



**MINISTÈRE
CHARGÉ
DES TRANSPORTS**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



direction
générale
de l'Aviation
civile



4^e VOLET

DOSSIER DE PRÉSENTATION

La prise en compte des risques naturels
Février 2022

RISQUES NATURELS : ENJEUX MAJEURS ET COMPÉTENCES MOBILISÉES

Les travaux préparatoires sur la piste longue de l'aéroport de Mayotte comprennent des études et analyses approfondies sur les risques naturels. Elles ont été réalisées en 2020 et 2021 en mobilisant, en raison de la complexité et de la sensibilité du sujet, de nombreux experts d'instituts publics et de bureaux d'études. Leurs résultats sont présentés dans ce dossier " 4e volet ".

La prise en compte des risques naturels est un enjeu majeur pour dimensionner le projet de piste longue. Cela consiste à intégrer à l'horizon de 100 ans (durée de vie des grandes infrastructures telles que la piste longue) trois éléments majeurs : la situation spécifique de Mayotte liée à la découverte en 2018 du volcan sous-marin Fani Maoré, le contexte sismique et cyclonique régional, et les évolutions dues au changement climatique.

Concrètement, les travaux préparatoires sur le thème des risques naturels ont eu pour objectifs :

- d'évaluer les risques engendrés pour la future piste longue par les séismes et par des vagues dues à des cyclones ou des tsunamis ;
- sur ces bases de déterminer les dispositions à prendre pour sécuriser la future piste, à savoir la consolidation du fond marin qui accueillera l'ouvrage, le choix de la hauteur de la piste et la nature de la carapace de protection du remblai-digue qui supportera la piste.

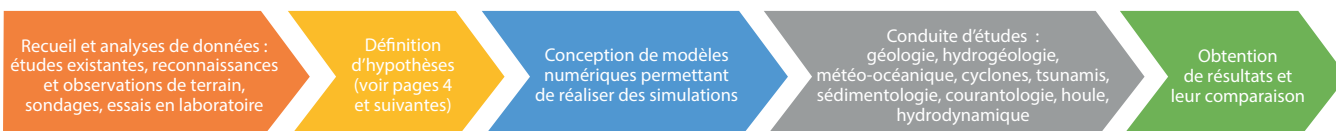
Le sujet des risques naturels est complexe. Il a nécessité des investigations et des études pointues, notamment dans les domaines :

- de la géologie et de la géotechnique : l'étude des caractéristiques et de la mécanique des sols a été réalisée par le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) et ses prestataires spécialisés dans les sondages et analyses des sols ;
- de l'hydrodynamique marine : les études concernant les mouvements de l'eau en fonction des marées, des courants, de la houle, des vents, etc., ont été réalisées par les bureaux d'études Ingérop et HR Wallingford, avec l'appui du CEREMA.

Ces études ont pris en compte les travaux du Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (REVOSIMA) créé en 2019 à la suite de la découverte du volcan sous-marin. Elles ont également fait appel aux expertises de l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP) et du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM).

Enfin, elles ont été partagées et enrichies au sein du comité technique réunissant les représentants du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), Institut de physique du globe de Paris (IPGP), Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (REVOSIMA), Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA), Direction de l'environnement de l'aménagement et du logement (DEAL) et de la préfecture de Mayotte.

LES ÉTAPES DES ÉTUDES SUR LES RISQUES NATURELS



LE CONTEXTE DU NOUVEAU VOLCAN

La connaissance des risques liés au nouveau volcan, baptisé Fani Maoré, est encore très récente. Ce volcan sous-marin a émergé au fond de l'océan à 50 kilomètres à l'est de Mayotte en 2018. Il constitue un élément majeur d'évolution à prendre en compte dans le projet de la piste longue.

Le volcan Fani Maoré se situe à l'est de Petite-Terre. Sa base se trouve à 3 500 mètres sous la surface de la mer. Il mesure actuellement 800 mètres de haut et son sommet culmine donc à 2 700 mètres sous la surface.

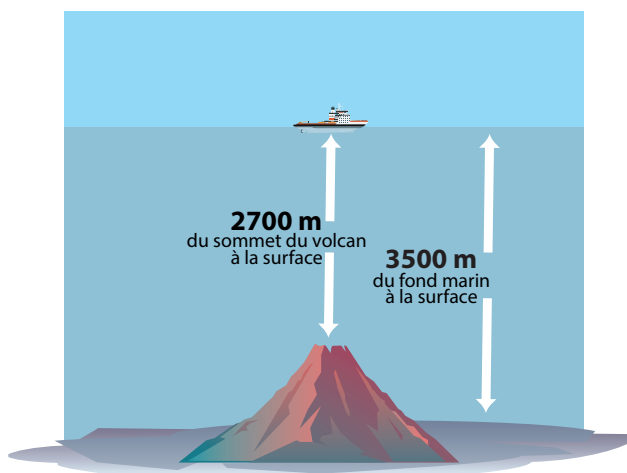
Le volcan a conduit à un enfoncement de la partie est de l'archipel de Mayotte de 19 centimètres depuis le 1er juillet 2018 et à la survenue de plusieurs milliers de séismes. Plusieurs dizaines de ces séismes, ressentis par les habitants, ont été d'une magnitude supérieure à 5, c'est-à-dire avec un effet considéré comme modéré mais pouvant causer des dommages à des bâtiments anciens ou mal conçus.

Selon le Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (REVOSIMA), l'activité sismique principale est aujourd'hui concentrée entre 5 et 15 kilomètres à l'est de Petite-Terre, à des profondeurs de 20 à 50 kilomètres sous terre.

La piste longue doit être conçue pour résister aux risques liés au volcan :

- le volcan génère des séismes dans le plancher océanique car le magma progresse depuis les entrailles de la terre vers la surface du volcan, ce qui vient briser des roches et provoquer des fractures dans les profondeurs sous-marines ;
- ces séismes, s'ils sont de forte intensité, pourraient :
 - d'une part fragiliser le platier (plateforme sous-marine) sur lequel reposera la piste longue,
 - d'autre part provoquer des glissements de terrain terrestres ou sous-marins, qui pourraient à leur tour générer des tsunamis, c'est-à-dire des successions de vagues pouvant submerger les terres, et donc potentiellement la zone de l'aéroport.

LA SITUATION DU VOLCAN FANI MAORÉ



LES HYPOTHÈSES POUR DIMENSIONNER LA PISTE LONGUE

Différentes hypothèses sont définies à l'horizon de 100 ans, durée de vie d'une grande infrastructure comme la piste longue. Elles concernent tout particulièrement l'évolution du niveau des eaux de l'océan, les risques cycloniques et les risques de tsunamis.

LA DURÉE DE VIE DE LA PISTE LONGUE

En vertu des règles concernant les infrastructures d'importance élevée comme les pistes d'aéroport, la durée de vie de l'ouvrage est fixée à 100 ans.

Cette durée de vie est une donnée essentielle pour bien prendre en compte les risques naturels : la piste longue doit en effet être dimensionnée en intégrant les évolutions qui sont susceptibles d'intervenir au cours des 100 prochaines années, soit à l'horizon de l'année 2125.

LES OBJECTIFS OPÉRATIONNELS DE FRANCHISSEMENT DE LA PISTE PAR LA HOULE

La DGAC, maître d'ouvrage, a décidé des objectifs opérationnels suivants pour le franchissement de la future piste longue par la houle :

- pour des hauteurs de vague rencontrées en moyenne tous les deux ans, à marée haute avec un coefficient de marée élevé (PMVE, pleine mer vives eaux), l'objectif est qu'il n'y ait aucun franchissement de la piste par des paquets de mer, ceci afin de garantir un passage piéton pour l'entretien des installations aéroportuaires et donc de maintenir l'exploitation aérienne ;
- dans tous les autres cas (tsunamis, houles cycloniques, houles non cycloniques de période de retour de plus de 2 ans), des franchissements de la piste par des paquets de mer ou des vagues sont possibles. En effet, ces conditions météorologiques conduiront à interrompre l'exploitation aérienne quoi qu'il arrive, évitant ainsi tout risque pour les personnels et les passagers aériens.

L'ÉVOLUTION DU NIVEAU DES EAUX LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le changement climatique engendre déjà depuis plusieurs décennies, entre autres effets, une hausse du niveau de la mer, et ce phénomène va se poursuivre au cours du 21ème siècle. Les processus physiques à l'origine de cette hausse du niveau des mers sont notamment la fonte des glaces (des pôles, des glaciers) et l'effet de la dilatation thermique des océans (en raison de l'augmentation de la température, l'eau se dilate ce qui signifie que son volume augmente).

Selon les données du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), les hypothèses pour Mayotte sont les suivantes à l'horizon 2125 : une élévation du niveau de la mer d'1,15 mètre à l'échelle du globe, à laquelle s'ajoutent 10 centimètres spécifiques à la situation géographique de l'île, soit une hausse totale d'1,25 mètre.

L'INCERTITUDE ALTIMÉTRIQUE

Afin de se conformer aux recommandations du ministère de la Transition écologique pour la prise en compte des risques littoraux, une marge d'incertitude altimétrique de 25 centimètres est ajoutée au niveau marin de référence.



Plongée de reconnaissance sous-marine pour le projet, au large de Petite-Terre en 2021 (photo : CEREMA).

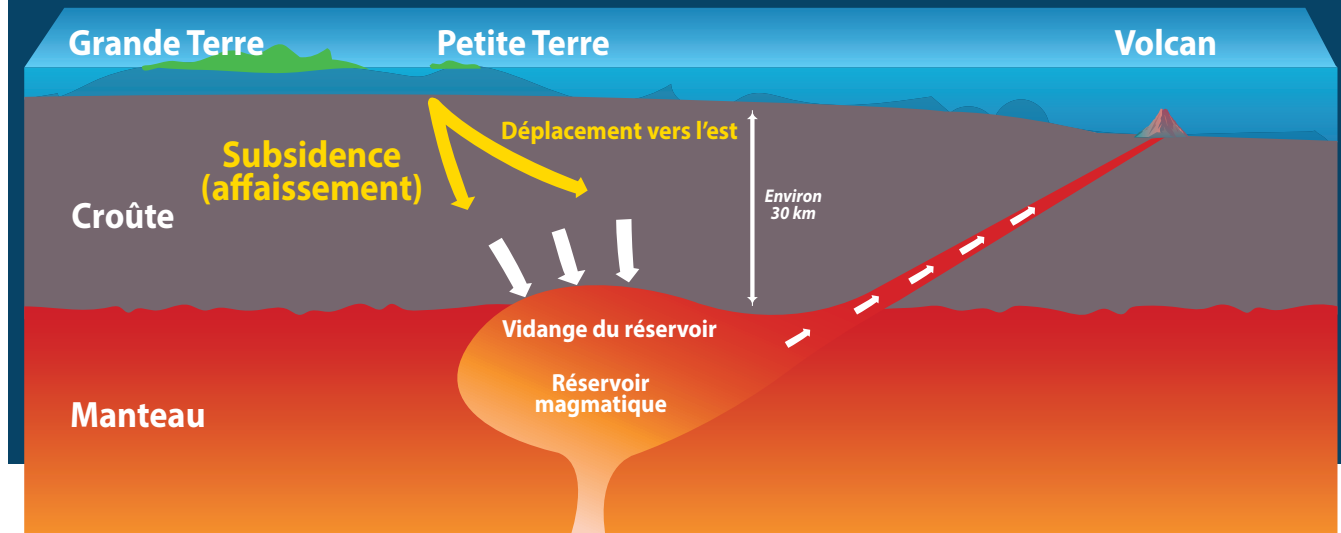
LA SUBSIDENCE DE MAYOTTE

Comme toute île volcanique, Mayotte subit un phénomène naturel de lent affaissement dans le lagon appelé subsidence. Du fait de l'apparition du volcan Fani Maoré, ce phénomène s'est exceptionnellement accéléré.

Petite-Terre s'est ainsi enfoncée de 19 cm au niveau de l'aéroport depuis 2018 et s'est stabilisée depuis 2020. Cette accélération récente fait l'objet d'un suivi permanent de la part du Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (REVOSIMA).

L'hypothèse prise pour l'horizon 2125 est celle d'un enfoncement supplémentaire de 59 centimètres, qui se décompose ainsi :

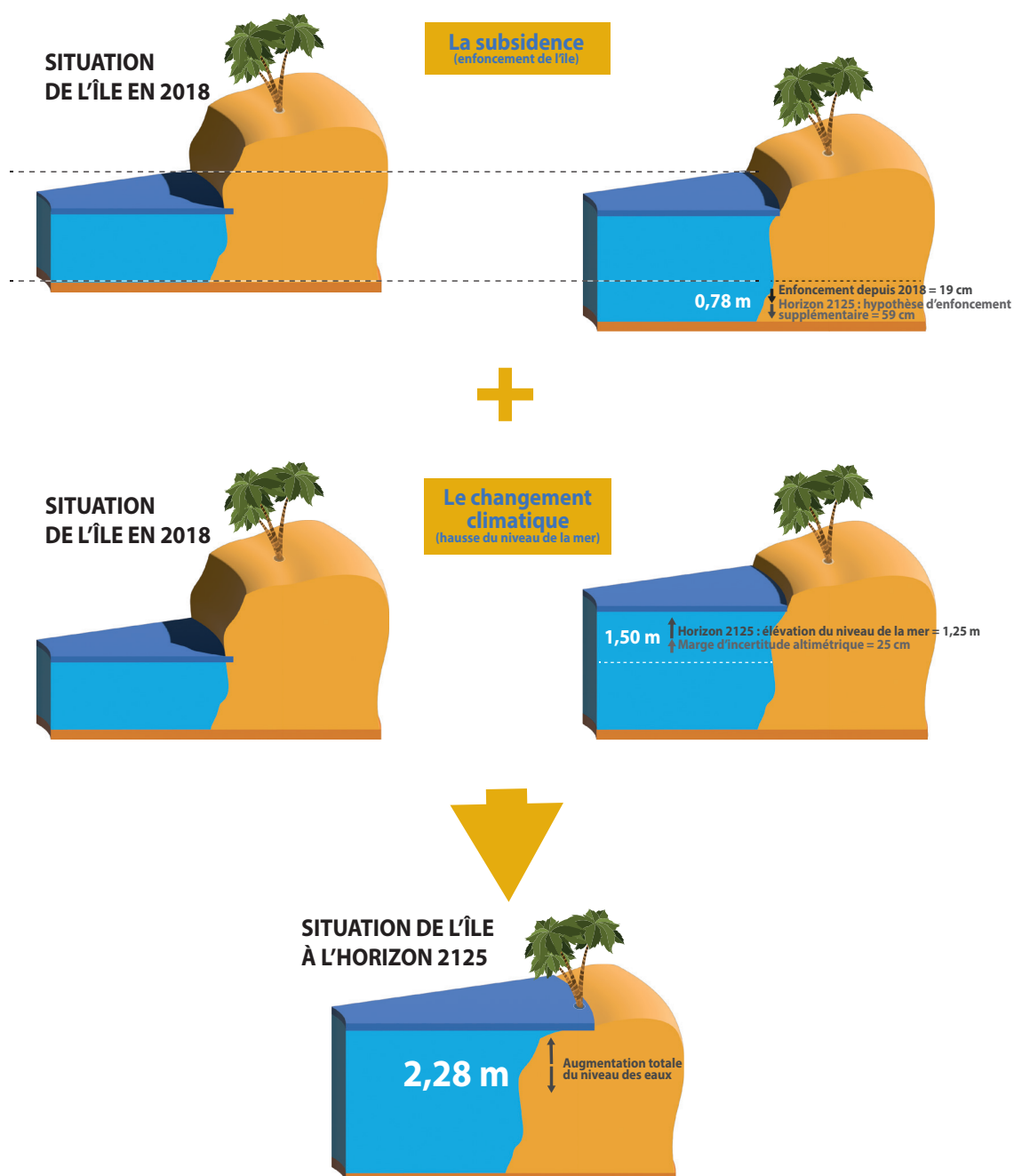
- 2 centimètres de subsidence supplémentaire naturelle : la subsidence moyenne observée jusqu'ici (donc indépendamment du volcan) était de 0,19 millimètre par an ; cela représente à l'horizon de 100 ans un total de 2 centimètres environ ;
- 57 centimètres de subsidence supplémentaire liée au nouveau volcan, avec l'hypothèse de trois crises sismo-volcaniques dans les 100 prochaines années, entraînant chacune une subsidence de 19 centimètres.



source : <https://leblob.fr/enquetes/mayotte-naissance-un-volcan-sous-marin>

Au total, l'hypothèse d'augmentation du niveau des eaux prise à l'horizon 2125 est de **2,28 mètres** par rapport à la situation actuelle. Ces 2,28 mètres correspondent à l'addition de 78 centimètres de subsidence (enfoncement) de Mayotte (19 centimètres constatés depuis 2018 + enfoncement supplémentaire de 59 centimètres dans les 100 prochaines années), d'1,25 mètre dû au changement climatique et de 25 centimètres d'incertitude altimétrique.

Les conséquences de l'affaissement de Mayotte et du changement climatique sur le niveau des eaux



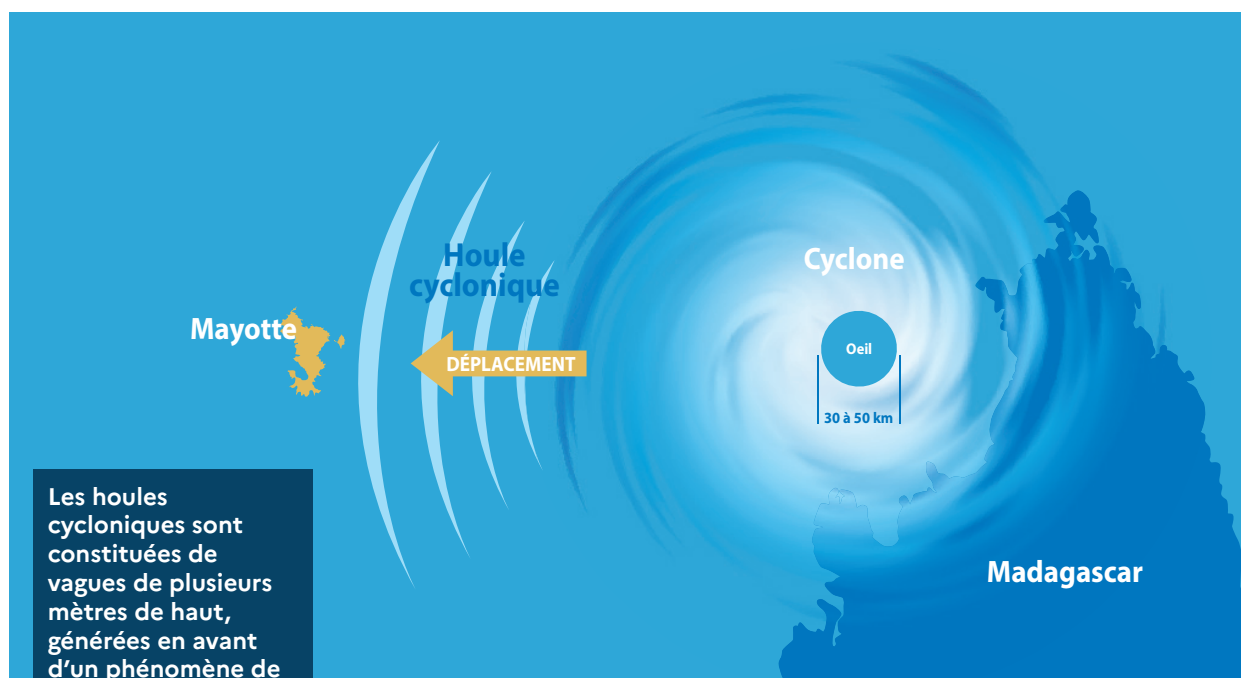
LES RISQUES CYCLONIQUES

L'objectif de l'étude cyclonique a été de disposer d'un état des lieux de la sensibilité du site de la piste longue vis-à-vis des cyclones et, afin de sécuriser le projet, de sélectionner les événements les plus pénalisants.

Les houles cycloniques ont été étudiées à partir de l'historique des cyclones à Mayotte, selon différents cas de trajectoires, de niveaux d'eau et de périodes de retour de vent. Des cyclones fictifs ont ensuite été modélisés par ordinateur.

Le scénario retenu est le plus pénalisant et intègre le renforcement de la violence des cyclones, conséquence du changement climatique : **il est celui d'un cyclone de type Kamisy** (cyclone tropical très intense qui a impacté Mayotte en avril 1984) qui aurait une **trajectoire nord (donc qui toucherait directement la piste)**, et qui serait **associé à une houle cyclonique rencontrée en moyenne tous les cent ans, à marée haute avec un coefficient de marée élevé (période de retour centennale, (PMVE, pleine mer vives eaux).**

EN SAVOIR PLUS



Les houles cycloniques sont constituées de vagues de plusieurs mètres de haut, générées en avant d'un phénomène de cyclone. Une fois créées, elles sont "poussées" par le cyclone, peuvent se propager sur plusieurs centaines de kilomètres et affecter les zones côtières bien avant l'arrivée du cyclone.



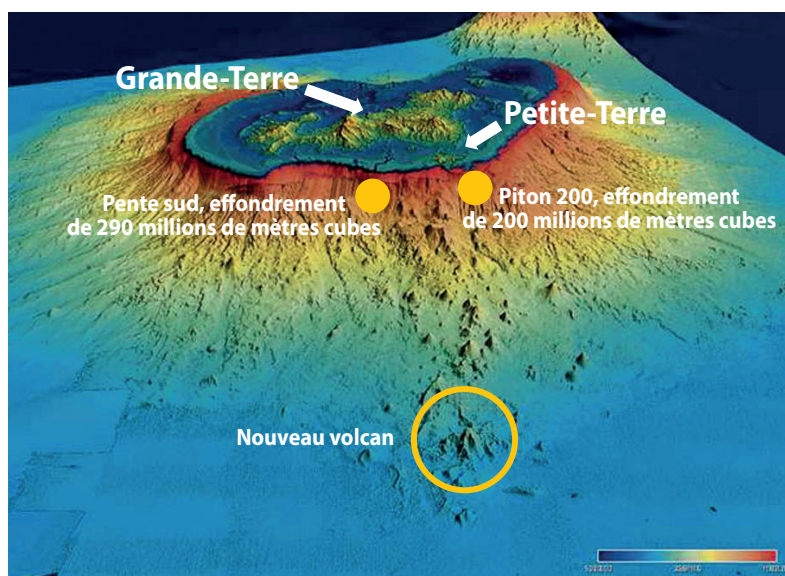
LES RISQUES DE TSUNAMIS

Le site de l'aéroport peut déjà aujourd'hui être soumis à des risques de tsunamis provenant des côtes d'Indonésie ou du Pakistan. Mais le risque tsunami majeur sera dû dorénavant davantage au nouveau volcan, qui conduira à une augmentation de l'intensité et de la rapidité de propagation d'un tel événement.

Le nouveau volcan est susceptible de **déclencher des glissements ou effondrements le long des fortes pentes sous-marines situées au large de Petite-Terre**. Il pourrait générer ainsi, par le déplacement brutal d'une grande quantité d'eau, des tsunamis en surface. **Les deux cas les plus défavorables** identifiés par le BRGM et l'IPGP sont retenus comme hypothèses, à savoir **les scénarios dénommés "Pente Sud" et "Piton 200"**.

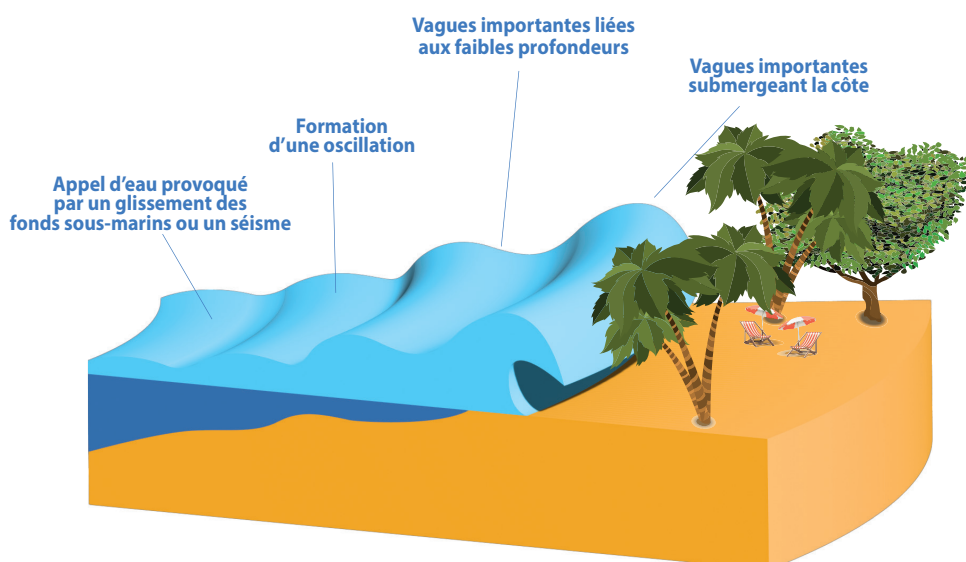
La situation des fortes pentes sous-marines et les scénarios de tsunamis retenus : "Pente Sud" et "Piton 200"

¹ Scénarios d'impacts de tsunamis liés à des instabilités potentielles de pentes sous-marines au large de Mayotte (mai 2020)



EN SAVOIR PLUS

FORMATION D'UN TSUNAMI

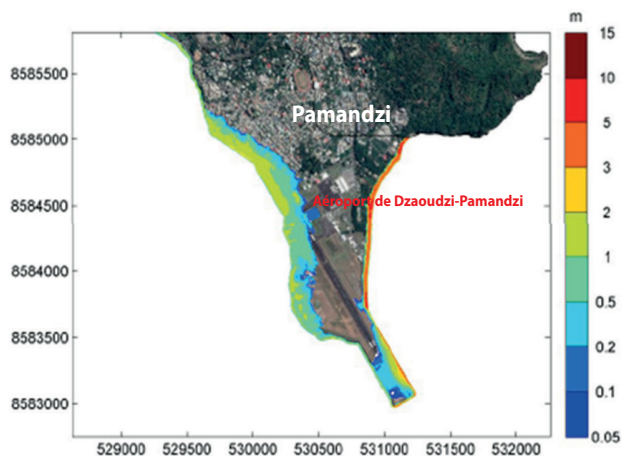


Les tsunamis sont le résultat de la mise en mouvement brusque d'une grande masse d'eau dans les fonds sous-marins, qui se propage jusqu'aux côtes sous la forme d'une ou plusieurs vagues d'ampleur exceptionnelle. La propagation des vagues est influencée par la bathymétrie (topographie du fond marin).

SIMULATIONS DU SCÉNARIO DE TSUNAMI " PENTE SUD "

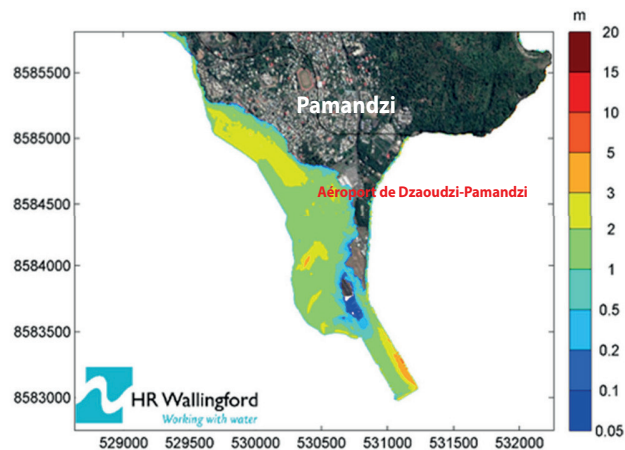
Les hauteurs figurées sur les schémas sont les hauteurs d'eau maximales à terre, sur une échelle allant de 50 centimètres à 15 mètres

HAUTEURS D'INONDATION EN 2021



Tsunami Pente sud en 2021
Hauteur d'inondation

HAUTEURS D'INONDATION EN 2125

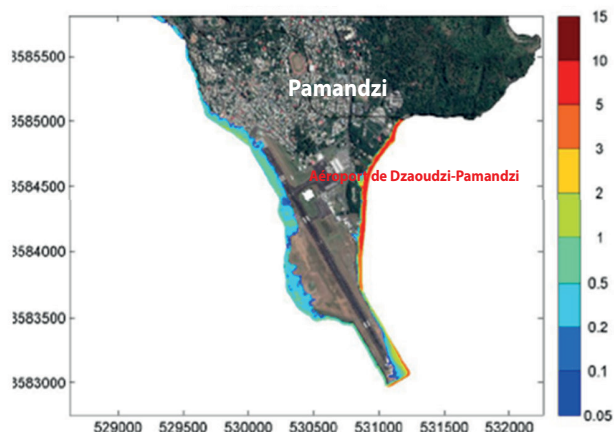


Tsunami Pente sud en 2125
Hauteur d'inondation

SIMULATIONS DU SCÉNARIO DE TSUNAMI " PITON 200 "

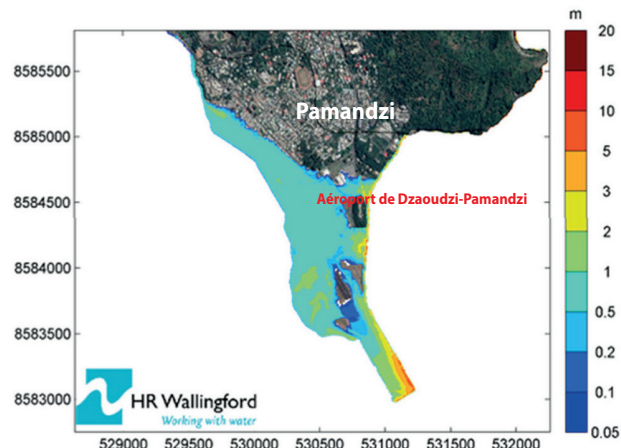
Les hauteurs figurées sur les schémas sont les hauteurs d'eau maximales à terre, sur une échelle allant de 50 centimètres à 15 mètres

HAUTEURS D'INONDATION EN 2021



Tsunami Piton 200 en 2021
Hauteur d'inondation

HAUTEURS D'INONDATION EN 2125



Tsunami Piton 200 en 2125
Hauteur d'inondation

QUELLES DISPOSITIONS POUR FAIRE FACE AUX RISQUES NATURELS ?

Les dispositions définies pour la réalisation de la piste longue concernent la hauteur de la piste, la stabilité du platier et la carapace de protection du remblai-digue supportant la piste. Elles sont étudiées pour les deux scénarios d'implantation de piste convergente (scénario 1 et scénario 2).

ASSURER LA STABILITÉ DU PLATIER

Compte tenu du contexte géologique et du risque sismique, des dispositions devront être prises pour assurer la stabilité du platier, la plate-forme sous-marine sur laquelle reposera le remblai-digue de la piste longue.

En effet, si les études concluent à la **faisabilité globale du projet en remblai**, elles ont identifié les risques suivants :

- des risques liés aux caractéristiques des sols sous-marins, en raison de la présence :
 - de sols lâches : il s'agit de sables coraliens solides à l'état normal mais qui peuvent se liquéfier sous l'effet d'un séisme, et nuire ainsi à la stabilité du pied de digue ;
 - de sols contenant des argiles, qui pourraient se tasser sous le poids du remblai-digue ;
- des risques liés aux vagues et tsunamis : ceux-ci pourraient éroder les fondations du remblai-digue et déstabiliser le pied de digue.



En conséquence, les dispositions suivantes devront être prises :

- **le confortement des sables coraliens**, soit en extrayant ces sables pour les remplacer par des matériaux non lâches, soit en les consolidant avec l'injection d'un solidifiant ;
- pour solutionner les problèmes de tassement, **la réalisation d'un pré-chargement du remblai** avec un premier volume important de matériaux, une attente de plusieurs mois pour que le tassement s'opère, puis la finalisation du remblai en chargeant le solde des matériaux. Cette disposition pourra être complétée par des drainages pour accélérer le séchage et la consolidation des couches d'argile du sous-sol.



DIMENSIONNER LA CARAPACE DE PROTECTION

La carapace de protection de la digue face aux risques naturels sera constituée d'enrochements naturels ou artificiels, recouverts de blocs artificiels (accropodes), objets de béton conçus pour résister à l'action des vagues sur les digues – les accropodes, qui peuvent s'imbriquer entre eux, offrent une très bonne résistance et une très bonne stabilité.

Les besoins de protection, et notamment les poids des enrochements et les volumes des accropodes, sont calculés sur la base d'une vague de tsunami, qui aurait l'impact le plus fort en termes de puissance et de surélévation du plan d'eau – plus important que celui d'une houle cyclonique.

Les volumes nécessaires pour les blocs de protection sont très importants. Ils varient selon les zones. Ils sont plus élevés au sud du projet, secteur plus exposé aux risques et demandant donc une protection plus forte.

LES BLOCS DE PROTECTION NÉCESSAIRES

Les volumes nécessaires pour les blocs de protection atteignent aux extrémités sud de la future piste longue :

- pour le scénario 2, environ 16 m³ par bloc ;
- pour le scénario 1, environ 44 m³ par bloc.

À titre de comparaison, les accropodes utilisés sur la piste actuelle sont des blocs d'un volume de 2,5 m³.



La mise en place d'accropodes de 16 m³ nécessite une grue de capacité de 100 tonnes avec un bras de 20 mètres.

LES RÉSULTATS INFLUENT SUR LE CHOIX DU SCÉNARIO

Les études apportent des éléments de comparaison structurants sur les besoins de protection de la digue de la future piste longue, et des arguments en faveur du scénario 2.

Scénario 2



Les résultats des études montrent que l'extrémité sud de la future piste longue sera la plus fortement exposée aux risques de submersion par les houles cycloniques ou les tsunamis.

Cela a des incidences pour les deux scénarios d'implantation de la piste longue :

- **le scénario 2** prenant appui sur l'extrémité sud de la piste actuelle, la protection de l'extrémité actuelle devra être renforcée pour résister en cas de tsunami ;





Scénario 1



• **le scénario 1** prévoit dans sa première étape un allongement de la piste actuelle sur la mer au sud, sur une longueur de 400 mètres. Pour être protégé correctement, cet allongement nécessiterait en certains points (particulièrement à l'extrémité sud-est de l'allongement, la plus au large) la pose d'accropodes d'un volume de 44 m³ (soit 105 tonnes) par bloc. Or, des accropodes d'un tel volume **ne peuvent pas être techniquement réalisés**.



En conséquence, il apparaît qu'il est techniquement impossible de protéger le prolongement de la piste au sud prévu dans l'étape 1 du scénario 1 à un niveau équivalent à celui du scénario 2. Cela signifie que dans le scénario 1, en cas de tsunami important, l'extrémité sud de la piste pourrait être emportée.

PLUS D'INFOS

Le dossier de présentation 3^e volet
" Les ressources en matériaux pour
construire la piste longue ", à consulter sur
www.pistelongue-mayotte.fr

Les études montrent également que les enrochements nécessaires à la protection de la digue devront être constitués de blocs de 3 à 10 tonnes. Compte tenu de la taille de ces blocs, les enrochements devront donc être très majoritairement réalisés en béton, ce qui nécessitera des ressources supplémentaires en granulats, à faire venir de Grande-Terre.



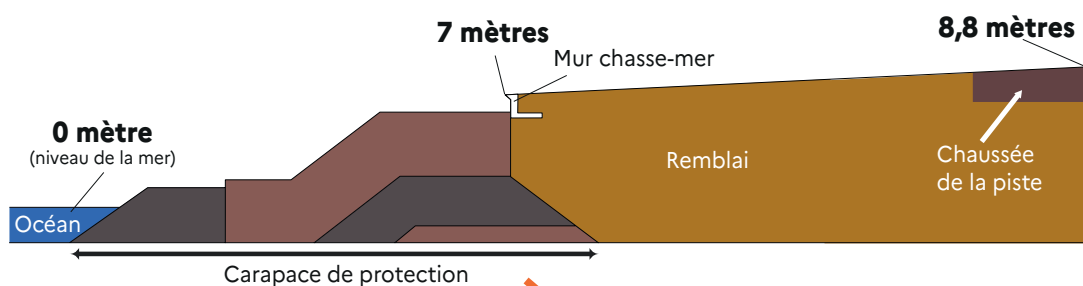
DÉTERMINER LA HAUTEUR DE LA PISTE

La hauteur (ou altimétrie) de la piste longue est **définie pour respecter toutes les hypothèses à l'horizon 2125**, telles qu'elles sont présentées dans les pages précédentes : subsidence (c'est-à-dire affaissement) de Mayotte, effets du changement climatique sur la hausse du niveau de la mer, risques de submersion de la piste par des houles cycloniques ou des tsunamis et objectifs opérationnels de franchissement définis par le maître d'ouvrage.

La solution de construction privilégiée est celle d'un **remblai-digue surmonté d'un mur chasse-mer**, c'est-à-dire d'un mur en béton qui permet de gagner une rehausse de l'ordre d'1 mètre et ainsi de limiter la hauteur de digue.

Les hauteurs du remblai-digue par rapport au niveau de la mer varient (niveau de référence de 2012), dans l'exemple du scénario 2, de 5,70 mètres pour les moins élevées (au nord du projet) à 7 mètres pour les plus élevées (au sud du projet). Il s'agit des hauteurs en bord de remblai-digue, la chaussée de la piste longue en elle-même devant encore être surélevée d'environ 1,80 mètre.

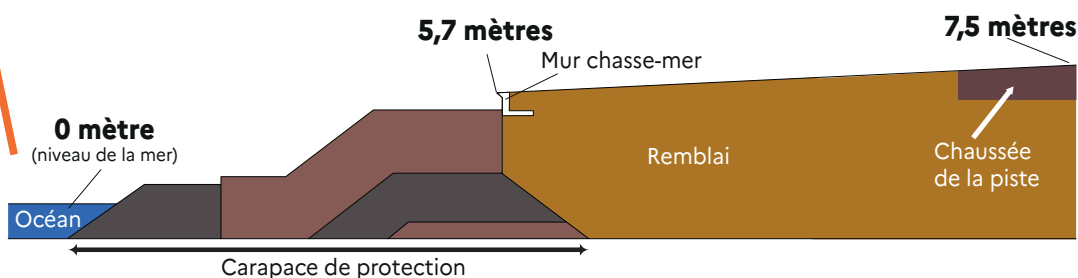
Extrémité sud



Scénario 2



Extrémité nord



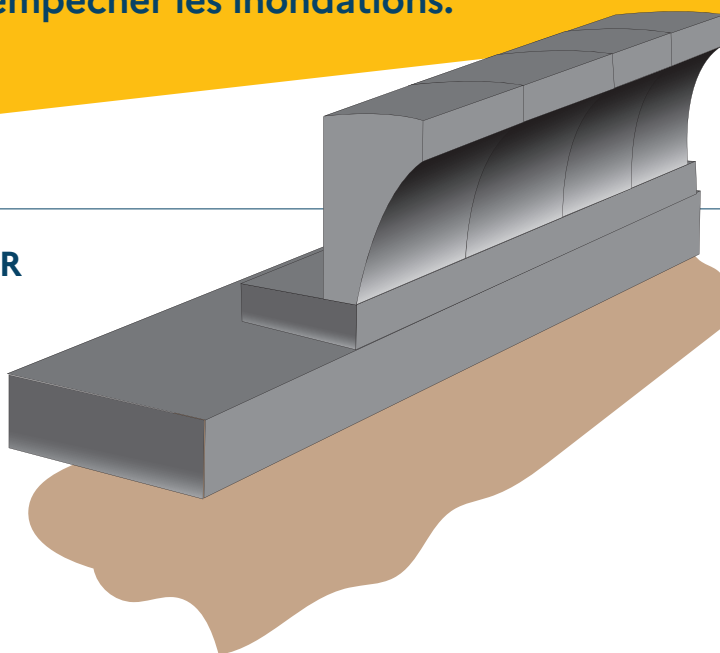


La hauteur totale de l'ouvrage par rapport au niveau de la mer variera de 7,5 mètres au nord de la future piste longue à 8,8 mètres au sud.

À titre de comparaison, la hauteur de la piste actuelle est au minimum à 2,7 mètres dans la partie nord et au maximum à 7,2 mètres au-dessus du niveau de la mer.

La hauteur du remblai-digue permettra de limiter les hauteurs d'inondation sur les installations aéroportuaires, mais ne pourra pas pour autant empêcher les inondations.

MUR CHASSE-MER



UN SUIVI DES RISQUES À LONG TERME

Le maître d'ouvrage prévoit un suivi de l'altimétrie de la future piste longue et de la topographie du fond marin sur le long terme, afin de prendre en compte d'éventuelles altérations dues au nouveau contexte sismo-volcanique de Mayotte.

Les mesures de suivi prennent en compte la jeunesse du phénomène du nouveau volcan et la possibilité d'évolutions vers des séismes plus importants que ceux constatés aujourd'hui, et qui pourraient affecter de manière significative les caractéristiques hydrogéologiques de la piste longue.

La DGAC prévoit un suivi des risques sur le long terme :

- au cours des travaux préparatoires, avec un suivi régulier de l'évolution des phénomènes conduit avec les experts du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et du Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (REVOSIMA), de manière à pouvoir adapter si nécessaire les dispositions de construction de la piste longue ;
- la poursuite du suivi pendant les travaux de réalisation de la piste longue et, une fois la piste mise en service, pendant toute la durée de son exploitation.



Restez informés et faites part de votre avis !

 www.pistelongue-mayotte.fr

 **Piste longue de l'aéroport de Mayotte**



Direction générale de l'Aviation civile
La Maison du projet
Rue des Jardins
97615 PAMANDZI

Représentant du maître d'ouvrage à Mayotte :
Christophe Masson,
délégué à la piste longue de l'aéroport de Mayotte