux débits transitant dans la rivière et aux flux solides transportés. Pour ce faire, il serait nécessaire soit :
  - D'installer une station instrumentée au niveau du cours aval de la rivière,
  - De disposer des informations permettant d'apprécier de manière simplifiée les débits (données pluviométriques) et une partie des flux solides (teneurs en MES).
- ⇒ Aux forçages induits par les conditions environnementales rencontrées dans la baie Kwé (courants, vagues). Pour cela, deux approches peuvent être envisagées :

- Une approche simplifiée par description de la courantologie du site par la conduite d'une campagne de suivi de flotteurs dérivants.

La méthode utilisée consiste à suivre l'évolution de la trajectoire des flotteurs dérivants constitués d'une voile cylindrique immergée, légèrement lestée, et reliée par une gârcette à un flotteur de repérage en surface permettant de décrire la direction et l'intensité des courants observés à différents niveaux de la colonne d'eau. Les flotteurs sont repérés en surface par géoréférencement (positionnement au DGPS métrique). Par un relevé précis des positions des flotteurs à différents instants, il est possible de déterminer les vecteurs de déplacement de chaque flotteur dérivant (en vitesse et en direction) pour un cycle de marée.

Le montant estimatif préliminaire pour la réalisation d'une campagne de suivi de flotteurs dérivants est de 300 000 XPF HT par campagne (représentative d'une condition de vent).

- Une approche plus complète par l'acquisition *in situ* de données de courants et d'agitation par la mise en œuvre pendant 1 mois d'un courantomètre profileur équipé d'un capteur de pression installé au fond dans la baie Kwé. Une acquisition de ce type permet de collecter les informations descriptives :
  - Des intensités et des directions des courants à différentes profondeurs de la colonne d'eau à la verticale du point de mesure. Pour un déploiement sur 1 mois, il est envisageable de mesurer les courants en continu avec un pas de temps de 3 h,
  - Des agitations au niveau du point d'installation de l'appareil : l'exploitation conjointe des données doppler et du capteur de pression de l'instrument permet de mesurer l'amplitude et la direction des vagues durant la période d'acquisition.

Comme pour les courants, il est envisageable, pour un déploiement sur 1 mois, de mesurer les agitations avec un pas de temps de 3 h.

Le montant estimatif préliminaire pour l'installation et l'acquisition in situ pendant 1 mois de données de courants et de vagues à l'aide d'un courantomètre profileur en baie Kwé est de 1 700 000 XPF HT.

L'approche pour la compréhension la plus fine de la dynamique sédimentaire de la zone d'étude serait de paramétrer et de caler/valider un modèle hydrosédimentaire de la zone d'étude. Une telle prestation ne serait envisageable qu'à l'issue de l'obtention de données d'entrée telles que :

- ⇒ Débits de la rivière selon la pluviométrie parvenant sur le bassin versant,
- ⇒ Charge solide en suspension transportée par la rivière,
- ⇒ Courants et agitations dans la baie Kwé (campagne d'acquisition par ADCP),
- ⇒ Granulométrie des sédiments de surface dans le domaine d'étude,

A ce stade, le budget prévisionnel associé à la paramétrisation et au calage/validation d'un tel modèle est de 4 500 000 XPF HT.

#### ***IV.3.3. Suivi de la qualité des sédiments (traceurs métalliques et granulométrie)***

Il est proposé deux approches de suivi de la qualité des sédiments de surface de la zone d'étude correspondant à deux niveaux d'effort d'échantillonnage :

- ⇒ Une approche « exhaustive », couvrant l'ensemble de la zone d'étude,
- ⇒ Une approche simplifiée visant à limiter le programme d'échantillonnage aux sédiments présents à proximité des stations de suivi des communautés benthiques implantées dans la baie Kwé (ST31 et ST32) afin de fournir une aide à l'interprétation d'observation d'éventuelles évolutions de l'état de santé de ces habitats.

#### **IV.3.3.a. Description exhaustive de la zone d'étude**

##### *xvii. Programme d'acquisition proposé*

EMR a conduit en 2010 une campagne d'échantillonnage visant à décrire la granulométrie des sédiments de surface de la rivière Kwé et de la baie Kwé. Lors de cette campagne, 38 stations ont été échantillonnées en plongée (stations localisées en jaune à la figure suivante).

Ce plan d'échantillonnage relativement dense couvre l'ensemble de la zone d'étude et permet de disposer d'une donnée historique pouvant constituer une sorte d'état de référence.

Sur la base de cette référence, il est proposé un programme de suivi de la qualité physico-chimique des sédiments basé sur :

- ⇒ Le prélèvement d'échantillons de sédiment de surface au niveau des stations EMR 2010 situées dans la zone couverte par le suivi bathymétrique,
- ⇒ L'analyse des paramètres suivants :
  - Micropolluants métalliques : As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn,
  - Granulométrie laser 10 fractions.

Cela conduit à envisager un programme basé sur

- ⇒ L'échantillonnage de sédiment de surface au niveau de 22 stations situées dans la zone délimitée en rouge à la figure suivante :
  - 6 dans le cours aval de la rivière Kwé (Station EMR 2010 R1 à R6) ;
  - 2 stations initialement échantillonnées par l'IRD lors de la mission d'octobre 2006 puis par EMR en 2010 (K6 et K7);
  - 14 autres dans la baie.
- ⇒ Dans un premier temps, la fréquence proposée est bi-annuelle (tous les 2 ans). Celle-ci pourra être revue à la baisse (échantillonnage tous les 5 ans) si les évolutions constatées sont homogènes (tendance évolutive nette) ou considérées comme non significatives.

##### *xviii. Recommandations opérationnelles*

Il est préconisé pour la conduite de cette prestation que :

- ⇒ Les prélèvements de sédiments de surface soient réalisés en plongée (carottier à main) ou à la benne preneuse,
- ⇒ Prélèvement et conditionnement d'un seul échantillon par station,
- ⇒ Analyse granulométrique laser permettant de fournir les proportions de chacune des 10 fractions granulométriques suivantes : <2µm, <16µm, <32µm, <50µm, <63µm, <125µm, <250µm, <500µm, <1mm, <2mm. Ceci permettra une description fine des profils granulométriques tout en disposant des grandeurs mesurées par EMR en 2010 (% arénites et pélites) afin de pouvoir comparer les résultats obtenus à ces valeurs de référence,
- ⇒ Analyse des teneurs en micropolluants métalliques pour exploitation, entre autres, des ratios Fe/Ni et Fe/Mn.

xix. Budget prévisionnel

Le montant estimatif associé à la réalisation d'une campagne d'échantillonnage et d'analyse des sédiments de surface telle que définie précédemment est présenté dans le tableau suivant.

Analyse qualité sédiments (22 stations)	Montant (XPF HT)
Fourniture d'une embarcation instrumentée (plate, carburant, pilote)	1 800 000
Prélèvement sédiments	
Analyses en laboratoire (22 échantillons)	
Rédaction note d'intervention	

**Tableau 6 : Montant estimatif d'une campagne de suivi de la qualité des sédiments de surface (22 stations)**



Figure 41 : Stations de suivi de la granulométrie des sédiments (base échantillonnage EMR 2010)

#### IV.3.3.b. Description limitée aux stations de suivi des communautés benthiques

##### xx. Programme d'acquisition proposé

Comme indiqué précédemment, la description granulométrique des sédiments de surface est envisagée dans cette proposition de programme de suivi comme une source d'information permettant d'éclairer d'éventuelles observations issues du suivi des communautés benthiques de la baie Kwé effectué par ailleurs.

Ceci conduit à envisager un programme basé sur :

- ⇒ L'échantillonnage de sédiment de surface au niveau des 2 stations de suivi des communautés benthiques en baie Kwé (stations ST31 et ST32),
- ⇒ Une fréquence d'échantillonnage annuelle, afin de fournir une information à exploiter dans le cadre du suivi annuel de l'état de santé des communautés benthiques de la baie.

##### xxi. Recommandations opérationnelles

Il est préconisé pour la conduite de cette prestation que :

- ⇒ Les prélèvements de sédiments de surface soient réalisés en plongée (carottier à main) ou à la benne preneuse,
- ⇒ Il soit prélevé 2 échantillons de sédiment par station afin de réduire les effets d'un éventuel artéfact lors du prélèvement.

Les coordonnées géographiques de points de prélèvement devront être établies de manière précise de manière à garantir la reproductibilité des prélèvements,

- ⇒ Il soit conduit sur ces prélèvements les analyses suivantes :
  - Granulométrie laser permettant de fournir les proportions de chacune des 10 fractions granulométriques suivantes : <math><2\mu\text{m}</math>, <math><16\mu\text{m}</math>, <math><32\mu\text{m}</math>, <math><50\mu\text{m}</math>, <math><63\mu\text{m}</math>, <math><125\mu\text{m}</math>, <math><250\mu\text{m}</math>, <math><500\mu\text{m}</math>, <math><1\text{mm}</math>, <math><2\text{mm}</math>,
  - Teneurs en micropolluants métalliques pour exploitation, entre autres, des ratios Fe/Ni et Fe/Mn.

##### xxii. Budget prévisionnel

Le montant estimatif associé à la réalisation d'une campagne d'échantillonnage et d'analyse des sédiments de surface telle que définie précédemment est présenté dans le tableau suivant.

Analyse qualité sédiments (2 stations)	Montant (XPF HT)
Fourniture d'une embarcation instrumentée (plate, carburant, pilote)	420 000
Prélèvement sédiments	
Analyses en laboratoire (4 échantillons)	
Rédaction note d'intervention	

**Tableau 7 : Montant estimatif d'une campagne de suivi de la qualité des sédiments de surface (stations ST31 et ST32)**

#### IV.3.4. *Recommandations du groupe d'experts consultés*

Le bilan préliminaire de cette étude a été présenté et débattu devant un groupe d'experts en dynamique hydro-sédimentaire et érosive appartenant au conseil scientifique de l'OEIL ainsi qu'un expert de PRNC.

Le bilan de ces échanges est résumé dans les points suivants :

- ⇒ Parmi l'éventail des thématiques et des modalités de suivi présentées précédemment, il est nécessaire d'établir clairement les objectifs de suivi poursuivis et les limites des techniques et moyens mis en œuvre.
- ⇒ Afin de savoir si une accumulation de dépôts sédimentaires est effectivement constatée en Baie Kwé (problématique principale initiale du cahier des charges de la mission), il a été préconisé qu'un suivi bathymétrique soit conduit selon une approche surfacique avec :
  - Une fréquence d'acquisition nécessairement haute dans un premier temps pour bien caractériser les cinétiques spatio-temporelles des phénomènes d'accrétion/érosion :
    - Interventions planifiées selon les moyens financiers disponibles (fréquence semestrielle, annuelle, ...)
    - Intervention additionnelle non planifiée (1 à 3 par an selon moyens financiers), réalisée au plus tôt à l'issue d'un phénomène météo intense afin de prendre en compte les contraintes logistiques et opérationnelles associées à ces campagnes.
  - Une rationalisation de la densité d'acquisition selon les sites : transects espacés de 5 m au niveau de la rivière et de 10 m au niveau de la baie (approche B).

Ceci permettra de caractériser les cinétiques, la volumétrie et la localisation des zones d'envasement/érosion. A la lumière des résultats obtenus, l'ajustement des protocoles pourra intervenir avec le resserrement du suivi sur les zones les plus dynamiques et un allègement dans les autres secteurs.

- ⇒ Dans le but d'identifier l'origine des matériaux accumulés, les éléments suivants ont été préconisés :
  - Le suivi des sédiments ne sera réalisé que lorsque les dynamiques de dépôts et l'identification des principales zones d'accumulation auront été établies, c'est à dire à l'issue de quelques campagnes de suivi bathymétrique (nombre et localisation des stations de prélèvement d'échantillons de sédiment).
  - Pour ce qui concerne les paramètres à analyser, il est suggéré de s'en tenir qu'aux paramètres permettant de traiter clairement la question de l'origine des sédiments à savoir :
    - Fraction carbonatée ( $\text{CaCO}_3$ ) pour apprécier la proportion des apports d'origine marine et d'origine terrestre ;
    - Les éléments chimiques permettant de discriminer les horizons du régolithe exposées à l'érosion (ex : ratios Fe/Ni) ;
    - Le suivi de la granulométrie est également jugé pertinent compte tenu de son coût maîtrisé et des informations contextuelles intéressantes qu'il est susceptible de fournir.

A noter qu'il est considéré que l'étude de l'origine des sédiments est un véritable défi qui restera particulièrement difficile à relever en raison de la diversité des sources et de la complexité des processus de transit vraisemblablement à l'œuvre dans la zone.

- ⇒ Si la compréhension fine de la dynamique sédimentaire de la zone venait à devenir un objectif du suivi, il serait nécessaire de :
- Disposer d'informations concernant les débits dans la rivière et les volumes de matériaux transportés. Selon les moyens financiers disponibles, ceci pourrait être réalisé par :
    - Des protocoles simplifiés d'appréciation des débits et des volumes de matériaux charriés ;
    - L'instrumentation d'une station au niveau de l'exutoire de la rivière Kwé.
  - Disposer d'informations contextuelles dans la baie (vagues, courants) par le déploiement sur le fond d'un courantomètre profileur (ADCP) équipé d'un capteur de pression pendant une durée minimale de 1 à 2 mois ;
  - Si les moyens financiers disponibles le permettent, exploiter les données collectées pour paramétrer et valider un outil de modélisation des dépôts sédimentaires.
- ⇒ Si l'on souhaite s'intéresser également à la zone de la forêt d'Araucaria située au nord immédiat de l'embouchure et que les moyens financiers disponibles le permettent, il est préconisé de :
- Conduire un suivi topographique de cette zone par Lidar (seule méthode envisageable dans cette zone) afin d'apprécier l'ampleur et la localisation des éventuels dépôts de matériaux ;
  - Confirmer la nature *a priori* alluvionnaire des matériaux présents au niveau de la forêt d'Araucaria. Il serait pertinent de prélever une carotte sédimentaire dans cette zone.

## Chapitre V - Conclusion

Les travaux menés dans le cadre de cette mission ont permis d'atteindre l'ensemble des objectifs formulés par l'OEIL et le groupe de travail composé de membres du conseil scientifique de l'OEIL et d'un expert en dynamique hydro-sédimentaire de PRNC.

Ci-après, les principales activités menées et résultats obtenus sont présentés :

- ⇒ Fournir une description topo-bathymétrique des dépôts sédimentaires présents dans l'estuaire et le fond de la baie Kwé afin de disposer d'un état initial précis de la répartition spatiale des dépôts sédimentaires.
- Durant cette étude, il a été conduit un levé topobathymétrique au 1/500<sup>ème</sup> de l'ensemble de la zone d'étude (3 jours d'intervention). Cette caractérisation constitue un état initial à une résolution inédite et qui offre une description fine des caractéristiques morphologiques des dépôts sédimentaires dans le fond de la baie Kwé.

Il a par ailleurs été mis en œuvre des acquisitions d'images et de données topographiques par drone (LiDAR aéroporté) afin de disposer de données complémentaires et d'apprécier les forces et faiblesses de cette technique en vue d'un éventuel suivi de la zone. Les acquisitions LiDAR ont par ailleurs permis une première caractérisation de la zone de forêt d'Araucaria située au nord immédiat de l'embouchure qui semble composée de dépôts alluvionnaires (à confirmer) en apportant de nouveaux éléments de compréhension du fonctionnement hydro-sédimentaires de la baie.

Enfin, l'exploitation des relevés passés effectués en décembre 2013 par le cabinet DELVAR (étude Litorallys, Safège 2014) a indiqué une accumulation de sédiments sur la surface étudiée (36,35 ha) pour de la période 2013-2022. En considérant une incertitude de  $\pm 10$  cm dans les mesures, le bilan des volumes indique 4 299 m<sup>3</sup> d'excédant correspond à une accumulation moyenne de près de 1 cm de matériaux par m<sup>2</sup>. Le groupe de travail consulté considère toutefois que ces résultats ne peuvent être interprétés correctement sans une véritable connaissance du fonctionnement hydrosédimentaire de la baie.

⇒ Mener une expertise pour la définition d'une stratégie de suivi des dépôts sédimentaires sur le moyen terme.

Il a été proposé une description technique et financière des différentes approches envisageables pour atteindre différents objectifs de suivi :

- Approches dédiées au suivi de l'évolution des fonds, visant à caractériser les dynamiques spatio-temporelles hydro-sédimentaires de la baie;
- Approches de suivi de la qualité physico-chimique des matériaux accumulés afin de disposer d'informations permettant de préciser leur origine (terrigène/océanique).

⇒ L'enveloppe budgétaire prévisionnelle associée à ces opérations de suivi a été fournie afin de permettre de solliciter les fonds nécessaires auprès d'éventuelles sources de financement.

Enfin, la nature, la fréquence et la chronologie des interventions qu'il serait pertinent d'intégrer dans un programme de suivi a été établi en concertation avec le groupe de travail et les experts sollicités par l'OEIL.

## Chapitre VI - Bibliographie

Fernandez JM, Chevillon C, Dolbecq M, Legendre R, Belhandouz A, Lamoureux JP (2007). Etat de référence : distribution superficielle des sédiments, flux sédimentaires et taux d'accumulation dans la Baie du Prony (Rades Nord et Nord-Est) et dans la Baie Kwé. Rapport final IRD-Nouméa. Contrat de consultance IRD/Goro-Ni.

Jaud M (2011). Techniques d'observation et de mesure haute résolution des transferts sédimentaires dans la frange littorale.

Kissling A, Sarramegna S (2010). Étude de l'engravement de la rivière Kwé, de son estuaire et de la baie - Prolongation du suivi des pièges à sédiments - Rapport Final. Rapport EMR commandité par Vale NC.

Rafecas N, Messenger M (2014). Etude de faisabilité technique, économique et environnementale de désengravement de l'estuaire de la rivière Kwé et de la baie. Rapport LITTORALYS commandité par le CCCE.