

La crise volcano-tectonique de 2018 et ses effets sur la géodésie à Mayotte

Thierry Gattacceca & Brice Virly

Division de l'expertise et de la documentation

Service de Géodésie et Métrologie, IGN



Crise volcano-tectonique 2018-2022

Chronologie

RGM23

Transformation de coordonnées

Mise à jour de la législation

1. Crise géologique

© MAYOBS – IPGP/CNRS/Ifremer/BRGM

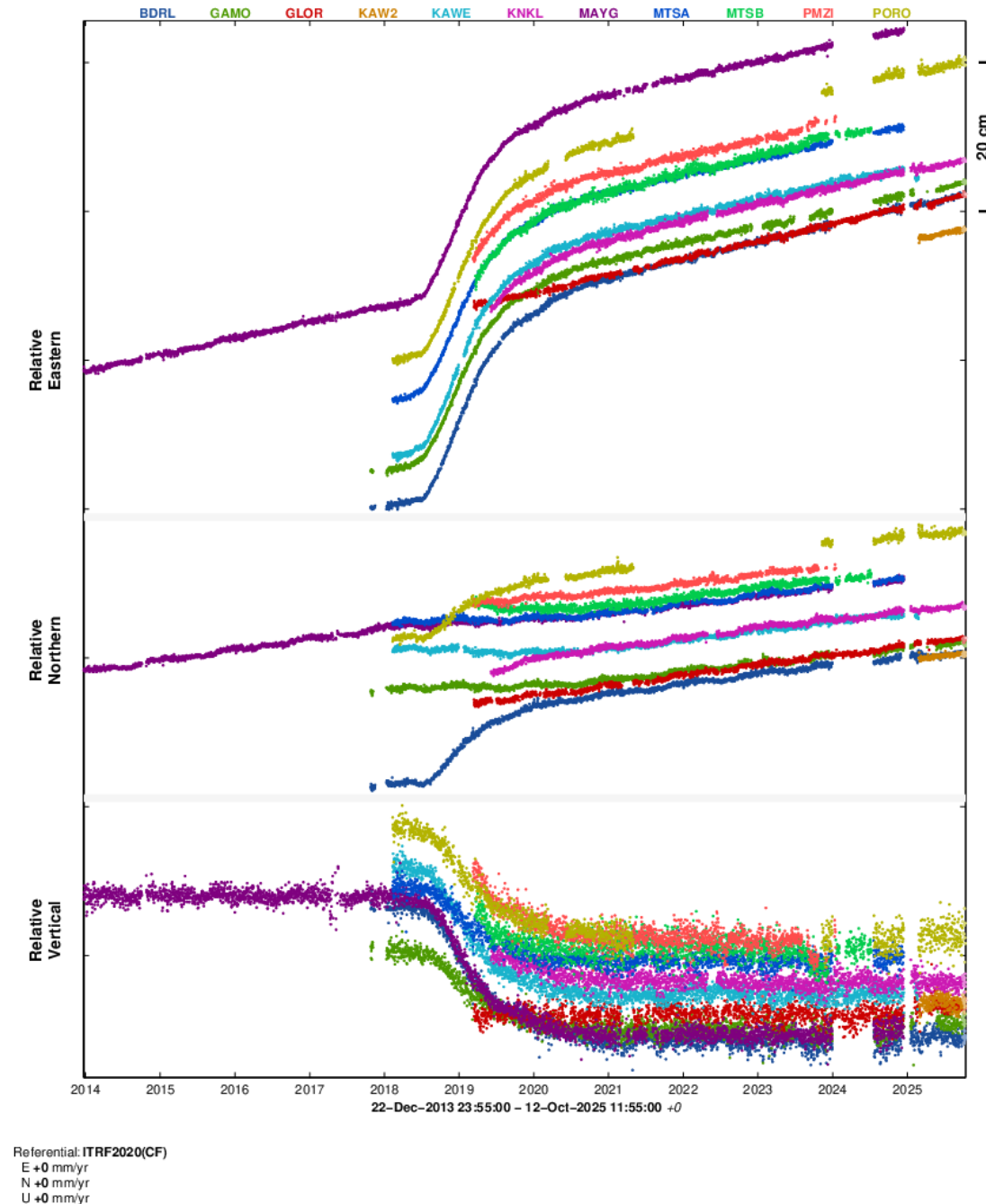
10 km

Crise volcano-tectonique (2018-2022)

- ▶ Résumé de la crise volcano-tectonique
- ▶ La mission de terrain de 2023
- ▶ Impact sur l'accès aux références géodésiques à Mayotte

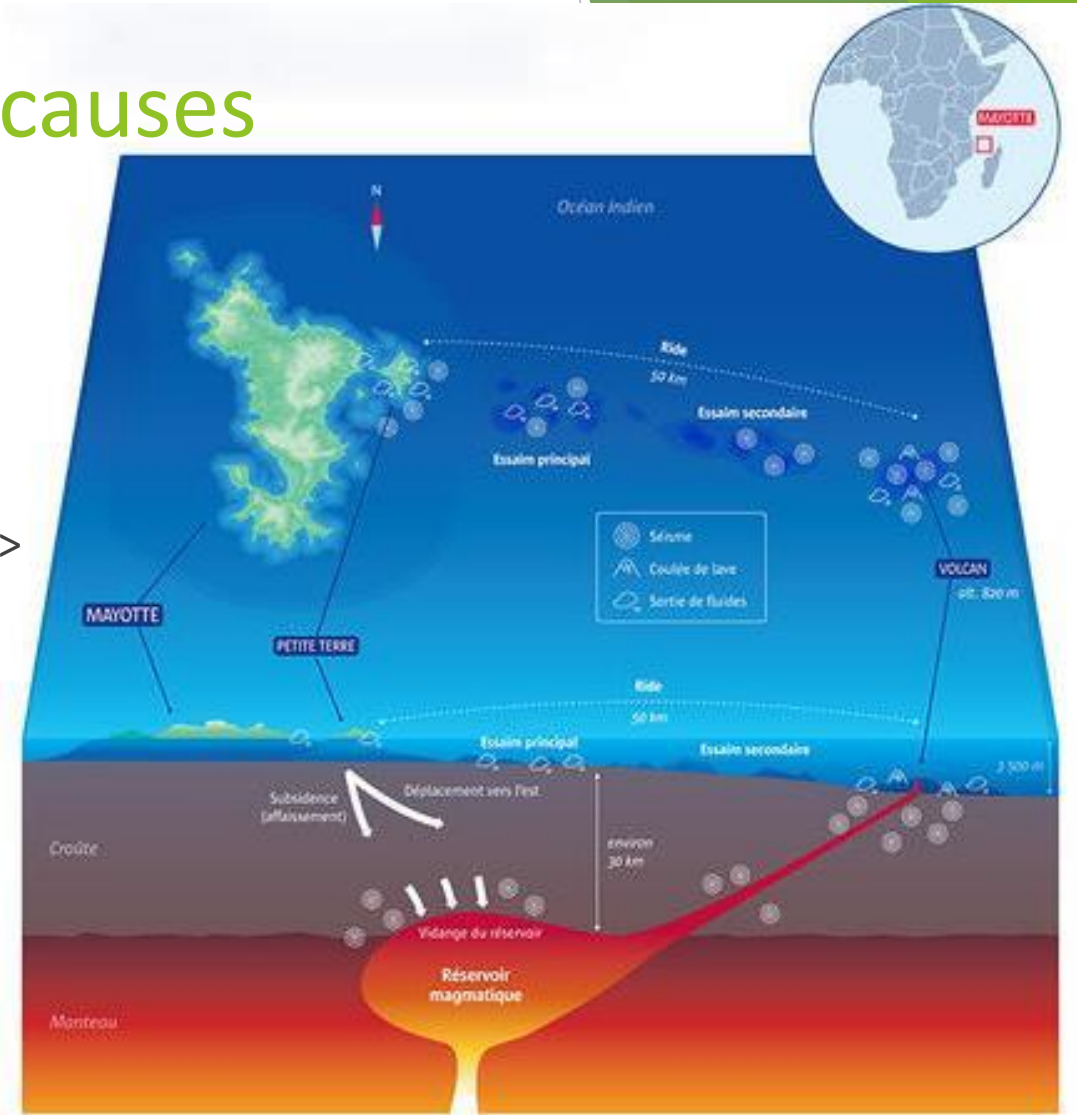
La crise volcano-tectonique: les faits

- ▶ Le 10 mai 2018, Mayotte s'est mise à trembler. Pendant plusieurs mois, des dizaines, voire des centaines de secousses par jour se sont succédé.
- ▶ Les stations GNSS permanentes (dont celles du RGP) enregistrent le phénomène (déplacements).
 - ▶ Investigation des scientifiques: le REVOSIMA (Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte)
 - ▶ Déplacements de l'ordre de 2 cm/mois (vs 3 cm/an en temps normal) enregistrés pendant plusieurs mois.
 - ▶ Déplacements (en cm) enregistrés sur 9 stations GPS localisés à Mayotte (BDRL, GAMO, KAW2, KAW1, KNKL, MAYG, MTSA, MTSB, PMZI, PORO), 1 station à Grande Glorieuse (GLOR) et 1 station au nord de Madagascar à Diego Suarez (DSUA) sur les composantes est (en haut), nord (au milieu) et vertical (en bas) depuis le 22 décembre 2013. Post-traitement de ces données réalisé par l'IPGP. ©OVPF-IPGP / REVOSIMA =>



La crise volcano-tectonique: les causes

- Origine du phénomène: une intense activité volcanique au large de Mayotte
- Source: CNRS =>
- **Ce phénomène est une illustration du fait que les phénomènes dynamiques de la surface terrestre doivent être pris en compte dans le domaine des données géolocalisées dès qu'ils provoquent un changement qui est significatif par rapport à la précision recherchée.**



La crise volcano-tectonique: les conséquences

- ▶ À la suite de la crise volcano-tectonique au large de Mayotte, des déformations importantes et imprévisibles ont été enregistrées **entre 2018 et 2022**.
- ▶ Des **déplacements absolus** de **plus de ~20 cm** et des déplacements **relatifs** allant **jusqu'à ~10 cm** ont été observés sur la période (principalement entre mai 2018 et janvier 2021)
 - ▶ **nécessité absolue de recréer de nouvelles références géodésiques et altimétriques** pour remplacer RGM04 et SHOM 1953/IGN 1950.
- ▶ Stabilisation de l'activité sismo-volcanique en 2021: les scientifiques confirment que la crise est passée. L'IGN organise une mission de terrain de géodésie à Mayotte.
- ▶ En raison de la déformation interne de l'archipel, le réseau géodésique a été redéterminé par GNSS à l'automne 2023 pour réaliser le « **RGM23** » (Repère de référence géodésique de Mayotte 2023 = Référence géodésique de Mayotte 2023 = **ITRF2020@2023.75**), et des opérations de nivellement ont permis de réaliser le nouveau système vertical « **IGN 2023 Mayotte** ».

Le RGM04

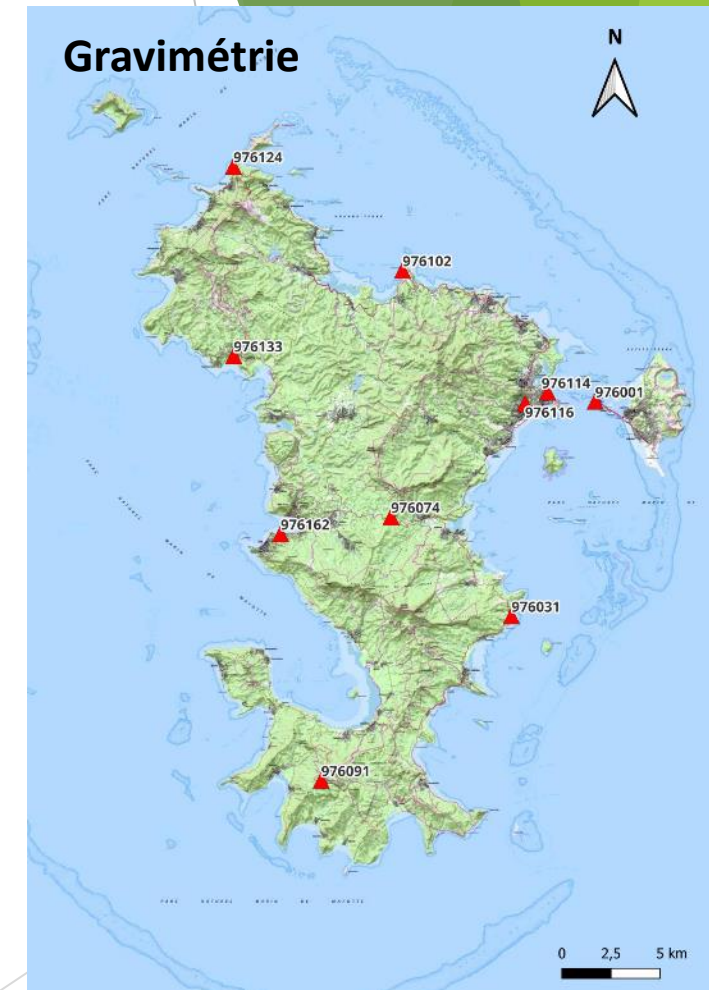
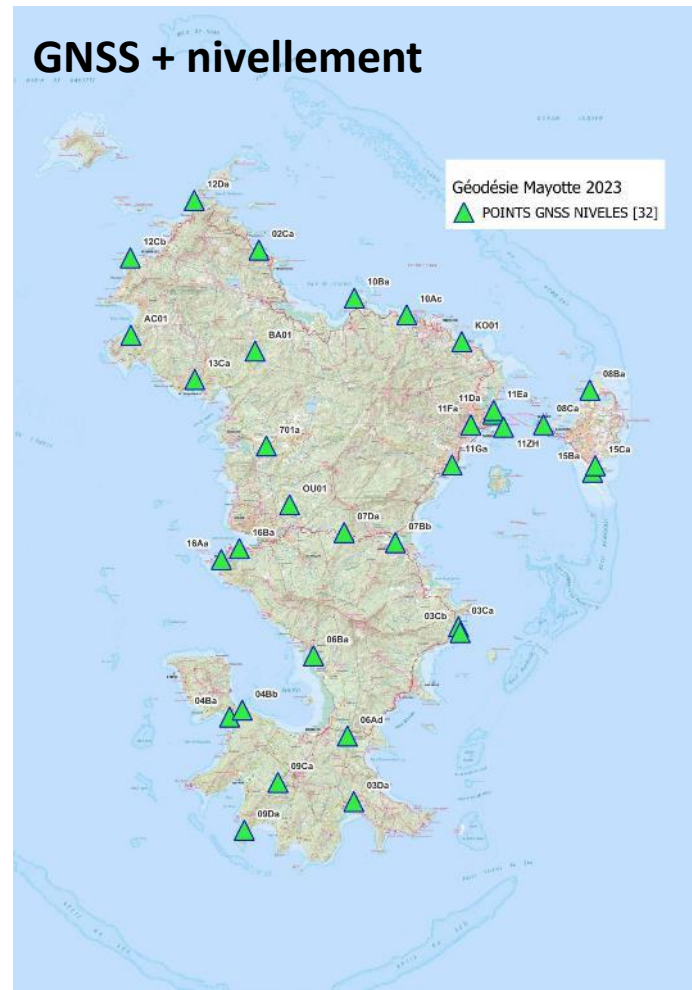
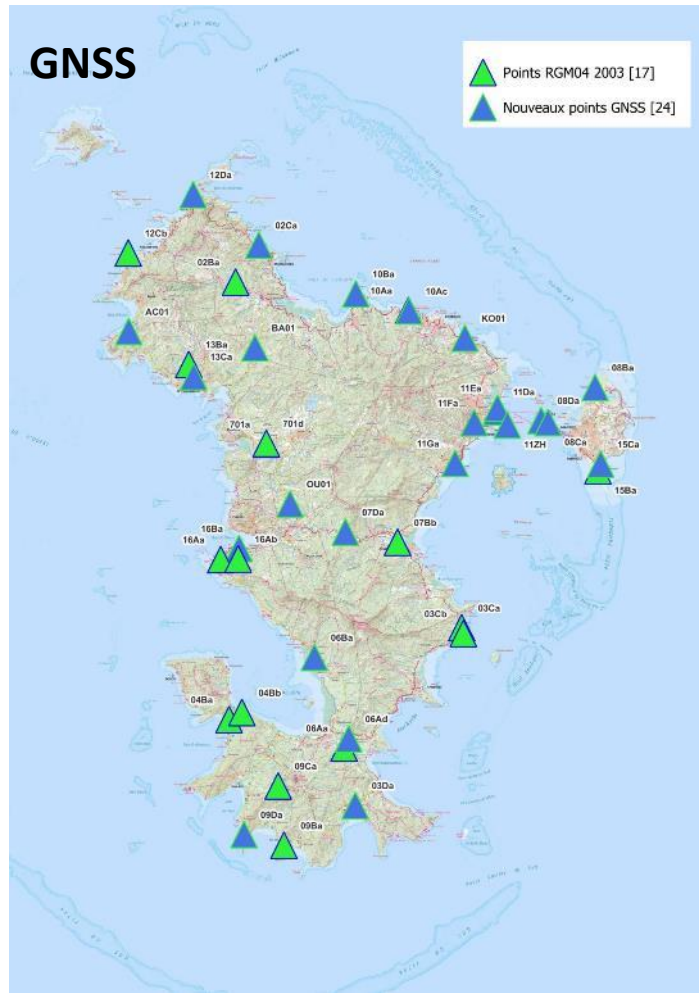
- ▶ À l'initiative du Service de Géodésie et Métrologie de l'IGN, un réseau moderne a été mis en place à Mayotte en 2004 : le RGM04 (Réseau Géodésique de Mayotte 2004).
- ▶ Matérialisation dans l'archipel d'un repère de référence précis, adapté aux technologies modernes, et compatible avec les références mondiales:
 - ▶ 47 stations déterminées par mesures GPS en 2003.
 - ▶ Repère de référence tridimensionnel et géocentrique, réalisation locale du système mondial ITRF2000 (International Terrestrial Reference System 2000).
 - ▶ équivalent (à un biais de réalisation près) à ITRF2000 (à l'époque 2004.0)
 - ▶ Ellipsoïde associé : IAG GRS80
 - ▶ $a = 6378137.000$
 - ▶ $1/f = 298.25722210088$
 - ▶ Projection associée : UTM Sud fuseau 38
- ▶ Il a remplacé progressivement les repères de référence antérieurs "Combani 1950" et "Cadastre 1997".
- ▶ Après la crise volcano-tectonique, ne peut plus garantir une assise précise (centimétrique) à tout développement d'infrastructure géolocalisée.

La mission de terrain de 2023

- ▶ 7 septembre au 9 décembre 2023
- ▶ GNSS: 41 sites mesurés (51 points)
- ▶ Nivellement: 255 km de cheminement
- ▶ Gravimétrie: 10 points mesurés

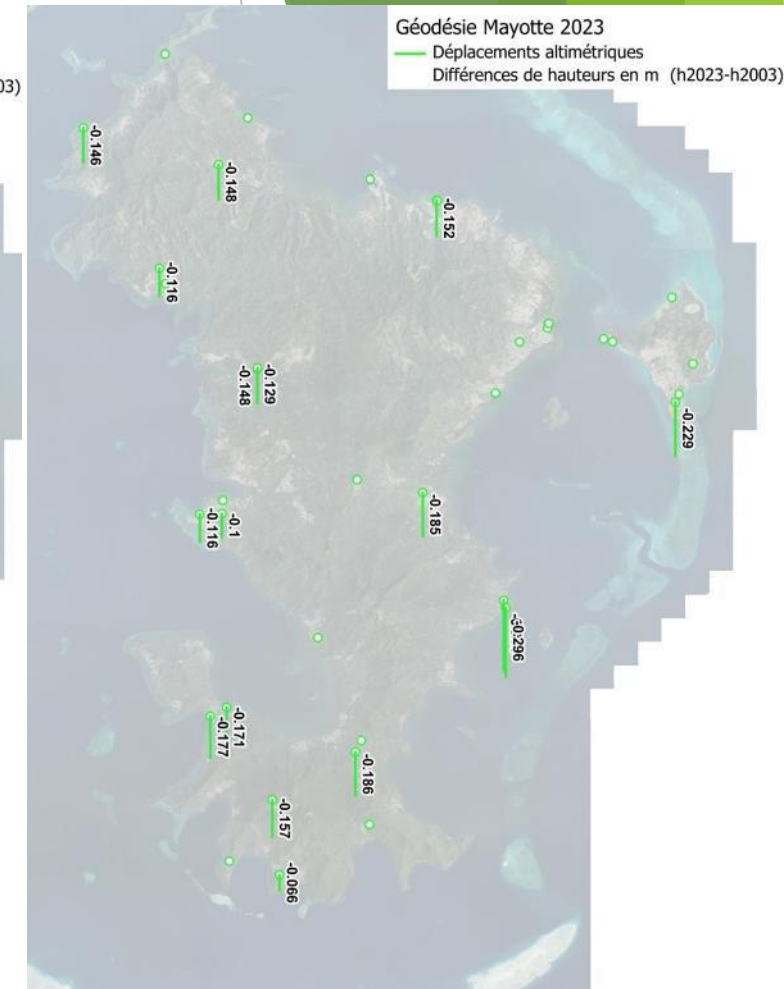
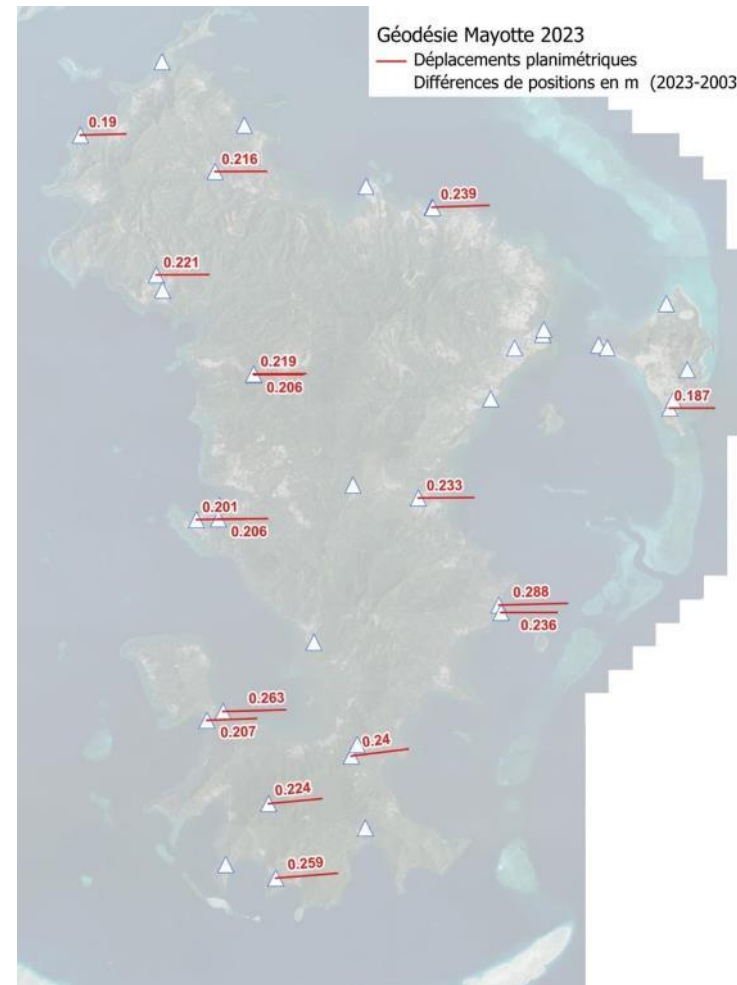


La mission de terrain de 2023



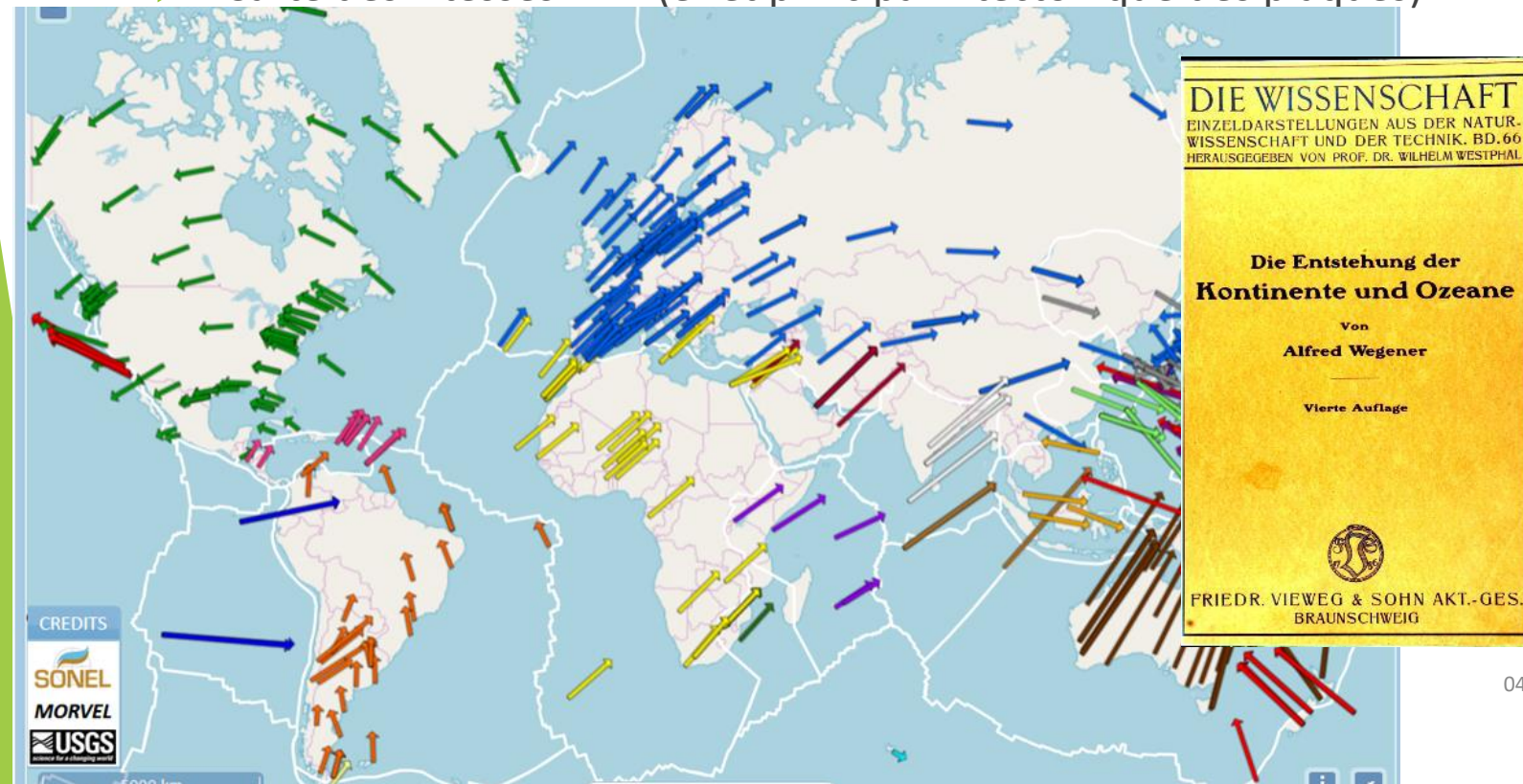
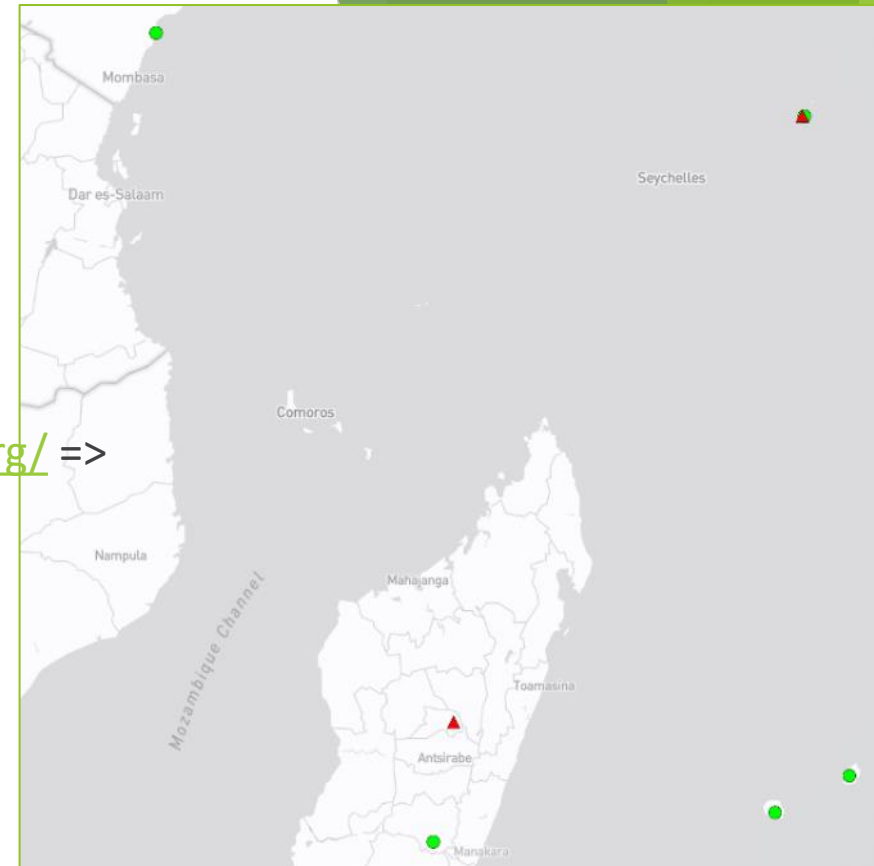
Impact sur l'accès aux références géodésiques

- Déplacements **mesurés** de RGM04 à RGM23 (après retrait du modèle de plaque tectonique) =>
- Déplacement non cohérent avec le modèle de de plaques tectoniques ITRF2020 !
- Déformations internes => modèles complexes nécessaires pour décrire le passage de RGM04 à RGM23



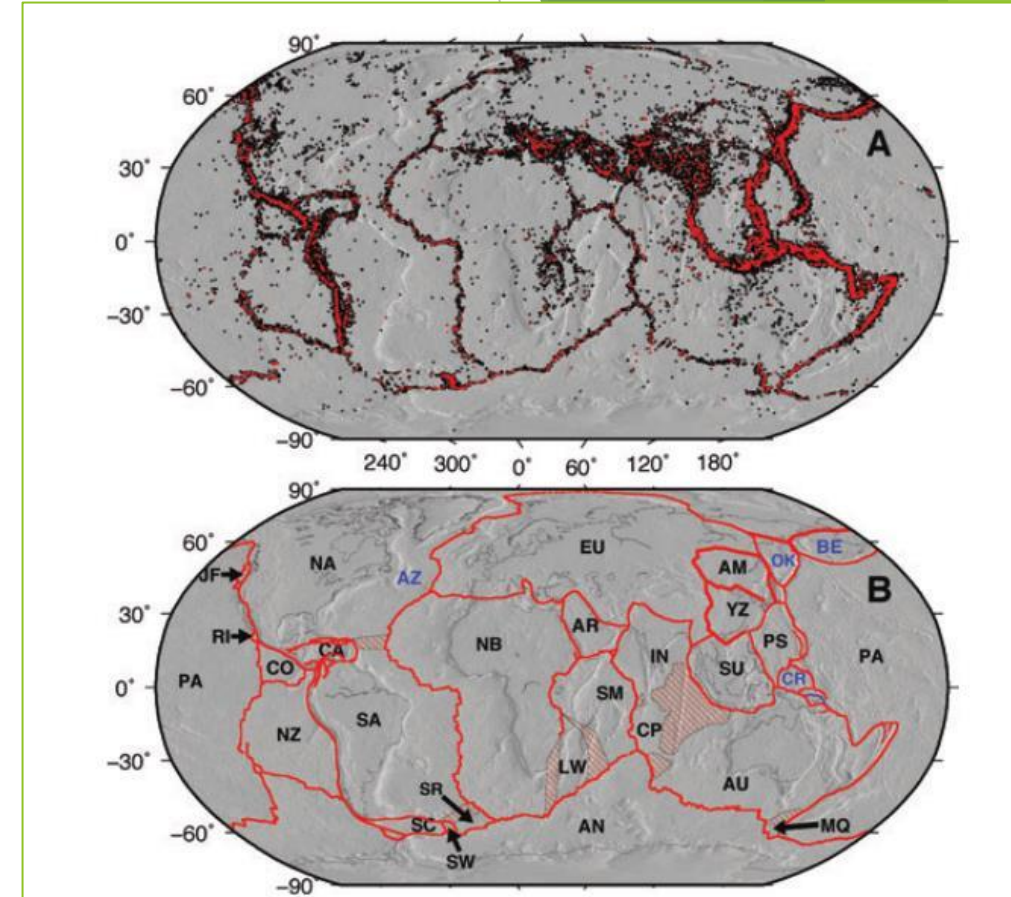
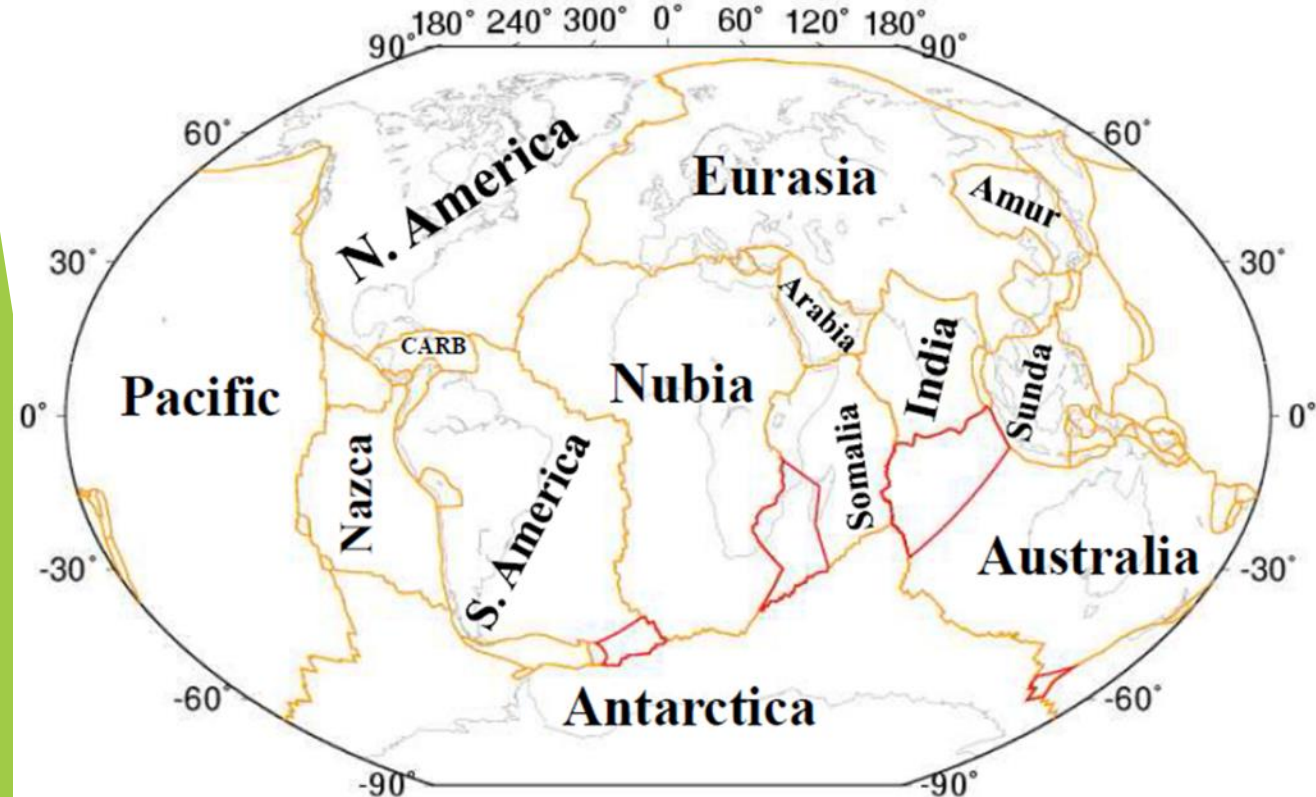
Rappel sur la tectonique des plaques

- ▶ Carte des stations IGS autour de Mayotte - source <https://network.igs.org/> =>
- ▶ Carte des vitesses ITRF (effet principal = tectonique des plaques)



Rappels sur la tectonique des plaques

- Modèles de plaques tectoniques
 - Bird (2003) and Morvel (2010)



Limitations des modèles de plaques tectoniques

- ▶ Le mouvement intra-plaque n'est pas modélisé
- ▶ Les modèles ne s'appliquent pas à moins de 100 km des bords de la plaque
 - ▶ Le point doit appartenir à la partie rigide de la plaque
 - ▶ Dans certaines zones, le nombre de plaques et leurs limites sont encore mal connus
- ▶ Le pôle de rotation et les vitesses angulaires publiés n'ont pas partout la même précision
 - ▶ Exemple: ITRF2014 PMM =>
- ▶ Toute propagation de coordonnées à une autre époque entraîne une dégradation de la précision (écarts types associés aux vitesses) qui s'ajoute à l'imprécision des coordonnées initiales

Table 1. Absolute plate rotation poles defining ITRF2014-PMM.

Plate	NS ^a	ω_x	ω_y	ω_z	ω	WRMS	
		(mas yr ⁻¹)			(° Ma ⁻¹)	E	N
ANTA	7	-0.248	-0.324	0.675	0.219	0.20	0.16
±		0.004	0.004	0.008	0.002		
ARAB	5	1.154	-0.136	1.444	0.515	0.36	0.43
±		0.020	0.022	0.014	0.006		
AUST	36	1.510	1.182	1.215	0.631	0.24	0.20
±		0.004	0.004	0.004	0.001		
EURA	97	-0.085	-0.531	0.770	0.261	0.23	0.19
±		0.004	0.002	0.005	0.001		
INDI	3	1.154	-0.005	1.454	0.516	0.21	0.21
±		0.027	0.117	0.035	0.012		
NAZC	2	-0.333	-1.544	1.623	0.629	0.13	0.19
±		0.006	0.015	0.007	0.002		
NOAM	72	0.024	-0.694	-0.063	0.194	0.23	0.28
±		0.002	0.005	0.004	0.001		
NUBI	24	0.099	-0.614	0.733	0.267	0.28	0.36
±		0.004	0.003	0.003	0.001		
PCFC	18	-0.409	1.047	-2.169	0.679	0.36	0.31
±		0.003	0.004	0.004	0.001		
SOAM	30	-0.270	-0.301	-0.140	0.119	0.34	0.35
±		0.006	0.006	0.003	0.001		
SOMA	3	-0.121	-0.794	0.884	0.332	0.32	0.30
±		0.035	0.034	0.008	0.008		
ITRF2014-PMM overall fit						0.26	0.26

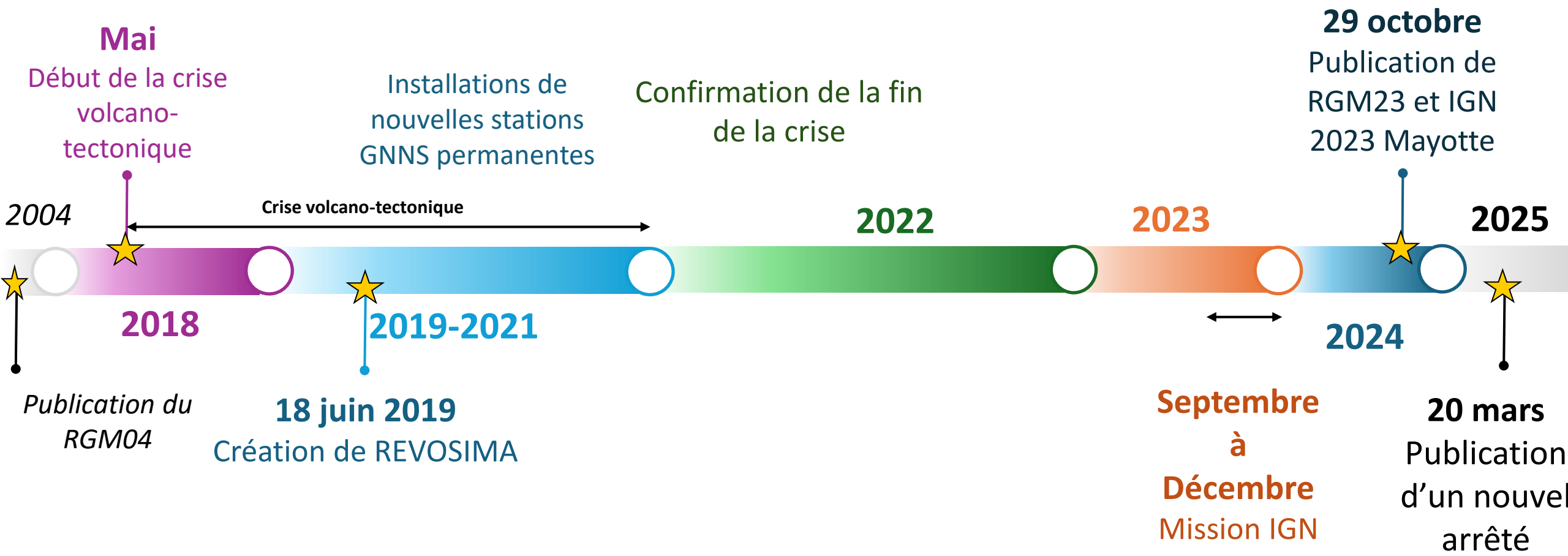
^a Number of sites.

2. Chronologie

© MAYOBS – IPGP/CNRS/Ifremer/BRGM

10 km

Chronologie



3. RGM23

© MAYOBS – IPGP/CNRS/Ifremer/BRGM

10 km

Calcul du nouveau référentiel géodésique RGM23

Constat

- ❖ Des déplacements absolus de plus de 20 cm et des déplacements relatifs supérieurs à 10 cm ont été observés sur l'ensemble de la période.
- ▶ Les coordonnées et altitudes des réseaux de référence matérialisés RGM04 et MAYO53 déterminées en 2006 ne sont donc plus valides

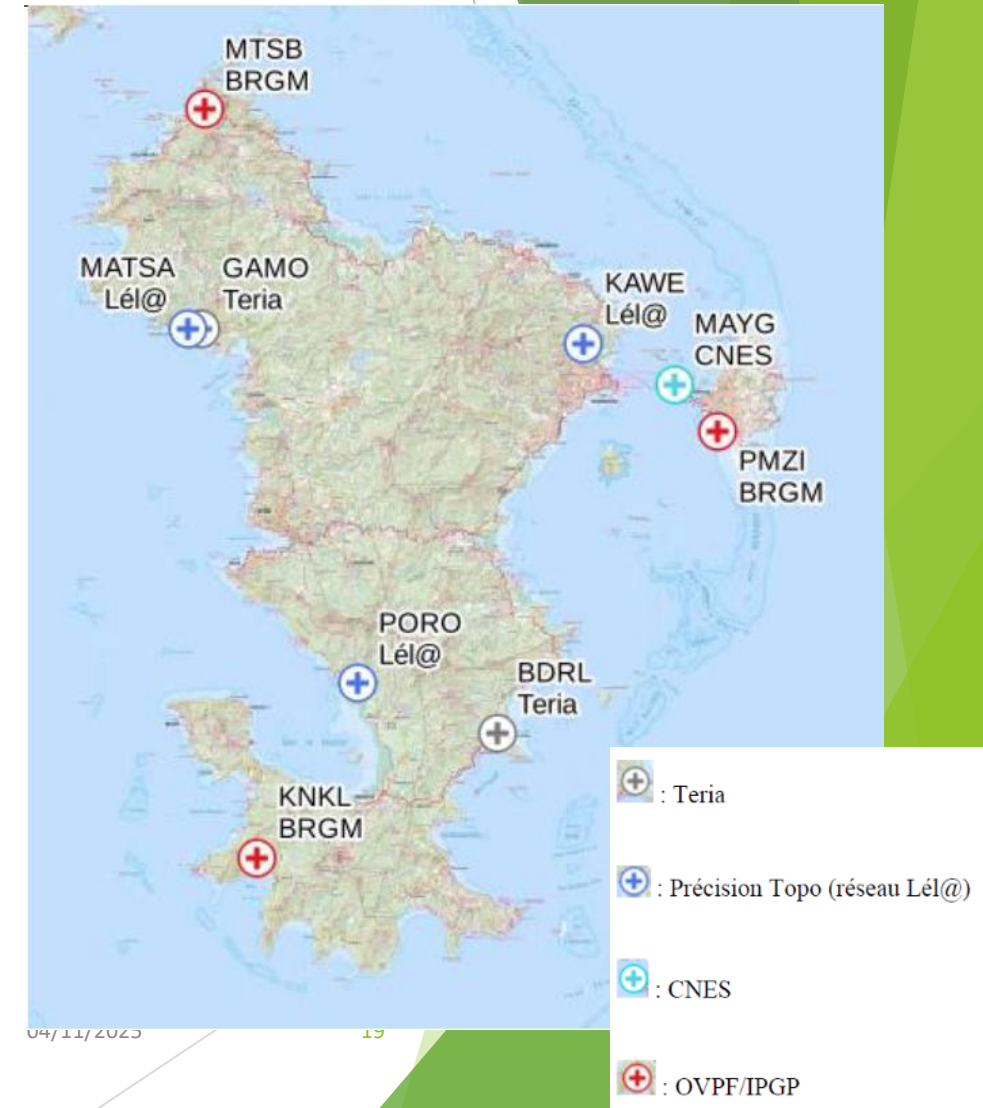
▶ Définition d'un nouveau repère RGM23

Le RGM23 (Repère de référence Géodésique de Mayotte 2023) est une réalisation de l'ITRF2020 via l'IGS20 à l'époque 2023.75. Ce repère est valide à compter du 1er janvier 2023, date à laquelle la crise tellurique est considérée comme terminée.

Calcul du nouveau référentiel géodésique RGM23

Calcul GNSS

- Calcul GNSS et mise en référence en IGS20 des stations RGP
- Calcul avec le logiciel Bernese des points géodésiques
 - Calcul GNSS de points géodésiques
 - Comparaison des deux méthodes de calcul Bernese
- Validation avec le logiciel Leica Infinity



Calcul du nouveau référentiel géodésique RGM23

❖ Détermination d'un nouveau repère dans l'IGS

➤ Mise en référence dans l'IGS 20

- Calcul d'une solution libre des 8 stations RGP sur l'île de Mayotte en mode « Shortest » avec un pivot sur le point géodésique **06Aa**
- Combinaison avec 13 stations IGS sur 28 sessions journalière

Du jour GPS 253 au jour GPS 280



Figure 9 : mode radial

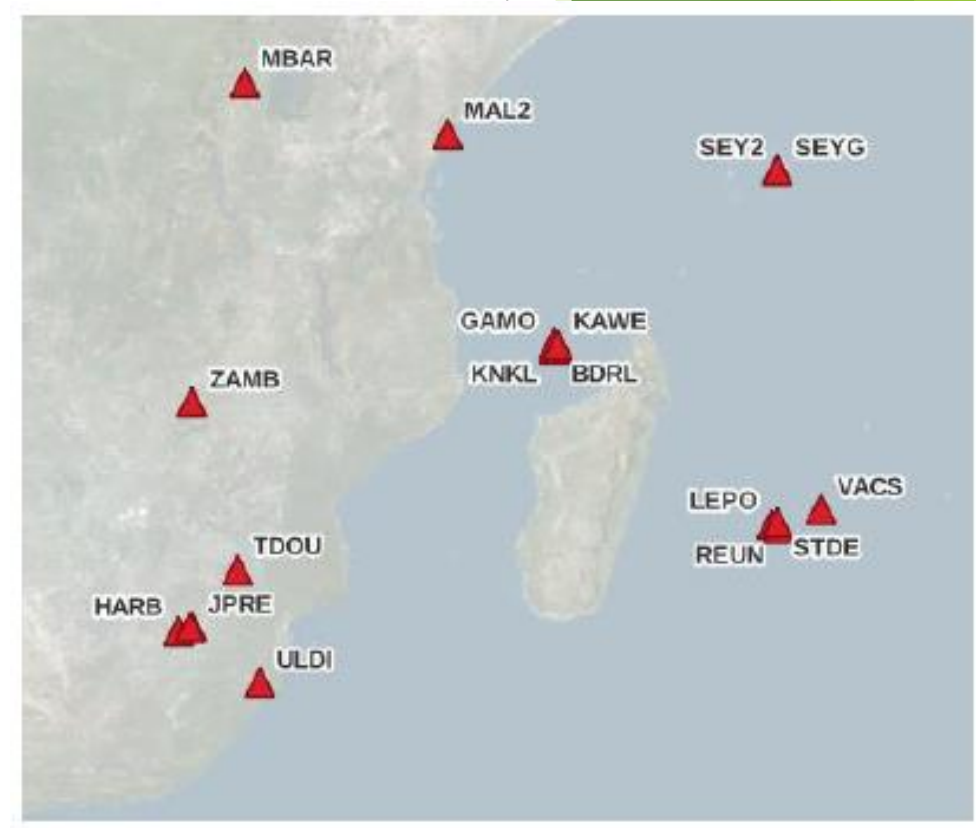


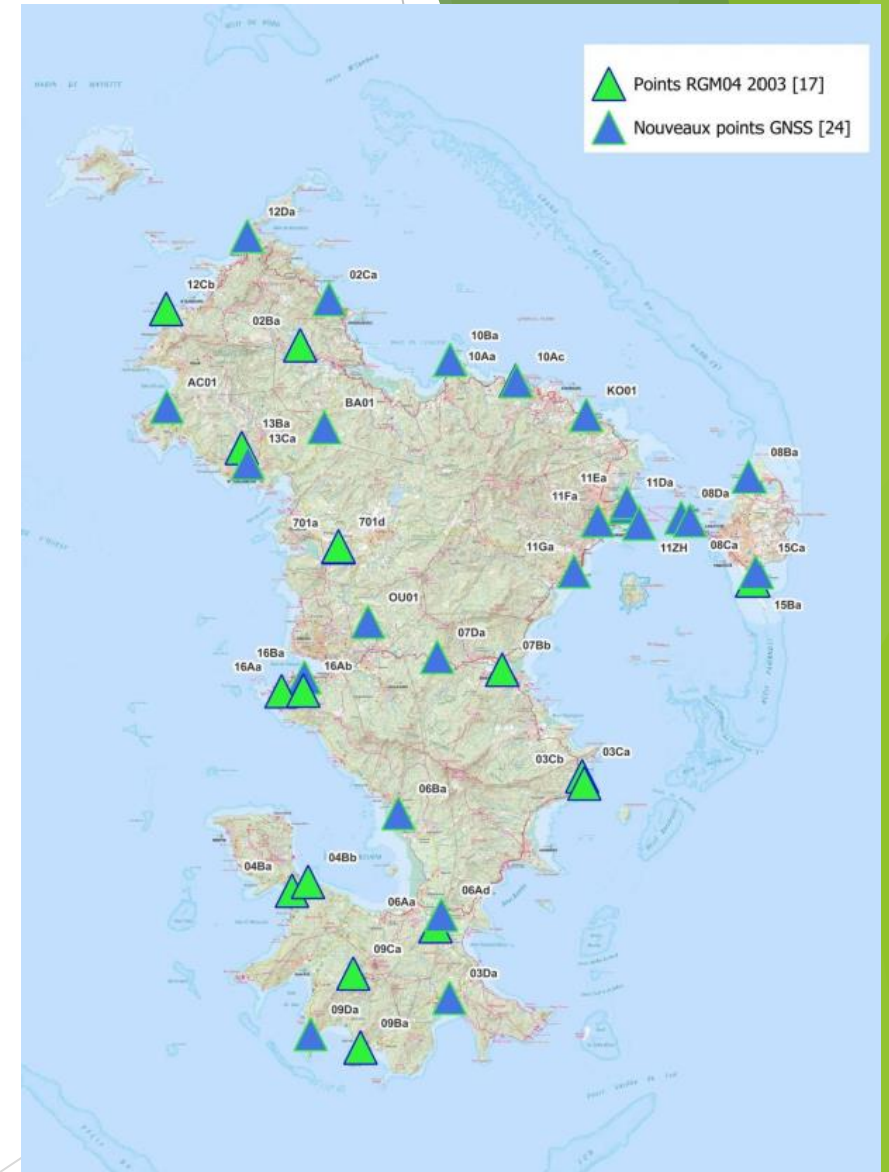
Figure 10 : mode shortest

Calcul du nouveau référentiel géodésique RGM23

❖ Détermination d'un nouveau repère dans l'IGS

- Mise en référence dans l'IGS 20
 - Calcul d'une solution libre des 8 stations RGP sur l'île de Mayotte en mode « Shortest » avec un pivot sur un point géodésique **06Aa**
 - Combinaison avec 13 stations IGS sur 28 sessions journalière du jour GPS 253 au jour GPS 280
- Détermination des coordonnées IGS20 @ 2023.75 date moyenne des observations
 - Mise en référence de la solution "libre" par un calcul Helmert sur les 13 stations IGS de coordonnées connues
 - EMQ de la transformation = 3,5 mm
 - Le RGM23 devient une réalisation de l'ITRF2020 via l'IGS20 à l'époque 2023.75, les coordonnées des 8 stations RGP sont fixées en RGM23



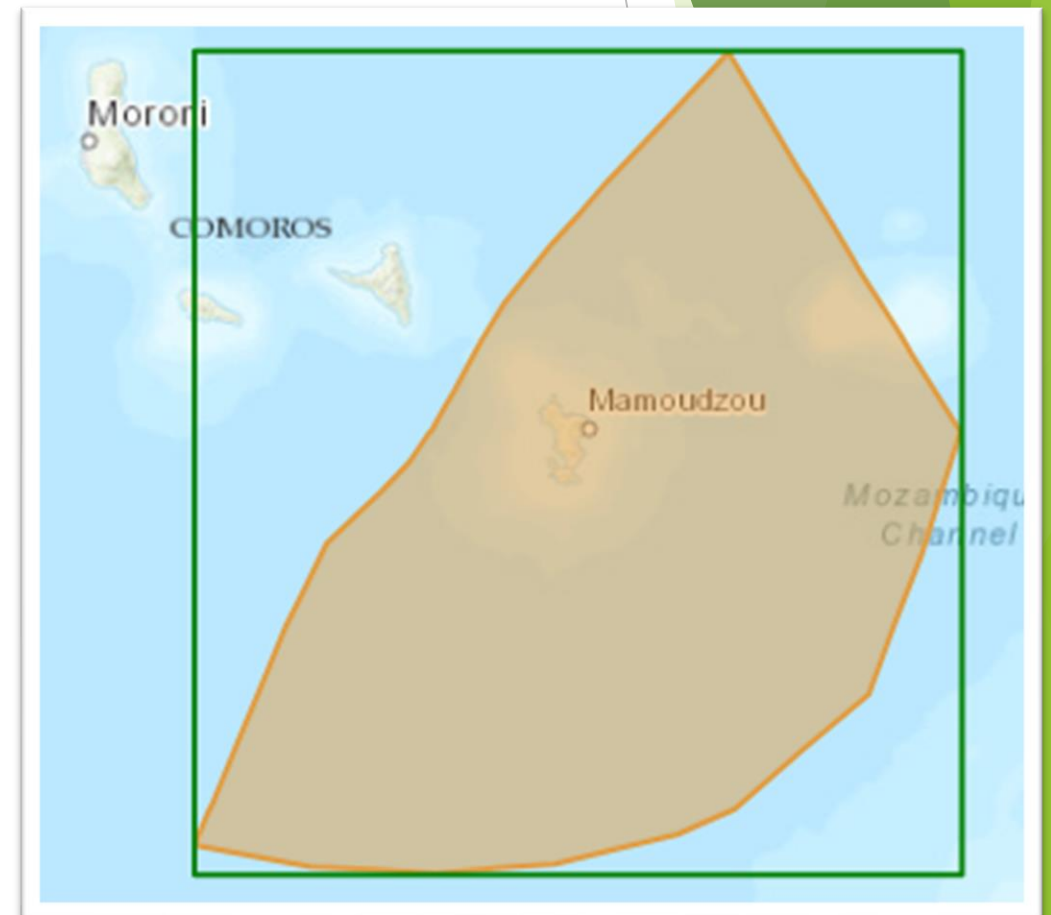


Calcul du nouveau référentiel géodésique RGM23

❖ Codes EPSG du RGM23

- Plusieurs codes ajoutés au registre EPSG
- <https://epsg.org/home.html>

Code	Coordonnées
10669	Cartésiennes géocentriques
10670	Géographiques 3D (lat, lon, he)
10671	Géographiques 2D (lat, lon)
10672	Géographiques 3D (lon, lat ,he)
10673	Géographique 2D (lon, lat)
10674	UTM 38 S
11158	UTM 38 S + altitude IGN 2023



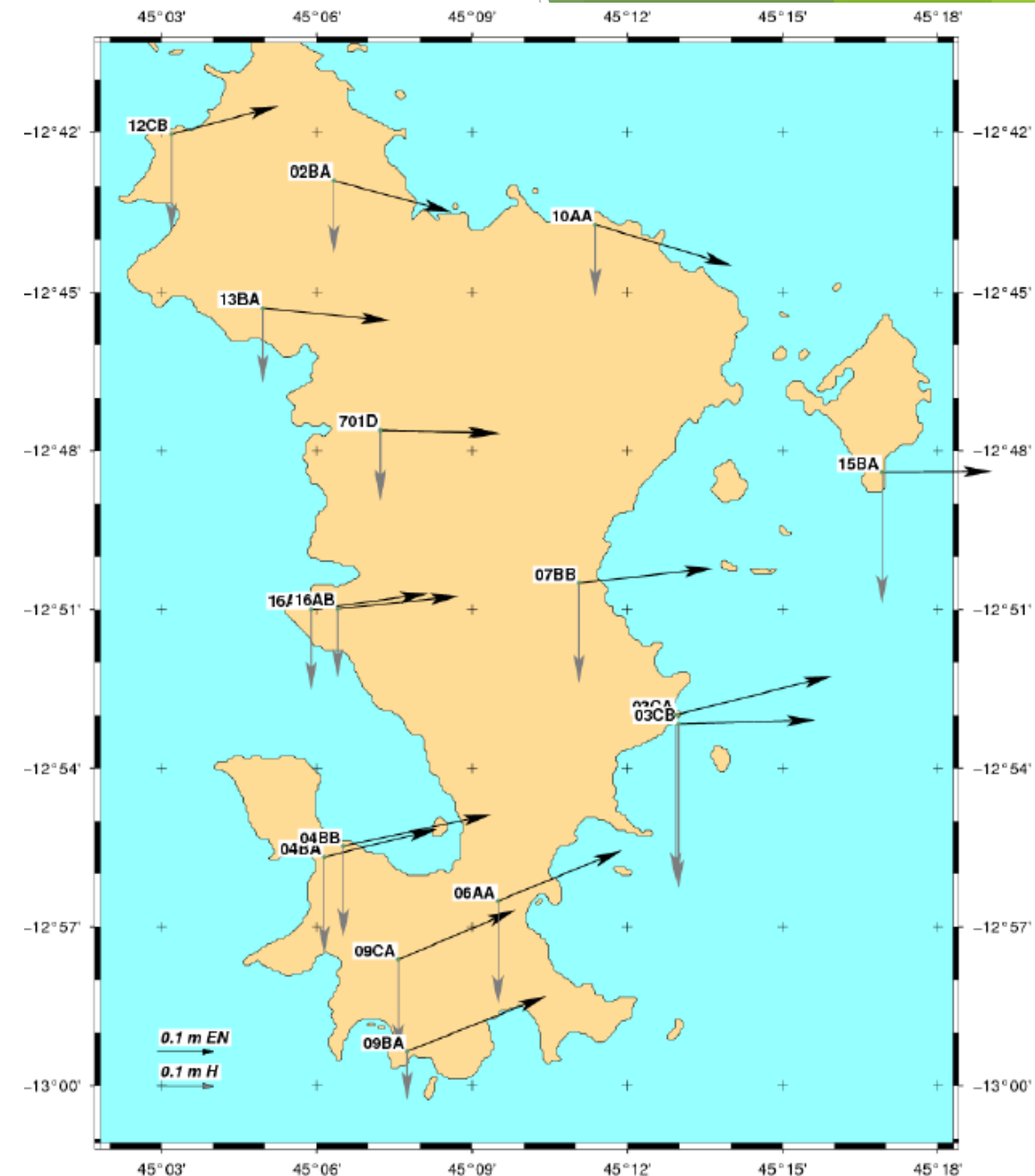
Ecart entre RGM04 et RGM23

❖ Ecart en coordonnées planes

- De 20 à 30 cm en planimétrie
- De 10 à 30 cm sur la composante verticale

On constate que le déplacement n'est pas homogène et présente une contraction au sein de l'île.

ID	Déplacement Est (m)	Déplacement Nord (m)	Déplacement he (m)
02BA	0.208	-0.054	-0.128
03CA	0.274	0.068	-0.289
03CB	0.242	0.006	-0.284
04BA	0.199	0.048	-0.170
04BB	0.260	0.058	-0.171
06AA	0.217	0.087	-0.179
07BB	0.235	0.025	-0.175
09BA	0.245	0.100	-0.084
09CA	0.206	0.087	-0.159
10AA	0.241	-0.072	-0.125
12CB	0.187	0.051	-0.165
13BA	0.222	-0.021	-0.130
15BA	0.193	0.001	-0.233
16AA	0.205	0.028	-0.141
16AB	0.212	0.022	-0.119
701A	0.204	-0.002	-0.116
701D	0.211	-0.006	-0.125



4. Transformations de coordonnées

© MAYOBS – IPGP/CNRS/Ifremer/BRGM

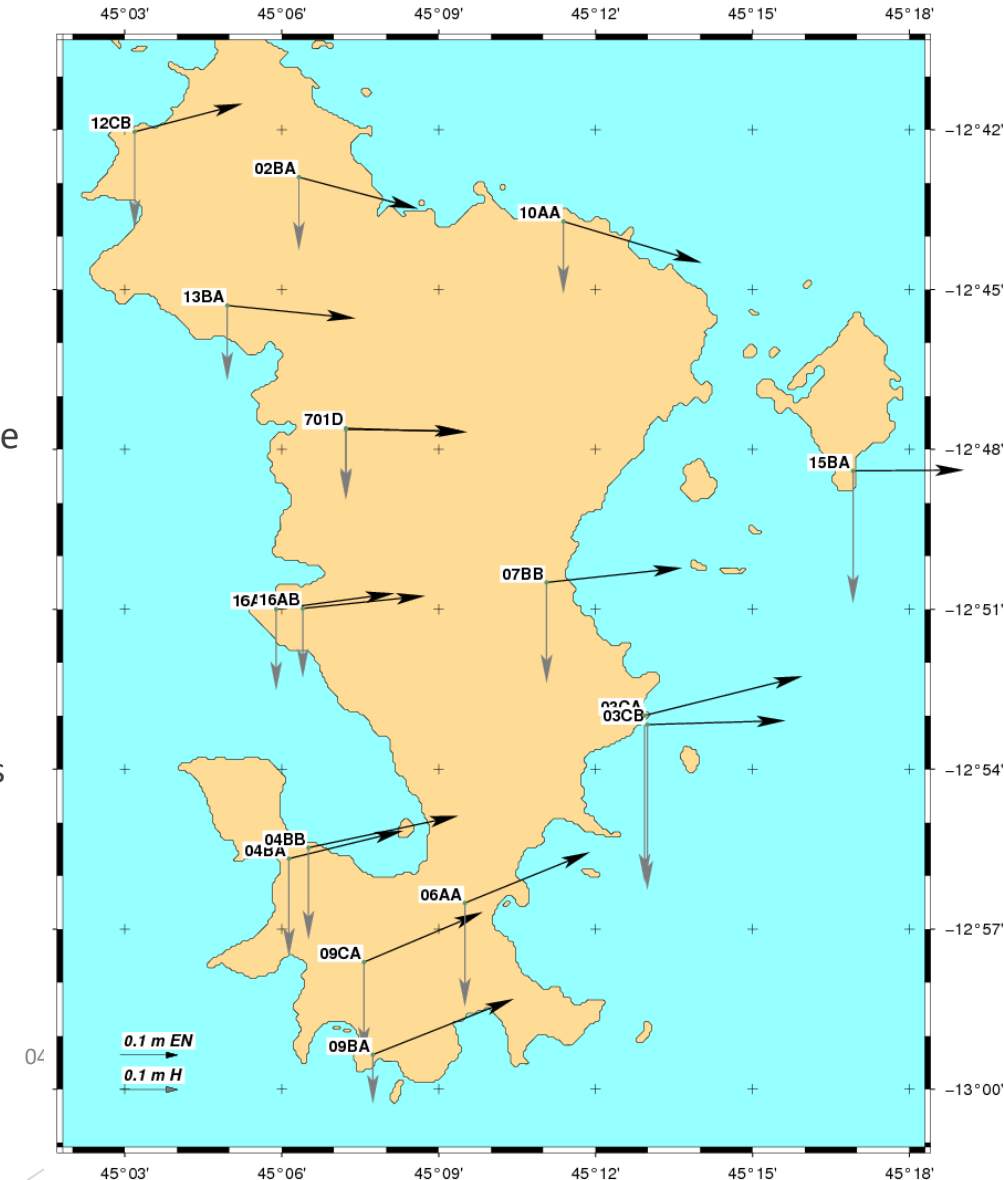
10 km

Transformation de coordonnées

- ▶ RGM04 ↔ RGM23
- ▶ RGM23 ↔ IGN 2023 Mayotte
- ▶ SHOM 1953/IGN1950 ~~↔~~ IGN 2023 Mayotte

Transformation entre RGM04 et RGM23

- Estimation des déplacements liés à la sismicité : différence entre coordonnées RGM04 transformées en ITRF2020 époque 2023.75 avec le modèle de plaques ITRF2014 PMM et les coordonnées RGM23 (= ITRF2020 @2023.75) finales =>
- Calcul des 7 paramètres d'une transformation de Helmert (formules simplifiées de Bursa-Wolf)
 - 16 points connus à la fois en RGM04 et RGM23, répartis sur 13 sites géodésiques différents
 - Au vu des résidus obtenus, la précision de la transformation peut être estimée à entre 5 et 10 centimètres.
 - Il paraissait difficile d'obtenir une transformation plus précise par cette méthode. Cette transformation de Helmert à 7 paramètres doit en effet modéliser plusieurs phénomènes de natures différentes :
 - déplacement « normal » de la plaque tectonique somalienne ;
 - crise sismique entre le 10 mai 2018 et le 1^{er} janvier 2021 ;
 - mouvements locaux pouvant affecter un seul point en particulier.



Grille de transformation entre RGM04 et RGM23

- Intégration du modèle de déformation (IPGP/ENSG) et des 7 paramètres de la transformation de Helmert (IGN) dans une **grille de paramètres de transformation** « **RGM04versRGM23.txt** »
 - En chaque nœud de la grille, trois translations $T_x T_y T_z$ s'appliquant aux coordonnées géocentriques
 - Interpolation bilinéaire
 - Utilisable uniquement pour des mises en référence RGM04 à partir d'observations antérieures au 1^{er} mai 2018
 - Précision estimée: < 5 cm à 1 sigma
 - Code EPSG = 10683

```
45.0 45.32 -13.02 -12.62 0.01 0.01 1 1 3 1 0. 0. 0. Grille RGM04-RGM23
45.0000 -13.0200 -0.4401 0.3859 0.3926 01
45.0000 -13.0100 -0.4411 0.3883 0.3901 01
45.0000 -13.0000 -0.4421 0.3908 0.3873 01
45.0000 -12.9900 -0.4429 0.3933 0.3845 01
45.0000 -12.9800 -0.4436 0.3956 0.3815 01
45.0000 -12.9700 -0.4443 0.3978 0.3785 01
...
```

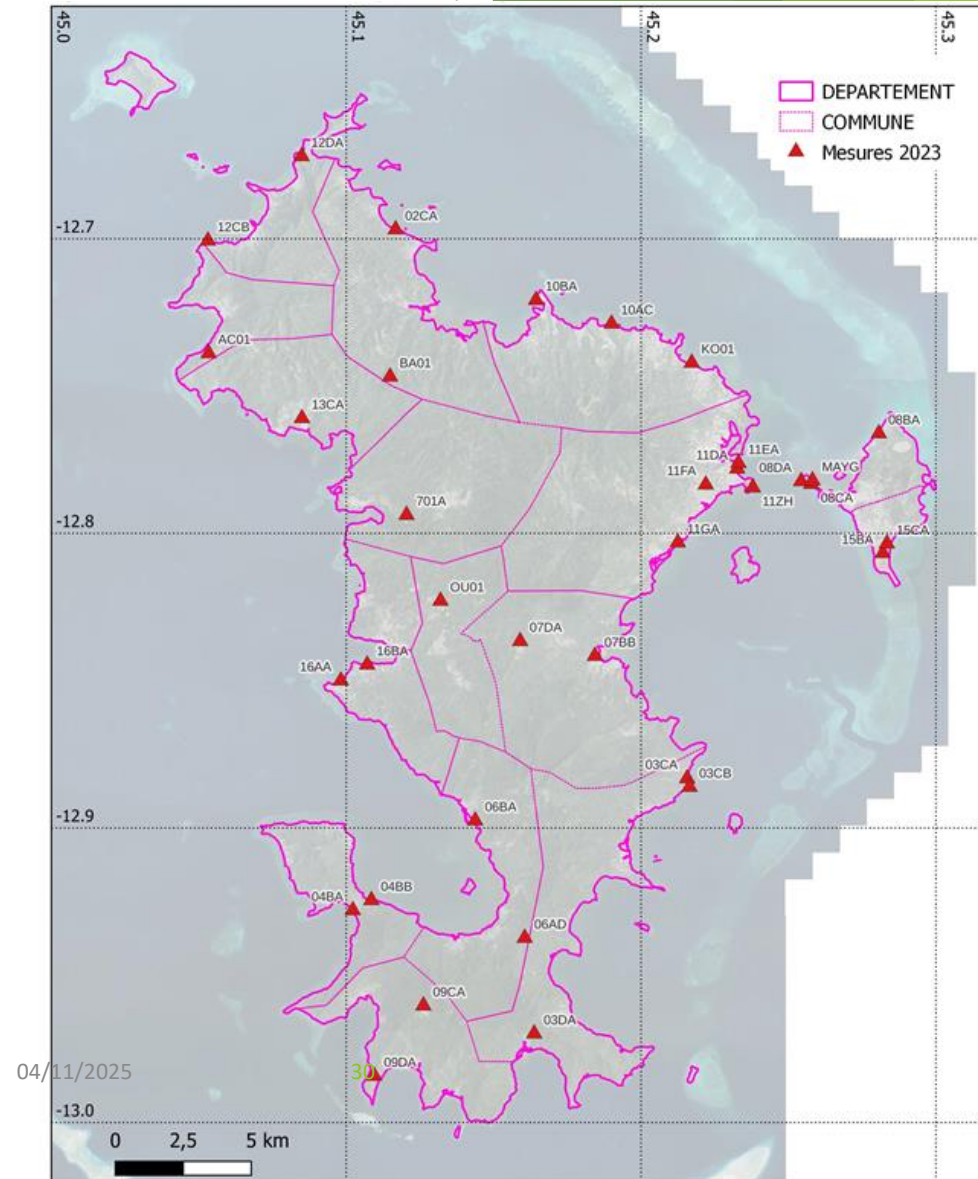
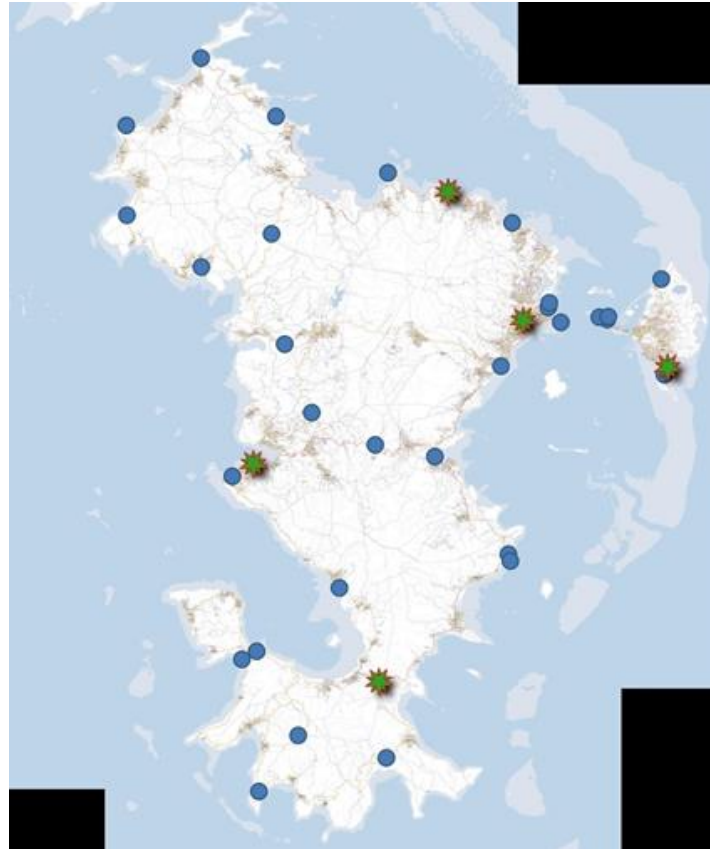
Transformations entre RGM04 et RGM23

- ▶ Coordonnées RGM04 déterminées à partir d'observations **antérieures au 1^{er} mai 2018** : transformation par grille de paramètres (Circé Service Public ou PROJ)
 - ▶ Intégrée à Circé à partir de la v5.4.6
 - ▶ Code EPSG = 10683
- ▶ Coordonnées RGM04 déterminées à partir d'observations effectuées **entre le 1^{er} mai 2018 et le 1^{er} janvier 2021** : transformation par modèle de déformation 3D (PROJ)
- ▶ Coordonnées RGM04 déterminées à partir d'observations effectuée **entre le 1^{er} janvier 2021 et la date de publication du RGM23** (novembre 2024) :
 - ▶ a) calcul des coordonnées RGM23 à partir des observations GNSS et des coordonnées RGM23 des stations permanentes de Mayotte
 - ▶ b) à défaut, application du modèle de déplacement 3D pour ramener les coordonnées RGM04 à la date du 1^{er} mai 2018 (PROJ), puis transformation par grille de paramètres vers le RGM23 (Circé Service Public)
- ▶ Tous les détails sur <https://geodesie.ign.fr/actualites/laces-la-nouvelle-reference-geodesique-rgm23-de-mayotte>

Transformation entre RGM23 et IGN 23

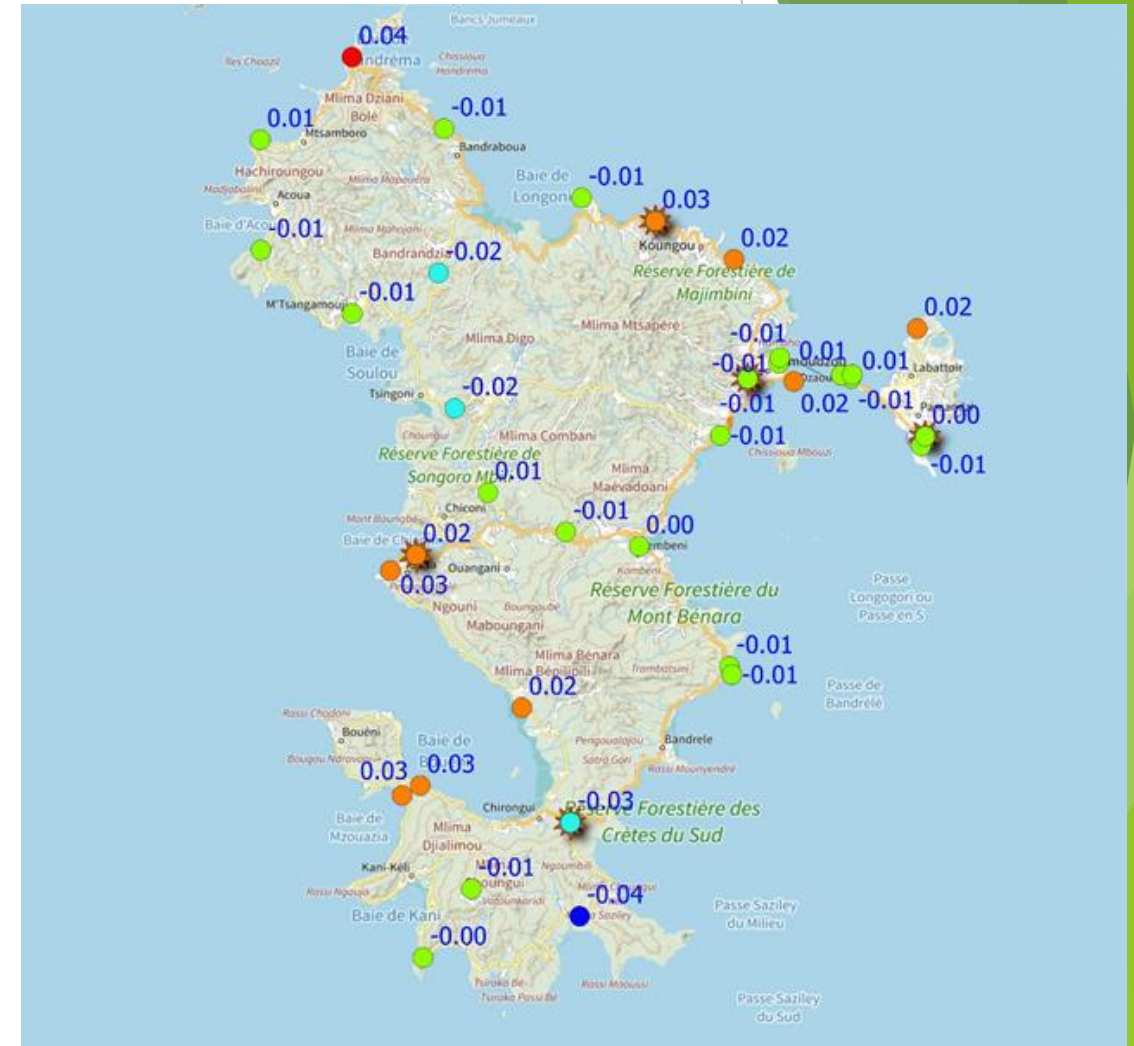
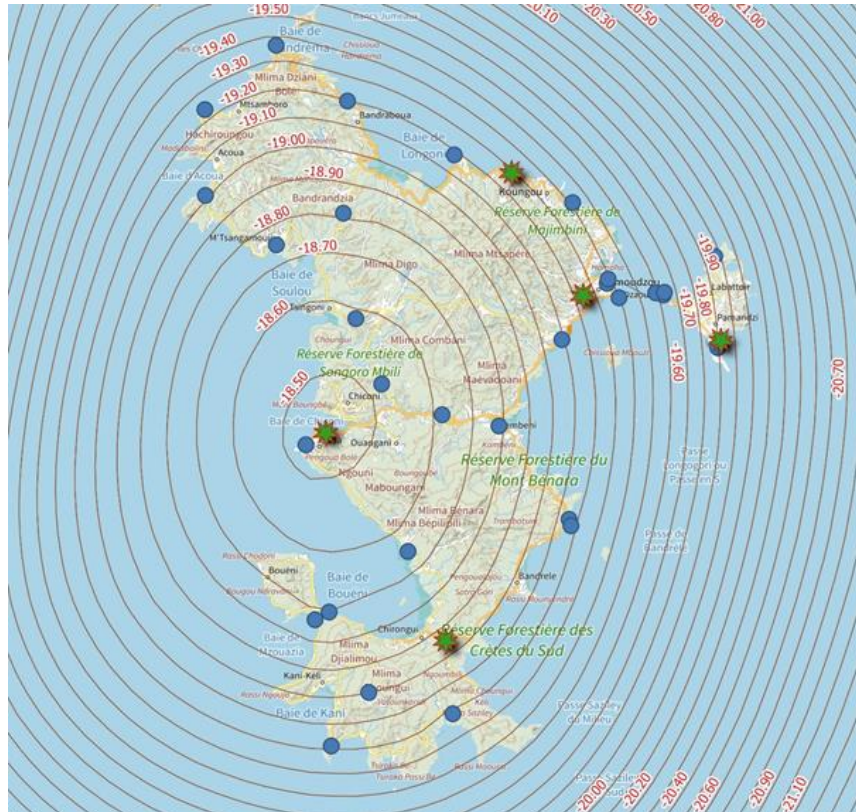
Mayotte

- ▶ 35 points GPS nivelés à l'issue de la mission IGN de 2023
 - ▶ 30 points de calage (bleu)
 - ▶ 5 points de contrôle (vert)
- ▶ + Modèle global: EGM2008
 - ↓
- ▶ Adaptation par krigeage
 - ↓
- ▶ Analyse des résidus
 - ▶ Précision estimée: < 5 cm



Transformation entre RGM23 et IGN 2023 Mayotte

- Résidus (m) sur points de calage et de contrôle =>
- Courbes des isovaleurs (m):



Transformation entre RGM23 et IGN 2023 Mayotte

► Grille de transformation verticale GGM23V2

► Transformation d'une hauteur ellipsoïdale RGM23 en altitude IGN 2023 Mayotte

$$h_{e \text{ RGM23}} = H_{\text{IGN2023Mayotte}} + N_{\text{GGM23V2}}$$

► Interpolation bilinéaire

► Diffusée au format IGN/SGM (.mnt = .tac)

► Intégrée à Circé Service Public à partir de la v5.4.6

► Code EPSG = 11159 (publié le 30 septembre 2025)

► Intégration dans PROJ en cours par des développeurs

```
44.800000000000 45.540000000000 -13.200000000000 -12.500000000000
0.010000000000 0.010000000000 2 1 1 1 0 IGN 2023 Mayotte vers
RGM23 - Adaptation de l'EGM2008 sur 35 points GPS nivelés
-12.5      44.8 -23.5134 00
-12.5      44.81 -23.4209 00
-12.5      44.82 -23.3221 00
-12.5      44.83 -23.2175 00
-12.5      44.84 -23.108 00
-12.5      44.85 -22.9941 00
...
```


5. Aspects législatifs

© MAYOBS – IPGP/CNRS/Ifremer/BRGM

10 km

Mise à jour de la législation

- ▶ Décret et arrêté de 2019 sur les références géodésiques
- ▶ Mise à jour de l'arrêté de 2019 par l'arrêté de 2025

- ▶ CNIG = Conseil National de l'Information Géolocalisée
 - ▶ Instance consultative placée auprès du ministre chargé du Développement durable.
 - ▶ Renouvelé pour cinq ans à compter du 1^{er} juillet 2020
 - ▶ Chargé d'étudier les questions relatives aux données dont l'information de localisation est essentielle et qui peuvent être géoréférencées.
 - ▶ Se concentre sur les enjeux et les perspectives de l'information géolocalisée qui concourent au déploiement des politiques publiques.
 - ▶ Rassemble en un lieu unique la très grande variété d'acteurs qui composent l'écosystème de la géo-donnée en France : ministères, établissements publics, collectivités territoriales, entreprises privées, associations professionnelles, organisations syndicales, association de citoyens, qui peuvent se rencontrer, décider et coproduire ensemble

Commission GEOPOS

- ▶ Commission GEOPOS (Géopositionnement)
 - ▶ mission : mener des travaux relatifs aux « techniques de géopositionnement à terre, en mer, sous la terre, sous les mers, dans les airs ou dans l'espace ».
 - ▶ chargée d'étudier tout type de problèmes liés au géopositionnement dans tous ces environnements, d'objets fixes ou mobiles.
 - ▶ Parmi ses missions et objectifs figure le suivi des besoins des utilisateurs.
- ▶ <https://cnig.gouv.fr/commission-geopositionnement-a665.html>

GTRIG

► Groupe de travail GTRIG

- Groupe « Règlementation pour l'Information Géodésique » (GTRIG)
- Missions liés aux **aspects juridiques de la géodésie**
 - **modification et mise en place des textes réglementaires concernant l'usage des références géodésiques en France métropolitaine et dans les départements et collectivités d'outre-mer.**
- Président choisi par le président de la commission Géopositionnement sur proposition de ses membres
- Secrétariat assuré par un agent de l'IGN.
- Membres désignés suite à un appel à candidatures lancé auprès des membres de la commission et des contributeurs du CNIG.
 - organismes publics et acteurs privés directement concernés (**Collectivités territoriales**, OGE, DGFIP, **IGN**, SNCF, SHOM, ERDF, Total Energies, Leica Géosystems, ESGT, ENSTA Bretagne, etc...) désignent leurs représentants.

Décret sur les références géodésiques

- ▶ RGM04 mentionné dans le **décret n°2006-272 (3 mars 2006)** qui définit le système national de référence de coordonnées géographiques, planimétriques et altimétriques.
 - ▶ officialise l'utilisation des repères de référence précis réalisant l'ITRS pour les entités ultra-marines (RGM04 pour Mayotte).
 - ▶ Par décret n° 2006-272 du 3 mars 2006 modifiant le décret n° 2000-1276 du 26 décembre 2000, le système national de référence de coordonnées géographiques, planimétriques et altimétriques cité à l'article 89 de la loi du 4 février 1995 susvisée a été défini.
- ▶ Travaux entre 2015 et 2018 du GTRIG (groupe de travail dédié de la commission GEOPOS du CNIG)
- ▶ **Nouveau décret n°2019-165 du 5 mars 2019 relatif au système national de référence de coordonnées.**
 - ▶ Texte mis en application par un **arrêté publié simultanément**, qui précise les repères de référence géodésiques et altimétriques réalisant le système sur les territoires de la République (RGM04 pour Mayotte)
 - ▶ **Règlementation « évolutive »**: La mise en œuvre du décret, prévoit une veille active pour l'évolution des références et de proposer des modifications de l'arrêté à chaque fois que cela paraît opportun

Mise à jour de l'Arrêté

- ▶ Réunions du GT RIG en 2024
 - ▶ Sur Mayotte, l'arrêté de 2019 est devenu caduc et il est nécessaire de le modifier.
 - ▶ => propositions de mise à jour de l'arrêté de 2019 pour remplacer RGM04 par RGM23 et SHOM 1953 par IGN 2023 Mayotte.
- ▶ Accompagnement jusqu'à la publication de l'Arrêté du 10 mars 2025
- ▶ Sur le site de la géodésie: <https://geodesie.ign.fr/textes-et-decrets>

Arrêté du 10 mars 2025 (extraits)

› Article 2

L'article 1er de l'arrêté du 5 mars 2019 susvisé est ainsi modifié :

1° Au premier alinéa, les mots : « Les réalisations des systèmes de référence verticale » sont remplacés par les mots : « Les réalisations des systèmes de référence terrestre » ;

2° Au sein du tableau introduit par le premier alinéa, la ligne :

«

Mayotte	RGM04	Réseau géodésique de Mayotte 2004	ITRS
---------	-------	-----------------------------------	------

› Article 3

L'article 2 de l'arrêté du 5 mars 2019 susvisé est ainsi modifié :

1° Au tableau introduit par le premier alinéa, il est ajouté un titre ainsi rédigé :

« Réalisation reliée au système de référence via une transformation de coordonnées verticales : » ;

2° Au sein du tableau introduit par le deuxième alinéa, la ligne :

«

Mayotte	MAYO53	IGN 1950/ SHOM 1953	Système local
---------	--------	---------------------	---------------

»

est remplacée par la ligne :

«

Mayotte	MAYO2023	IGN 2023 Mayotte	Système local
---------	----------	------------------	---------------

Mayotte	RGM23	Repère de référence géodésique de Mayotte 2023	ITRS
---------	-------	--	------

The background features abstract, overlapping green geometric shapes, primarily triangles and polygons, in various shades of green, creating a modern and dynamic visual effect.

MERCI POUR VOTRE PARTICIPATION