

Gravimétrie : **Application à l'hydrogéologie**

Notions fondamentales

- Gravimétrie version cartographie (anomalie de Bouguer) ou version suivis temporels
- Mesure intégrante : pas de localisation profondeur mais moins sensible aux hétérogénéités
- Plateau de Bouguer et gravité d'une sphère
- Bilan de masse hydrologique et gravité

Notions complémentaires

- Historique
- Différence entre pesanteur et gravité
- Le géoïde

La gravimétrie en une phrase

Le but est d'étudier les variations du champ de gravité pour en déduire la répartition des masses au sein de la Terre et ainsi sa structure (et sa dynamique).

Rappels théoriques et historiques

Galilée

Vers 1604 Galilée constate que quand on lâche un objet, la vitesse varie durant la chute ! Galilée propose que :

$$vitesse = constante \times temps \text{ écoulé}$$

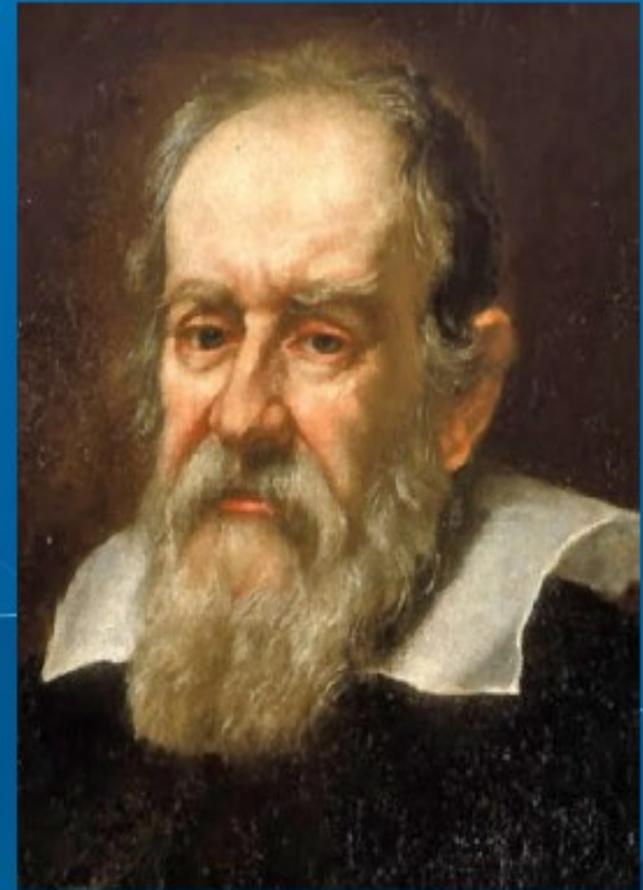
Il en conclut que la distance parcourue est :

$$distance = constante \times 0,5 \times temps \text{ écoulé}^2$$

Son idée est confirmée dans une expérience : une gouttière inclinée le long de laquelle des clochettes sont disposées pour indiquer le passage de la bille.

La constante sera notée g et sa valeur déterminée expérimentalement :

$$g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}.$$



Isaac Newton (1643-1727)

- 1ere loi de Newton :

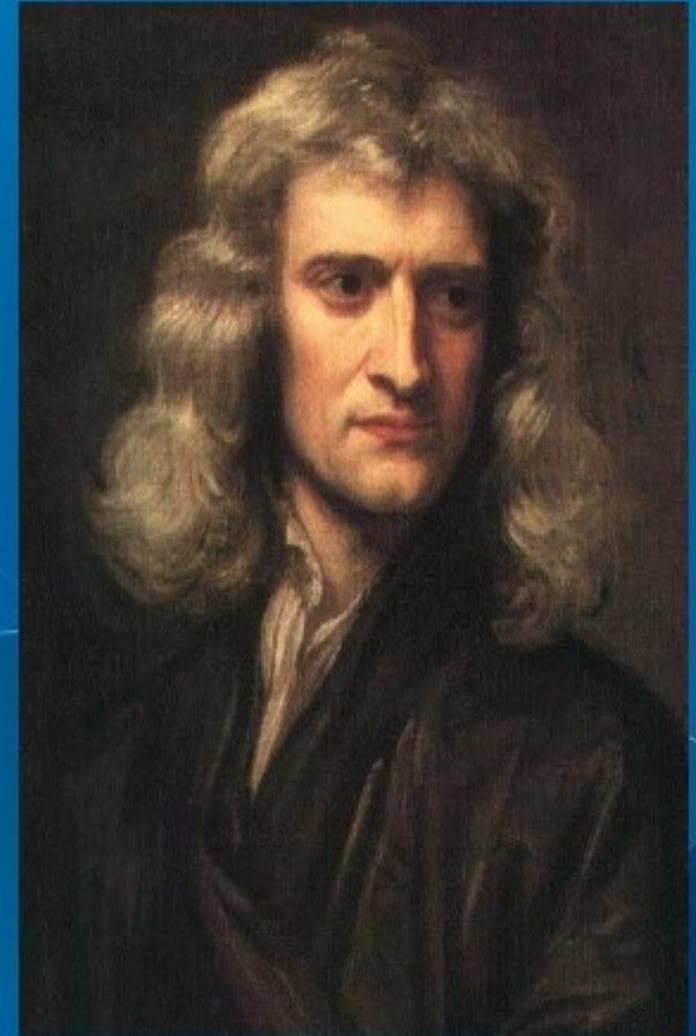
$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

- 2nd loi de Newton

$$\vec{F} = G \frac{M_a M_b}{d^2} \vec{e}_r$$

- On peut la réécrire :

$$\vec{g} = G \sum \frac{M}{d^2} \cdot \vec{e}_r \Rightarrow \vec{F}_a = m_a \vec{g}$$



Mesurer la gravité

- Expérience du pendule

$$T_o = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$



Evaluation masse d'une montagne



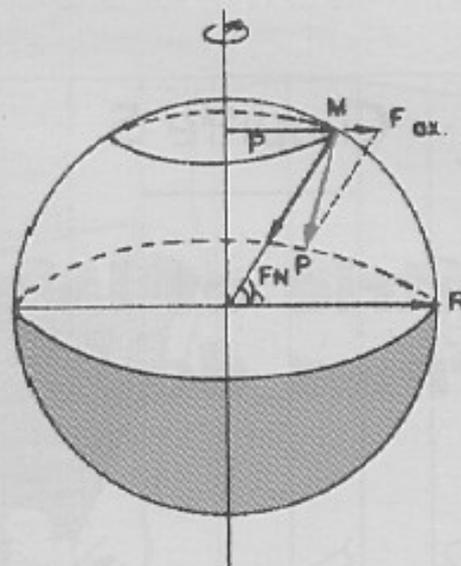
Chimborazo (Volcan de la cordillère des Andes)



Bouguer (1698-1758)

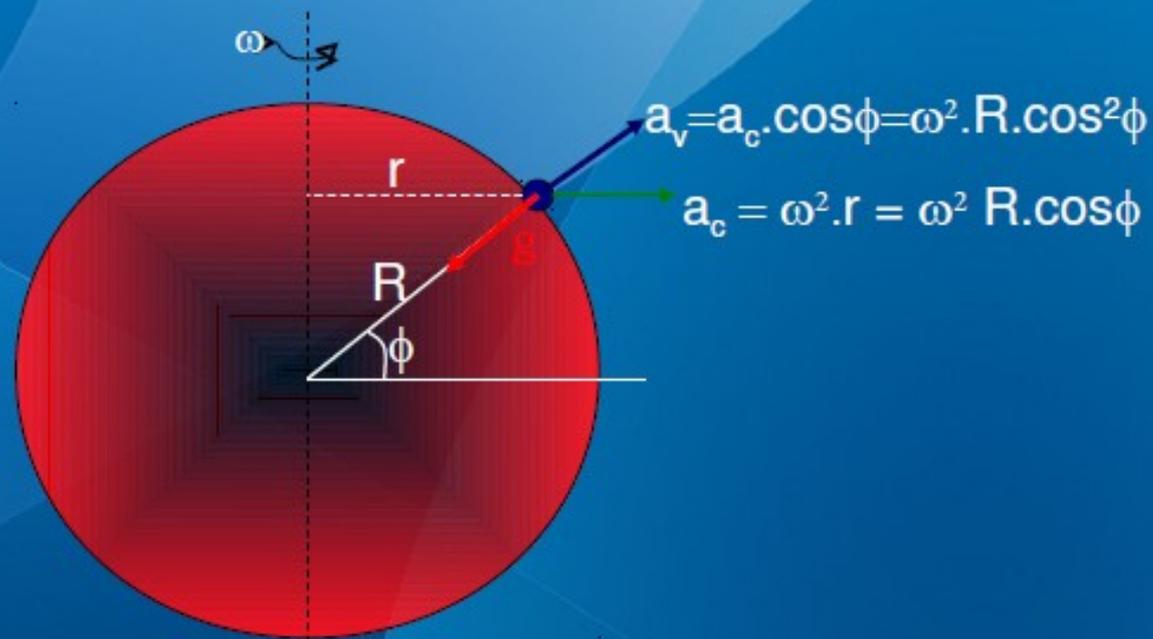
Définition du champ de pesanteur

Il s'agit de l'accélération subit par un corps du à l'attraction de la Terre. Cela inclue la gravité et la force centrifuge.



- F_{ax} : force axifuge
- F_N : gravité
- P : pesanteur
- R : rayon équatorial
- p : distance à l'axe de rotation de la terre
- λ : latitude

FIGURE 5.1 – Les composantes du champ de pesanteur.



$$a_v = a_c \cdot \cos\phi = \omega^2 \cdot R \cdot \cos^2\phi$$

$$a_c = \omega^2 \cdot r = \omega^2 R \cdot \cos\phi$$

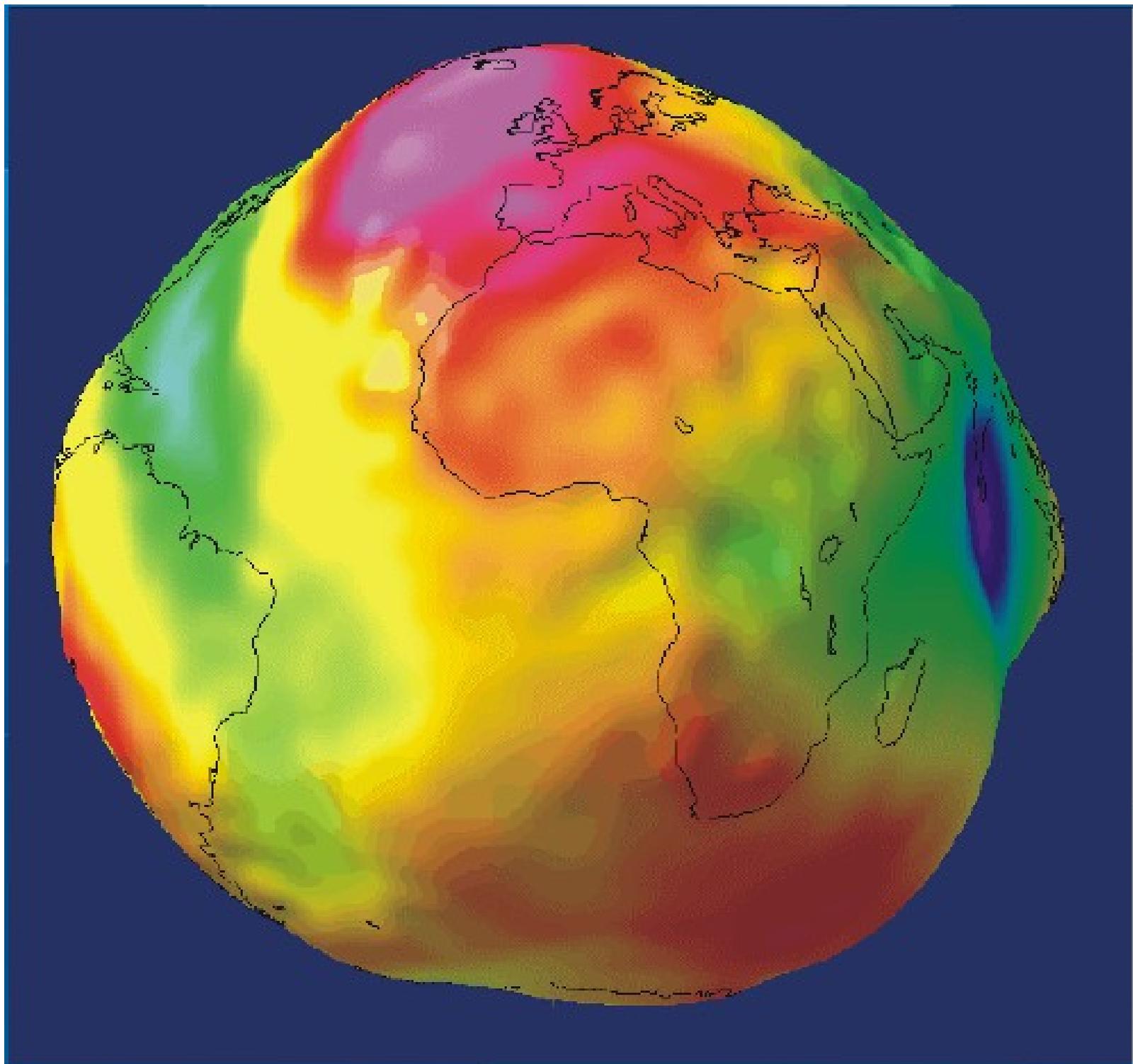
- L'accélération centrifuge est : $a_c = \omega^2 \cdot R \cos^2\phi$
- Au poles : $a_c = 0$
- A l'équateur : $a_c = 0.034 \text{ m.s}^{-2}$

Le champ de gravité est-il le meme partout ?

Pôle Nord : 90° N	9,83245 ms ⁻²
Paris : 49° N	9,8094 ms ⁻²
Equateur : 0° N	9,7803 ms ⁻²
Java : 6° S	9,7818 ms ⁻²
Melbourne: 38° S	9,7999 ms ⁻²

Géοide

- Géοide = surface équipotentielle passant par le niveau moyen des océans.
- En se promenant sur le Géοide, on garde la même énergie potentiel : on ne monte pas, on ne descend pas.
- Le géοide est en tout point perpendiculaire au vecteur de gravité.
- L'altitude précise = distance au géοide.

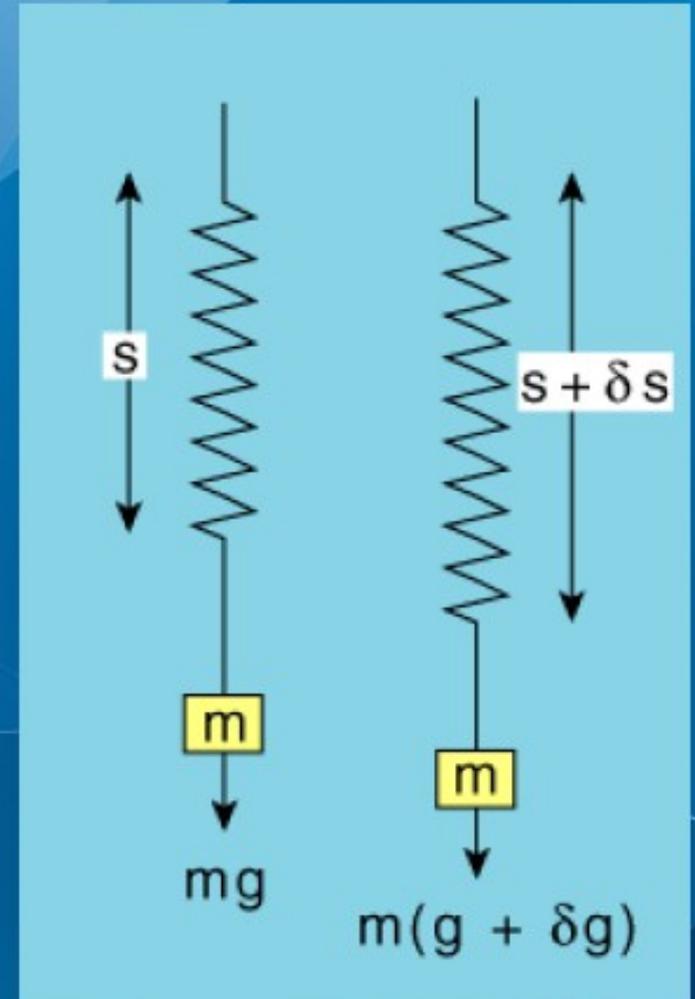


Variation de la pesanteur à la surface du globe

- Le champ de pesanteur vaut en moyenne 981 gals.
- La pesanteur dépend de
 - l'altitude.
 - La latitude car la Terre n'est pas une sphère parfaite
 - De la position, car les masses ne sont pas réparties uniformément au sein de la Terre.

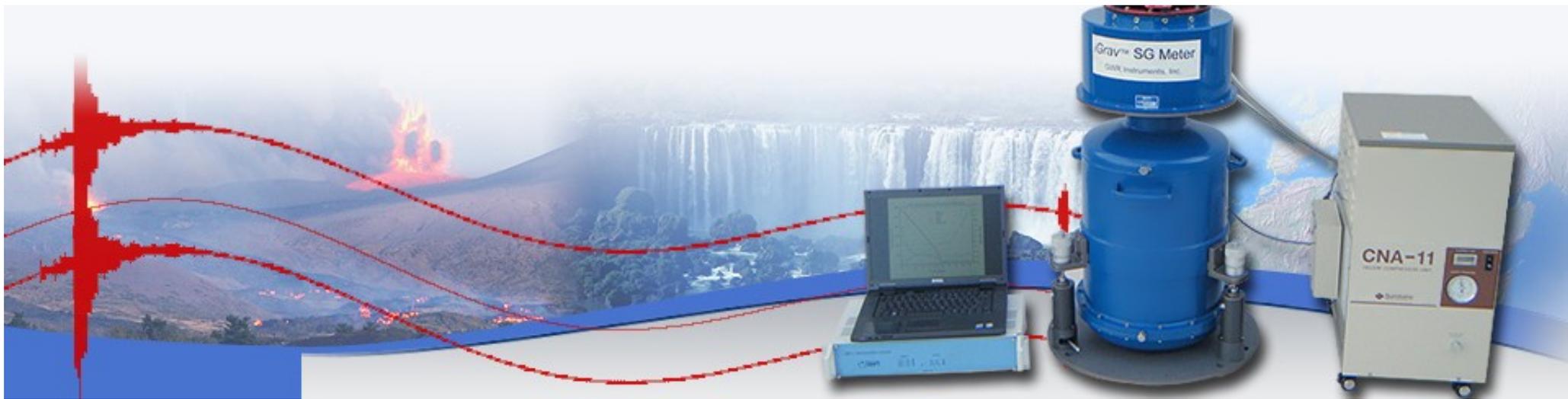
2- Instrumentation

Gravimètre à ressort

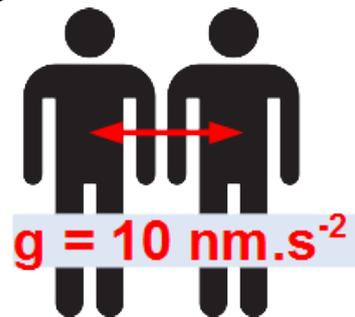


- Précision : 1/100 mGal
- 1 Gal = 1 cm/s⁻² = 0.01 m.s⁻²

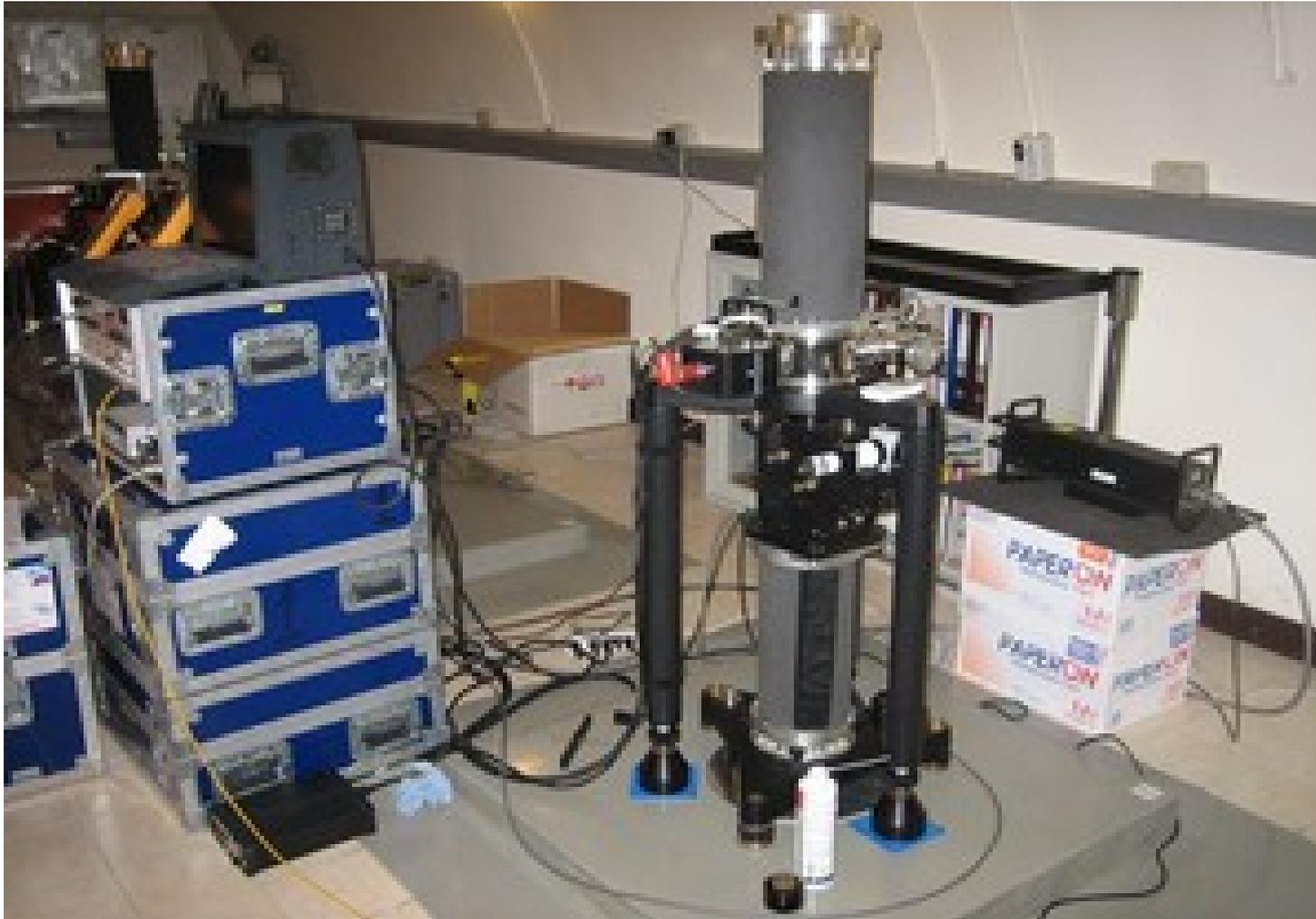
Gravimètre supraconducteur



Principe : sphère en suspension magnétique. On mesure la force nécessaire pour garder la sphère à la même position. Précision : 1 nm/s^2



Gravimètre absolu balistique



Principe : chute d'un objet (prisme) dans le vide.
Précision : 10 nm/s^2

Gravimètre absolu quantique



Principe : chute d'atomes dans le vide. Précision : 10 nm/s^2

Utilisation

- **Courante en entreprise:**
 - Gravimètre à ressort CG5
- **Recherche ou institutionnel :**
 - Gravimètre absolu balistique ou quantique
- **Recherche :**
 - Gravimètre supraconducteur

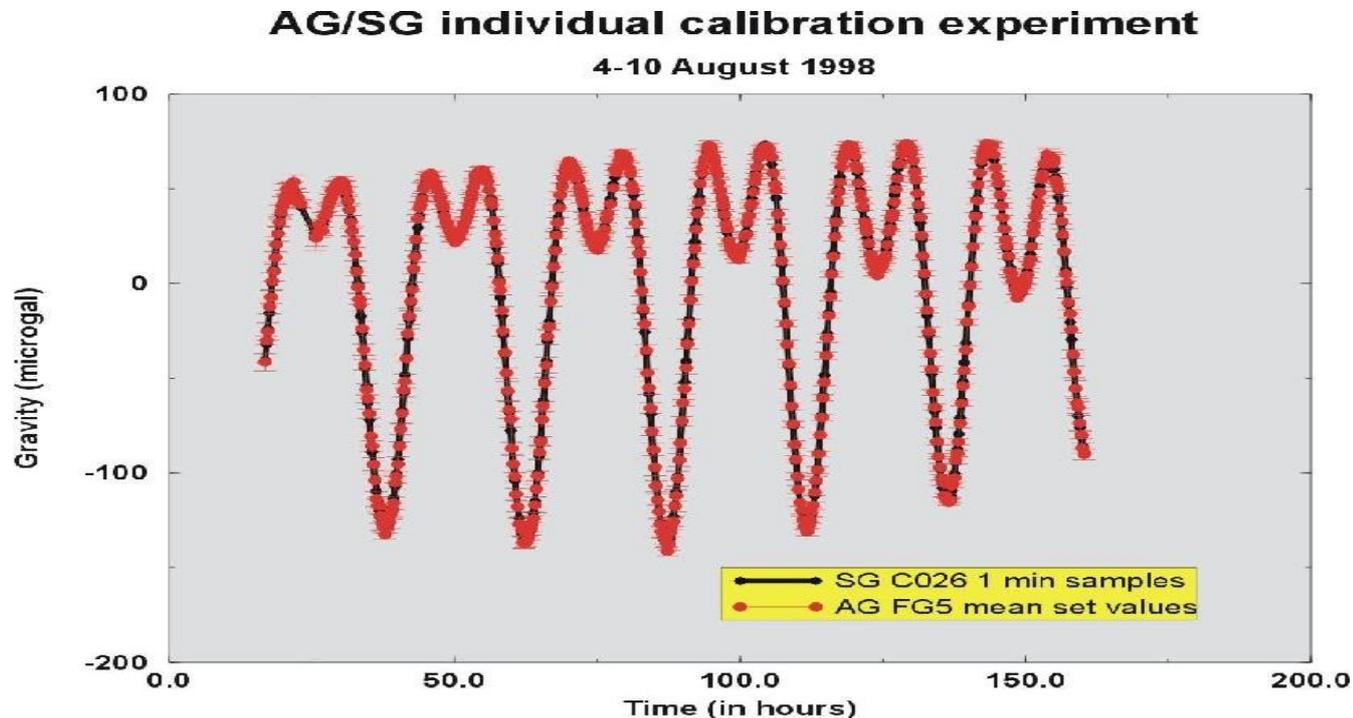
Traitement de données

Gravimétrie relative

- Calibration : volt \leftrightarrow mGal
- Calcul de la dérive : cheminement en « boucle »

Variations temporelles

- Marée terrestre (200 uGal) → modèles
- Surcharge océanique (10 uGal) → modèles
- Surcharge atmosphérique (1 uGal) → mesures



Les anomalies gravimétriques

Les anomalies de gravité

- La gravité dépend de divers facteurs : Altitude, latitude, topographie en surface, structures profondes
- => On souhaiterait isoler ces différents facteurs.
- => On introduit différentes corrections

Correction d'altitude (Faye) = correction à l'air libre

- Quantifie la variation de g due à l'altitude ie la distance du point de mesure du géoïde.
- Sur l'ellipsoïde on a :

$$g_e = GM_t / r^2$$

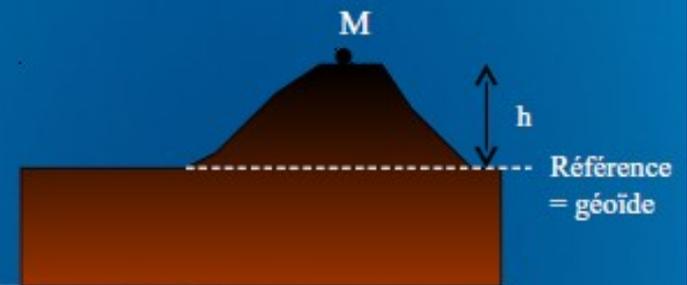
- A une altitude h :

$$g_h = GM_t / (r + h)^2 \text{ si } h \ll r$$

- Avec un développement limité:

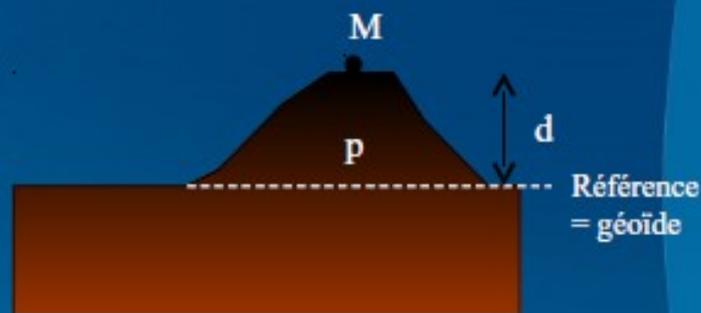
$$g_h = g_e (1 - 2h/r)$$

$$g_{al} = g_{mes} - g_{geoïde} (1 - 2h/r)$$



Correction plateau

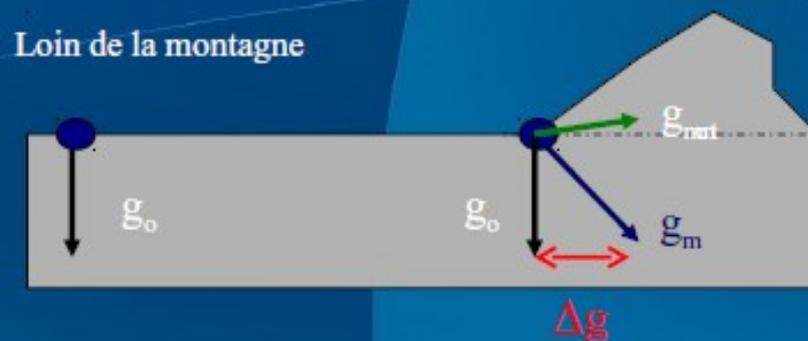
- On quantifie la variation de g due à la matière se trouvant entre l'ellipsoïde et le point de mesure.
- On suppose une densité de 2.67
- La matière entre l'ellipsoïde contribue à la gravité de la façon suivante :
- $\delta g_b = 2\pi G \rho d$



Cette correction tient compte de la densité, d , du matériel présent entre la surface de référence et le point de mesure..

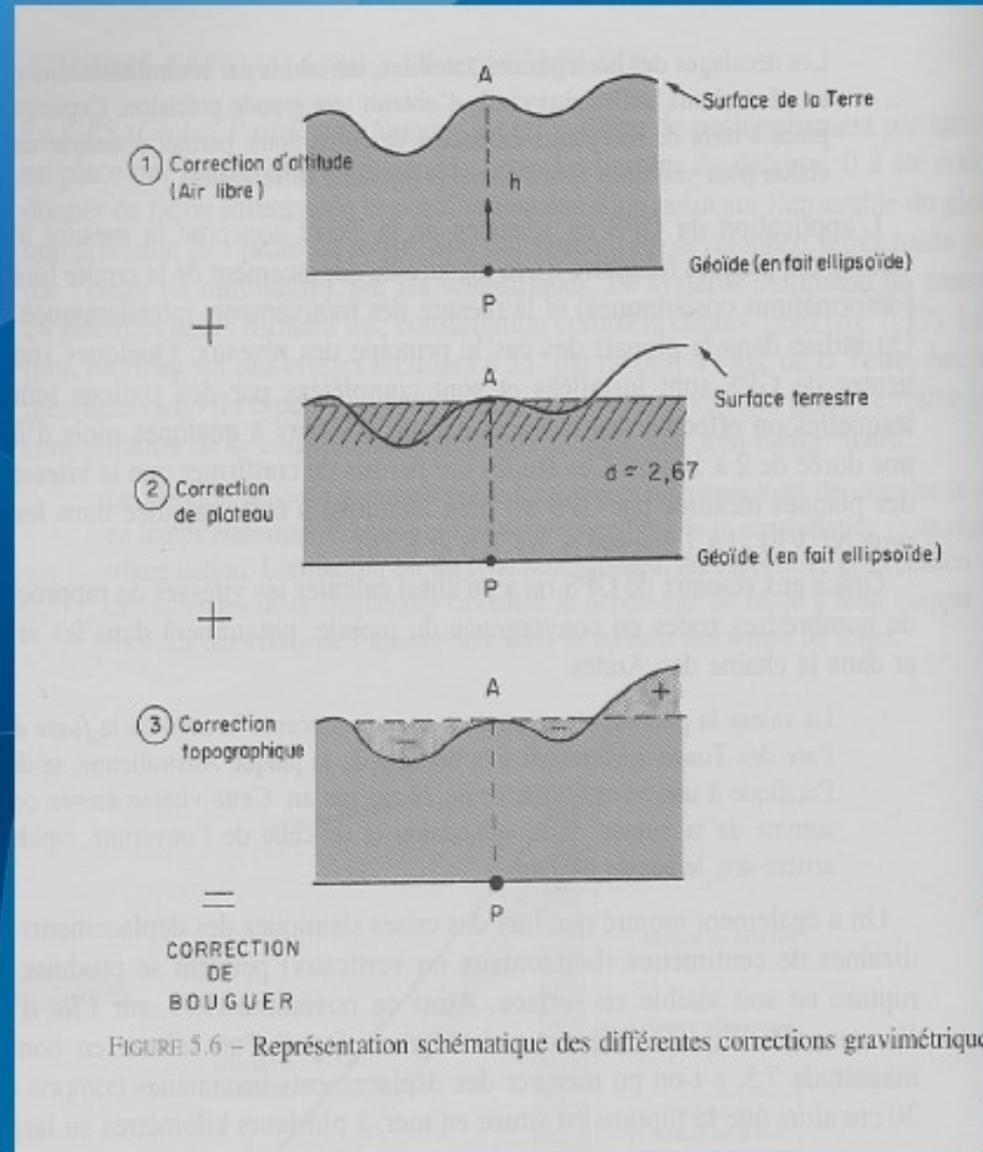
Correction topographique

- Plutôt que de supposer qu'entre le point de mesure et l'ellipsoïde il y'a de la matière partout, on tient compte de la topographie réelle.
- Cette correction peut être importante dans les zones à relief contrasté (montagnes).



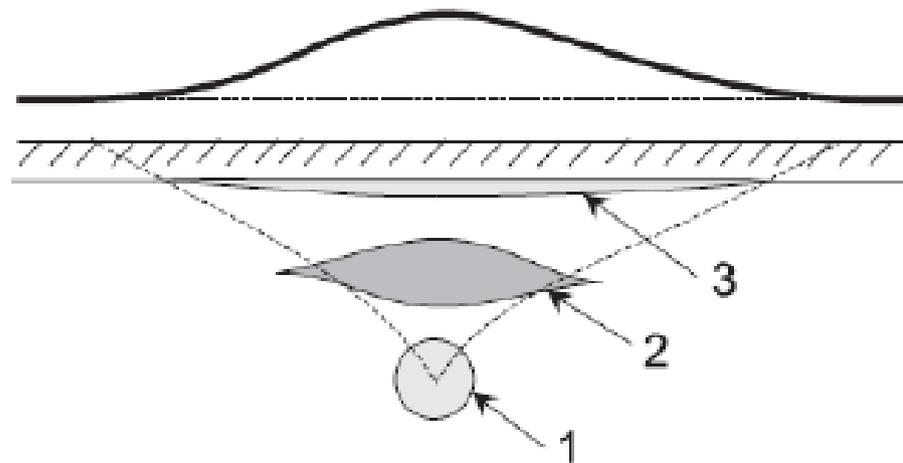
Correction Bouguer

- Il s'agit de la somme des corrections d'altitude, de plateau et de topographie.



Ellipsoïde de référence et anomalies

Attention à l'interprétation



La sphère 1 est le corps le plus profond qui peut produire approximativement l'anomalie gravimétrique présentée. Des corps plus superficiels et plus larges, tels que 2 et 3, pourraient aussi produire des anomalies semblables. Tous auraient la même anomalie de masse totale.

Interprétation

- Anomalie à l'air libre : dépend de la masse sous le point de mesure, pas de son altitude
→ **notion d'équilibre** → **pas utile en hydro.**
- Anomalie Bouguer : information sur ce qu'il y a en profondeur
→ **dépend de la structure, de la densité des roches en profondeur.**

Interprétation d'anomalie de Bouguer

- Anomalie due à une sphère : $g_{sphere} = G \cdot \frac{M_{sphere}}{d^2}$
avec d (distance), M(masse), G (constante)
- Plateau infini de Bouguer : $g_{plateau} = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot G \cdot h$
avec G (constante), ρ (densité), h (épaisseur)
ATTENTION : ne dépend pas de la profondeur

Suivis temporels

A des échelles de temps courtes (< 10 ans) hors tectonique ou volcan, les seules variations de pesanteur sont hydrométéorologiques.

Pour aller plus loin : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01649606>

Hydrogravimétrie

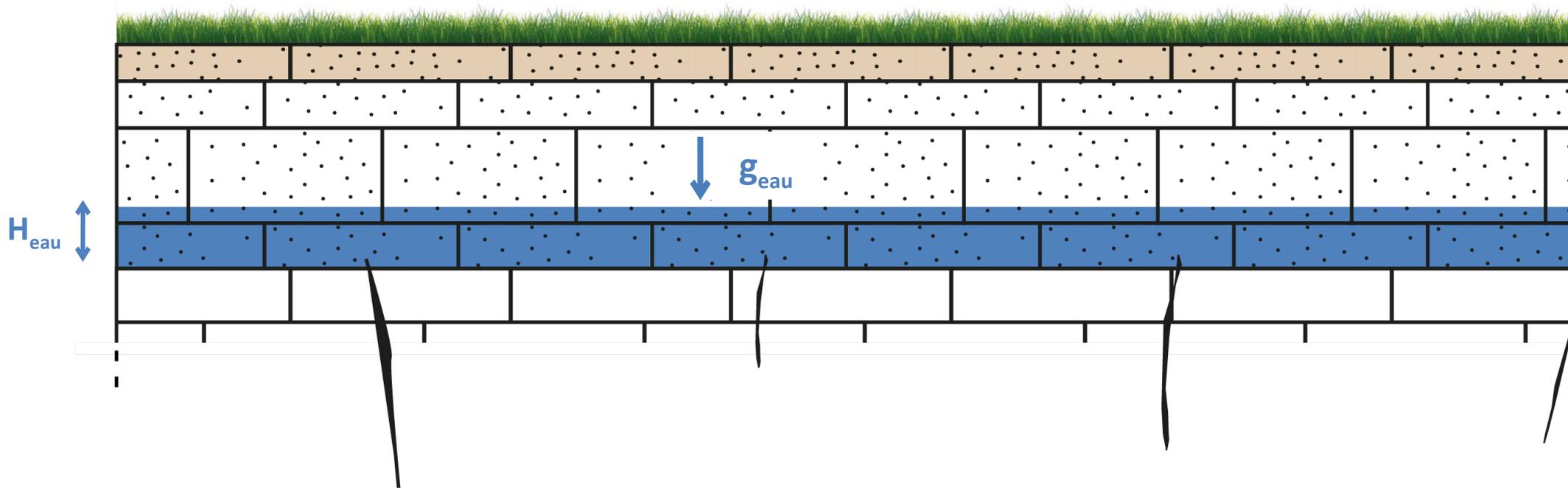
Attraction d'une lame d'eau « infinie »: $4.2 \text{ nm/s}^2/\text{cm}$ d'eau
(Ou « plateau de Bouguer »)

$$H_{\text{eau}} = 1 \text{ m}$$

(Porosité = 10%)



$$g_{\text{eau}} = 42 \text{ nm.s}^{-2}$$



Plateau infini de Bouguer d'une couche saturée de 1m

Hydrogravimétrie

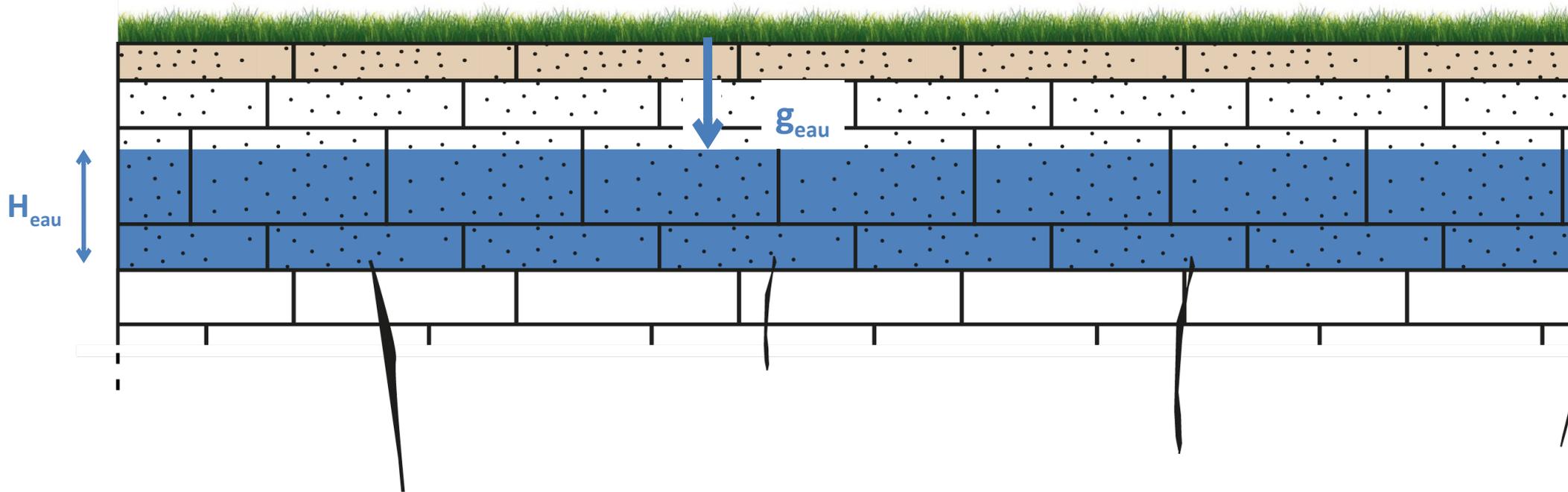
Attraction d'une lame d'eau « infinie »: $4.2 \text{ nm/s}^2/\text{cm}$ d'eau
(Ou « plateau de Bouguer »)

$$H_{\text{eau}} = 2 \text{ m}$$

(Porosité = 10%)



$$g_{\text{eau}} = 84 \text{ nm.s}^{-2}$$



Plateau infini de Bouguer d'une couche saturée de 2m

Hydrogravimétrie

Attraction d'une lame d'eau « infinie »: $4.2 \text{ nm/s}^2/\text{cm}$ d'eau
(Ou « plateau de Bouguer »)

$$H_{\text{eau}} = 3 \text{ m}$$

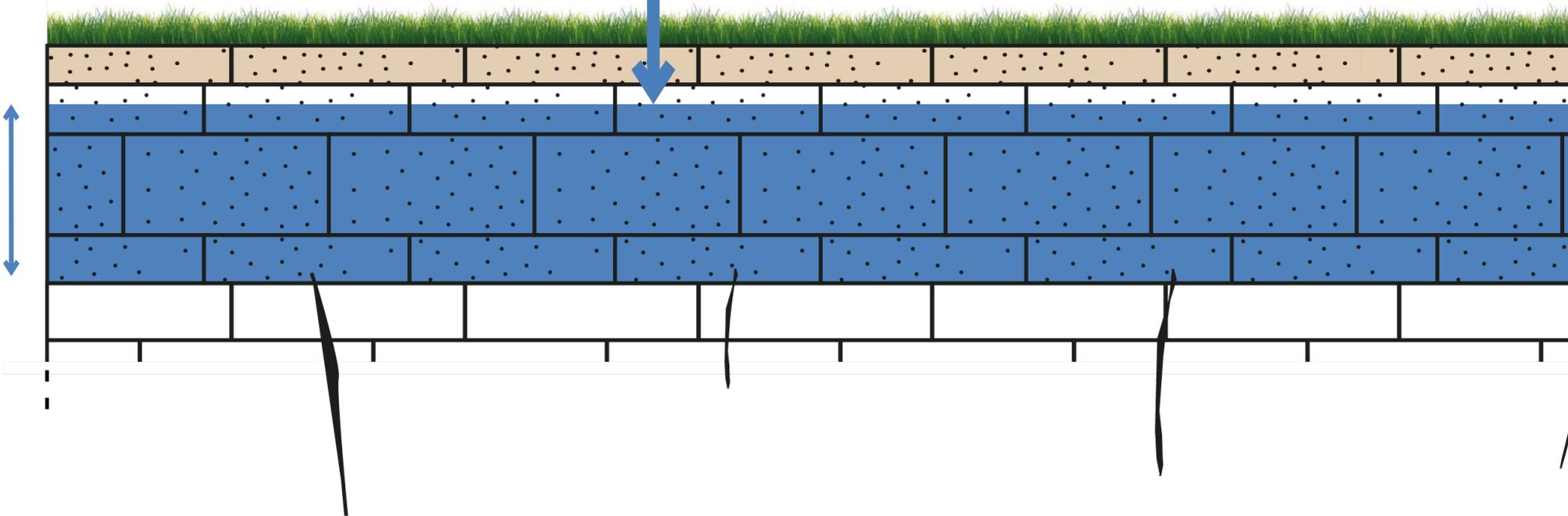
(Porosité = 10%)

$$g_{\text{eau}} = 126 \text{ nm.s}^{-2}$$



g_{eau}

H_{eau}



Plateau infini de Bouguer d'une couche saturée de 3m

Résidus gravimétriques à long terme

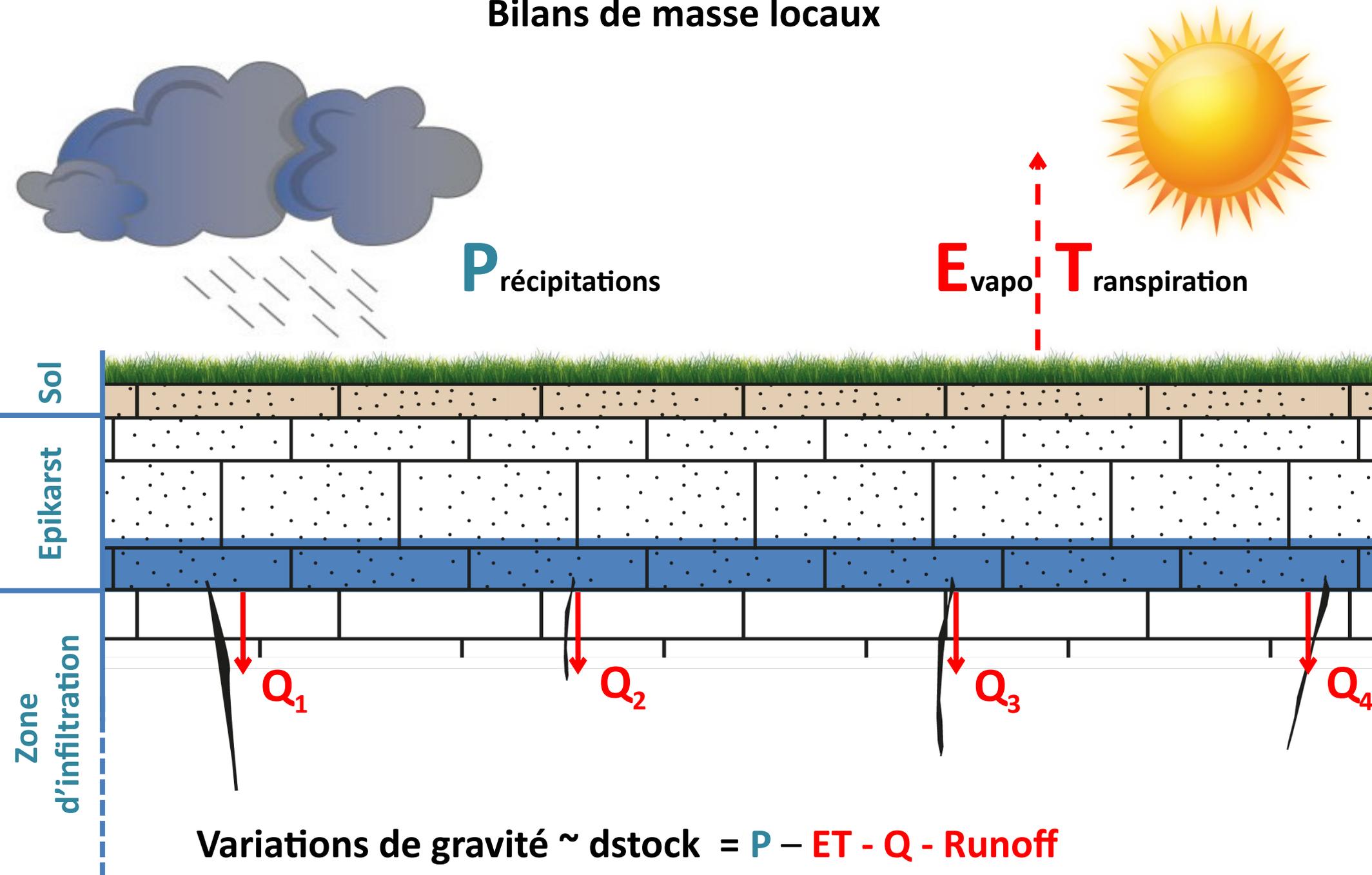


→ Origine hydrologique certaine à long terme

- ✓ *Augmentation de g après les pluies*
- ✓ *Diminution de la gravité en période sèche (débit/ET)*

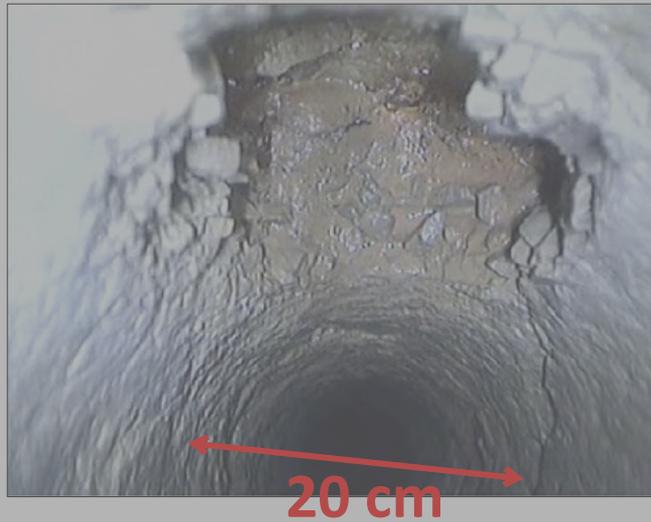
Hydrogravimétrie : variations temporelles

Bilans de masse locaux



Notion d'échelle d'investigation

Études très locales:
Forages



Noushabadi et al. (2011)

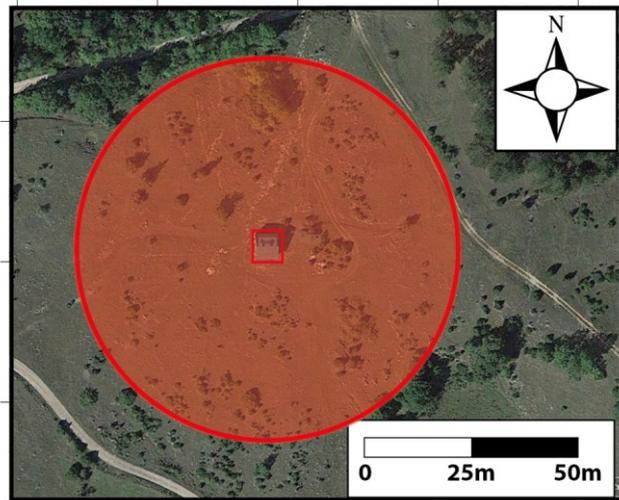
- « Champs » de forages

Échelle intermédiaire

Parcelle ~100 - 1000 m

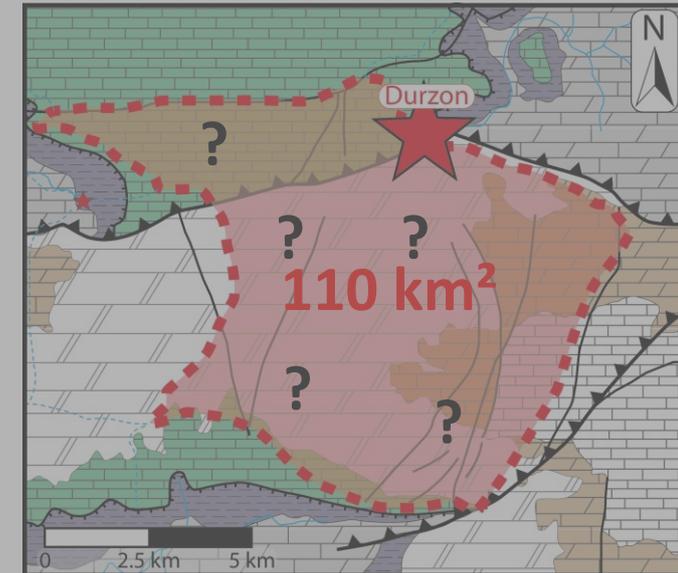
Débits? Écoulements?
Protection ?

→ **Géophysique**



- Gravimétrie
- Sismique

Études globales:
Les sources karstiques

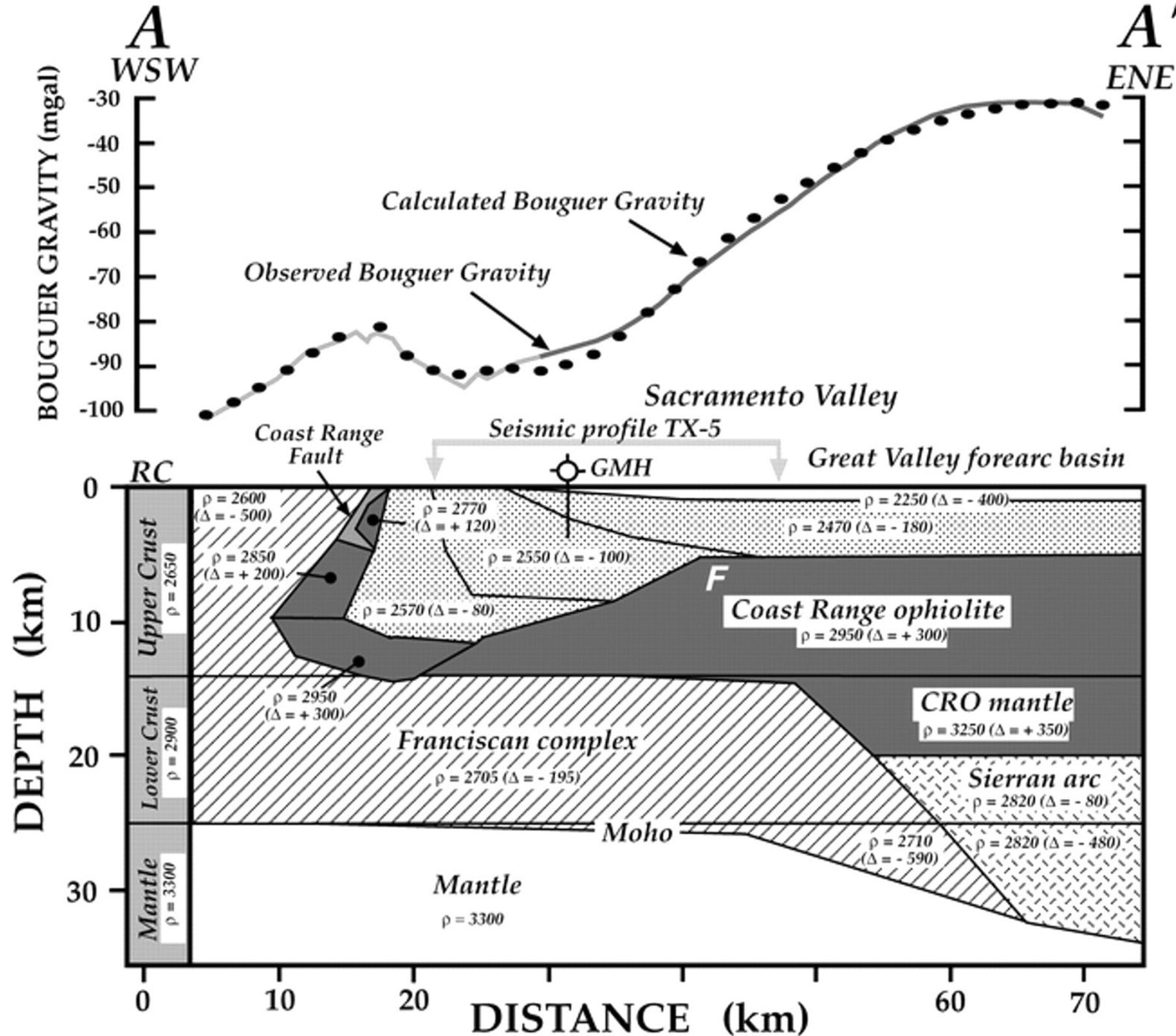


- Hydrogrammes et Modèles conceptuels (*Tritz et al., 2011 ; Mazzilli et al., 2012*)
- Géochimie (*Plagnes, 1997*)

Applications

Cartographie

- Interpréter / modéliser les variations spatiales du champ de gravité
 - Applications à toutes les échelles, en mer et à terre.



Suivi de réservoir

- Etude des variations temporelles de gravité (en plein développement !)
 - Suivi de réservoir hydro-géologique
 - Suivi de réservoir pétrolier
 - Suivi de stockage de CO₂ / Gaz