



Géophysique externe, climat

Géomorphologie de Tromelin, océan Indien

*Geomorphology of Tromelin, Indian Ocean*Nick Marriner^{a,*}, Max Guérout^b, Thomas Romon^c, Philippe Dussouillez^a^a CEREGE CNRS UMR 6635, europôle de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence cedex 04, France^b GRAN, 4, rue Antoine-Condorcet, 34500 Béziers, France^c INRAP, rue des Gommiers-Blancs, Parnasse, 97120 Saint-Claude, France

INFO ARTICLE

Historique de l'article :

Reçu le 5 mai 2009

Accepté après révision le 30 juin 2010

Présenté par Xavier Le Pichon

Mots clés :

Géomorphologie littorale

Géochronologie

Littoraux tropicaux

Tromelin

Océan Indien

RÉSUMÉ

Tromelin est une petite île corallienne d'environ 1 km² située dans le bassin cyclonique du Sud-Ouest de l'océan Indien, à environ 440 km à l'est de Madagascar et 580 km au nord de la Réunion. L'île n'a jamais fait l'objet d'une étude géomorphologique approfondie. Ici, nous décrivons les premiers résultats de la mission de terrain 2008, menée sous les auspices du groupe de recherche d'archéologie navale (GRAN), qui a permis d'élucider sept unités géomorphologiques sur l'île. (1) La bathymétrie tromelinoise est caractérisée par une pente externe sous-marine, très marquée et qui descend à 1000 m à environ 2,5 km de la ligne de rivage, typique des points chauds volcaniques. (2) Un platier corallien ceinture la couronne terrestre de l'île. Il est exposé uniquement à marée basse, façonné dans un substrat calcaire ancien. Ce substrat a été aplani depuis la stabilisation du niveau relatif de la mer autour de 6000 ans BP, par l'action abrasive de la mer, et fournit la quasi-totalité du matériel détritique à l'île. (3) La partie supérieure de l'estran est caractérisée par l'affleurement de *beachrocks*. Ces formations montrent une stratification en dalles et un pendage vers la mer qui suit l'alignement des dépôts meubles actuels. (4) Le cordon littoral de Tromelin est caractérisé par trois sous-unités : (i) les plages de tempête à blocs de corail au sud (*boulder ramparts*) ; (ii) les plages « mixtes » au sud-est et au sud-ouest ; et (iii) les plages sableuses au nord. (5) Sur Tromelin, la hauteur des dunes varie de 10 cm (micro-dunes sud) à 250 cm au nord-est de l'île. Pour la plupart, il s'agit de dunes paraboliques, orientées SE–NW. (6) Les vagues de tempêtes exceptionnelles ont pu déferler par-dessus la levée de tempête, dont la plus haute s'élève à environ 7 m, pour former une laisse jusqu'à 250 m à l'intérieur des terres. Ces laisses de tempête sont principalement visibles dans le sud de l'île en raison de la faible couverture végétale. (7) Pour finir, la dépression sud couvre une superficie d'environ 40 000 m². Sa partie basse se situe à seulement 1,2 m au-dessus du niveau de la mer.

© 2010 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

A B S T R A C T

Tromelin is a small coral reef island (1 km²) located in the Indian Ocean, approximately 440 km east of Madagascar and 580 km north of La Réunion. Despite the presence of a permanent Météo France weather station on Tromelin since the 1950s, a detailed geomorphological study of the island has never been undertaken. In this paper, we describe results from the 2008 field season, which enabled us to map and describe seven geomorphological zones on the atoll. (1) Tromelin's bathymetry is characterised by a pronounced submarine slope, which attains depths of 1000 m at only 2.5 km from the

Keywords:

Coastal geomorphology

Geoarchaeology

Coral reef

Tromelin

Indian Ocean

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : marriner@cerge.fr (N. Marriner), mrgueroutmaxadrien@9business.fr (M. Guérout), thomas.romon@inrap.fr (T. Romon).

island's coastline. This geomorphology is typical of volcanic hotspots. (2) A coral platform borders the emerged crown of the island. This platform is exposed at low tide and has been fashioned in an ancient Pleistocene substratum. The substratum has been eroded by abrasive marine action to its present shape since the stabilisation of relative sea level around 6000 years ago. Erosion of the reef yields most of the biogenic sediment supply to the island. (3) The upper foreshore is characterised by outcrops of beachrock. These formations show a stratification in slabs and dip gently towards the sea in the same manner as the contemporary clastic sediments. (4) Tromelin's beaches are divided into three sub-units, which reflect the different energy dynamics around the island, in addition to the transfer of sediment from the windward to the leeward side: (i) the southern storm beaches are characterised by coral blocks reworked during episodic high-energy events; they form boulder ramparts. Four perched rampart ridges have been recorded at ~1 m, ~3 m, ~4.5 m and ~7 m above mean sea level; (ii) transitional beaches are observed between the south and the north, constituting storm blocks and coarse sands and gravels; and (iii) sandy beaches are noted on the northern leeward side, comprising rounded gravels and coarse sands. The northern tip of the island is characterised by a sand spit (~125 × ~225 m), whose geometry varies based on the seasonal and meteo-marine contexts. (5) On Tromelin, a number of dune formations are observed. These are best developed in the north of the island due to the south-north translation of clastic sediments by aeolian wind action, and the trapping of sands by the well-developed vegetation. The height of the dunes varies between 10 cm (the southern micro-dunes) to 250 cm in the Northeast of Tromelin. (6) Exceptional waves have deposited storm tracts up to 250 m from the foreshore zone, comprising coarse gravels and coral blocks. The storm tract deposits are most prevalent on the windward side of the island, due not only to the high-energy dynamics, but also to the absence of vegetation cover in this area. (7) The southern depression covers an area of ~40,000 m². At its lowest point it is only 1.2 m above sea level.

© 2010 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Abridged English version

Tromelin is a small coral reef island (1 km²) located in the Indian Ocean, approximately 440 km east of Madagascar and 580 km north of La Réunion (Fig. 1). Tromelin is a coral cay whose maximum height does not exceed 8 m. In its present configuration, the island formed when eustatic sea-level stabilised during the mid-Holocene, leading to the accretion of a sand bank atop shallow Quaternary reefs (Barry et al., 2007; Guilcher, 1988; Montaggioni, 2005); the reef system that flanks the island is the main sediment source. From 6000 years BP, when global sea level achieved broad stability (Bard et al., 1996; Camoin et al., 1997, 2004; Pirazzoli, 1996), bioclastic reef material eroded on the reef complex helped extend the island's surface. Despite the presence of a permanent Météo France weather station on Tromelin since the 1950s, a detailed geomorphological study of the island has never been undertaken. In this article, we describe results from the 2008 field season, which enabled us to map and describe seven geomorphological zones on the atoll: (1) Tromelin's bathymetry is characterised by a pronounced submarine slope, which attains depths of 1000 m at only 2.5 km from the island's coastline (Fig. 6). This geomorphology is typical of volcanic hotspots. Tromelin is located in the Mascarene Basin, a rift formed 83 Ma ago when Madagascar was separated from India. This rift was abandoned around 60 Ma ago when the extension moved to a new area, the central Indian Ridge, between the Seychelles and India (Lénat et al., 2009). To date, no study of this offshore zone has been conducted. (2) A coral platform borders the emerged crown of the island. This substrate, of which some remains are presently found

around 1 m above current sea-level (Pirazzoli, personal communication), has been extensively eroded by wave action since the stabilization of relative sea level around 6000 years BP; the reef yields the majority of bio-clastic material to the island crown. The substratum has been eroded by abrasive marine action to its present shape since the stabilisation of relative sea level around 6000 years ago. Erosion of the reef yields most of the biogenic sediment supply to the island. The coral reef yields the bulk of the sediment budget to the island's supratidal formations. Accordingly, with the exception of some pumice stones of undefined origin, the island's sediments are bioclastic. The sedimentary deposits, studied through a series of sampling stations, show a clear south-north grain-size differentiation. These variations are mainly due to the dominant meteo-marine forcing agents. Absence of water-courses on the island provides very little terrestrial sediment to feed longshore drift. (3) The upper foreshore is characterised by outcrops of beachrock, particularly in the south of the island (Fig. 8). These formations show a stratification in slabs and dip gently towards the sea in the same manner as the contemporary clastic sediments. The beachrock formation disappears beneath the boulder ramparts, comprising coral blocks and slabs of detached beachrock. (4) Tromelin's beaches are divided into three sub-units, which reflect the different energy dynamics around the island, in addition to the transfer of sediment from the windward to the leeward side: (i) the southern storm beaches (20–35 m wide) are characterised by coral blocks reworked during episodic high-energy events; they form boulder ramparts. Four perched rampart ridges have been recorded at ~1 m, ~3 m, ~4.5 m and ~7 m above

mean sea level. The most recent ridge lies just above mean sea level and constitutes white coral blocks that contrast with the darker shades, due to Cyanobacteria, of older ridges. The height of these ramparts is exceptional for a coral reef (Pirazzoli, 2011) and has principally resulted from the strength of tropical storms and the long fetch area (> 6500 km from the east); (ii) transitional beaches are observed between the south and the north, constituting storm blocks and coarse sands and gravels; and (iii) sandy beaches are noted on the northern leeward side (maximum width ~50–75 m), comprising rounded gravels and coarse sands. The northern tip of the island is characterised by a sand spit (~125 × ~225 m), whose geometry varies based on the seasonal and meteo-marine contexts. (5) On Tromelin, a number of dune formations are observed (Fig. 9). These are best developed in the north of the island due to the south-north translation of clastic sediments by aeolian wind action, and the trapping of sands by the well-developed vegetation. The height of the dunes varies between 10 cm (the southern micro-dunes) to 250 cm in the Northeast of Tromelin. The dunes are parabolic, oriented southeast-northwest. (6) Exceptional waves have deposited storm tracts up to 250 m from the foreshore zone, comprising coarse gravels and coral blocks. For the most part, the sediments are of hydrodynamic origin, deposited by high-energy waves associated with intense cyclones. These storms deposits comprise coral blocks (usually < 30 cm) and are principally visible in the south of the island, due to the low vegetation cover and low sediment budgets. (7) The southern depression covers an area of ~40 000 m². At its lowest point it is only 1.2 m above sea level. Clastic sediments are rapidly lithified to form a conglomerate about 15 cm below the ground surface. This low topography has resulted from low sediment supply and the strong accretion of flanking areas during storm events (Fig. 10).

1. Introduction

Localisée à 580 km au nord-ouest de La Réunion, soit de longitude 54°31 E et de latitude 15°53 S, Tromelin est une petite île corallienne d'environ 1750 m de long par 700 m, ceinturée d'un platier corallien exposé lors des marées basses (Fig. 1 et 2). Bien que décrite et visitée par plusieurs voyageurs depuis le XVIII^e siècle (Guérout et Romon, 2008), Tromelin n'a jamais fait l'objet d'études géographiques ou géologiques approfondies, les recherches étant jusqu'à présent le fait de zoologues ou des botanistes (Brygoo, 1955 ; Paulian, 1955 ; Séguy, 1955 ; Staub, 1970).

Découverte le 10 août 1722, par *la Diane*, un vaisseau de la Compagnie française des Indes orientales, l'île est le mieux connue pour un épisode tragique : le naufrage de la flûte *l'Utile* (Guérout, 2007 ; Guérout et Romon, 2007, 2008). Le 31 juillet 1761, 120 hommes d'équipage et une soixantaine d'esclaves survivent au naufrage de *l'Utile*, une flûte de la Compagnie française des Indes orientales se rendant de Madagascar à l'île de France (l'actuelle île Maurice). À l'aide des restes de *l'Utile*, les survivants construisent une embarcation de fortune, *la Providence*, prennent la mer, le 27 septembre, vers Madagascar, abandonnant les naufragés malgaches. Seulement huit

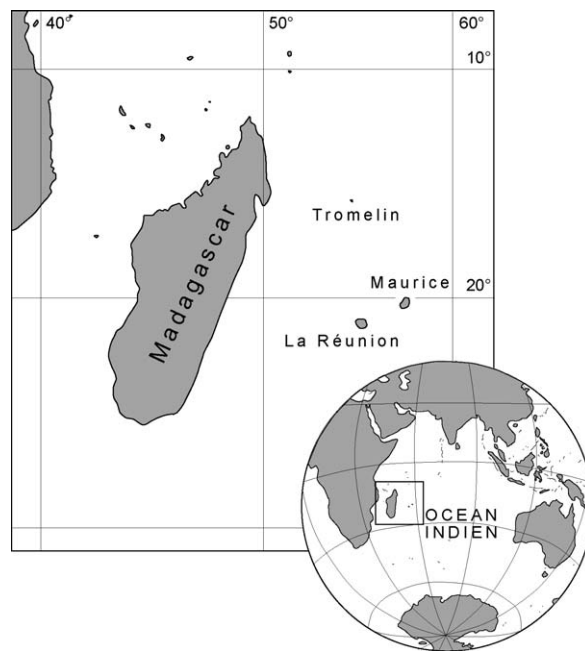


Fig. 1. Localisation de Tromelin dans l'océan Indien.

Fig. 1. Location map of Tromelin, Indian Ocean.

survivants, sept femmes et un enfant, seront secourus le 29 novembre 1776. Bien que le séjour des marins français sur l'île soit bien attesté grâce à un journal et des cartes manuscrites, nous ne disposons pas d'informations quant à la manière dont les esclaves ont survécu sur l'île pendant près de 15 ans. Afin d'éclaircir non seulement les conditions de vie des naufragés, mais également le contexte géomorphologique de l'île, deux missions archéologiques ont été menées en 2006 et 2008, sous la direction de M. Guérout (GRAN) avec le concours de T. Romon (INRAP).

Tromelin est une caye corallienne dont la hauteur maximale ne dépasse pas 8 m. L'île doit son origine à l'émergence à la fin de la transgression marine holocène, sous forme d'un banc sableux accumulé sur des hauts-fonds coralliens pléistocènes (Barry et al., 2007 ; Guilcher, 1988 ; Montaggioni, 2005) ; le récif est le pourvoyeur sédimentaire principal. À partir de 6000 ans BP, une fois le niveau marin glacio-eustatique stabilisé (Bard et al., 1996 ; Camoin et al., 1997, 2004 ; Pirazzoli, 1996), les matériaux coralliens détritiques, érodés sur le platier et les hauts-fonds marins, ont contribué à étendre la surface de l'île.

La géomorphologie de Tromelin témoigne de trois forçages principaux : (1) les houles dues aux vents, dont le régime habituel à Tromelin, est l'alizé de sud-est. Ces vents sont régulièrement supérieurs à 8 m/s en hiver (données Météo France Tromelin) ; (2) les houles longues, également d'origine météorologique, indépendantes des conditions locales. Ce type de houle est fréquent pendant l'hiver austral et résulte de tempêtes lointaines dans la zone de fetch (i.e. > 6500 km pour l'est). Ces houles sont à l'origine d'une érosion accélérée des côtes ainsi que d'une forte sédimentation ; (3) les cyclones.

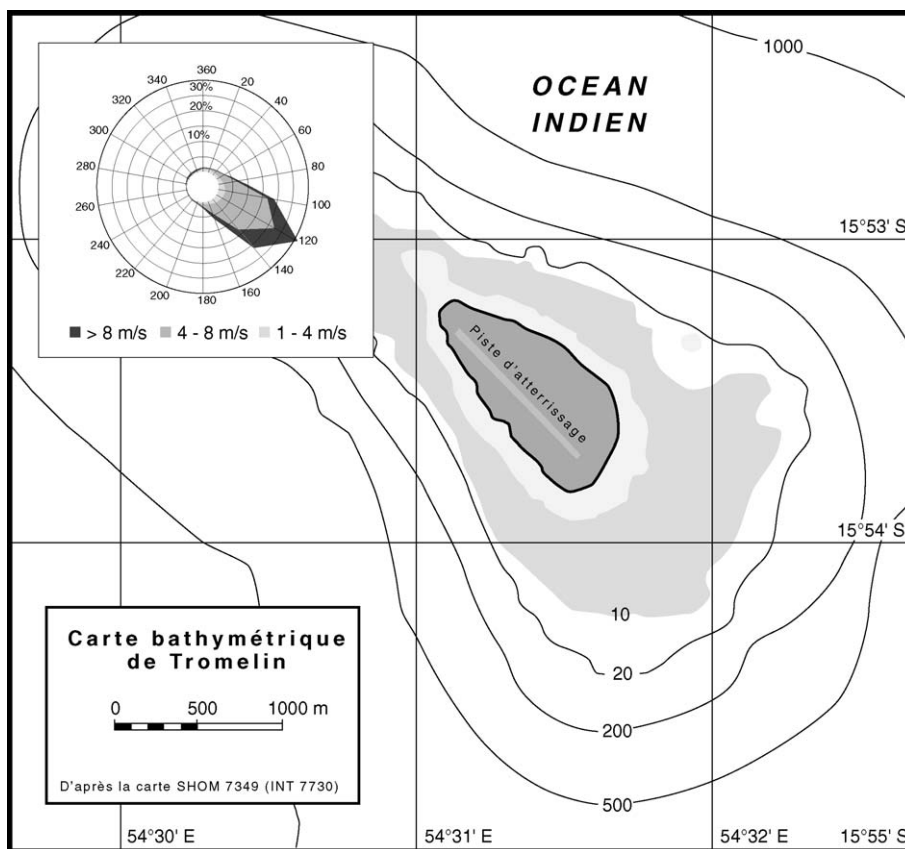


Fig. 2. Carte bathymétrique de Tromelin.

Fig. 2. Bathymetric map of Tromelin.

D'après les données du SHOM (7349).

Tromelin se situe dans le bassin cyclonique du Sud-Ouest de l'océan Indien, qui s'étend depuis les côtes africaines jusqu'au méridien 90° Est (<http://www.mto-tec.com/>). En moyenne, neuf perturbations tropicales naissent dans la région chaque année, dont quatre atteindront le stade de cyclones tropicaux, alors que les cinq autres ne dépasseront pas le stade de tempête. Tromelin est une île particulièrement exposée à l'aléa cyclonique en raison de sa topographie plane (< 8 m). Les saisons hivernales, de mai à octobre, sont caractérisées par le régime des alizés de sud-est à est (Mancel, 1991). L'été, de novembre à avril, le flux est d'est à nord-est en raison des basses pressions équatoriales qui descendent vers le sud. Les alizés océaniques affectant Tromelin voient leurs vitesses fréquemment atteindre les 20 km/h.

Afin de vérifier la faisabilité de l'installation d'une station météo, la Direction des services météorologiques prit en novembre 1953, la décision d'envoyer une mission de reconnaissance sur l'île. L'équipe était formée notamment de : M. Renaud Paulian, Directeur adjoint de l'institut de recherches scientifiques de Madagascar, et du capitaine Lombaert.

Renaud Paulian, publia un compte rendu de sa visite intitulé : « Observations de la faune terrestre de l'île de Tromelin » :

« ... L'île de Tromelin, longue de 1750 m, se termine au Nord-Ouest par un banc de sable mobile ; elle comprend, sur un socle corallien, une partie nord un peu relevée, bordée, vers l'est de sable, et, vers l'ouest, d'une banquette corallienne, à laquelle fait suite, au sud, une zone légèrement déprimée, ceinturée d'une muraille où blocs de corail et épaves se mêlent.

L'ensemble atteint au maximum 6 m au-dessus du niveau des hautes mers. Ce niveau paraît en exhaussement continu, car les météorologistes installés sur l'île ont eu la surprise de découvrir que les abris en pierre construits par les naufragés de l'Utile étaient actuellement complètement ensevelis sous le sable.

La végétation comprend une broussaille assez dense de *Tournefortia argentea* L., surtout répandue sur le Nord et sur le pourtour du Sud ; quelques pieds, poussant dans des entonnoirs de sable de la côte nord-est, atteignent 2,5 m de haut et ont des troncs noueux et épais.

À ces arbustes s'associent, principalement vers le nord, *Ipomea pescaprae* Roth, la Patate à Durand ; dans le Sud, *Portulaca oleracea* L., un peu partout *Boerhavia diffusa* L., et *Sida* cf. *Grewioides* Guill. Et Perr., plus rarement *Achynranthes aspera* L. ».

R. Paulian ajoute à sa publication un plan de l'île levé par le capitaine Lombaert (Fig. 3). La carte de Lombaert est

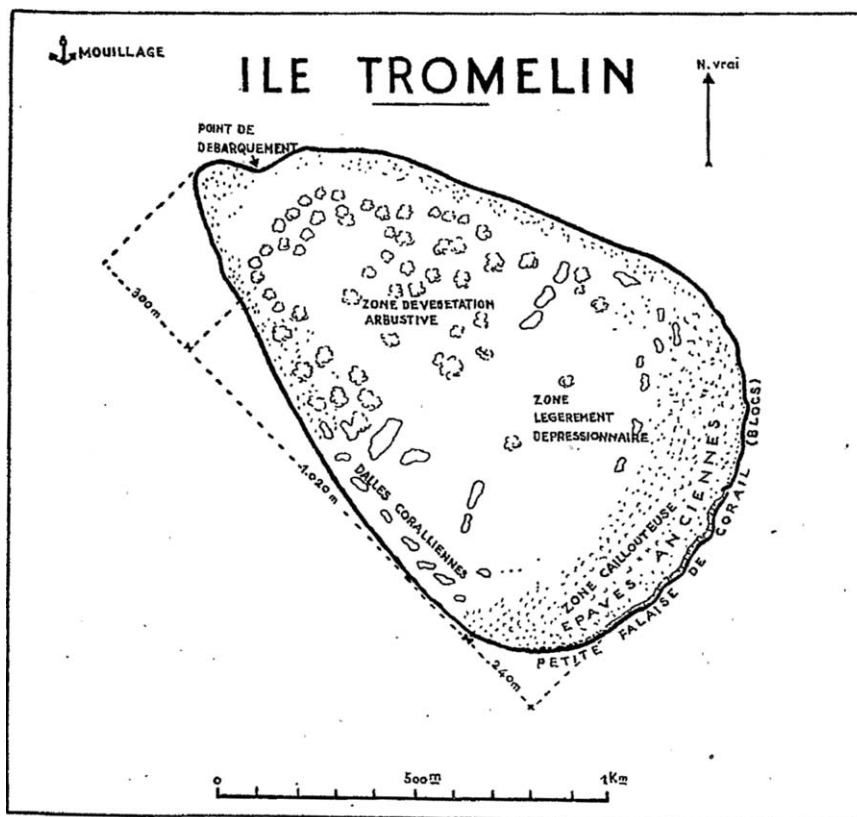


Fig. 3. Plan de Tromelin dressé par Lombaert.

Fig. 3. Map of Tromelin produced by Lombaert.

Dans Paulian, 1955.

peu précise et, si on comprend qu'il est surtout intéressé par la longueur de la piste d'aviation, on constate qu'il a un peu négligé la mesure de la largeur de l'île.

2. Problématiques de recherche géomorphologiques

Lors de la mission 2008, qui s'est déroulée entre le 27 octobre et le 1^{er} décembre, plusieurs problématiques géomorphologiques ont guidé nos recherches. Nous voulions :

- dresser une carte précise de l'île, à l'aide d'un GPS et d'un tachéomètre. Sachant que malgré l'occupation continue de l'île depuis les années 1950, aucune carte topographique précise de Tromelin n'avait été levée ;
- décrire les différentes unités géomorphologiques de l'île ;
- comprendre les processus de transferts sédimentaires autour de l'île ;
- étudier les archives sédimentaires dans le contexte archéologique, afin de caractériser l'impact des tempêtes sur la vie des esclaves ainsi que sur leurs habitats (Marriner et al., 2010).

Nous ne présentons ici que le volet géomorphologique.

3. Méthodologie

Les relevés topographiques ont été effectués à l'aide d'un tachéomètre (modèle Leica TPS800). Nous avons établi une station de référence (9000) sur le toit de la station météo avec les coordonnées 1000 (x), 1000 (y) et 100 (z). Un total de 20 stations (9000–9001 ; 9003–9014 ; 9016–9021) a été positionné autour de l'île, afin d'optimiser la couverture spatiale et de faciliter les mesures (Fig. 4). Les cartes topographiques ont été réalisées avec ArcGIS, en collaboration avec P. Dussoulliez du CEREGE. Le travail topographique fut complété par des prospections géomorphologiques approfondies de l'île.

4. Résultats

Notre étude géomorphologique a permis de décrire un zonage dans la structure de l'île, qui comprend, de l'extérieur vers l'intérieur sept unités principales (Fig. 5).

4.1. Pente externe sous-marine

La bathymétrie tromelinoise est caractérisée par une pente externe sous-marine, très marquée et qui descend à 1000 m, à environ 2,5 km de la ligne de rivage (Fig. 6 et 7).

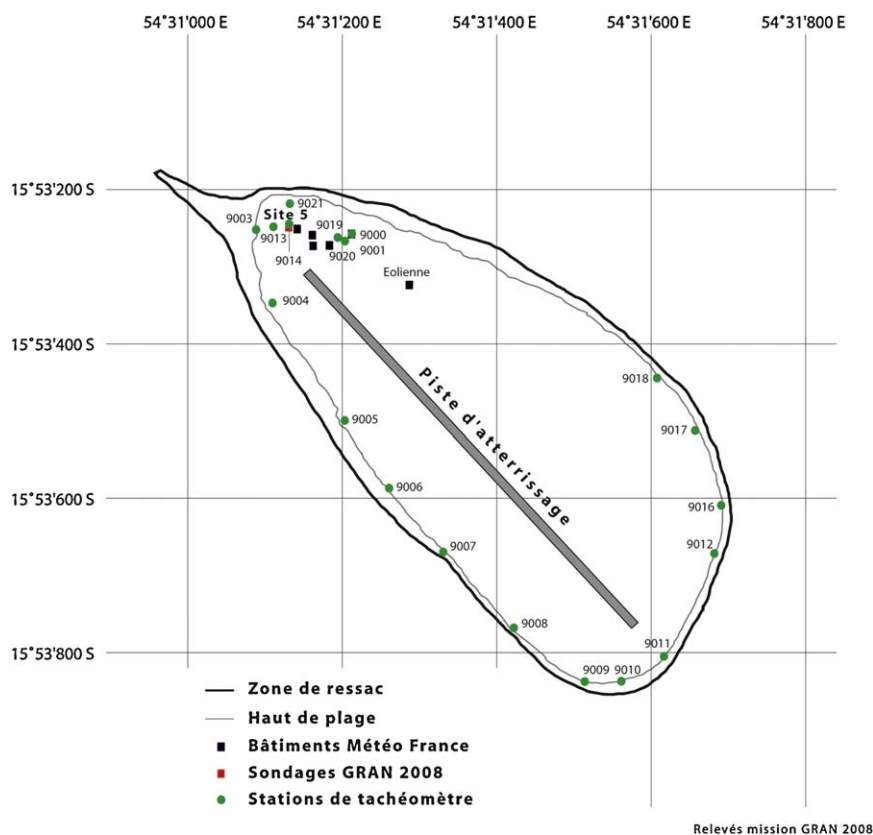


Fig. 4. Localisation des stations de tachéomètre.

Fig. 4. Location map of topographic stations.

Cette bathymétrie est typique des points chauds volcaniques, un volcanisme intra plaque retrouvé principalement sur la lithosphère océanique. Tromelin est située dans le *Mascarene Basin*, un rift formé il y a 83 Ma et qui a marqué la séparation de Madagascar de l'Inde ; ce rift s'est éteint vers 60 Ma, lorsque l'extension s'est déplacée vers un nouveau secteur, le *Central Indian Ridge*, entre les Seychelles et l'Inde (Lénat et al., 2009). À ce jour, aucune étude géomorphologique n'a été réalisée sur cette zone.

4.2. Platier corallien

Un platier ceinture la partie terrestre de l'île. Il est exposé uniquement à marée basse, façonné dans un substrat calcaire ancien. À Tromelin, les marées sont très faibles, de l'ordre d'un mètre. D'après les calculs du SHOM (B. Roump), la marée basse est 0,00 m, la marée de printemps est 0,17 m, le niveau moyen de la mer 0,50 m, la marée haute moyenne de printemps est 0,84 m et la marée des plus hautes mers 1,02 m. Ce substrat, dont il reste quelques vestiges atteignant environ un mètre au-dessus des basses-mers actuelles (Pirazzoli, communication personnelle), a été aplani depuis la stabilisation du niveau relatif de la mer autour de 6000 ans BP, par l'action abrasive de la mer, et fournit la quasi-totalité du matériel biodétritique à l'île. Une série d'éperons et de sillons sont notés sur les prises photographiques aériennes ; ces

structures en peigne sont constituées d'une succession de rides et de sillons perpendiculaires au platier (Battistini et al., 1975) où l'érosion mécanique, très forte, fournit l'essentiel des blocs biogéniques. En effet, le platier sud subit une forte érosion mécanique (vagues déferlantes, courants de retour) et biologique (attaque par les organismes récifaux cariants).

Nous avons également effectué un travail sur les transferts sédimentaires, notamment les blocs coralliens depuis le Sud de l'île. Le platier corallien fournit l'essentiel du sédiment à la côte tromelinoise. En conséquence, à l'exception de quelques laisses de ponces, les sédiments de l'île sont biogéniques. Les dépôts sédimentaires, étudiés à travers une série de stations, présentent une différenciation nette et progressive de la signature sud-nord. Ces variations sédimentaires sont essentiellement dues aux forçages météo-océaniques. L'absence de réseau hydrographique sur l'île ne fournit que très peu de sédiments 'terrestres' pour alimenter la dérive littorale. Treize stations ont été mises en place à plusieurs endroits stratégiques de l'île (Fig. 7). L'axe principal des plus gros blocs diminue de 75 cm (e.g. la station 9010) au sud, à < 20 cm pour les stations nord. Quelques mégablocs (> 1 m de long) se situent en bordure du platier. Ces blocs correspondent, pour la plupart, à des zones d'arrachement et de fracturation du platier, dont ils sont écartés de quelques mètres. Paradoxalement, nous n'avons observé aucun bloc cyclopéen sur Tromelin.

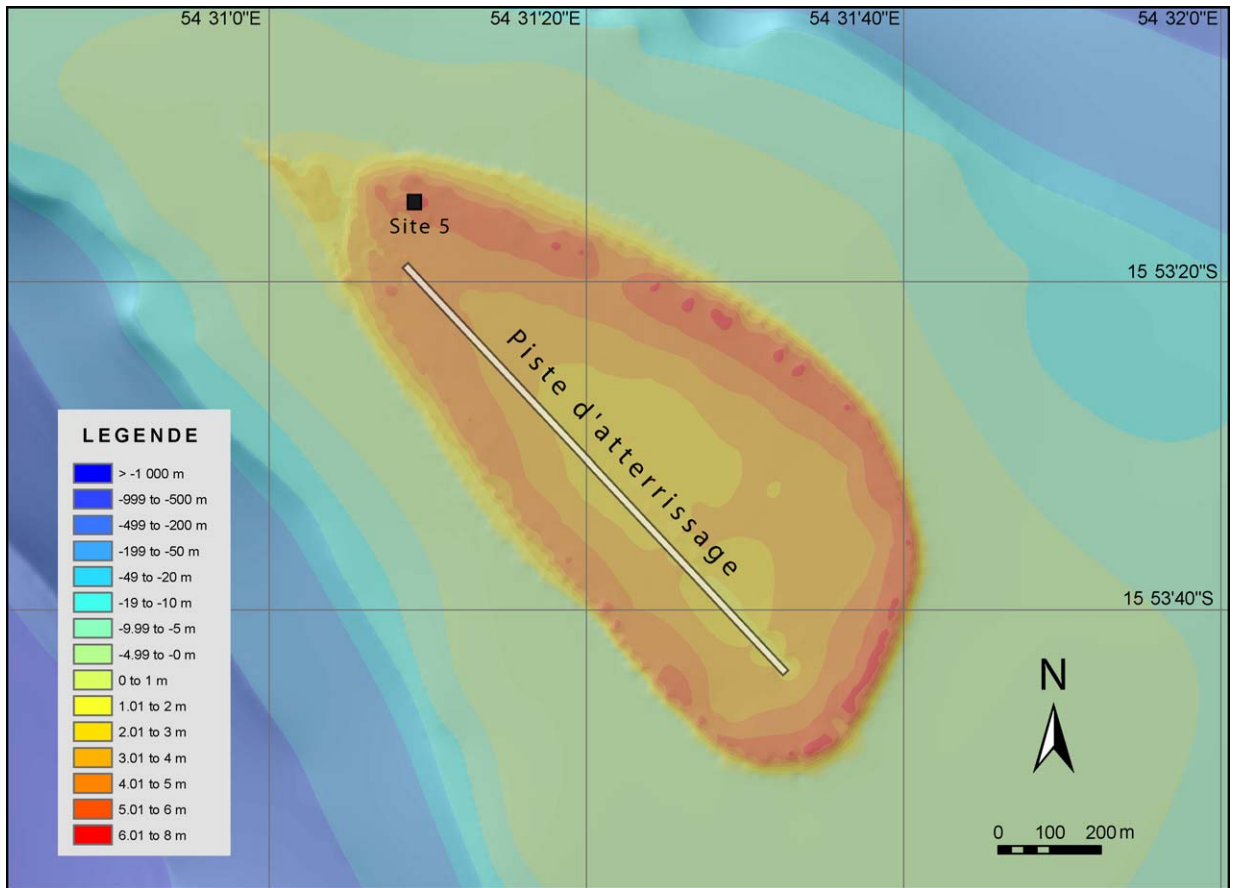


Fig. 5. Modèle Numérique de Terrain.

Fig. 5. Digital elevation model of Tromelin.

P. Dussouillez, service SIGéo, CEREGE.

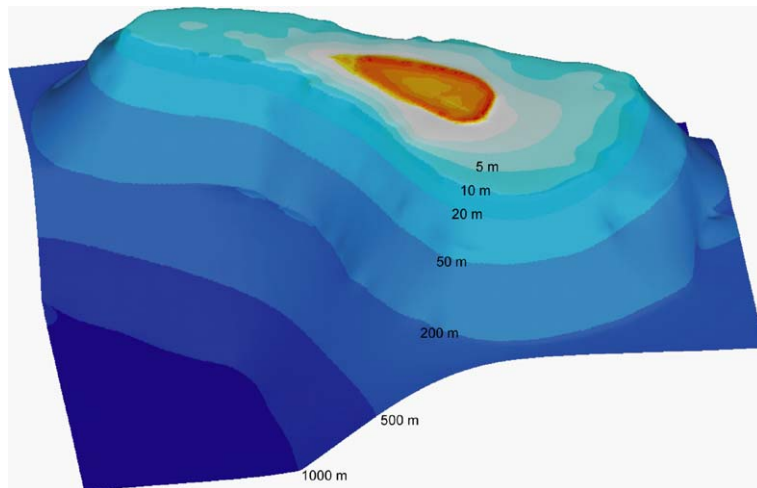


Fig. 6. La bathymétrie tromelinoise. Modèle Numérique de Terrain (P. Dussouillez, service SIGéo, CEREGE).

Fig. 6. Tromelin's bathymetry. Digital elevation terrain model.

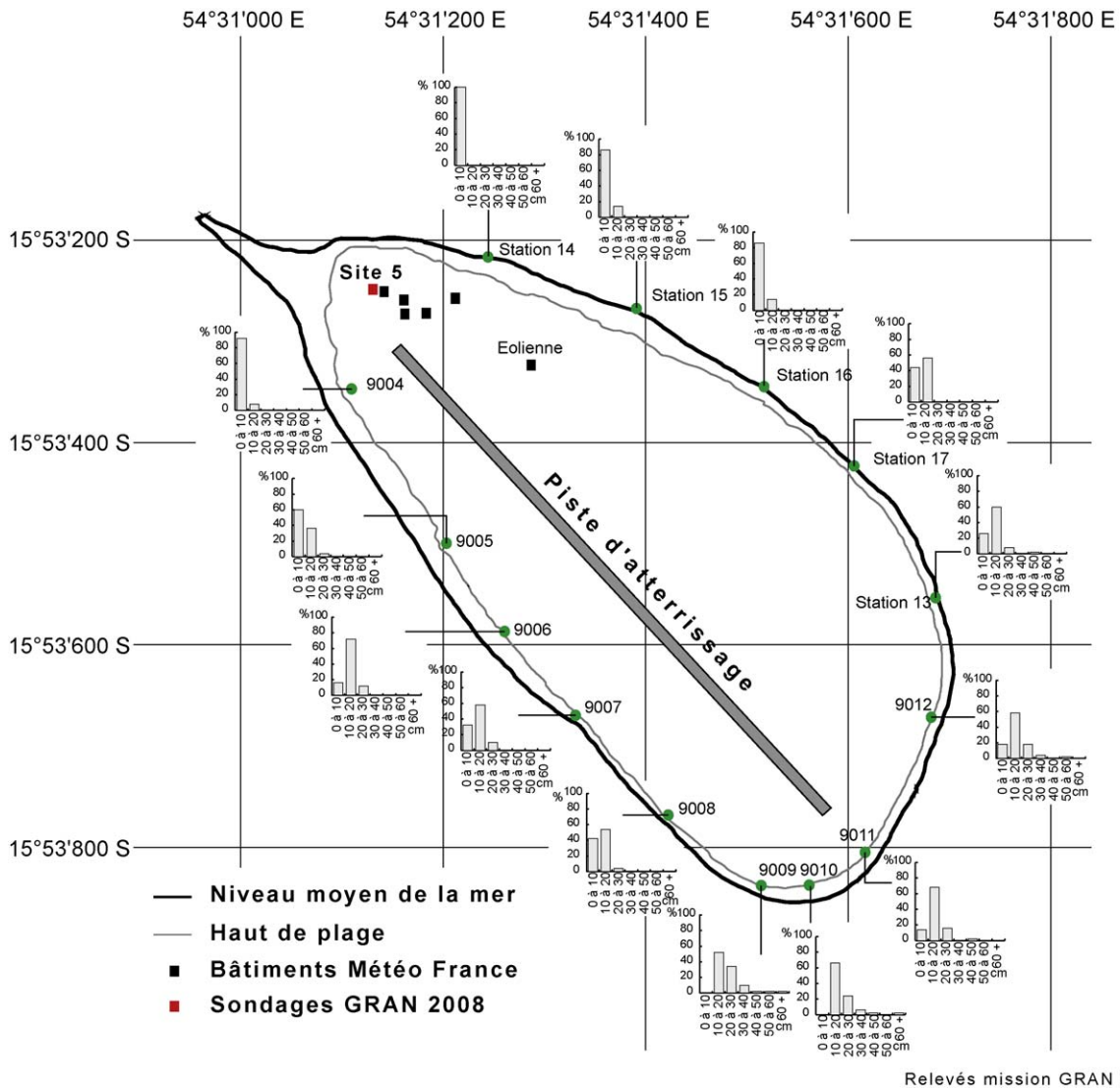


Fig. 7. Cartographie des blocs coralliens autour de Tromelin. Nous avons effectué un travail sur les transferts sédimentaires à travers 13 stations mises en place à plusieurs endroits stratégiques de l’île. Nous avons sélectionné 50 blocs (> 2 mm) au hasard à chaque station, mesurant les trois axes principaux, hauteur, longueur et largeur.

Fig. 7. Cartography of coral blocks around Tromelin. Sediment transfers were studied at 13 stations at strategic points. Fifty blocks (> 2 mm) were randomly selected at each station and their height, length and width measured.

4.3. Zones de beachrock

La partie supérieure de l’estran est caractérisée par l’affleurement de *beachrocks*, notamment au sud de l’île. Ces formations montrent une stratification en dalles et un pendage vers la mer qui suit l’alignement des dépôts meubles actuels. Les *beachrocks* constituent des formations indurées de sédiments littoraux, rapidement lithifiés par la précipitation de ciments carbonatés, essentiellement la calcite magnésienne et l’aragonite (Vousdoukas et al., 2007). La lithification se produit dans la zone intertidale, parfois sur des durées de temps très courtes (quelques dizaines d’années). Cette formation disparaît vers l’intérieur, directement sous les dépôts de tempêtes, constitués par une accumulation de blocs coralliens et de plaques de

beachrock (Fig. 8). Quelques affleurements de poudingue ancien montent jusqu’à environ 1 m au-dessus du niveau de la mer. Ce substrat est l’élément principal du bâti de l’île, constituant aussi le socle sur lequel reposent les formations superficielles actuelles et sub-actuelles ; aucun élément géologique pré-corallien n’affleure sur l’île. Sur les hauts des plages et dans les laisses de surcôte, une grande quantité de ponces volcaniques sont observées, notamment sur la façade sud-est de l’île. Pour le moment, l’origine de ces pierres ponces demeure ambiguë. Elles seraient a priori à mettre en relation avec l’hypothétique socle volcanique de l’île, mais il ne faut pas écarter l’hypothèse d’une origine plus lointaine. En général, la granulométrie des *beachrocks* exposés sur l’estran est la même que celle des sédiments meubles actuels (e.g. blocs

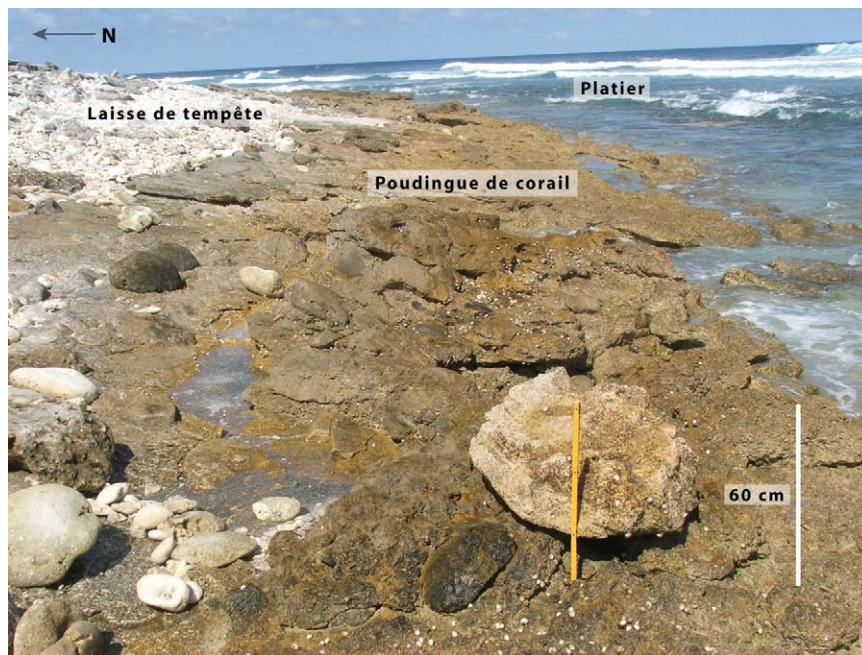


Fig. 8. Beachrock (ou poudingue de corail) et lisses de tempête exposées près de la station topographique 9010.

Fig. 8. Beachrock and storm tract deposits near topographic station 9010.

Photo : N. Marriner.

de corail dans une matrice sableuse au sud vs. les beachrocks sableux au nord). Le bord des formations de beachrock est caractérisé par une fracturation des affleurements, liée à l'action mécanique de très fortes houles.

4.4. Le cordon littoral

Le cordon littoral de Tromelin se divise en trois unités : (i) les plages de tempête, à blocs de corail au sud ($15^{\circ}53'562$ S, $54^{\circ}31'242$ E ; $15^{\circ}53'341$ S, $54^{\circ}31'484$ E) ; (ii) les plages 'mixtes' au sud-est et au sud-ouest ($15^{\circ}53'464$ S, $54^{\circ}31'164$ E à $15^{\circ}53'660$ S, $54^{\circ}31'313$ E ; $15^{\circ}53'303$ S, $54^{\circ}31'423$ E à $15^{\circ}53'391$ S, $54^{\circ}31'571$ E) ; et (iii) les plages sableuses au nord (Fig. 7). La diffraction de la houle et les transferts sédimentaires sud-nord ont engendré la mise en place d'un saillant sableux ($\sim 125 \times \sim 225$ m), de morphologie variable selon les saisons et les conditions météo-marines. Cette « queue de comète », constituée de petits graviers roulés ainsi que d'un sable grossier bien trié, est localisée en position d'abri derrière l'île.

Les plages sud, d'environ 20–35 m de long, sont constituées pour la plupart par des blocs de corail, arrachés lors des tempêtes pour être déposés en zone supratidale ; ces dépôts se superposent en talus de tempête parallèles à la ligne de rivage (Otvos, 2000). Plusieurs générations de talus de tempête sont présentes, bien qu'aucun élément de datation n'existe actuellement. Les talus les plus récents, situés sur les bas de plages, sont caractérisés par des blocs de corail blancs qui contrastent avec les blocs de teinte foncée due aux algues Cyanophycéens, plus anciens. Le platier de Tromelin est relativement étendu (300–400 m

selon les endroits), avec des pentes faibles qui favorisent le transport vers la ligne de rivage. A priori, l'exposition du littoral sud aux vents et aux houles sud-est dominants tend à suggérer le remaniement des talus anciens par les événements cycloniques les plus puissants (Scoffin, 1993 ; Nott et Hayne, 2001 ; Nott et al., 2009).

Les plages dites 'mixtes' se situent dans une zone de transition entre les plages où dominent les blocs de corail et les plages sableuses du nord. Ces secteurs sont caractérisés par un sable biogénique grossier ainsi que des lisses de tempête sous forme de blocs coralliens.

Les plages nord atteignent une largeur maximale d'environ 50–75 m et sont caractérisées par des sables biogéniques blancs, remaniés depuis le sud par la dérive littorale dominante sud-est. Par endroit, les sédiments détritiques ont été érodés pour exposer le beachrocks corallien. Quelques blocs de corail sont présents, généralement inférieurs à 20 cm.

4.5. Les dunes

Les dunes les plus développées sont situées dans les parties nord, nord-est et nord-ouest de Tromelin (Fig. 9), généralement associées aux *Tournefortia argentea* (arbustes communément appelés veloutiers), de 1–1,5 m de hauteur, qui ceinturent l'île. La frange dunaire littorale est d'une largeur maximale d'environ 200 m ; cette unité géomorphologique atteint une hauteur maximale de 8 m au-dessus du niveau moyen de la mer. Sur Tromelin, la hauteur des dunes varie de 10 cm (micro-dunes sud) à 250 cm au nord-est de l'île. Il s'agit essentiellement de dunes paraboliques, orientées SE-NW (Pye et Tsoar,

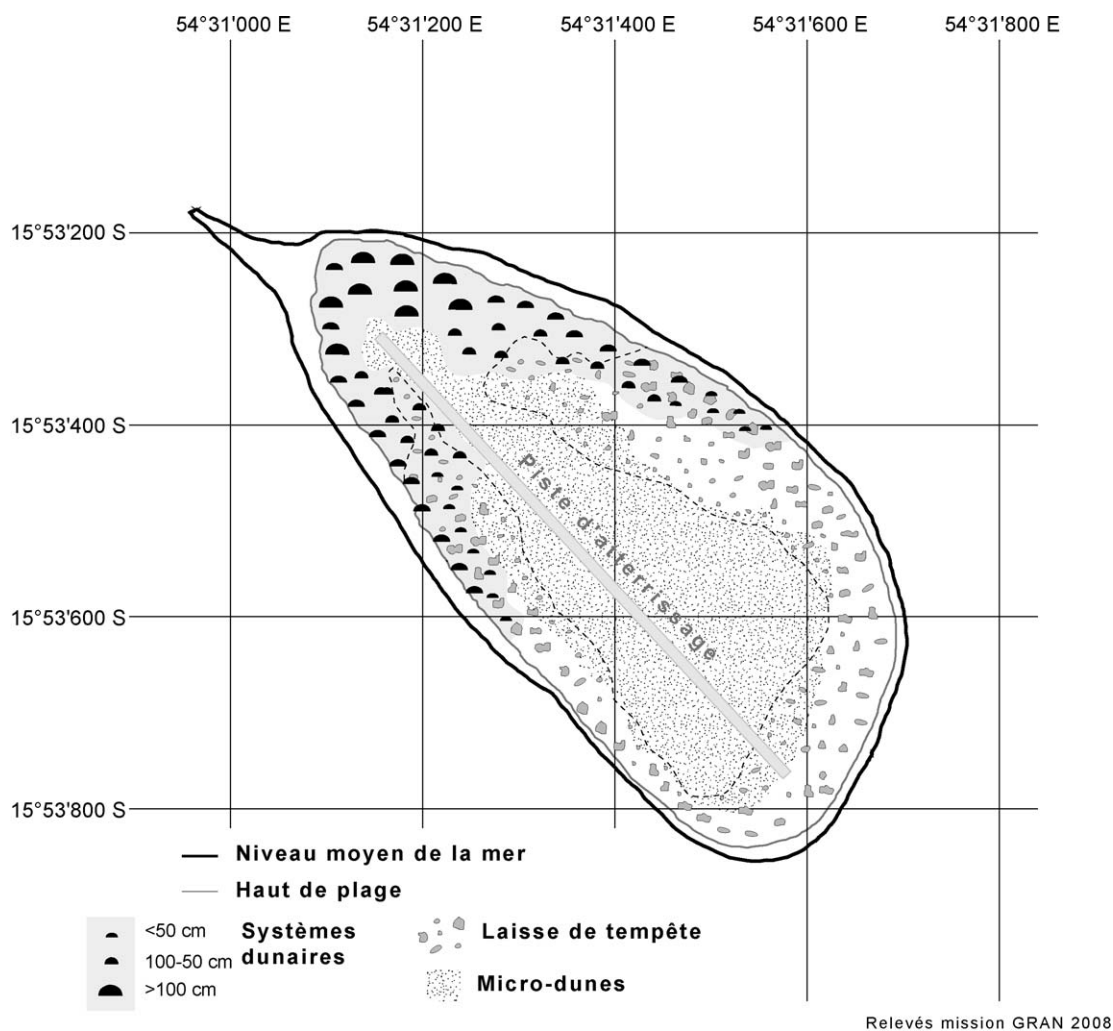


Fig. 9. Carte géomorphologique simplifiée, montrant l'étendue des laisses de tempêtes liées aux cyclones, ainsi que les différents systèmes dunaires. Relevés effectués au GPS.

Fig. 9. Simplified geomorphological map of Tromelin, depicting the distribution of the storm tract and dune systems.

1990). Au sud-ouest de l'île, cette frange dunaire est moins bien développée. L'existence d'un talus corallien dans la partie supérieure de l'estran entrave l'alimentation des dunes en sable. Le système micro-dunaire est constitué par des plantes herbacées, formées essentiellement de *Boerhavia diffusa*, qui sont adaptées aux supports sableux à très faible teneur en nutriments.

Deux phénomènes expliquent l'absence de dunes dans le sud de l'île : (1) la brume de sel qui n'est pas propice à la mise en place d'une couverture végétale importante ; l'absence de végétation ne permet donc pas de fixer les sédiments fins ; (2) les plages à blocs de corail qui piègent les stocks de sable, limitant son transport par les processus éoliens.

4.6. Laisse de tempête

La façade sud de Tromelin est caractérisée par une série de talus de tempête (*boulder ramparts*), juxtaposés, parallèles à la ligne de rivage, depuis le niveau moyen

de la mer jusqu'à la couronne de l'île (Fig. 10). Nous avons pu mesurer quatre talus vers 1 m, 3 m, 4,5 m et 7 m au-dessus du niveau moyen de la mer. La hauteur des talus sud de Tromelin est exceptionnellement importante pour des régions coralliennes, principalement en raison de la puissance des tempêtes tropicales (Pirazzoli, P.A., 2011), ainsi que la zone de fetch très étendue (i.e. > 6500 km pour l'est). Les blocs constituant ces talus sont généralement arrondis, façonnés par l'abrasion au cours de leur remaniement depuis la zone intertidale.

Les vagues de tempête exceptionnelles ont pu déferler par-dessus le *boulder rampart* pour former une laisse jusqu'à 250 m à l'intérieur des terres (Fig. 8). Pour la plupart, les sédiments d'origine hydrodynamique sont déposés par la houle associée aux cyclones. Ces laisses de tempête, constituées de blocs de corail (généralement inférieurs à 30 cm), sont principalement visibles dans le Sud de l'île, en raison de la faible couverture végétale, ainsi que l'absence de sédiments fins détritiques, piégés sous les blocs de tempête des plages. Cette unité géomorphologi-

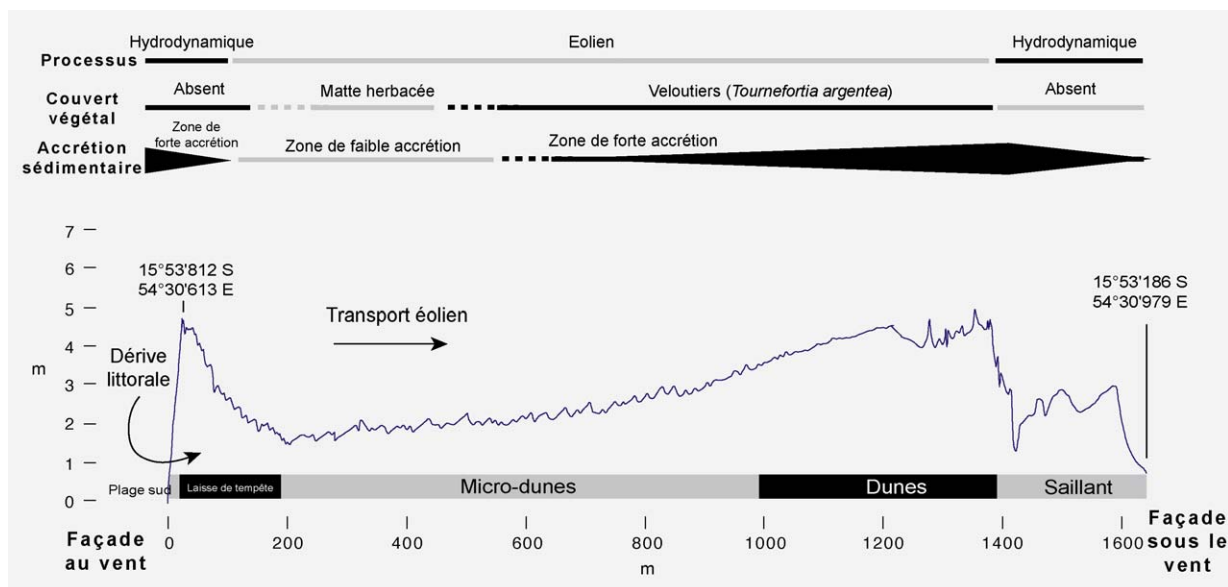


Fig. 10. Transect nord-sud de l'île de Tromelin.

Fig. 10. North-south transect of Tromelin.

que recouvre également la zone dunaire entre 54°31'300 E–15°53'400 S et 54°31'200 E–15°53'400 S. Les blocs les plus importants (axe le plus long : 40–30 cm) se situent en bordure des hauts de plage sud. Leur présence en deçà des plages de tempête implique qu'ils ont été apportés lors d'événements hydrodynamiques ponctuels, ayant transité par les vagues pour être déposés en zone supratidale sur la couronne sableuse de l'île.

4.7. Dépression sud

La dépression sud couvre une superficie d'environ 40 000 m². Sa partie basse se situe à seulement 1,2 m au-dessus du niveau de la mer. Une mince couche de sable éolien bien trié caractérise la surface de cette zone ; les sédiments de surface ont subi une déflation éolienne active qui a contribué à former de petits champs de micro-dunes qui s'engraissent très lentement en raison des faibles flux sédimentaires et des forts vents. Les sédiments meubles sont très rapidement lithifiés pour former un poudingue induré à environ 15 cm sous la surface topographique. Cette basse topographie est due à une surélévation des zones avoisinantes, notamment lors des apports sédimentaires de tempête.

5. Conclusion

Les relevés topographiques et géomorphologiques ont permis de décrire sept unités paysagères depuis la pente externe sous-marine jusqu'à la couronne récifale. Le transport sédimentaire s'effectue par deux voies principales : (1) la dérive littorale ; et (2) le transport éolien, les vents et les houles dominants provenant du sud-ouest. Les cyclones ont joué un rôle prépondérant dans la morphogénèse de l'île, ainsi que dans la distribution de ces formations morphosédimentaires. En effet, la géomorpho-

logie de la façade au vent s'apparente à la façade sous le vent. Le Sud de Tromelin est caractérisé par des talus de surcôte, mobilisés lors des tempêtes et des fortes houles. En raison de la vigueur des processus éoliens (> 8 m/s 20 % du temps), outre les talus de tempête piégeant les sables, l'accrétion sédimentaire sur la couronne sud est relativement modérée. Le Nord de l'île est caractérisé par une importante accrétion sédimentaire, principalement sous forme de sédiments meubles (graviers roulés et sables grossiers). Il s'agit de la zone la plus élevée et la mieux abritée de Tromelin, dont la potentialité explique l'édification du quartier des naufragés pendant le XVIII^e siècle. Le saillant sud est de morphologie variable selon les saisons et les conditions météo-marines.

Remerciements

Nous tenons à remercier S. Fuma, J. Guesnon L. Hoarau, J. Mouret et J.-F. Rebeyrotte de leur aide pendant la mission 2008. Nous remercions également les institutions suivantes : la préfecture des Terres Australes et Antarctiques Françaises, le Commandement des Forces Armées dans la Zone Sud de l'océan Indien, Météo France La Réunion, la Fondation du Patrimoine, le Conseil Régional de La Réunion, la Direction Régionale des Affaires Culturelles de la Réunion et la Fondation d'entreprise Groupe Banque Populaire.

Références

- Bard, E., Hamelin, B., Arnold, M., Montaggioni, L., Cabioch, G., Faure, G., Rougerie, F., 1996. Sea level record from Tahiti corals and the timing of deglacial meltwater discharge. *Nature* 382, 241–244.
- Barry, S.J., Cowell, P.J., Woodroffe, C.D., 2007. A morphodynamic model of reef-island development on atolls. *Sedimentary Geology* 197, 47–63.
- Battistini, R., Bourrouilh, F., Chevalier, J.-P., Coudray, J., Denizot, M., Faure, G., Fisher, J.-C., Guilcher, A., Harmelin-Vivien, M., Jaubert, J., Laborel, J.,

- Montaggioni, L., Masse, J.-P., Mauge, L.-A., Peyrot-Clausade, M., Pichon, M., Plante, R., Plaziat, J.-C., Plessis, Y.B., Richard, G., Salvat, B., Thomassin, B.A., Vasseur, P., Weydert, P., 1975. Éléments de terminologie récifale indopacifique. *Tethys* 7, 1–111.
- Brygoo, E., 1955. Observations sur les oiseaux de Tromelin. *Le Naturaliste Malgache* 7, 209–214.
- Camoin, G.F., Colonna, M., Montaggioni, L.F., Casanova, J., Faure, G., Thomassin, B.A., 1997. Holocene sea-level changes and reef development in the southwestern Indian Ocean. *Coral Reefs* 16, 247–259.
- Camoin, G.F., Montaggioni, L., Braithwaite, C.J.R., 2004. Late glacial to post-glacial sea levels in the western Indian Ocean. *Marine Geology* 206, 119–146.
- Guérout, M., 2007. Tromelin, L'île des esclaves oubliés. *Archeologia* 443, 30–42.
- Guérout, M., Romon, T., 2007. Tromelin (océan Indien) – Une archéologie de la détresse. *Les nouvelles de l'archéologie* 108–109, 113–118.
- Guérout, M., Romon, T., 2008. L'Utile 1761. ... « Esclaves oubliés ». *Archeopages – Constructions de l'archéologie* 59–62.
- Guilcher, A., 1988. Coral reef geomorphology. John Wiley, Chichester, UK.
- Lénat, J.-F., Merle, O., Lespagnol, L., 2009. La Réunion: an example of channelled hot spot plume. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 184, 1–13.
- Mancel, F., 1991. Ernista. Centre Météorologique de la Réunion. La Réunion.
- Marriner, N., Guérout, M., Romon, T., 2010. The forgotten slaves of Tromelin: new geoarchaeological data. *Journal of Archaeological Science* 37, 1293–1304.
- Montaggioni, L.F., 2005. History of Indo-Pacific coral reef systems since the last glaciation: development patterns and controlling factors. *Earth-Science Reviews* 71, 1–75.
- Nott, J., Hayne, M., 2001. High frequency of 'super-cyclones' along the Great Barrier Reef over the past 5,000 years. *Nature* 413, 508–512.
- Nott, J., Smithers, S., Walsh, K., Rhodes, E., 2009. Sand beach ridges record 6000 year history of extreme tropical cyclone activity in northeastern Australia. *Quaternary Science Reviews* 28 (15–16), 1511–1520.
- Otvos, E.G., 2000. Beach ridges – definitions and significance. *Geomorphology* 32, 83–108.
- Paulian, R., 1955. Observations de la faune terrestre de l'île de Tromelin. *Le Naturaliste Malgache* 7, 1–7.
- Pirazzoli, P.A., 1996. *Sea Level Changes: The Last 20,000 Years*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Pirazzoli, P.A., 2011. Boulder zone/ramparts. In: Hopley, D. (Ed.), *Encyclopedia of Modern Coral Reefs*. Springer-Verlag.
- Pye, K., Tsoar, H., 1990. *Aeolian Sand and Sand Dunes*, Unwin, London, UK.
- Scoffin, T.P., 1993. The geological effects of hurricanes on coral reefs and the interpretation of storm deposits. *Coral Reefs* 12, 203–221.
- Séguy, E., 1955. Diptères de l'île de Tromelin. *Le Naturaliste Malgache* 7, 8–12.
- Staub, F., 1970. The geography and ecology of Tromelin Island. *Atoll Research Bulletin* 136, 197–209.
- Vousdoukas, M.I., Velegarakis, A.F., Plomaritis, T.A., 2007. Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts. *Earth-Science Reviews* 85, 23–46.