



Problématique de l’engravement de Port Ouest et recherche de solutions de traçage RFID des galets (Le Port, Réunion)

Pierre GAUFRES¹, Mathieu CASSEL²

1. CEREMA DTerMed/DRN/RIL, Pôle d'activités Les Milles – 30 Avenue Albert Einstein
13290 Aix-en-Provence, France.

pierre.gaufres@cerema.fr

2. ARTELIA Group - Business Unit Eau & Afrique, Moyen – Orient - 135 All. Des
Noisetiers · 69760 Limonest · France.

mathieu.cassel@arteliagroup.com

Résumé :

La construction de Port Ouest sur l’Ile de la Réunion (1886) en aval dérive du cône deltaïque de la Rivière des Galets s’est heurtée dès l’origine à des problèmes d’engravement de son chenal d’accès à chaque épisode de houle australe. La courantologie côtière à l’origine de l’élaboration du cordon littoral de galets est modifiée par la jetée sud et les matériaux se trouvent piégés dans la passe d’entrée formant un banc accolé au parement nord. Les fonds particulièrement accores (pentes moyennes > 20 %) et l’énergie des houles rendent difficile le maintien des ouvrages portuaires plusieurs fois endommagés par les tempêtes et cyclones. L’optimisation des volumes dragués (en moyenne entre 50 000 et 80 000 m³/an) nécessite une meilleure connaissance des processus hydrosédimentaires.

Dans le cadre d’une stratégie de gestion globale du stock sédimentaire dans le secteur compris entre le débouché de la Rivière des Galets et la Pointe des Galets, une analyse bibliographique a été réalisée pour préciser la connaissance des processus d’engravement de Port Ouest. La recherche de solutions de traçage de galets par étiquettes RFID est explorée en complément des prédictions des modèles de transport sédimentaire longshore.

Mots-clés :

Génie côtier, hydro-sédimentaire, transport longshore, galet, tempête, houle australe, ouvrage portuaire, engravement, dragage, traçage sédimentaire sous-marin, RFID, Ile de la Réunion.

1. Introduction

1.1 Contexte hydro-sédimentaire

Le complexe alluvionnaire de la Rivière des Galets est en construction depuis 220 000 ans environ avec les matériaux hérités de l’érosion du cirque de Mafate (voir Figure 1). Plus récemment (25 000 ans B.P.), une érosion active du massif volcanique a mis en place une accumulation détritique très hétérogène, caractéristique d’une construction deltaïque en

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

mode torrentiel (TROADEC, 1991). L'action progradante du cône est régularisée par les actions marines, notamment les houles australes à l'origine de l'élaboration d'un cordon littoral remontant vers le nord jusqu'à la Pointe des Galets.

La morphologie sous-marine est particulièrement accore. Les pentes conduisant à la profondeur - 50 m sont souvent supérieures à 20 % et croissent avec la profondeur pour atteindre une situation proche du profil d'équilibre des matériaux non cohésifs. Les fortes houles (ASCIONE & GAUFRÈS, 2006) déclenchent l'effondrement d'accumulations sédimentaires ; des coulées gravitaires s'observent en grande profondeur.



Figure 1. Plan de situation – Port Ouest (Ile de la Réunion) – Image Google 3D.

1.2 Problématique d'engravement de Port Ouest

Dans ce contexte géologique et hydrosédimentaire, comme la Réunion ne disposait naturellement d'aucun site propice à l'établissement d'une infrastructure portuaire, Port Ouest a été construit sur ce littoral à la fin du XIX^{ème} siècle. (CAUBET, 1936) décrit l'édification de deux jetées protégeant l'entrée du port artificiel, protégées contre l'affouillement par un pavage de blocs de défense établi à leur base. Ouvert au trafic en 1886, le port révèle des imperfections dès son origine. A chaque épisode de houle australe, le chenal d'entrée est soumis à des problèmes d'engravement par galets dont la granulométrie varie entre 0 et 300 mm. La jetée sud crée une discontinuité dans le cheminement des matériaux qui, arrivant en extrémité de musoir se distribuent en s'accumulant pour partie sur le talus instable à forte pente devant l'ouvrage. Le restant est transporté par les courants de houles australes diffractant sur le musoir et se trouvent piégé dans la passe d'entrée, formant un banc accolé au parement nord de la jetée sud.

En 1904 et 1907 on consolide la jetée sud raccourcie de 40 m par l'attaque des lames par un musoir, mais celui-ci est détruit à deux reprises par la mer. Elle est reconstruite en 1930

après une obstruction complète du chenal (1927-1928). Un modèle physique (LHERMITTE & GERMAIN, 1955) conclut à un transport dans la bande comprise entre -7,00 m et - 3,00 m. Avec une profondeur optimale de - 8,00 m l'allongement de la jetée sud dans les années 1960 mit fin à ce grave inconvénient jusqu'à la dépression tropicale Hyacinthe (1980) qui emporta 30 m de musoir (AUBIE & OLIVEROS, 1999). Depuis cette date le Grand Port Maritime de La Réunion (GPMDLR) poursuit des dragages d'entretien pour assurer la bonne condition d'accès des navires à Port Ouest.

(ARTELIA, 2012) estime à 7,7 millions de m³ sur la période 1936-2008 le volume extrait et déposé sur le Banc de la Folette en aval dérive. Actuellement les volumes piégés sont compris en moyenne entre 50 et 80 000 m³/an et correspondent approximativement aux volumes dragués pour un coût moyen de 2 à 3 millions €/an (amortissement du matériel inclus) puis transportés par camion et mis en dépôt au nord de l'entrée du port.

Les modèles numériques (PONS & TRMAL, 2010), (ARTELIA, 2012), etc. sont limitées par la fiabilité des données bathymétriques et courantométriques notamment pour reproduire à fine échelle les processus hydrosédimentaires autour du musoir sud. Une position avancée en mer permettrait de réduire les apports de galets dans le chenal, mais la morphologie des fonds et leur instabilité limitent les possibilités d'allongement significatif de l'ouvrage et sa capacité à contenir les matériaux provenant de la dérive littorale. Ainsi, des solutions de traçage RFID des galets sont explorées en complément des prédictions des modèles de transport sédimentaire longshore pour optimiser la géométrie de la jetée et les moyens de dragage.

2. La technologie RFID

Les étiquettes d'identification par radio fréquence (tags RFID pour l'acronyme anglais) sont utilisées depuis les années 2000 pour le suivi de particules sédimentaires individualisées, enfouies, immergées ou émergées dans des milieux fluviaux et torrentiels (voir synthèse de LIEBAULT *et al.* 2023) ou côtier (voir la synthèse de PERIYASAMY *et al.*, 2020).

Le principe général de fonctionnement repose sur l'échange d'un signal radio sous forme d'ondes électro-magnétiques (EM) entre un système de détection/identification dont la position fixe ou mobile est connue, et une radio étiquette (tag) intégrée à un objet suivi et dont la position fixe ou mobile est à déterminer. L'intérêt de la technologie RFID réside dans :

- a) la détection sans fil (non invasive) de particules individuelles « taggées »
- b) l'individualisation des particules qui permet de rattacher chaque nouvelle localisation (avec ou sans déplacement) avec les propriétés morphométriques (taille, forme ou poids) et l'historique du mouvement (localisations antérieures, positions au sein du système étudié).

Ces données sont ensuite analysées au regard de l'intensité d'un forçage hydrologique (crue) ou météorin (tempête).

On peut distinguer les technologies RFID sur la base de deux critères :

- a) la source d'énergie électrique :

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

- Les « passives » sont sans batterie et captent les ondes EM à l'aide d'une antenne interne pour se charger puis émettre leur signal ;
 - Les « actives » ont une batterie et donc une durée de vie limitée dans le temps ;
- b) la longueur d'onde du signal radio :
- BF (120 – 150 kHz), HF (13.56 MHz) ou encore UHF (433 à 928 MHz)
 - conditionne la propagation du signal dans les milieux (eau douce ou salée, sédiments, air).

Parmi la diversité des systèmes existants, on peut citer les quatre technologies décrites dans le Tableau 1 et la Figure 2 ci-dessous.

Tableau 1. Synthèse des principaux types de traceurs abordés dans cet article.

Tags (Référence)	Type	Taille traceur (mm)	Dist. max. détection (m)	Installation	Coût par traceur (€)	Nb. injectés	Nb de ref. en côtier/fluvial	Environnement de déploiement
PIT (ARNAUD et al., 2015)	Passif BF	> 16	< 1m	Perçage/ collage	< 15	500 à 1000	8/59	Intertidal Cours d'eau Prof. < 3 m
aUHF (CASSEL et al., 2017)	Actif UHF	≈ 40	80 m à l'air 4 m enfouis 2 m en eau	Moulage dans galet artificiel	≈ 80	10 à 200	0/6	Cours d'eau Prof. < 3 m
Disk (BENELLI et al., 2011)	Passif BF	> 25	< 0.5 m	Perçage/ Collage	n/a	< 100	2/0	Intertidal Prof. < 3 m
LOTEK (LIEDERMA NN et al., 2013)	Actif UHF	≈ 40	200 m en eau	Moulage dans galet artificiel	≈ 350	< 50	0/3	Cours d'eau Prof. < 10 m

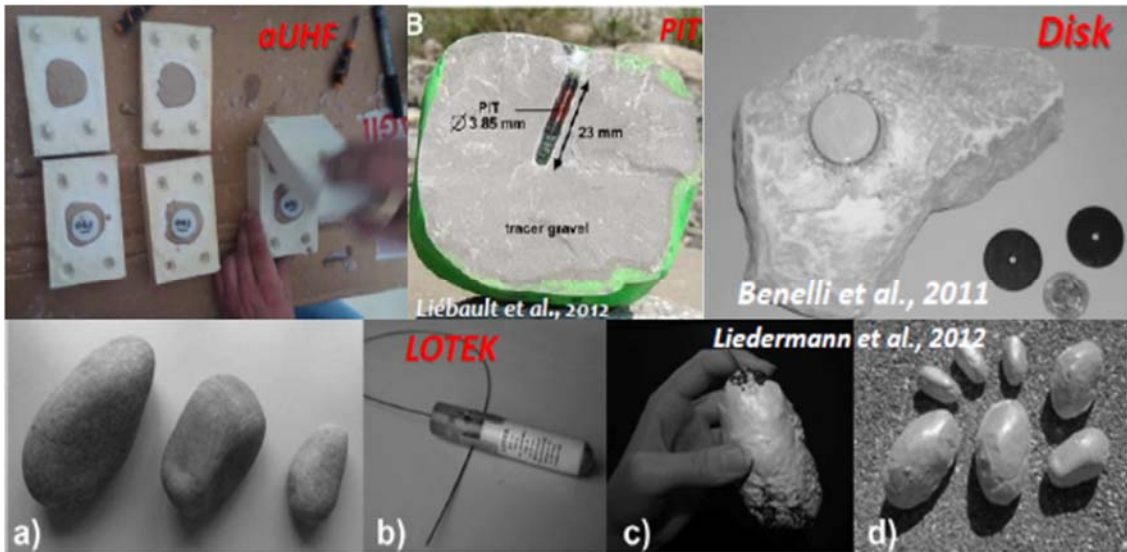


Figure 2. Exemple de traceurs sédimentaires équipés de puces RFID.

Le choix de la technologie résulte d'une série de compromis :

a) *Taille du traceur vs. Durée de vie vs. Distance de détection :*

- Les plus petits traceurs n'ont pas de batterie (et donc une longue durée de vie) MAIS ont aussi une distance de détection très faible
- Les traceurs volumineux fonctionnent généralement avec une batterie (donc une durée de vie finie) ; la distance maximale de détection est fonction de leur coût.

b) *Distance de détection vs. Précision de localisation vs. Temps de prospection :*

- Les traceurs à courte distance de détection engendrent une prospection très chronophage mais présentent une précision de localisation bonne et immédiate.
- Les traceurs à longue distance de détection engendrent une prospection plus rapide mais présentent une précision de localisation faible et/ou chronophage.

c) *Le coût total d'un traçage est la somme de l'équipement et des prospections de suivis*

- L'équipement (un investissement initial) : on réduit le nombre de transpondeurs en fonction de leur coût (souvent fonction de leurs performances).
- Les suivis (répétés dans le temps et pouvant s'étendre à mesure de la dispersion des traceurs) : selon la méthode/technologie plus ou moins chronophage ce poste peut augmenter de manière exponentielle.

d) *Echelles spatiales et temporelles de mesures vs durée des suivis :*

- Fines : les détections fréquentes et précises, coûteuses et chronophages, sont-elles compatibles avec la récurrence du processus mesuré ?
- Grandes : les détections ponctuelles et positions approximées, plus rapides mais moins précises, sont-elles en adéquation avec le processus étudié ?

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

3. Proposition d'équipement pour la Pointe des Galets à la Réunion.

3.1 Complexité du site

Le site constitue un défi de taille de par l'intensité des processus (puissance de la houle et des événements météomarins), l'ampleur du littoral instrumenté (plusieurs km²), les conditions d'accès et de prospection (forte houle et dérive littorale), les pertes de sédiments dans les fonds, etc.

3.2 Equipements envisageables

Nous conseillons de recourir aux technologies aUHF et LOTEKs (voir Tableau 1 et Figure 2) pour permettre la collecte d'information à deux échelles (voir Figure 3) :

a) Macro : depuis le delta de la Rivière des Galets jusqu'à la plage sud.

b) Micro : depuis la jetée sud jusqu'au chenal du port.

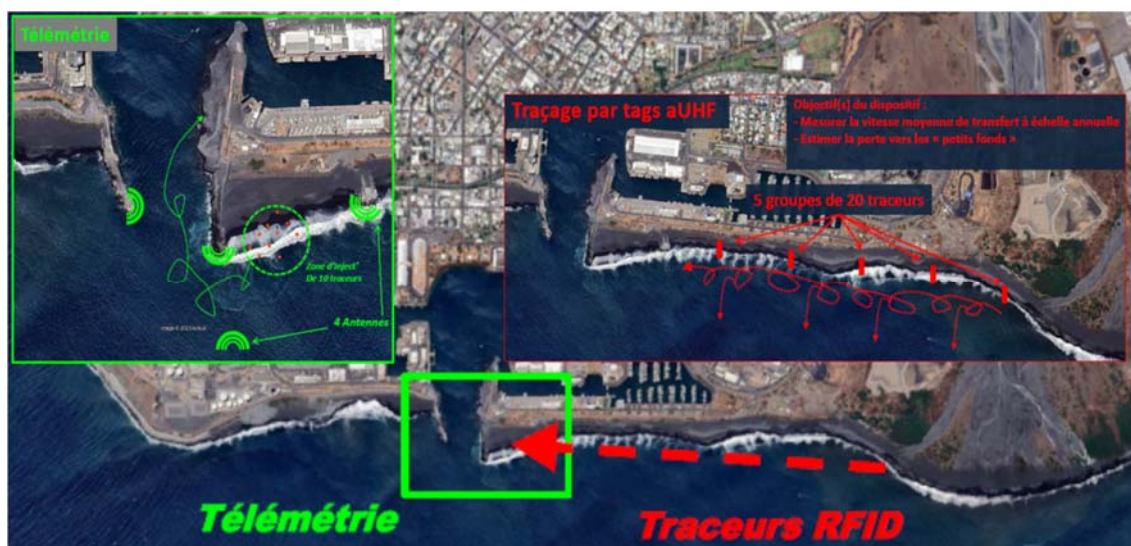


Figure 3. Proposition d'équipement de Port Ouest avec les deux technologies RFID.

3.3 Tests préalables à réaliser

Avant de déployer sur site ces différents matériels de traçage sédimentaire, un certain nombre de tests doivent être conduits pour valider l'adaptation à cet environnement côtier difficile. Ces tests sont listés pour chacune des deux technologies dans le Tableau 2, ci-dessous. Afin d'optimiser les coûts d'équipement, un premier protocole minimal reposerait sur : (a) une station de détection amovible implantée sur un emplacement fixe ; (b) 50 transpondeurs LOTEK inter distants de 50 m, entre le delta de la Rivière des Galets et le musoir ; (c) une première période de mesure des signaux (quelques heures/jours) ; (d) une introduction des transpondeurs dans des galets suivie d'une seconde période de détection.

Tableau 2. Synthèse des difficultés anticipées et des tests préalables au déploiement sur site.

<i>Technologie</i>	<i>Difficultés anticipées</i>	<i>Précautions et préalables</i>
<i>Traceurs RFID aUHF</i>	<i>i) Risque d'enfouissement des traceurs dans la masse sédimentaire de la plage à une profondeur indéterminée</i>	<i>Tests de détection dans les milieux salins et ferreux des engins de curage (camions de transport)</i>
	<i>ii) Prospections compliquées dans les zones intertidales ou infralittorales du fait de la houle et des courants marins</i>	
	<i>iii) Traceurs recherchés/détectés uniquement depuis la plage et/ou dans les zones de stockage des matériaux de curage</i>	
<i>Télémetrie LOTEK</i>	<i>i) Echelle importante du site mais besoin de décrire cheminement le plus précisément possible</i>	<i>i) Tests d'occurrence de phénomènes d'écho, notamment sur les digues</i>
	<i>ii) Prospection délicate avec le système de détection mobile dans les zones intertidales ou infralittorales du fait des courants marins (voir clubs de plongée locaux)</i>	<i>ii) Tests de détection à la profondeur max du site</i>
	<i>iii) Probablement besoin d'une antenne sur bouée pour « triangulation » signaux</i>	<i>iii) Mesure du recouvrement des champs de détection des antennes</i>
		<i>iv) Qualifier les probabilités de détection</i>
		<i>v) Antennes et fixations résistantes</i>
		<i>vi) Centraliser l'enregistrement des signaux</i>

4. Conclusion

L'environnement naturel du site de Port Ouest et en particulier l'agitation au droit des ouvrages constitue un défi majeur pour une opération de traçage sédimentaire dont les enjeux d'optimisation des dragages sont déterminants pour l'accès des navires dans le chenal. Au cours de ces dix dernières années, la technologie RFID a relevé de nombreux défis méthodologiques dans le domaine du traçage des particules, que ce soit en milieu fluvial ou côtier, et ce malgré des contraintes imposées par des milieux particulièrement dynamiques ou difficiles.

Dans cet article, pour éclairer la modélisation numérique qui se heurte à une morphologie sous-marine particulièrement tourmentée et une forte complexité des courants en fonction des forçages marins, nous posons les bases d'une méthodologie de traçage dont l'objectif est de mieux comprendre la dynamique sédimentaire entre la Rivière des Galets et le Port Ouest qui affecte le fonctionnement et la gestion portuaire. Nous présentons ici deux technologies qui pourraient permettre d'appréhender les fonctionnements des différents compartiments de ce système anthropisé. Nous y listons les tests préalables afin d'adapter les systèmes existants et éprouvés en milieux fluviaux et de valider leur transposition en milieu côtier. Pour aller plus loin, il convient maintenant de construire les protocoles nécessaires à l'aide d'une station de détection amovible sur un emplacement fixe et conduire ces tests dans des fenêtres météo-marines compatibles.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

5. Références bibliographiques

- ARNAUD F., PIEGAY H., VAUDOR L., BULTINGAIRE L., FANTINO G. (2015). *Technical specifications of low-frequency radio identification bedload tracking from field experiments: Differences in antennas, tags and operators*. *Geomorphology* 238: 37–46. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.02.029
- ARTELIA, (2012). 1 71 3118_R4VF : *Etude de la définition d'une gestion globale des stocks sédimentaires dans le secteur du Port Ouest de la Réunion*. MEDDTL.
- ASCIONE J.C., GAUFRÈS P. (2006). *Modélisation des états de mer pour la recherche de sites d'exploitation houlomotrice - Application à l'île de la Réunion*. IX^{ème} JNGCGC, 12-14 septembre 2006, Brest, doi:10.5150/JNGCGC.2006.002-A
- AUBIÉ S., OLIVEROS C. (1999). 40780-99 SGR/OI 34 : *Evolution du trait de côte de 1950 à 1997 de la Baie de La Possession à l'embouchure de l'Etang de Saint-Paul, Ile de la Réunion*. BRGM. http://www.eaureunion.fr/fileadmin/user_upload/Etudes/ETUDE_01119.PDF
- BENELLI G., BERTONI D., SARTI G. (2011). *An analysis on the use of LF RFID for the tracking of different typologies of pebbles on beaches*. pp. 426–431. IEEE, Int. Conf. on RFID-Technologies and Applications. doi: 10.1109/RFID-TA.2011.6068673
- CASSEL M., DEPRET T., PIEGAY H. (2017). *Assessment of a new solution for tracking pebbles in rivers based on active RFID*. *Earth Surface Processes and Landforms* 42: 1938–1951. doi: 10.1002/esp.4152
- CAUBET, P. (1936). *Rades et Ports de la Réunion*. *Annales de Géographie*. 1936. Vol. 45, n° 254, pp. 175- 184. doi.org/10.3406/geo.1936.18614
- LHERMITTE P., GERMAIN J. (1955). *Les transports littoraux sur les plages de galets - Application au port des Galets à l'île de la Réunion*. *La Houille Blanche*, Vol. 2. <https://doi.org/10.1051/lhb/1955019>
- LIEBAULT F., PIEGAY H., CASSEL M., ARNAUD F. (2023). *Bedload tracing with RFID tags in gravel-bed rivers: Review and meta-analysis after 20 years of field and laboratory experiments*. *Earth Surface Processes and Landforms*, doi: 10.1002/esp.5704
- LIEDERMANN M., TRITTHART M., HABERSACK H. (2013). *Particle path characteristics at the large gravel-bed river Danube: results from a tracer study and numerical modelling*. *Earth Surface Processes and Landforms* 38: 512–522. doi: 10.1002/esp.3338
- PERIYASAMY M., KARTHIKEYAN S., MAHENDRAN G. (2020). *Selected studies of sediment tracking in mixed and gravel beaches using RFID technology – A review*. *Materials Today: Proceedings* 33 : 4003–4006. doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.342
- PONS F., TRMAL C. (2010). *Étude d'extraction des matériaux sur le littoral sud du Port Ouest*. CETE Méditerranée.
- TROADEC R. (1991). *Courantologie et sédimentologie des baies de Saint-Paul et de La Possession à l'île de la Réunion*, Thèse de doctorat, Université de la Réunion et Aix Marseille II. http://www.eaureunion.fr/fileadmin/user_upload/Etudes/ETUDE_01286.PDF