



GÉODÉSIE MONDIALE DES NATIONS UNIES CENTRE D'EXCELLENCE

MODERNISATION DU SYSTEME DE REFERENCE
GÉOSPATIALE
ATELIER SUR LE DÉVELOPPEMENT DES CAPACITÉS

Références altimétriques et modèles de géoïde

Nicholas Brown
Directeur du bureau, UN-GGCE

COMMENT

3e jour, 2e séance [3_2_1]

Remerciements: Kevin Ahlgren (États-Unis) ; David Avalos (Mexique) ; Jack McCubbine (Australie) ; Nikolaos Pavlis (États-Unis) ; Anna Riddell (Australie) ; Laura Sanchez (Allemagne) ; Michael Sideris (Canada).

La hauteur est un sujet complexe... mais important

- Dans quel sens l'eau coule-t-elle ?
- Quels sont les risques encourus lors d'une inondation ?
- Comment construire un réseau d'égouts dans la ville ?
- Comment développer un système d'irrigation efficace pour l'agriculture ?
- Comment garantir l'inclinaison correcte des voies ferrées et des routes ?
- Comment connaître le tirant d'eau d'un navire ?
- Comment surveiller l'évolution du niveau de la mer ?
- Quelle est l'altitude du sommet de la montagne ?



<https://www.welt.de/vermishtes/weltgeschehen/gallery9348988/Das-Jahrzehnt-der-Wetterkatastrophen.html>



**PLUS
FORTS.
ENSEMBLE**

Introduction à la hauteur

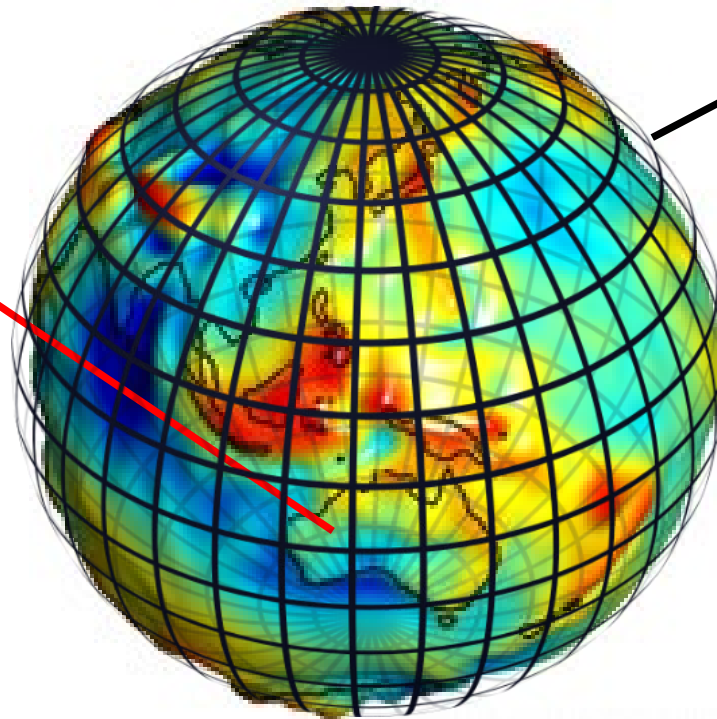
- Généralement, on souhaite connaître la hauteur d'un objet, ou l'altitude, par rapport au niveau de la mer.
 - C'est ce qu'on appelle les « hauteurs physiques »
- Les systèmes de positionnement par satellite (GNSS et télédétection) déterminent les altitudes par rapport à l'ellipsoïde.
 - On les appelle « hauteurs géométriques ».
- Il est important de comprendre en quoi ces systèmes sont différents et comment les données de ces systèmes peuvent être utilisées ensemble.



Hauteurs physiques et hauteurs géométriques

Potentiel
gravitationnel
égal

- Complexe
- Significatif sur le plan physique
- Précis
- Besoin d'un modèle à utiliser avec le GNSS
- L'eau coule toujours vers le bas

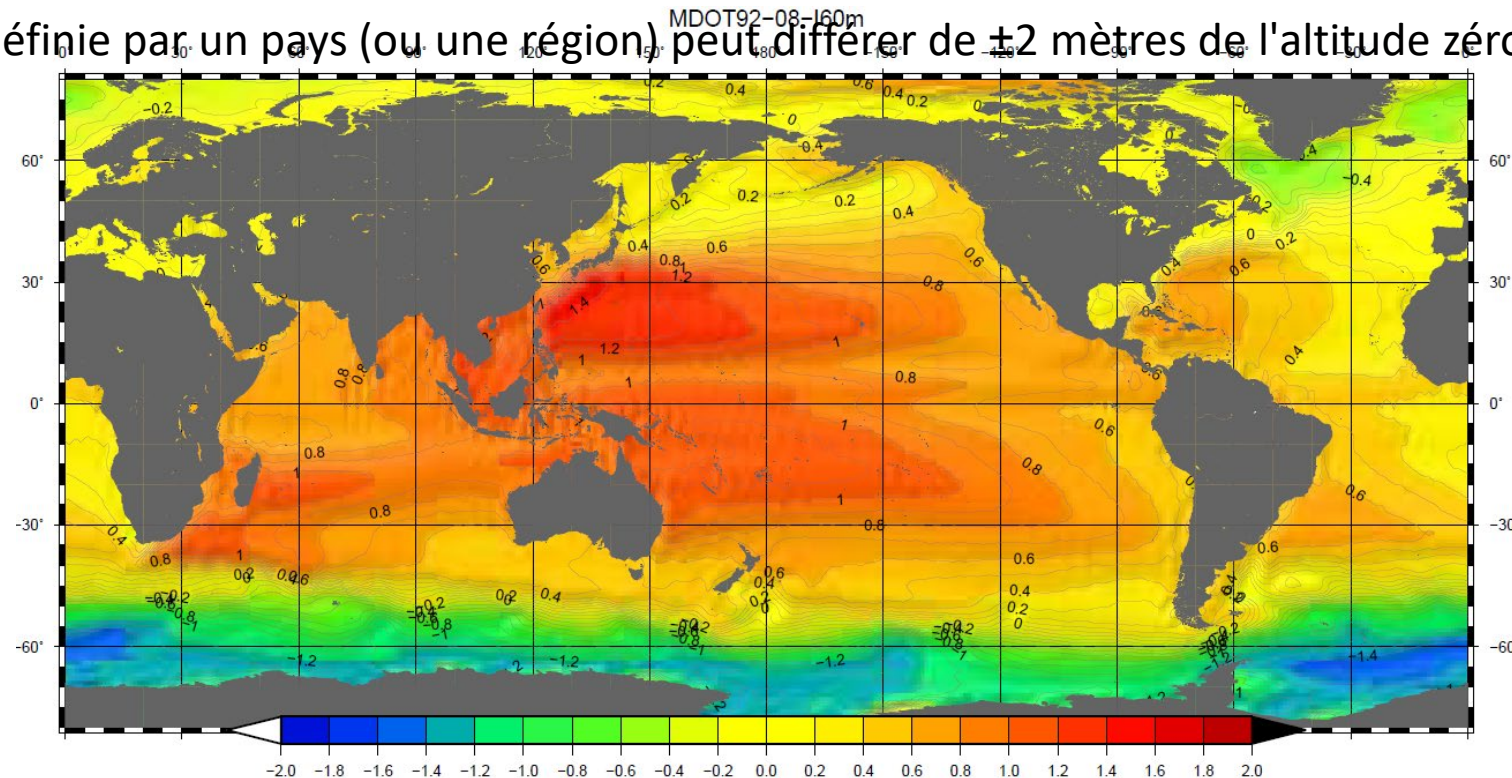


Géométrie

- Simple
- Sans signification physique
- Précis
- Utilisé par le GNSS
- L'eau ne coule pas toujours vers le bas

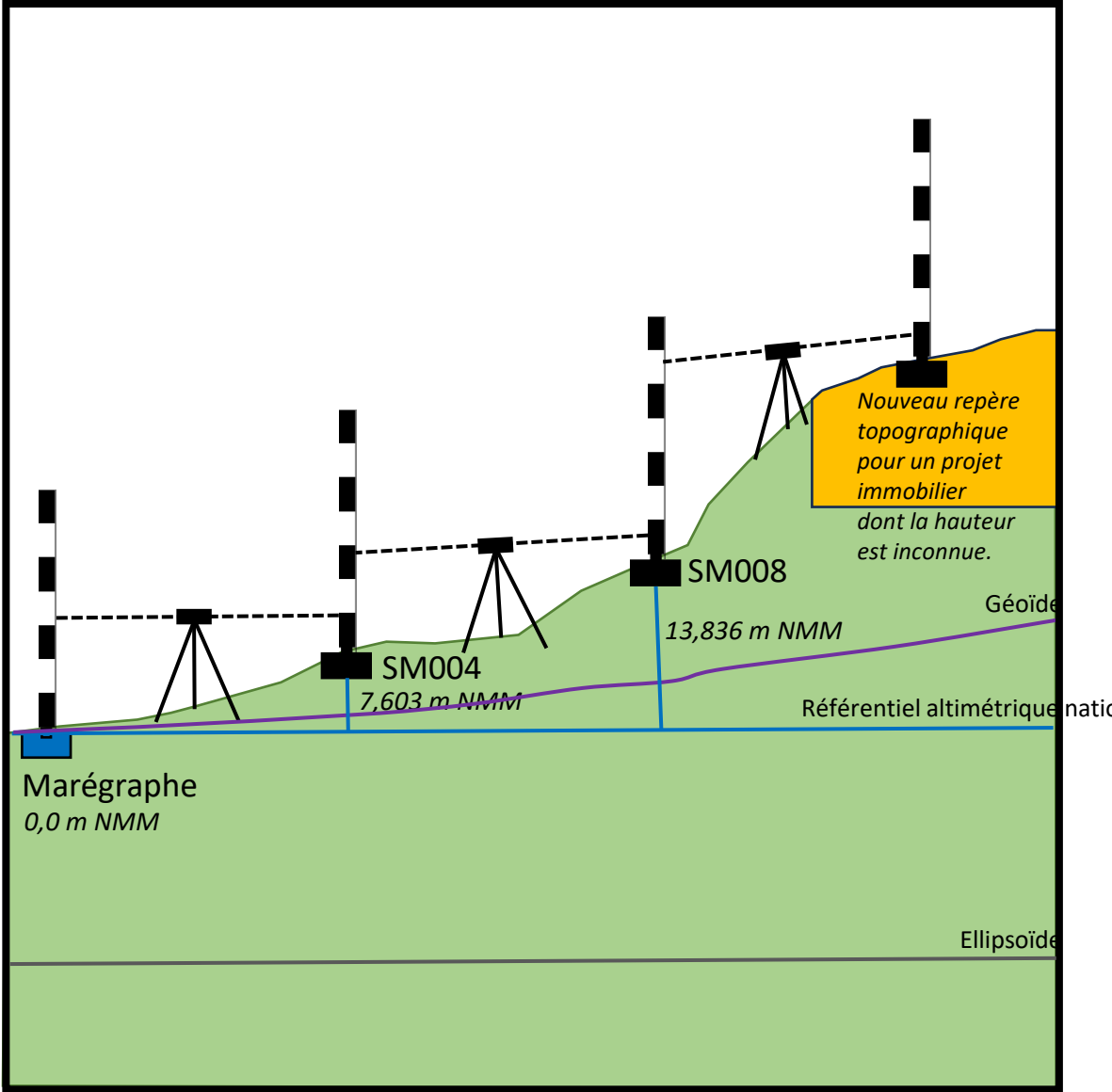
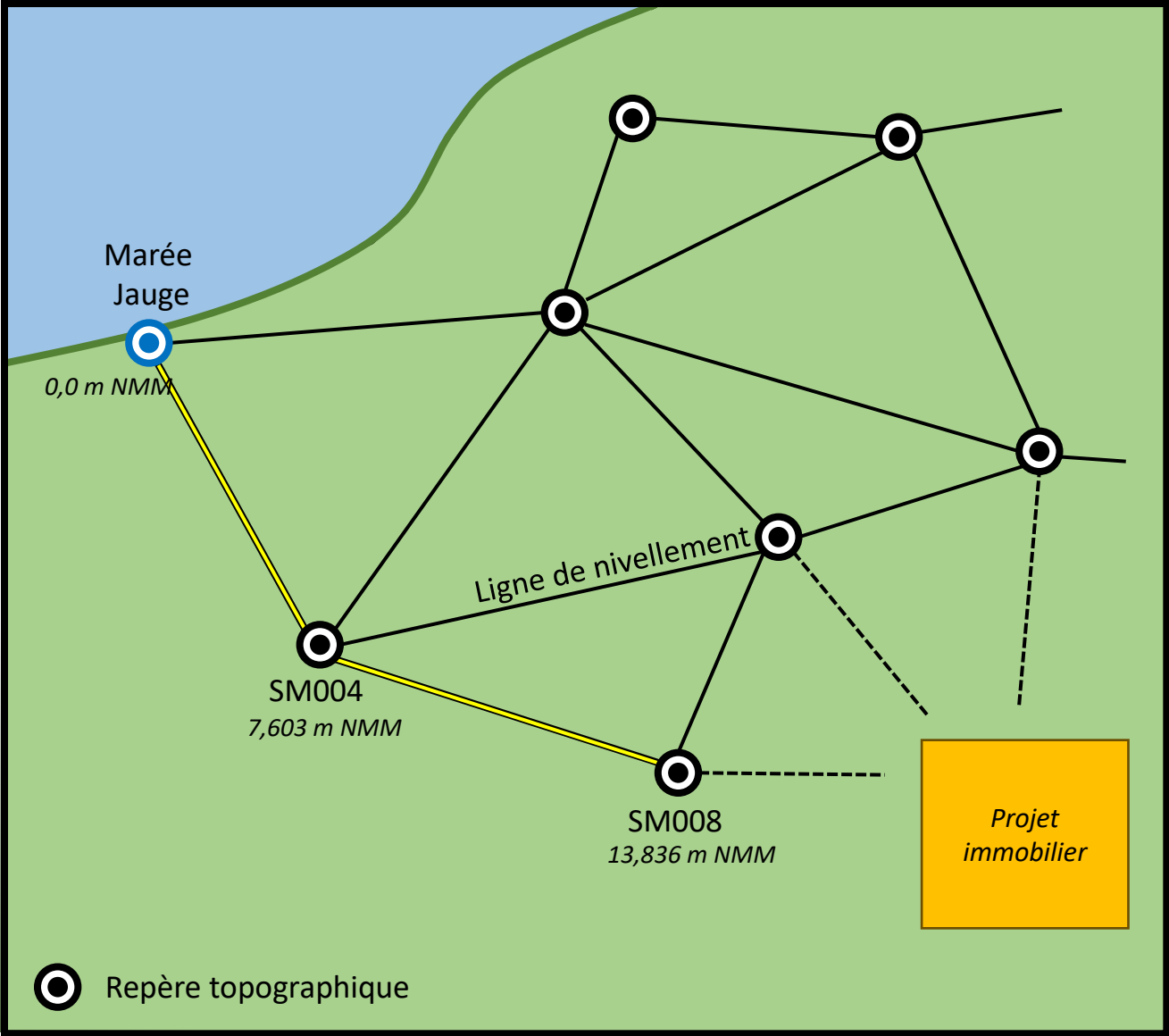
Altitudes par rapport au niveau moyen de la mer

- Les hauteurs nivelées font souvent référence au niveau moyen de la mer déterminé à l'aide de marégraphes sélectionnés.
- La surface de la mer n'est pas toujours à la même hauteur au-dessus du géoïde, elle varie en fonction des courants océaniques, de la température et de la salinité de l'eau.
- Le niveau moyen de la mer peut être plus ou moins proche de la valeur d'équilibre de la Terre (géoïde) en fonction de la situation géographique.
- Ainsi, l'altitude zéro définie par un pays (ou une région) peut différer de ± 2 mètres de l'altitude zéro définie par d'autres pays.

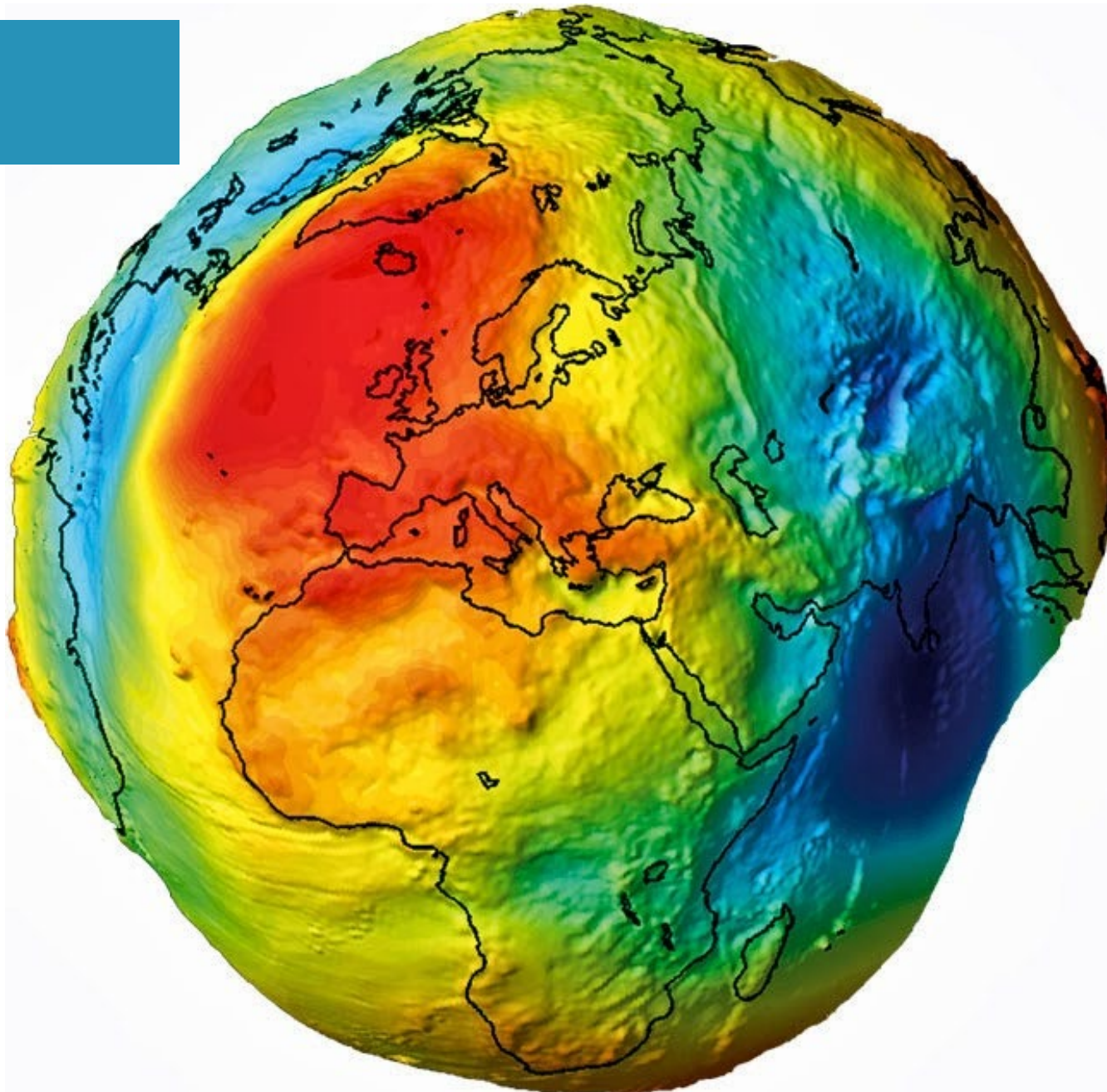


Topographie de la surface moyenne de la mer en mètres (©DGFI-TUM)

Référence de hauteur par rapport au marégraphe



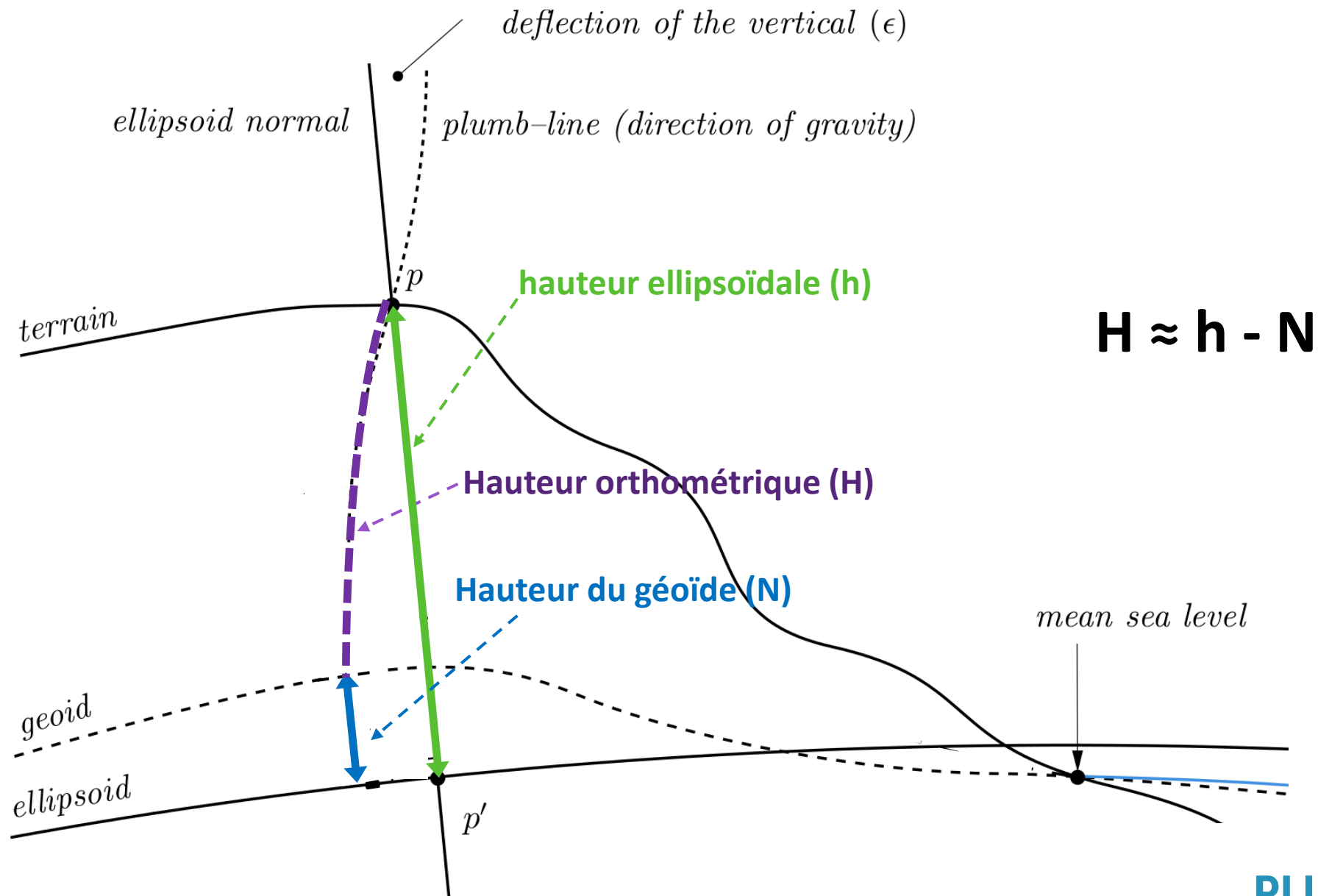
Le géoïde



L'échelle est exagérée pour rendre la différence visible. En réalité, ± 150 m

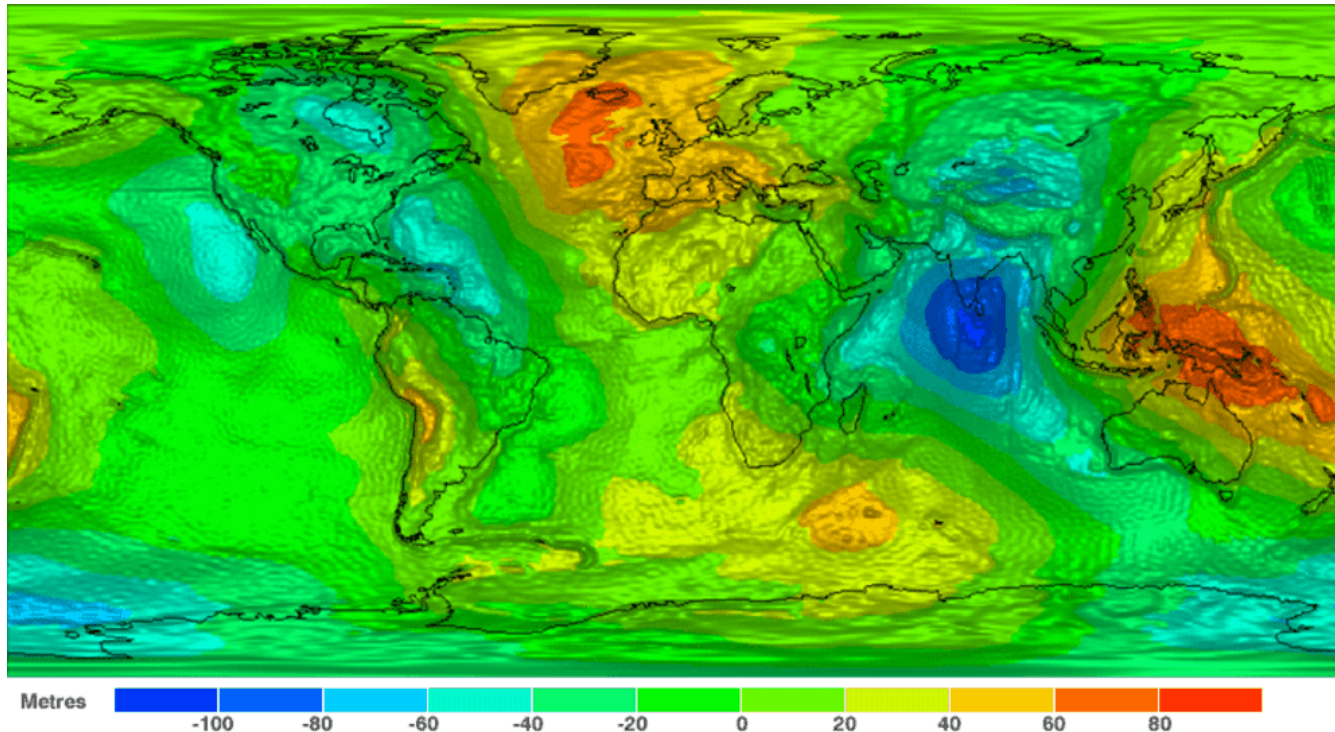


**PLUS
FORTS.
ENSEMBLE**

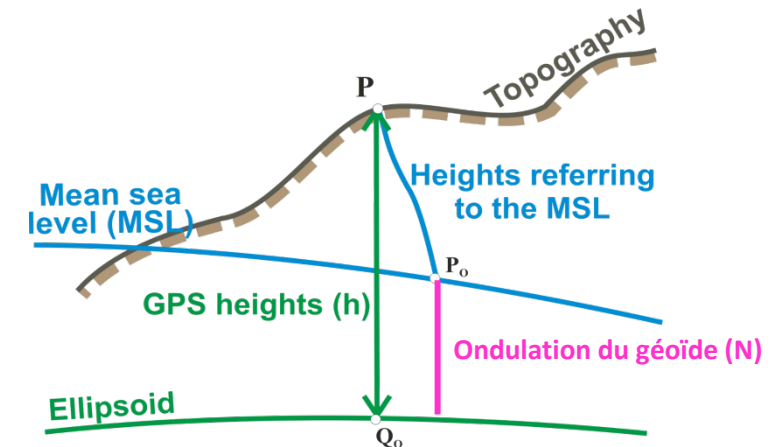


Hauteurs géométriques et hauteurs physiques

- Différentes techniques sont utilisées pour déterminer les hauteurs.
- Cependant, il n'existe aucune garantie que chaque technique permette d'obtenir la même hauteur.
- Les altitudes déterminées avec le GNSS ne se réfèrent pas à la surface moyenne de la mer, mais à l'ellipsoïde (un modèle géométrique de la Terre).
- Les différences entre les altitudes GNSS et celles qui se réfèrent à la surface moyenne de la mer peuvent atteindre ± 100 m.



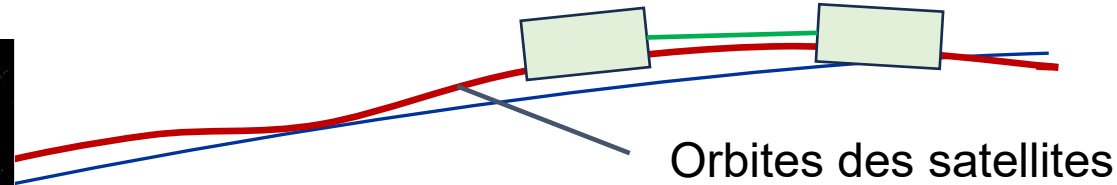
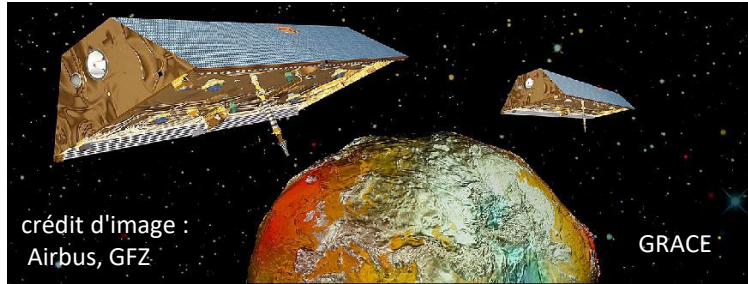
Différences en mètres entre les altitudes GNSS et les altitudes par rapport au niveau moyen de la mer (©ESA)



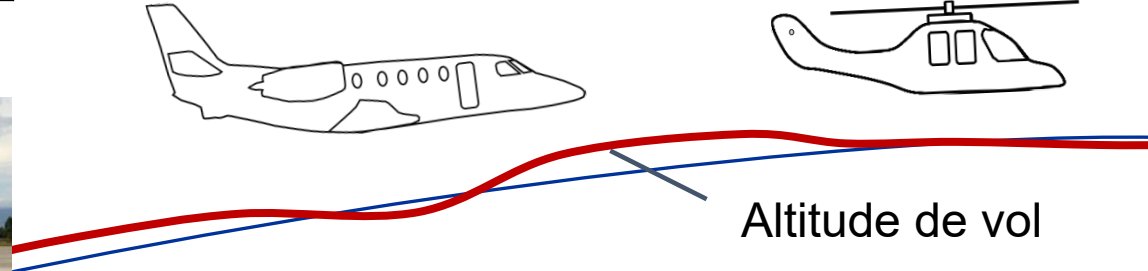
$$H = h - N$$

Création d'un modèle de géoïde

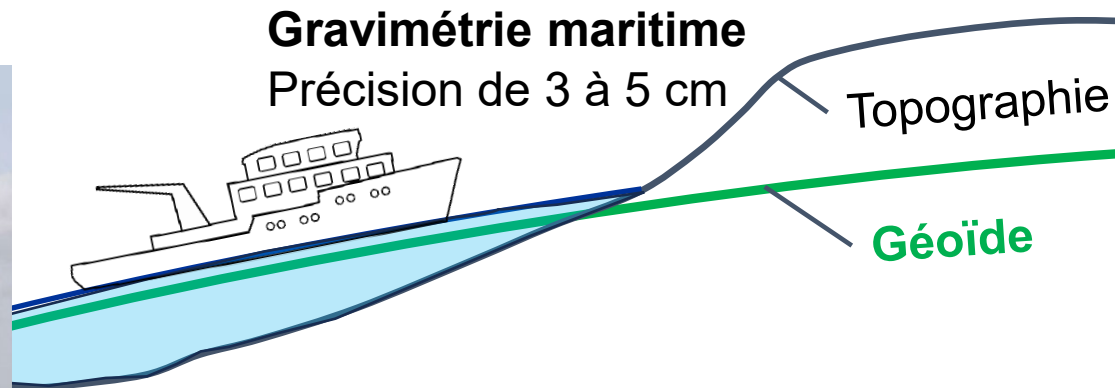
Mesures de la gravité



Gravimétrie par satellite
Précision de 20 cm



Gravimétrie aéroportée
Précision de 3 à 5 cm



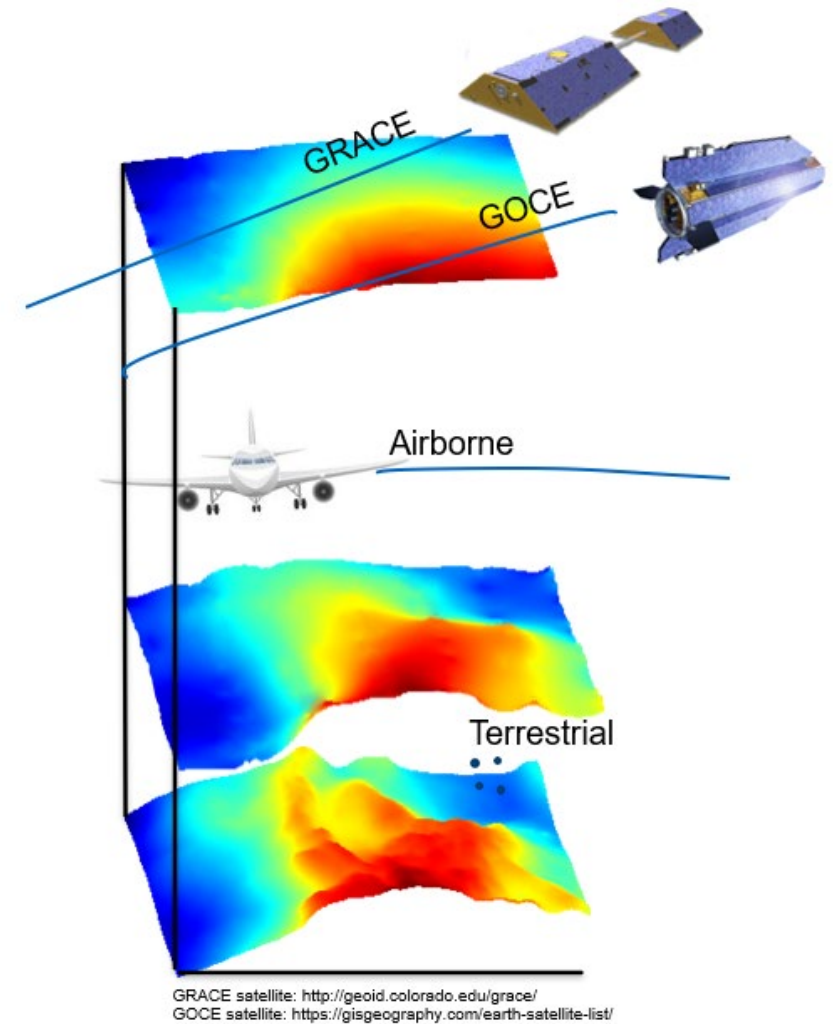
Gravimétrie maritime
Précision de 3 à 5 cm



Gravimétrie terrestre
Précision de 1 cm

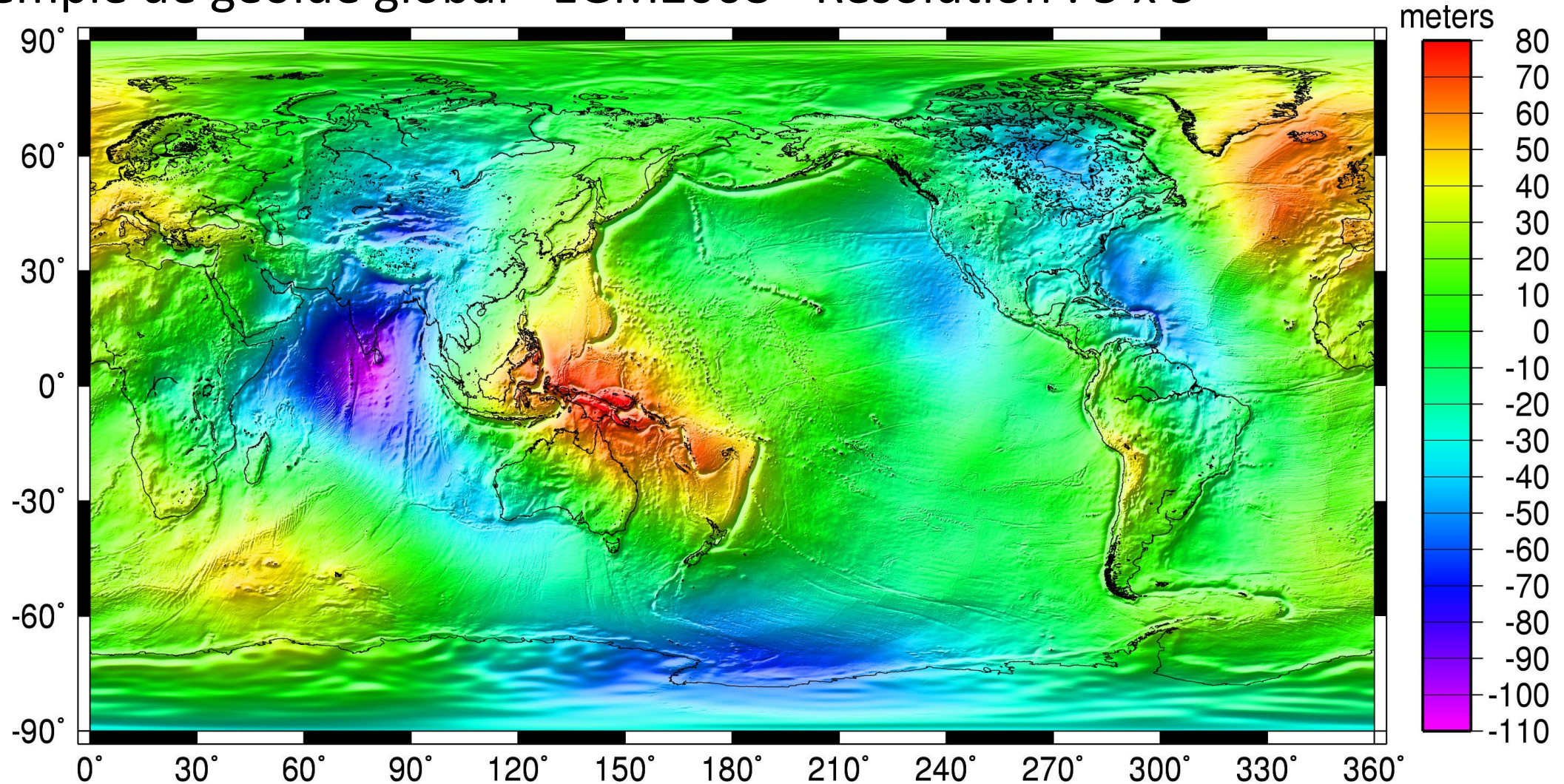
Données physiques

- La détermination du potentiel gravitationnel en tout point nécessite des anomalies gravitationnelles sur l'ensemble de la Terre.
 - La contribution de la grande longueur d'onde N_G est fournie par un ensemble de coefficients harmoniques sphériques (modèle de géopotentiel ou gravitationnel global) ;
 - La contribution de la longueur d'onde moyenne N_L est estimée à partir des anomalies locales (gravité terrestre, marine ou aéroportée dans la zone d'étude).
 - La contribution de la longueur d'onde courte N_T est calculée à l'aide d'un modèle numérique de terrain (altitudes topographiques).
 - L'ondulation du géoïde (ou anomalie de hauteur) est donnée par $N = N_G + N_L + N_T$



Modèle global du géoïde (EGM2008)

Exemple de géoïde global - EGM2008 - Résolution : 5'x 5'



Crédit : N.Pavlis

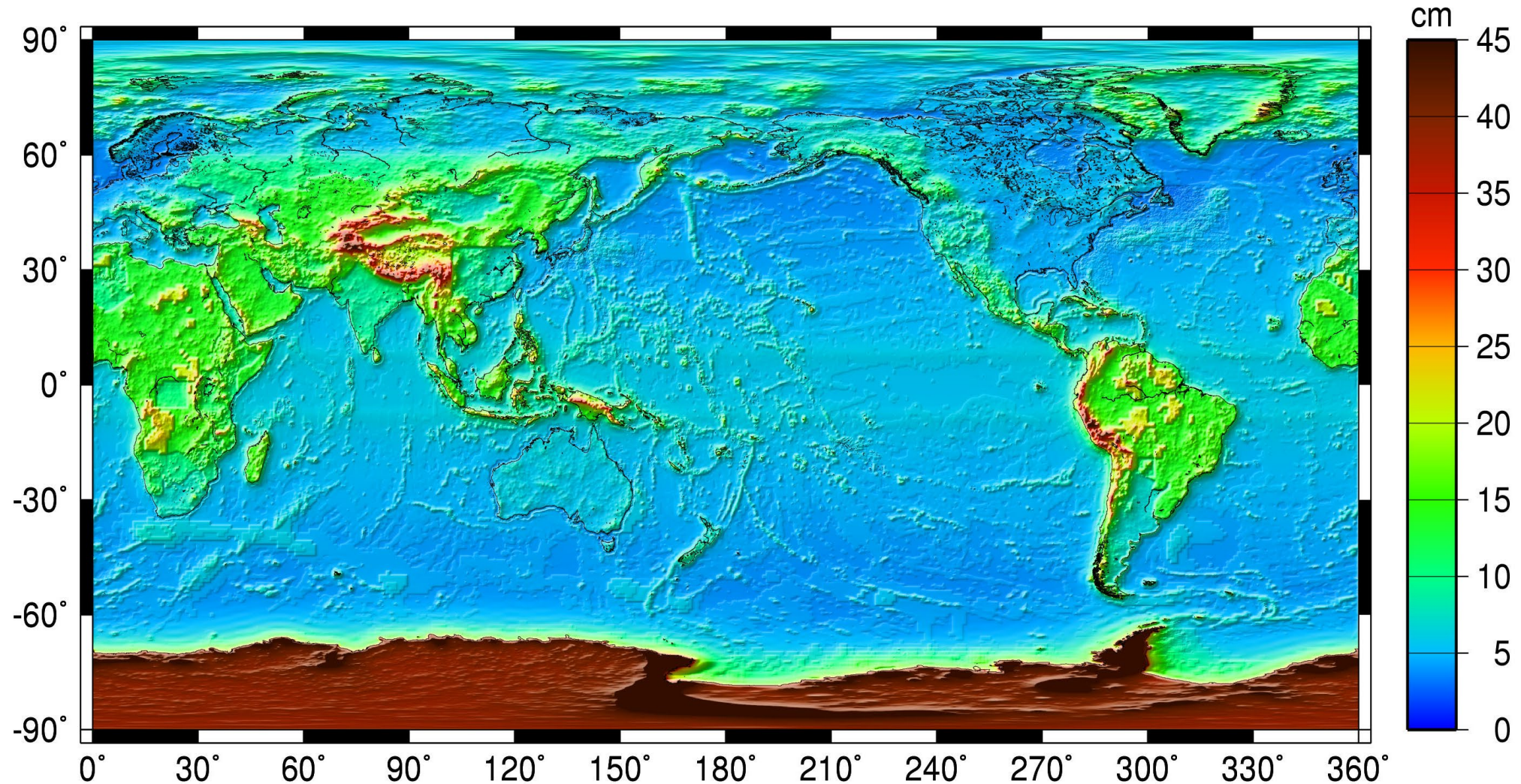
Modèle global du géoïde (EGM2008)

- Les modèles tels que le modèle géopotential terrestre 2008 combinent la gravité spatiale, atmosphérique, maritime et terrestre et peuvent servir de base à un système de référence altimétrique national.
- La quantité de données provenant de différentes régions dans EGM2008 n'est pas la même.
- Dans certains cas, les pays ont ajouté aux modèles EGM2008 des données gravimétriques supplémentaires afin d'améliorer la précision du modèle.



Modèle global du géoïde (EGM2008)

Incertitude de l'EGM2008



Crédit : N.Pavlis

Autres modèles gravitationnels globaux



https://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime

ICGEM

Global Gravity Field Models

We kindly ask the authors of the models to check the links to the original websites of the models from time to time.
Please let us know if something has changed.

The table can be interactively re-sorted by clicking on the column header fields (Nr, Model, Year, Degree, Data, Reference).

In the data column, the datasets used in the development of the models are summarized, where **A** is for altimetry, **S** is for satellite (e.g., GRACE, GOCE, LAGEOS), **G** for ground data (e.g., terrestrial, shipborne and airborne measurements) and **T** is for tide.

The links [calculate](#) and [show](#) in the last columns of the table directly invoke the *Calculation Service* and *Visualization page* for the selected model.

For models with a registered doi ("digital object identifier") the last column contains the symbol , which directly opens the page on "http://dx.doi.org/".

If you click on the reference, the complete list of references can be seen.

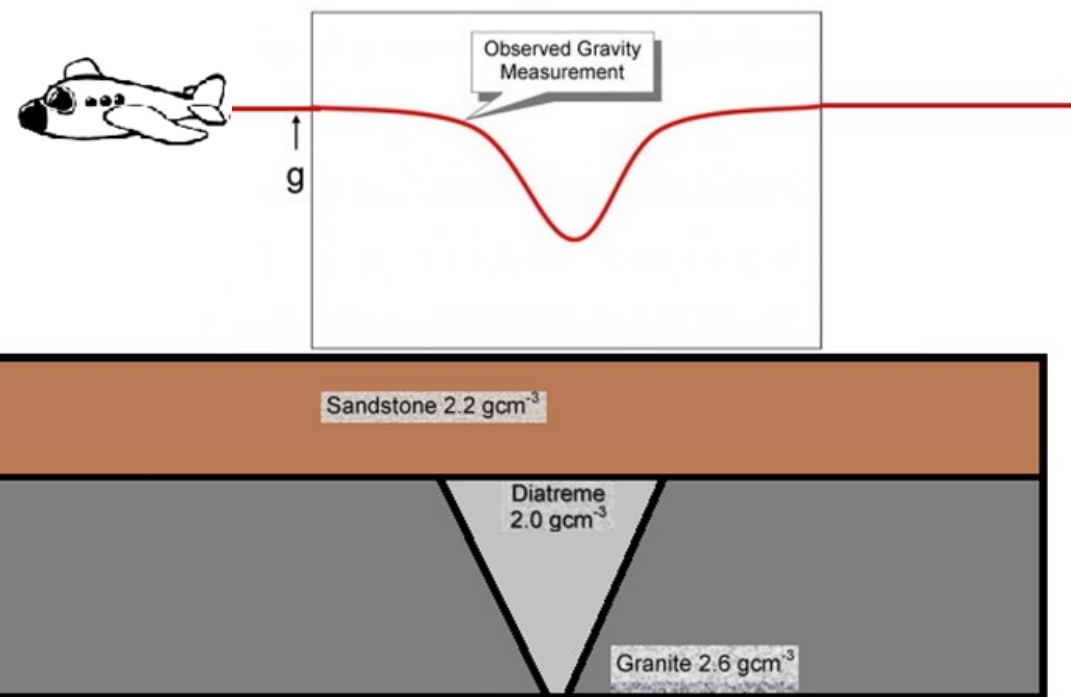
Nr	Model	Year	Degree	Data	References
180	WHU-SWPU-GOGR2022S	2023	300	S (Goce), S (Grace)	Zhao, Yongqi et al 2023
179	GOSG02S	2023	300	S (Goce)	Xu, Xinyu et al 2023
178	Tongji-GMMG2021S	2022	300	S (Goce), S (Grace)	Chen, J. et al, 2022
177	SGG-UGM-2	2020	2190	A, EGM2008, S(Goce), S(Grace)	Liang, W. et al, 2020
176	XGM2019e_2159	2019	2190 5540 760	A, G, S(GOCO06s), T	Zingerle, P. et al, 2019
175	GO_CONS_GCF_2_TIM_R6e	2019	300	G (Polar), S(Goce)	Zingerle, P. et al, 2019
174	ITSG-Grace2018s	2019	200	S(Grace)	Mayer-Gürr, T. et al, 2018
173	EIGEN-GRGS.RL04.MEAN-FIELD	2019	300	S	Lemoine, J.M. et al, 2019
172	GOCO06s	2019	300	S	Kvas, A. et al, 2021
171	GO_CONS_GCF_2_TIM_R6	2019	300	S(Goce)	Brockmann, J. M. et al, 2021
170	GO_CONS_GCF_2_DIR_R6	2019	300	S	Bruinsma, S. L. et al, 2014
169	IGGT_R1C	2018	240	G, S(Goce), S(Grace)	Lu, B. et al., 2019
168	Tongji-Grace02k	2018	180	S(Grace)	Chen, Q. et al, 2018
167	SGG-UGM-1	2018	2159	EGM2008, S(Goce)	Liang, W. et al., 2018 & Xu, X. et al. (2017)
166	GOSG01S	2018	220	S(Goce)	Xu, X. et al., 2018
165	IGGT_R1	2017	240	S(Goce)	Lu, B. et al, 2017
164	IFE_GOCE05s	2017	250	S	Wu, H. et al, 2017
163	GO_CONS_GCF_2_SPW_R5	2017	330	S(Goce)	Gatti, A. et al, 2016
162	GAO2012	2012	360	A, G, S(Goce), S(Grace)	Demianov, G. et al, 2012
161	XGM2016	2017	719	A, G, S(GOCO05s)	Pail, R. et al, 2017
160	Tongji-Grace02s	2017	180	S(Grace)	Chen, Q. et al, 2016
159	NULP-02s	2017	250	S(Goce)	A.N. Marchenko et al, 2016
158	HUST-Grace2016s	2016	160	S(Grace)	Zhou, H. et al, 2016
157	ITU_GRACE16	2016	180	S(Grace)	Akyilmaz, O. et al, 2016

Gravité aéroportée

Mesure l'accélération verticale totale. Nécessité de disposer de données GPS très précises et d'une UMI pour éliminer l'effet des mouvements de l'avion afin de récupérer un signal de gravité.

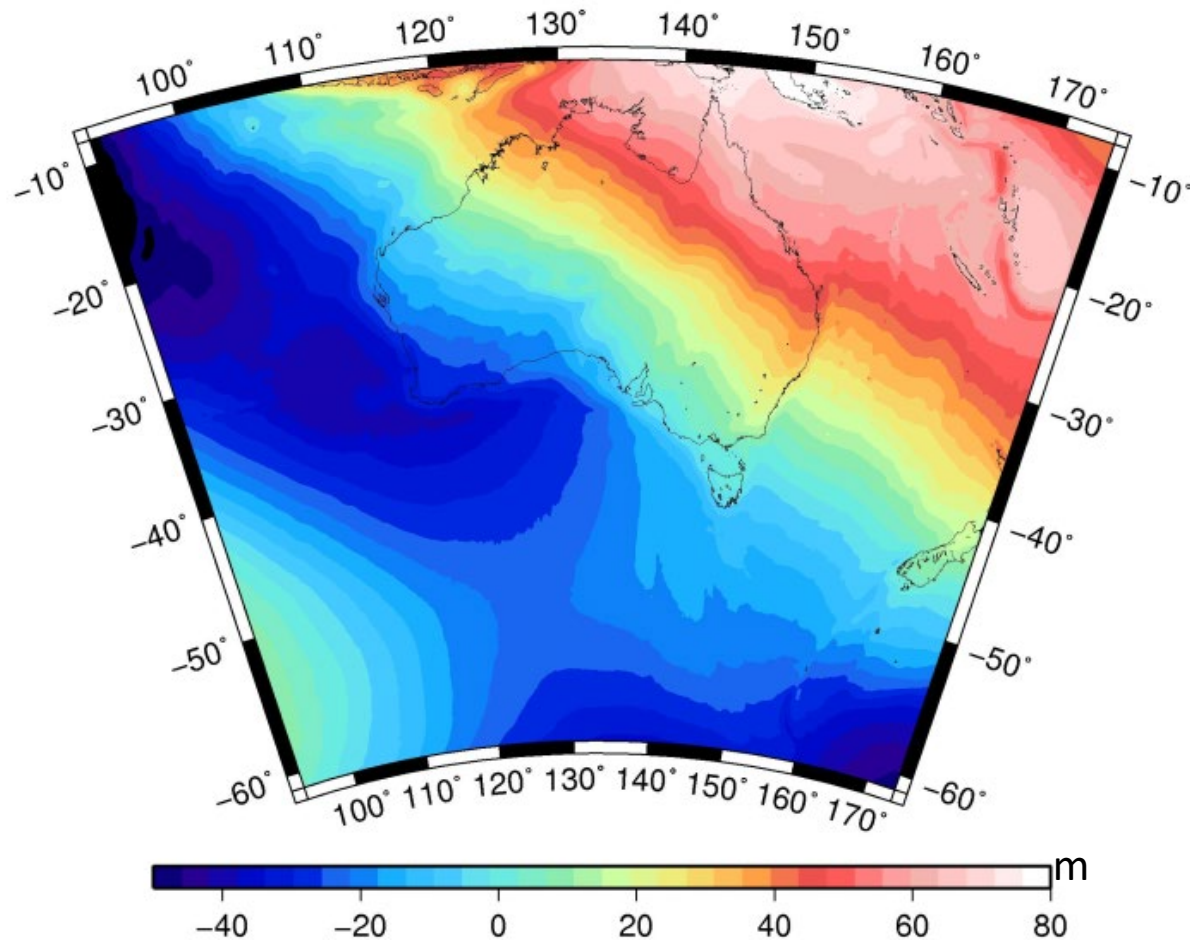
Avantages des observations gravimétriques aéroportées

- ✓ Facilité à obtenir une couverture homogène dans des zones autrement inaccessibles (montagnes, régions côtières peu profondes)
- ✓ Couverture de vastes zones rapidement et à moindre coût par rapport aux méthodes terrestres.
- ✓ Possibilité de couvrir facilement la zone littorale où les erreurs d'altimétrie satellitaire sont importantes et où les méthodes terrestres ou maritimes ne sont pas pratiques.

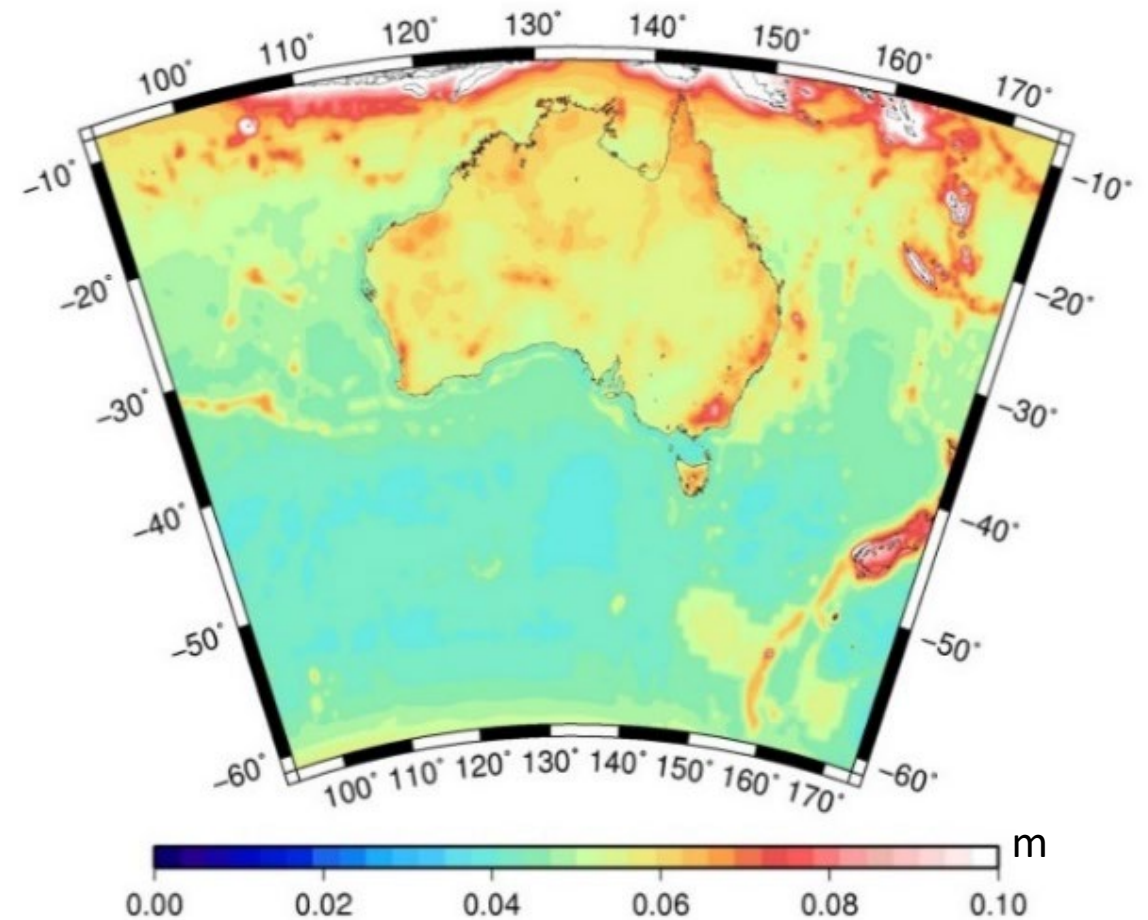


Exemple de modèle de géoïde EGM2008+aéroporté (partiel)+terrestre

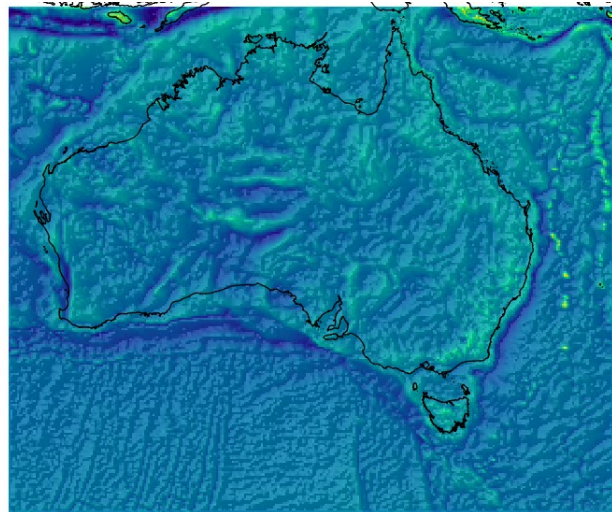
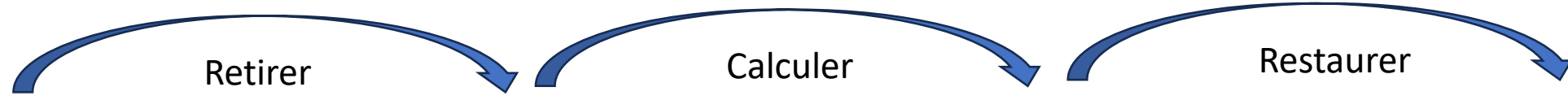
Quasigéoïde gravimétrique
australien 2017 (AGQG2017)



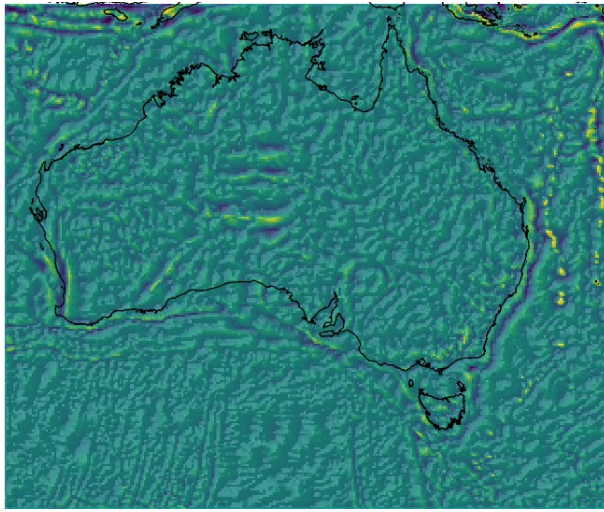
AGQG2017 - Incertitude



Modélisation du géoïde à l'échelle régionale



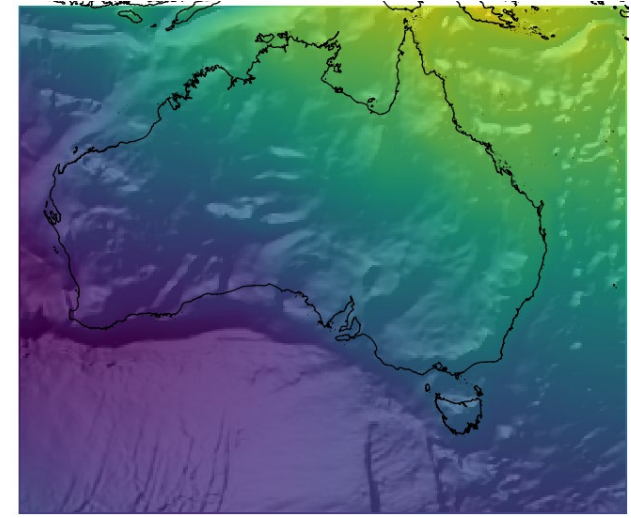
Anomalies gravimétriques régionales ($\pm 150 \text{ mGal}$)



Anomalies gravimétriques résiduelles ($\pm 50 \text{ mGal}$)



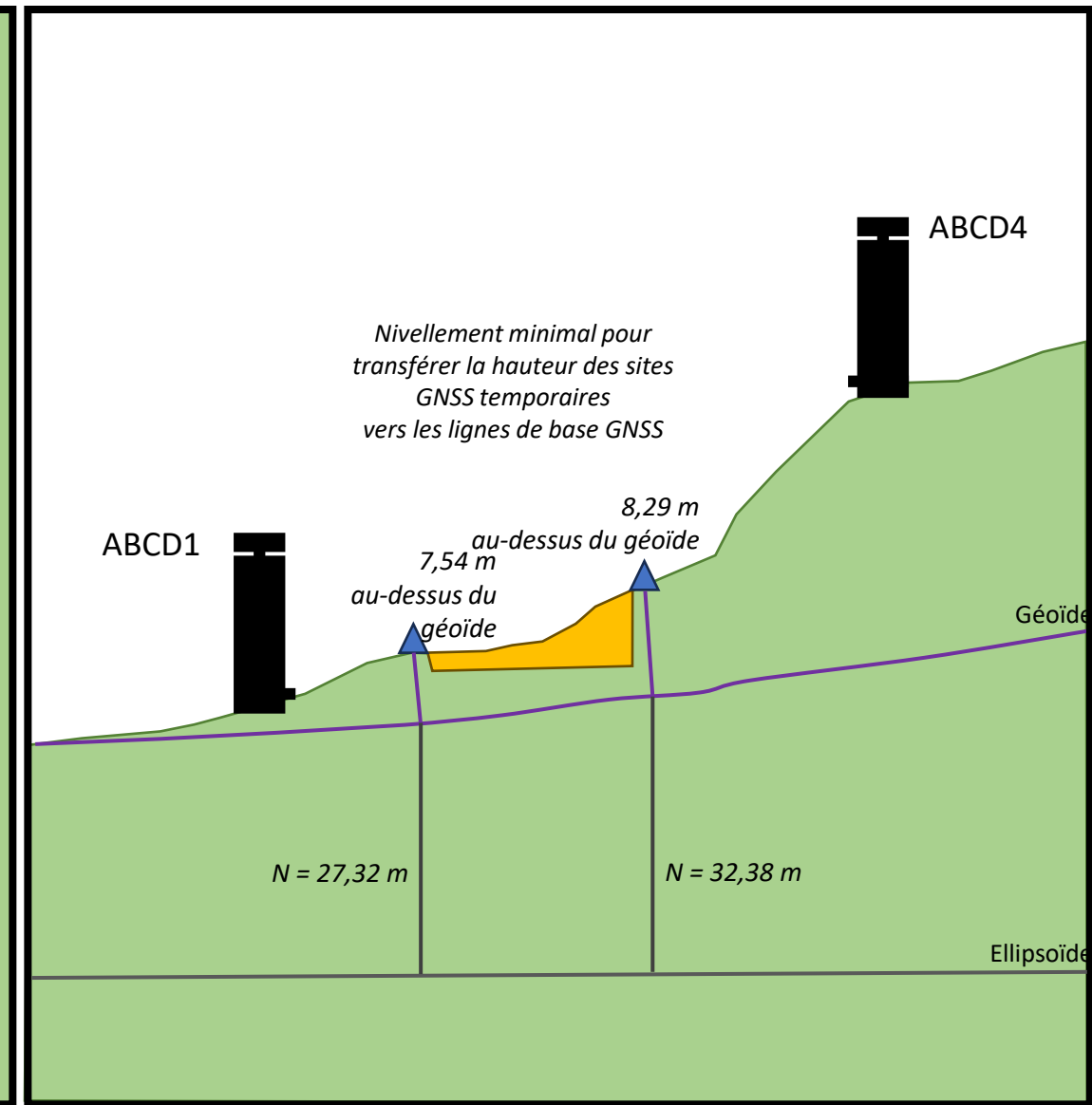
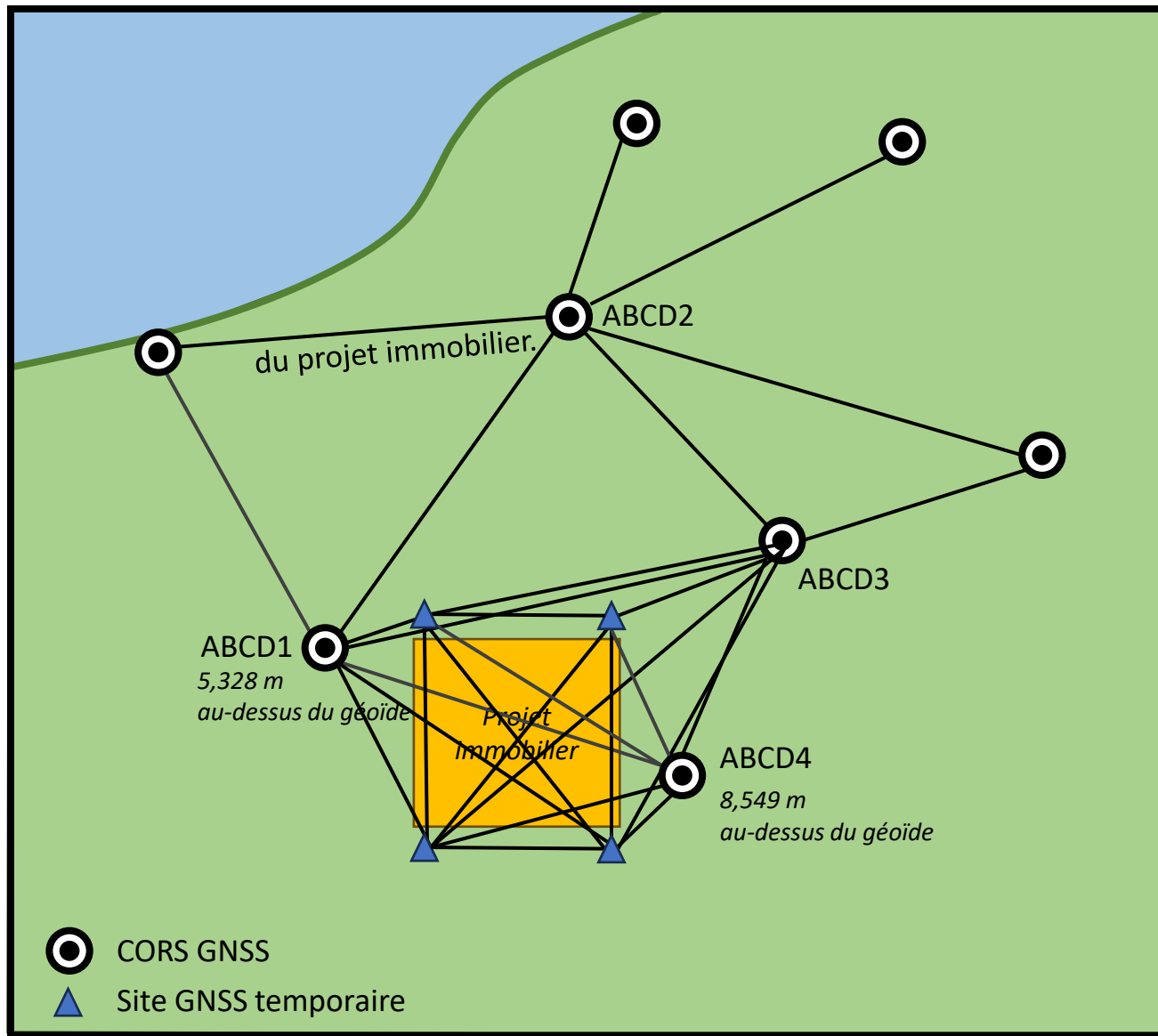
Variations résiduelles du géoïde ($\pm 5 \text{ mm}$)



Variations régionales du géoïde ($\pm 50 \text{ m}$)

- **Procédure d'augmentation des données** – Les données sur les anomalies gravimétriques régionales sont augmentées à l'aide de modèles gravimétriques globaux afin d'intégrer des caractéristiques à plus petite échelle ($< 100 \text{ km}$ et souvent jusqu'à $\pm 1 \text{ mm}$ variations) à l'aide de la technique dite « Remove-Compute-Restore » (supprimer-calculer-restaurer).
 - **Supprimer** : Les anomalies gravimétriques à grande longueur d'onde dérivées du modèle de gravité global sont soustraites des données d'anomalies gravimétriques régionales pour produire un résidu - idéalement composé uniquement de signaux à haute fréquence.
 - **Calculer** : Les anomalies gravimétriques résiduelles sont ensuite transformées en variations résiduelles du géoïde. Ce processus peut être réalisé de plusieurs manières (par exemple en quadrillant les données et en utilisant l'intégration FFT/Stokes numérique ou via des techniques statistiques telles que la collocation des moindres carrés) et comprend souvent un filtrage passe-bas et passe-haut (par exemple en utilisant des noyaux de Stokes modifiés) afin d'optimiser les caractéristiques déterminées à partir des données gravimétriques résiduelles à l'échelle régionale.
 - **Restaurer** : Les modèles de gravité globale à grande longueur d'onde sont ensuite « restaurés » (rajoutés) au modèle de géoïde résiduel issu de l'étape de calcul afin de produire le modèle final, à spectre complet (généralement quadrillé à 1 minute d'arc).

Référence altimétrique par rapport au modèle de géoïde



Considérations relatives à un référentiel vertical basé sur un modèle de géoïde

- Nécessite l'exploitation permanente d'un réseau CORS avec une répartition étendue des stations dans l'ensemble du pays.
- Dans la majeure partie du monde, les ensembles de données disponibles pour évaluer la qualité des modèles précis du géoïde sont rares (réseaux GNSS et de nivellement de haute qualité). De nombreux pays ne disposent pas non plus des données gravimétriques nécessaires.
- La technique la plus répandue pour créer le modèle gravimétrique d'entrée est la combinaison de données satellitaires aéroportées et terrestres.
- Le passage d'un référentiel vertical à un autre doit s'accompagner d'une surface de transformation permettant la traçabilité à l'ancienne norme.

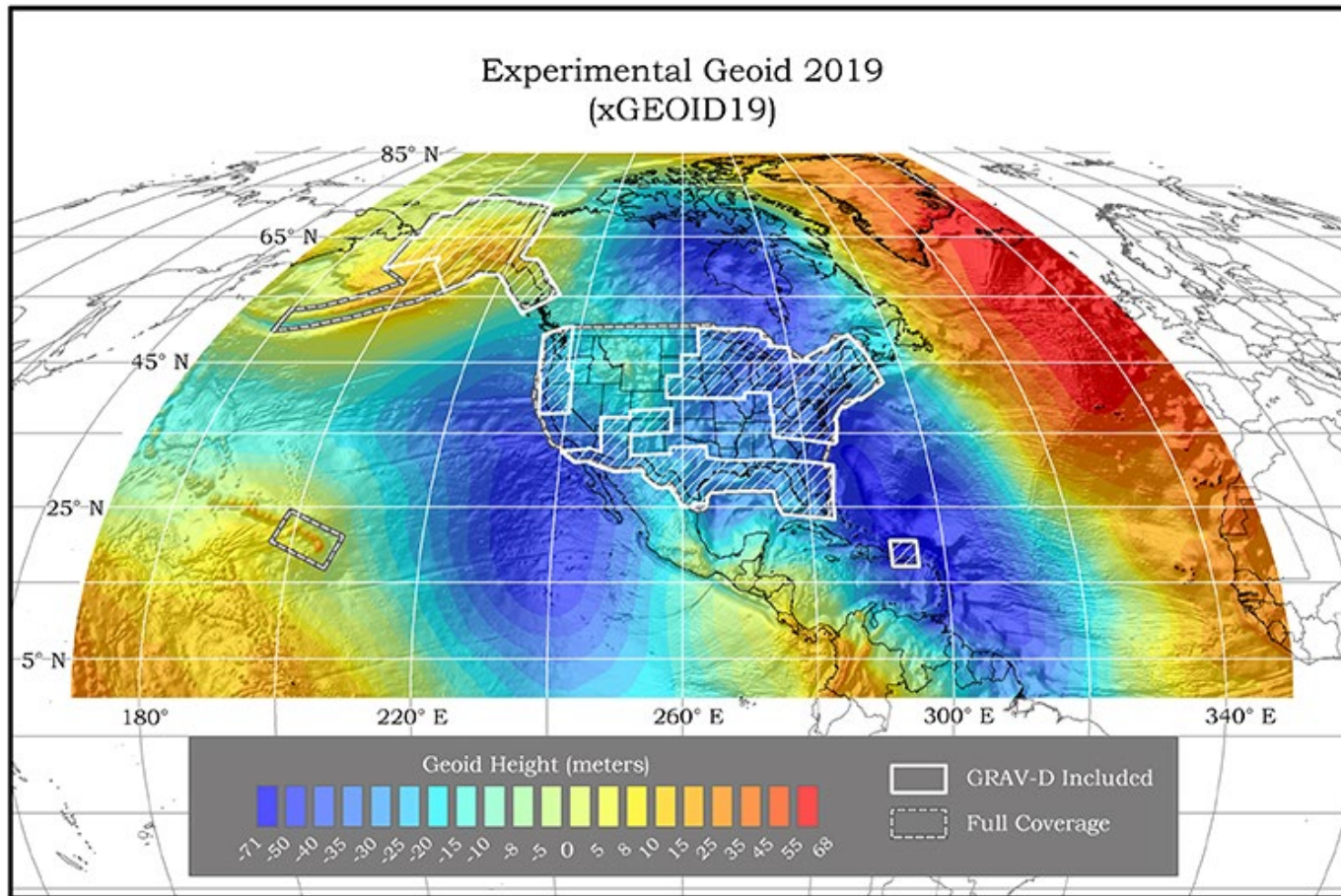


Considérations relatives à un référentiel vertical basé sur un modèle de géoïde

- Vous avez besoin d'un réseau CORS GNSS fiable
- Vous avez besoin d'un modèle de géoïde plus précis que votre réseau de nivellement actuel.
- Les utilisateurs doivent maîtriser l'utilisation du GNSS pour déterminer un réseau altimétrique local.
- Cela peut permettre de réaffecter les coûts d'entretien courants des repères au sol aux observations gravimétriques et au modèle de géoïde.
- Particulièrement pertinent pour les grands pays et / ou les pays avec un soulèvement de surface (par exemple plus froid).

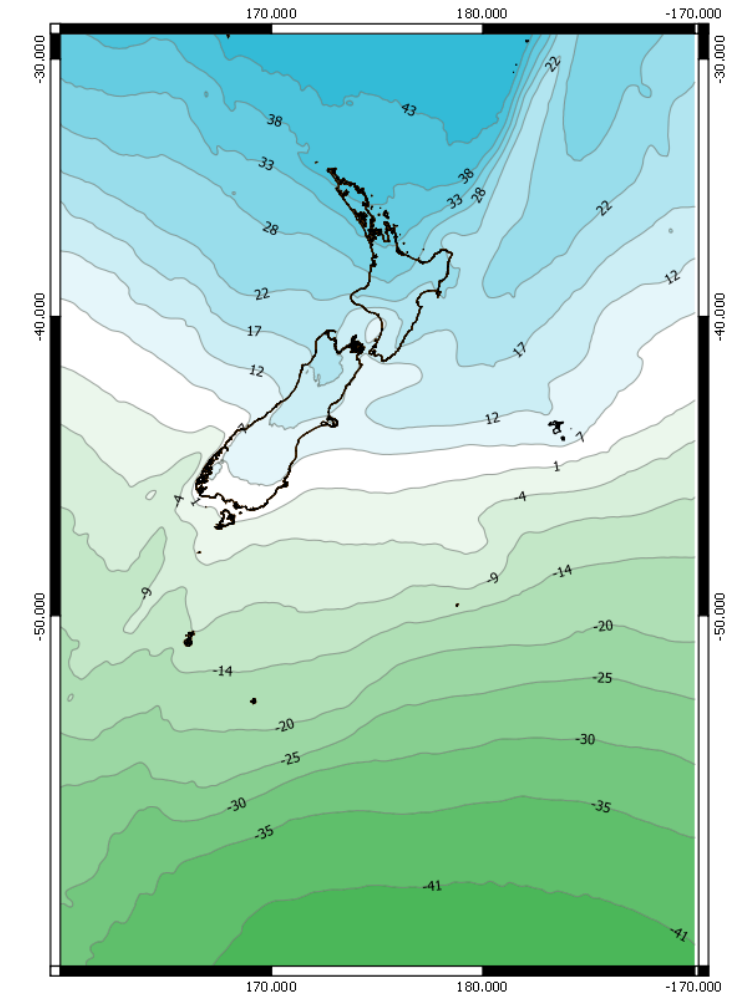


Modèles de géoïde des États-Unis et de la Nouvelle-Zélande



Source : <https://beta.ngs.noaa.gov/GEOID/xGEOID19/>

NZGeoid2016



Source : <https://www.linz.govt.nz/data/geodetic-system/datums-projections-and-heights/vertical-datums/new-zealand-quasigeoid-2016-nzgeoid2016>

Flux de travail LSC dans GitHub

 GeoscienceAustralia / analysis-ready-gravity-data-workflow

Type / to search

[Code](#) [Issues](#) [Pull requests](#) [Actions](#) [Projects](#) [Security](#) [Insights](#) [Settings](#)

 analysis-ready-gravity-data-workflow Public

Edit Pins Watch 3 Fork 0 Star 1

main 1 Branch 1 Tags

Go to file

Add file

Code

 Darbeheshti news

3c0fa54 · 4 days ago 36 Commits

document	doc folder	2 weeks ago
functions	little change	2 weeks ago
runPlots	Add files via upload	2 months ago
runPreparation	Add files via upload	2 months ago
runScripts	news	last month
.gitignore	Add files via upload	2 months ago
LICENSE	Create LICENSE	3 weeks ago
README.md	Update README.md	2 weeks ago
RunDemo.m	news	4 days ago

README

CC0-1.0 license

About

Analysis ready data for gravity observations is a set of Matlab files to calculate gravimetric quasigeoid.

gravity geoid

Readme

CC0-1.0 license

Activity

Custom properties

1 star

3 watching

0 forks

Report repository

Releases

1 tags

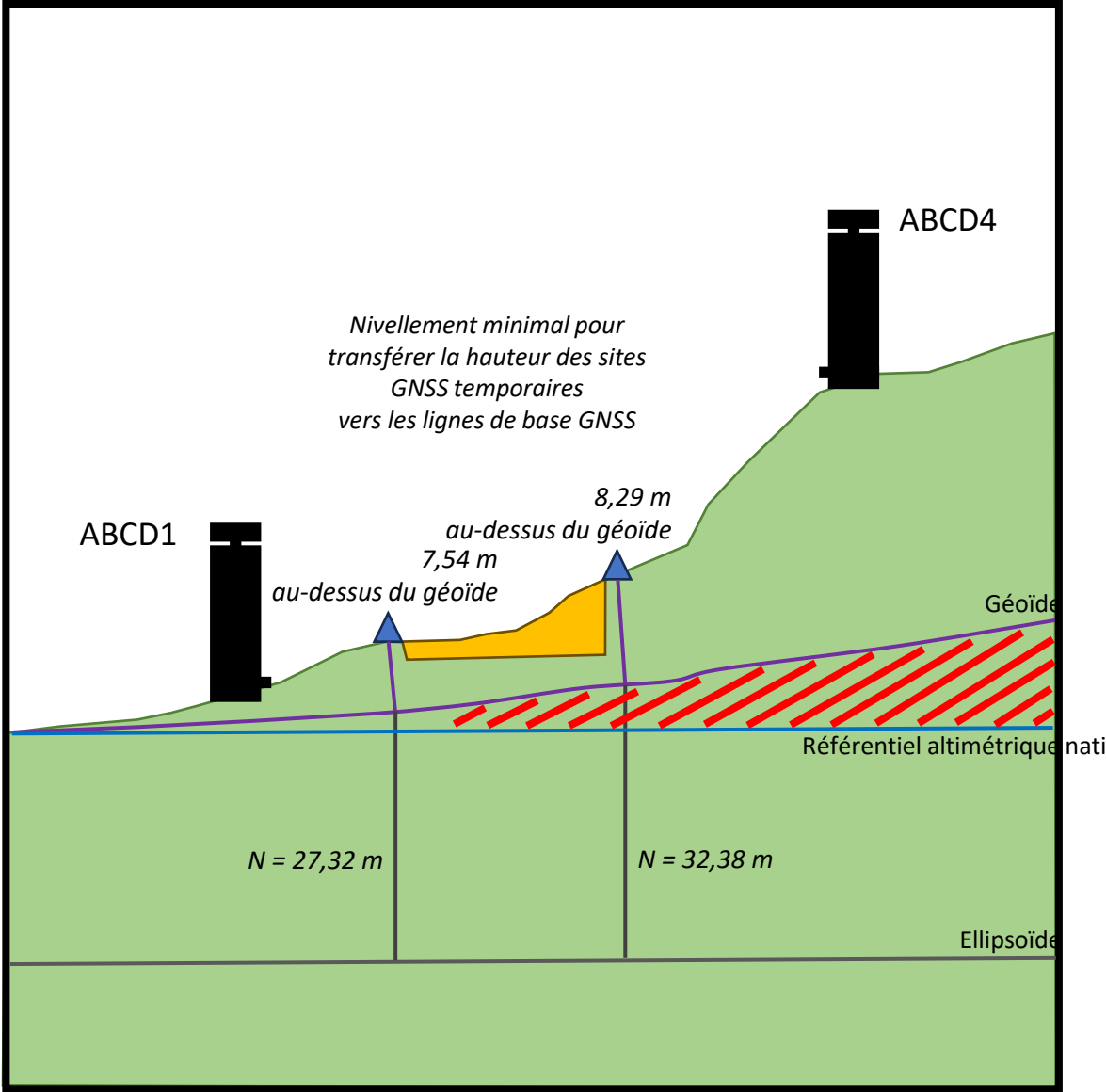
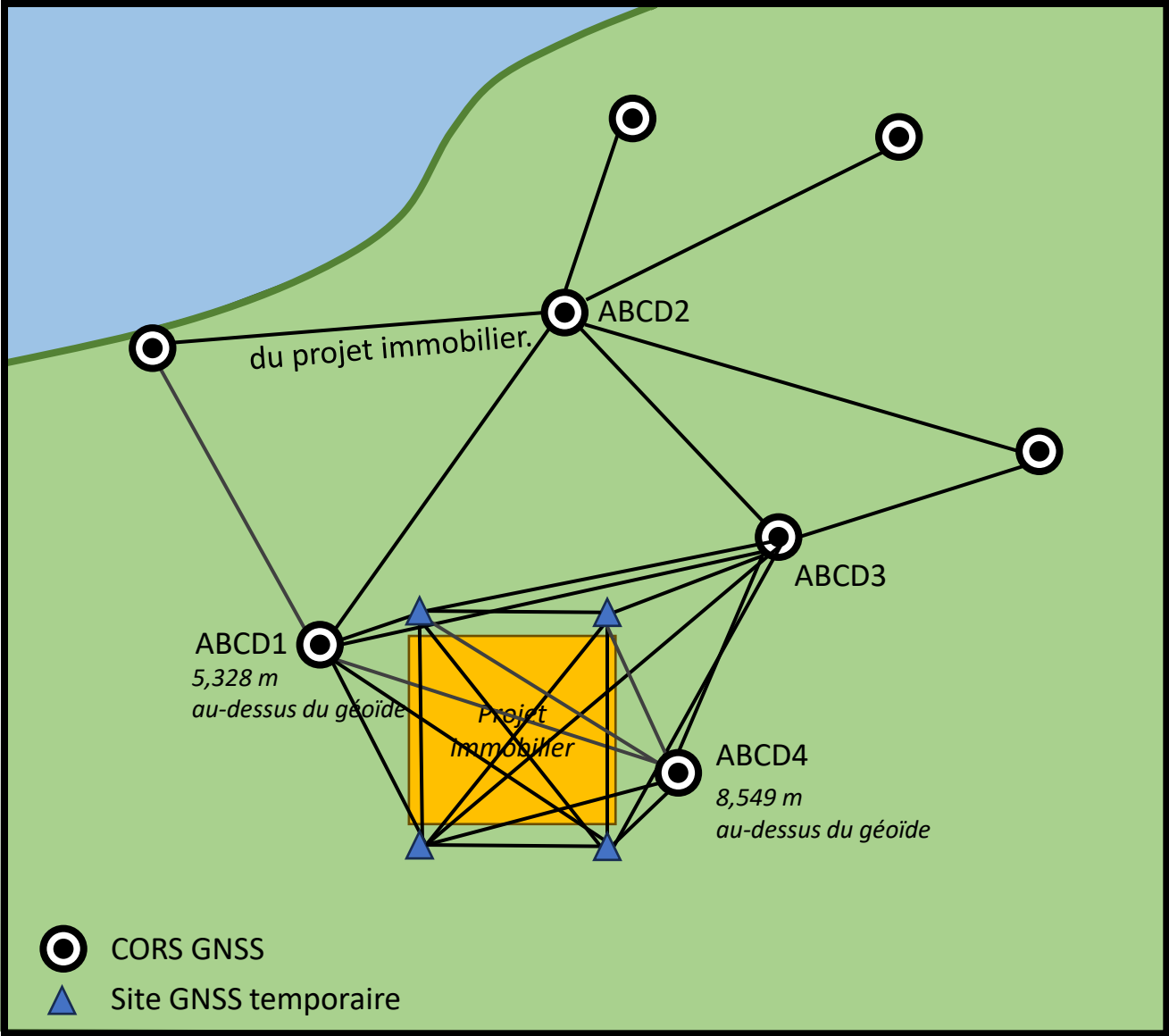
Create a new release

<https://github.com/GeoscienceAustralia/analysis-ready-gravity-data-workflow>

Surface du correcteur (h,H,N)

- Correction entre un modèle de géoïde et un référentiel altimétrique mis en œuvre dans un pays.
- Modèle de biais, de divergences et d'effets systématiques dans un référentiel altimétrique lors de sa réalisation ou depuis sa réalisation.
 - Les erreurs résiduelles $\varepsilon = h - H - N$ ont été modélisées à l'aide d'un modèle paramétrique (surface du correcteur), qui peut être basé sur un simple biais, un biais et une inclinaison, des polynômes d'ordre supérieur avec différentes fonctions de base, des modèles d'éléments finis, des séries de Fourier ou des approches basées sur la collocation des moindres carrés.
 - Les paramètres inconnus pour la surface du correcteur sélectionnée sont obtenus par un ajustement commun par la méthode des moindres carrés des données ellipsoïdales, orthométriques et de hauteur de géoïde sur un réseau de repères de nivellement GNSS co-localisés.

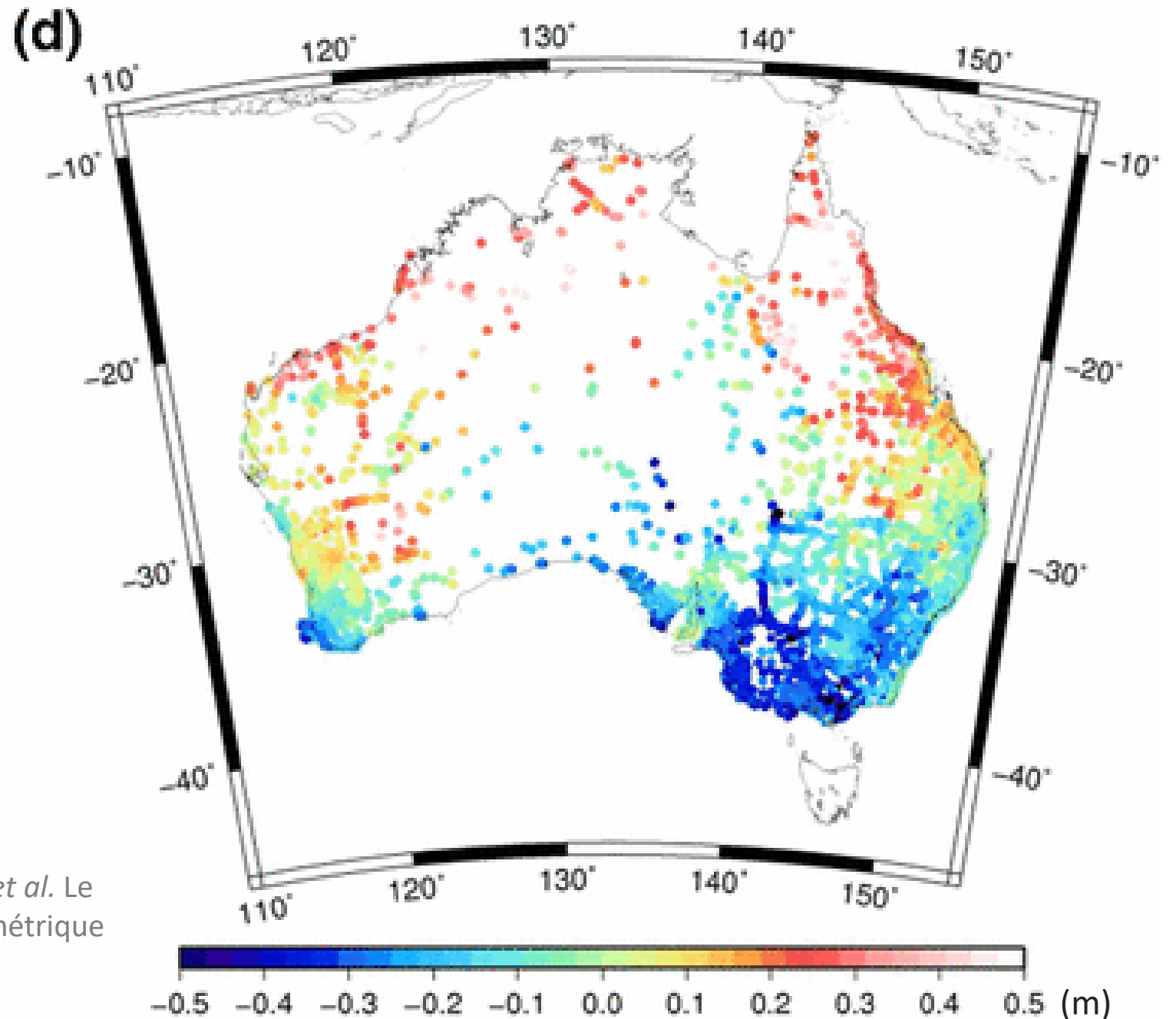
Référence altimétrique par rapport au modèle de géoïde + surface du correcteur



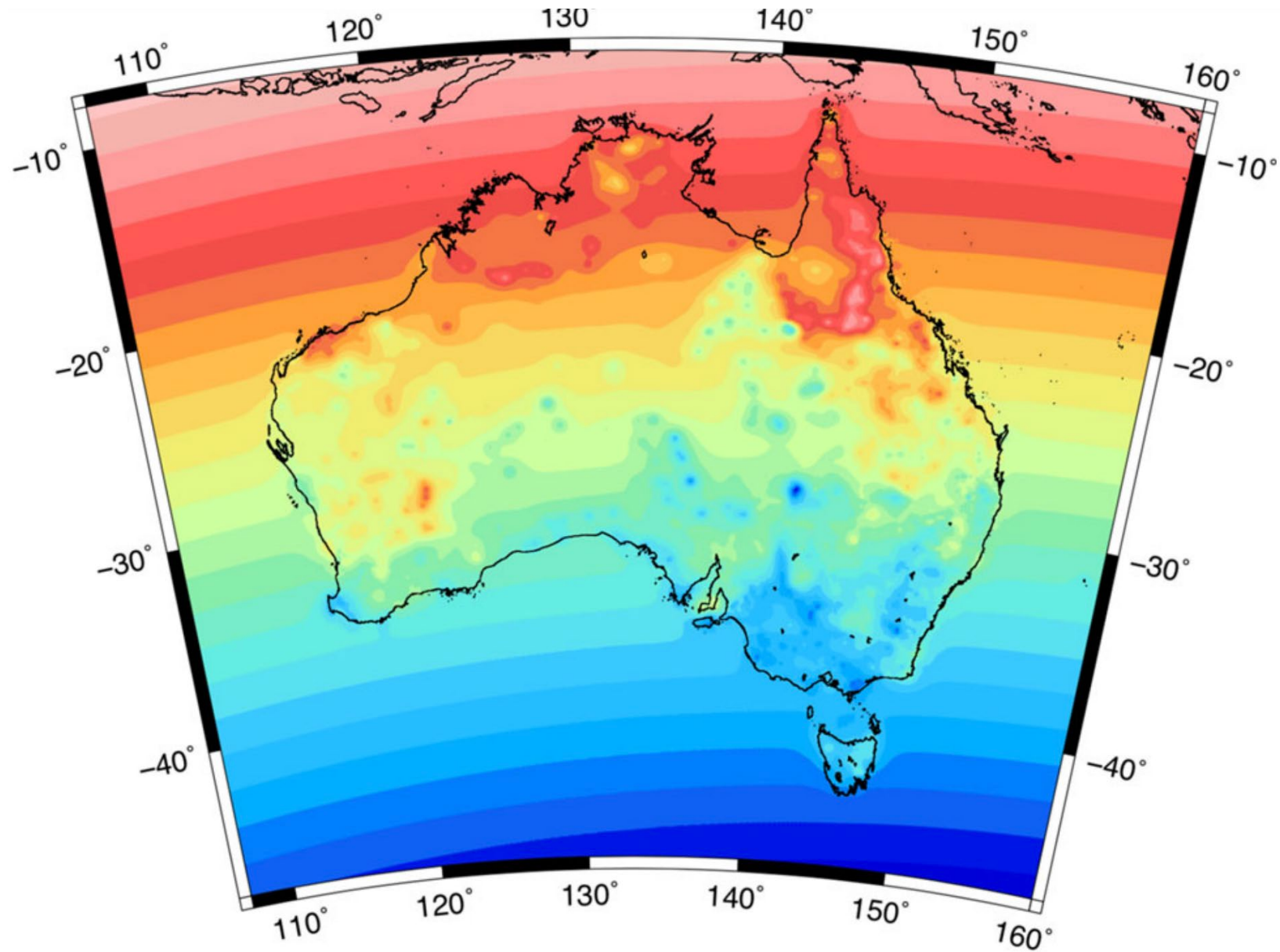
Différences entre le quasi-géoïde gravimétrique et le quasi-géoïde géométrique aux 7224 stations GNSS-AHD sur le continent

- Inclinaison nord-sud
- Biais régionaux
- Erreurs de nivellement

Featherstone, W.E., McCubbine, J.C., Brown, N.J. *et al.* Le premier modèle australien de quasi-géoïde gravimétrique avec des estimations d'incertitude spécifiques à l'emplacement. *J Geod* **92**, 149–168 (2018).
<https://doi.org/10.1007/s00190-017-1053-7>



Surface du correcteur (h,H,N)



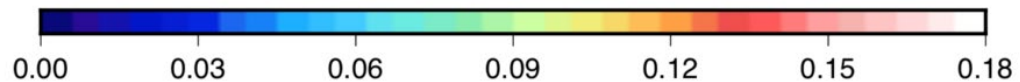
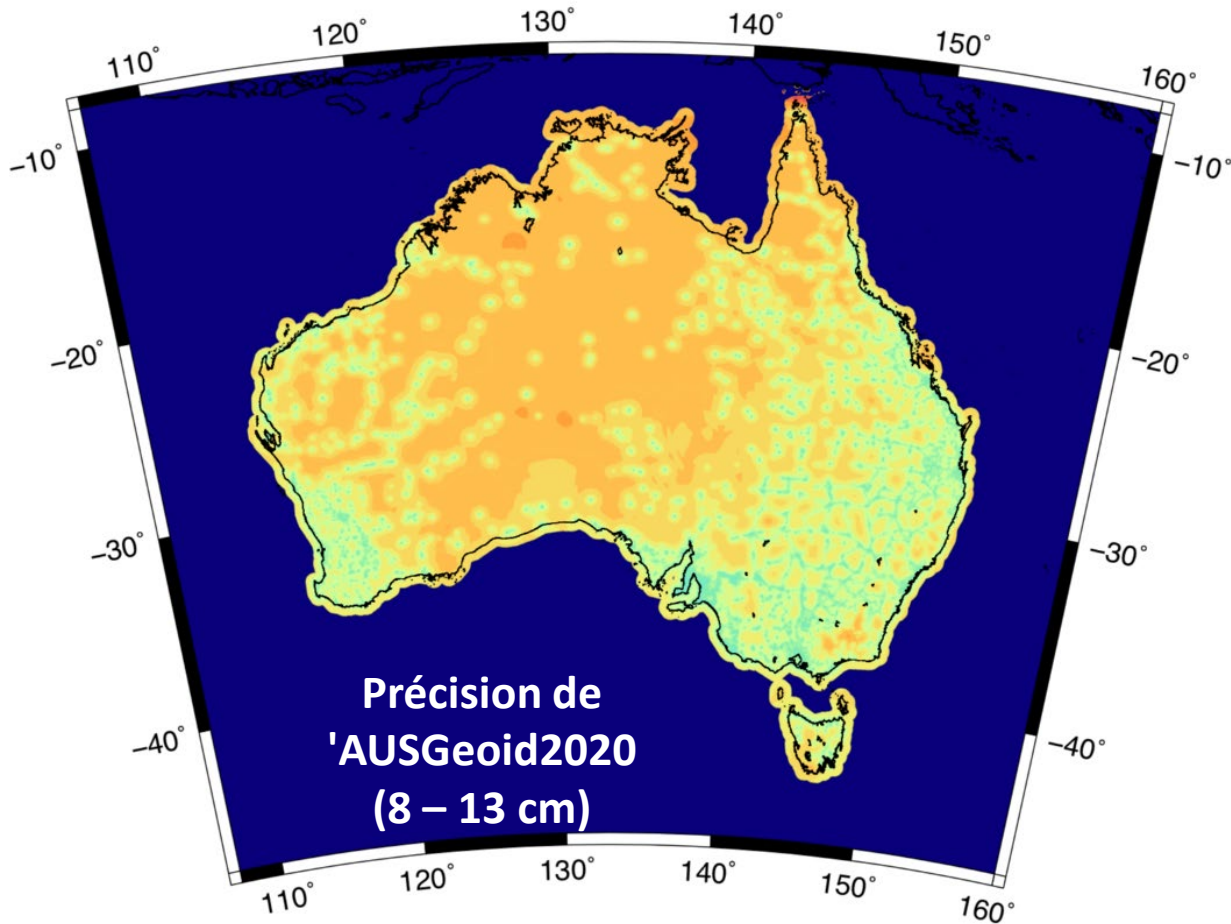
Surface du correcteur (h,H,N)

Remarques :

- Il est souhaitable de disposer d'un ensemble bien réparti de points de nivellement coïncidant avec le positionnement GNSS ;
- L'applicabilité de la surface du correcteur dépend du nombre et de la qualité des points inclus avec des données co-localisées (h, H, N) ;
- Plus il y a de points, meilleure est la surface du correcteur ;
- Plus la distribution géographique des données co-localisées est bonne, meilleure est la surface du correcteur ;
- Les points GNSS et les points de nivellement de faible importance ne doivent pas être inclus ;
- Les données estimées sont les incertitudes liées à la hauteur ; les données originales ne sont pas améliorées.

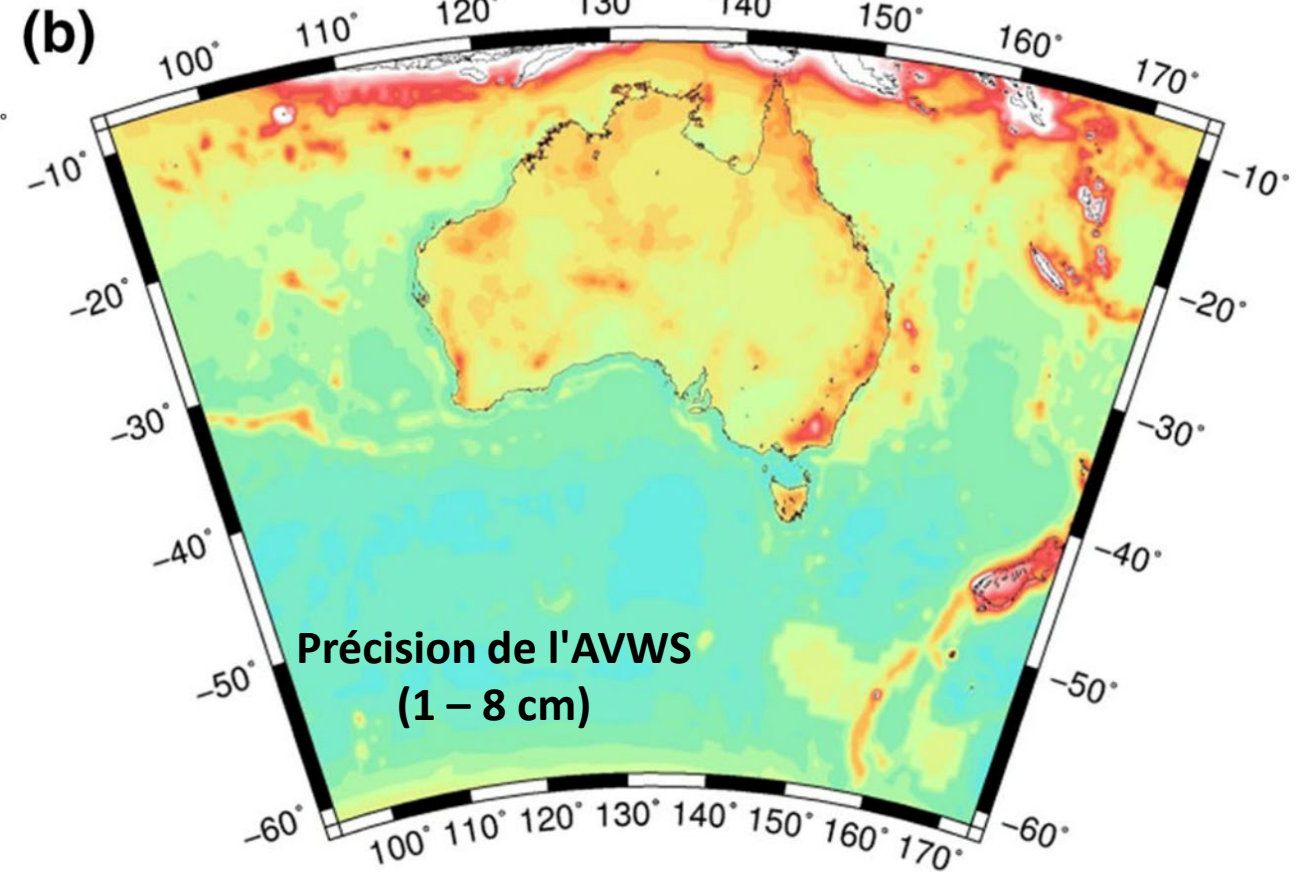
Solution à deux cadres

Gravimétrie + Géométrie



Brown et al. (2018), Journal of Geodesy

Gravimétrie



Featherstone et al. (2017), Journal of Geodesy