

Gravimétrie et isostasie

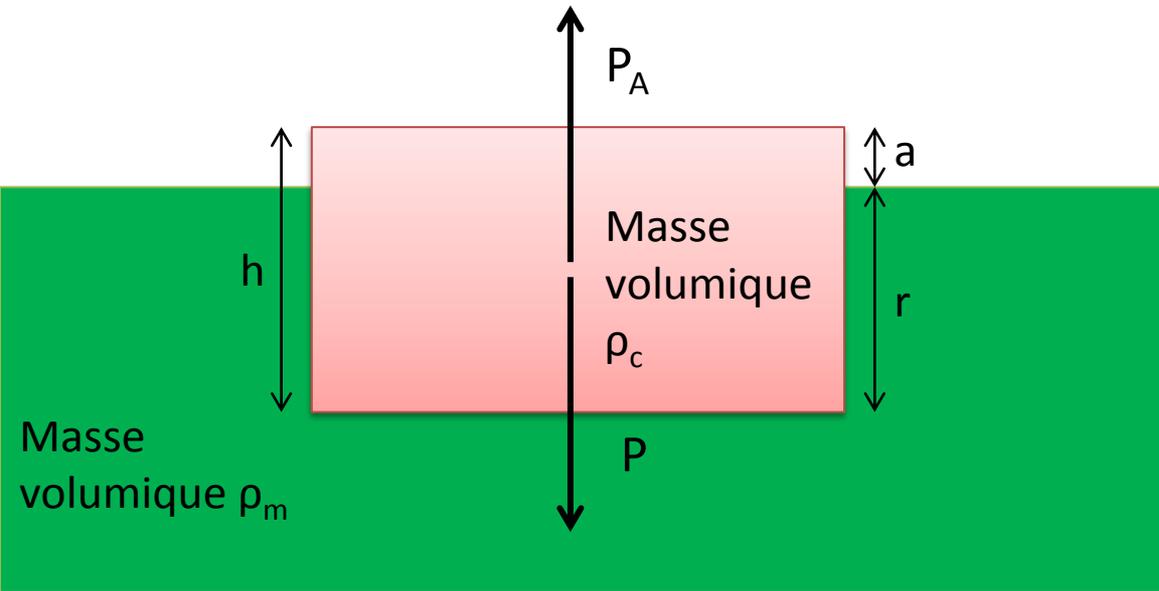
La flottabilité des corps, principes physiques

Archimède (287-212 avant JC) : « Tout corps plongé dans un liquide reçoit de la part de ce liquide une poussée de bas en haut égale au poids du volume déplacé »

Cette loi dépend des densités et des volumes des corps



La flottabilité des corps, principes physiques



P_A = Poussée d'Archimède
 P = Poids de l'objet
 h = hauteur du bloc
 r = racine (partie immergée)
 a = altitude (partie émergée)
 $h = r + a$
 ρ_m et ρ_c = Masses volumiques

Poids de l'objet = $P = m_c \cdot g = \rho_c \cdot V_c \cdot g = \rho_c \cdot h \cdot g$ si pour simplifier, largeur et longueur sont supposées égales à l'unité.

De même, la poussée d'Archimède = $P_A = \rho_m \cdot V_m \cdot g$
avec V_m = volume de liquide déplacé
 $P_A = \rho_m \cdot r \cdot g$

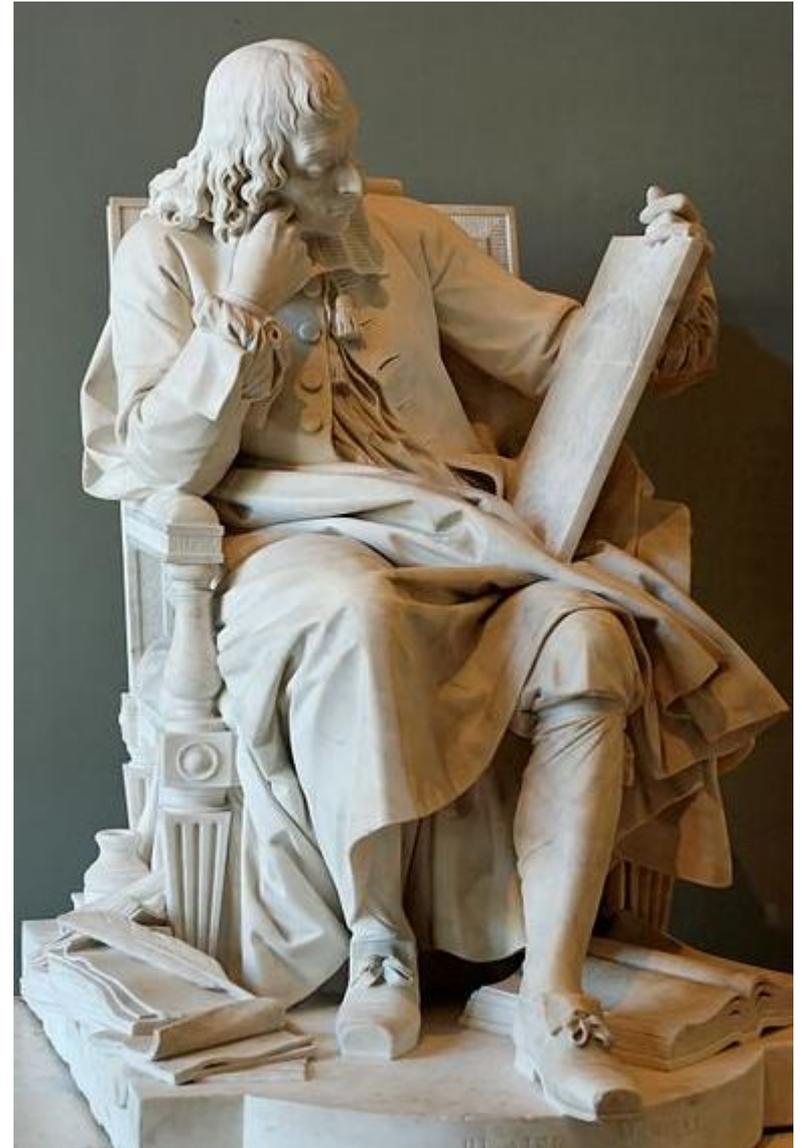
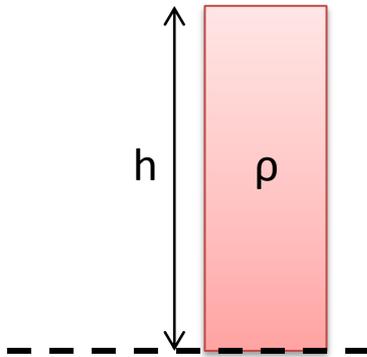
Si $P = P_A$ alors $\rho_c \cdot h \cdot g = \rho_m \cdot r \cdot g$ donc $\rho_c \cdot h = \rho_m \cdot r$ ou encore $r / h = \rho_c / \rho_m$

La flottabilité des corps, principes physiques

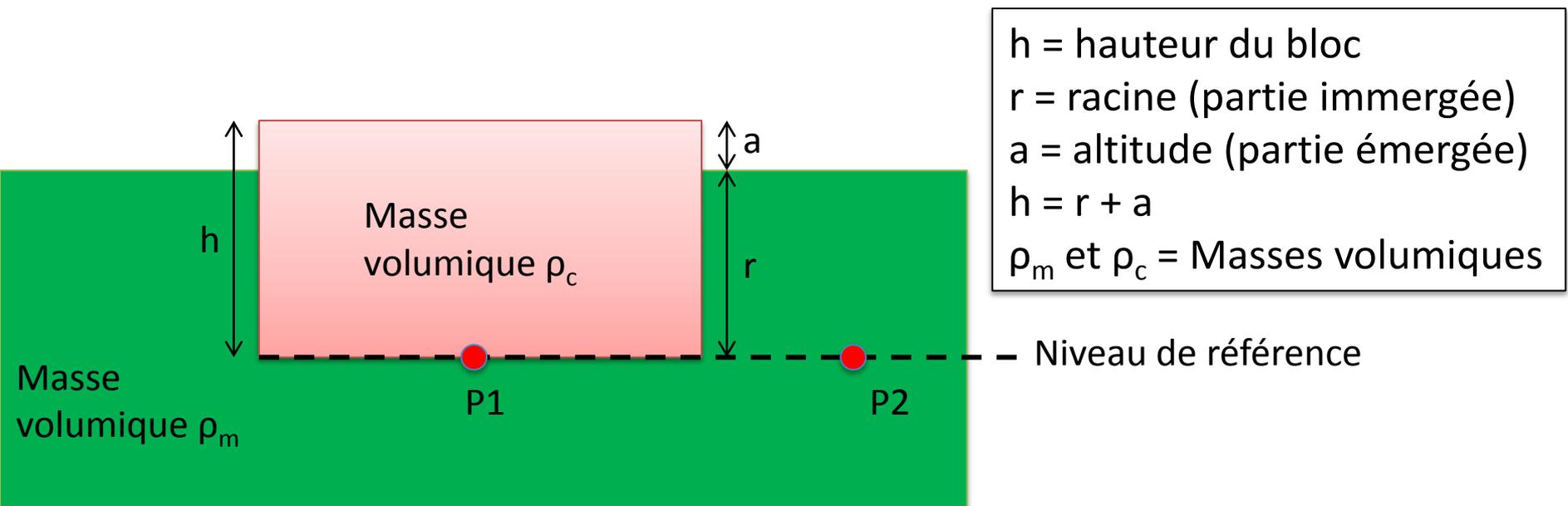
Dans son théorème sur « l'équilibre des liqueurs » (on dirait maintenant: principe de l'hydrostatique), **Blaise Pascal** introduit la notion de pression.

Ainsi la pression (force par unité de surface) à la base d'une colonne de liquide = P

$P = \rho \cdot g \cdot h$ avec h = hauteur de liquide



La flottabilité des corps, principes physiques



A l'équilibre, la pression exercée en P1 est la même qu'en P2

$$P1 = P2$$

$$\text{Avec } P1 = \rho_c \cdot g \cdot h \text{ et } P2 = \rho_m \cdot g \cdot r$$

$$\text{Donc } \rho_c \cdot g \cdot h = \rho_m \cdot g \cdot r$$

$$\rightarrow \rho_c \cdot h = \rho_m \cdot r \rightarrow r / h = \rho_c / \rho_m$$

On retrouve les mêmes résultats qu'avec la poussée d'Archimède !

Isaac Newton (1643-1727) a formalisé la force gravitationnelle et le champ de pesanteur

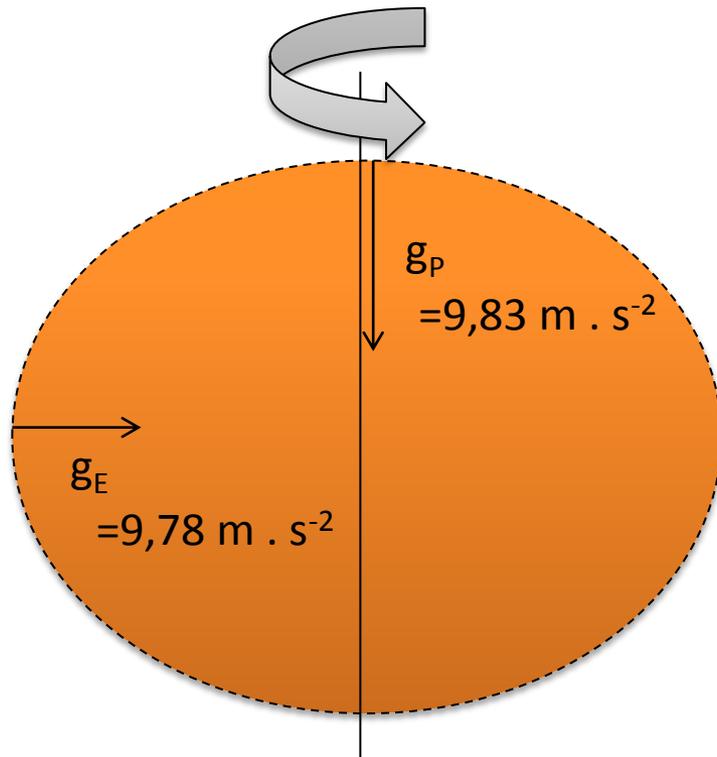
Le **champ de pesanteur** g créé par une masse ponctuelle (ou sphérique) de masse M à une distance d est égal à $g = G \cdot M / d^2$

Avec $G =$ **constante de gravitation universelle** $= 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$



D'Isaac Newton à Pierre Bouguer

Il a calculé que la surface de la Terre (supposée fluide), dont la surface de la mer devait être une bonne approximation, devait avoir la forme d'un ellipsoïde aplati aux pôles.



- Cette surface s'appelle le **l'ellipsoïde de référence**
- Sur cette surface, le champ de gravité est plus élevé aux pôles qu'à l'équateur (car on est plus près du centre de la Terre)
- Si on corrige les effets de la latitude (et de l'altitude), g est pratiquement constant sur cette surface de référence.
- Cette surface définit aussi l'horizontale et la verticale à la surface de la Terre.
- Cette surface sert de référence pour toutes les études gravimétriques

D'Isaac Newton à Pierre Bouguer

Pierre Bouguer (1698 -1758),
mathématicien, physicien et
hydrographe français.

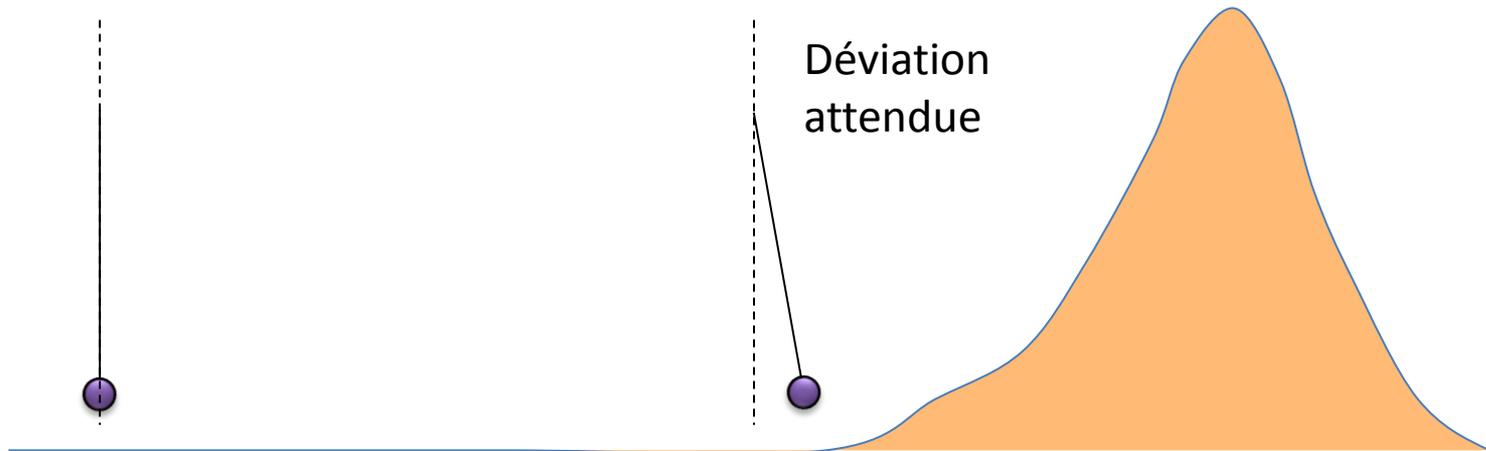
De 1735 à 1749, il effectue une mission
au Pérou, ayant pour but de mesurer un
degré d'arc de méridien près de
l'équateur.

C'est en effectuant des observations
d'ordre gravimétrique en altitude qu'une
anomalie le surprend.



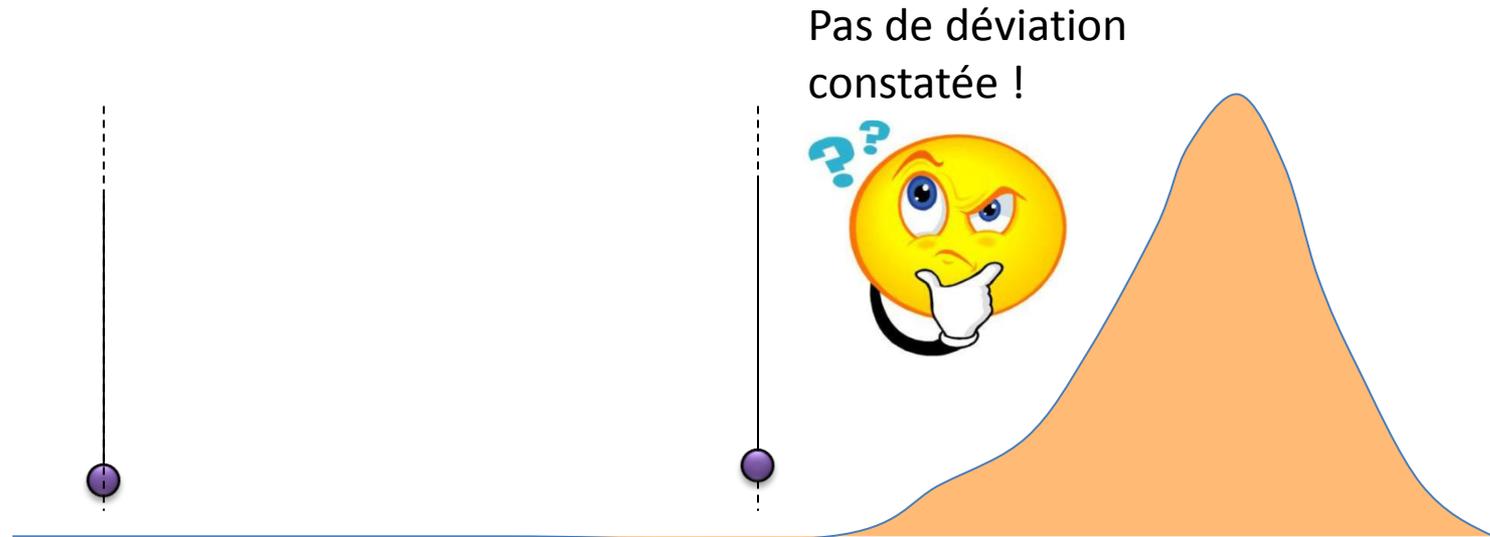
D'Isaac Newton à Pierre Bouguer

Pour réaliser ses mesures avec une grande précision, Bouguer a besoin d'une grande précision sur la verticale. Il prévoit donc de faire une correction lorsqu'il réalise ses mesures près des reliefs de la Cordillère des Andes. En effet, selon Newton, les fils à plomb doivent être déviés par rapport à la verticale, à cause de l'excès de masse.



D'Isaac Newton à Pierre Bouguer

Après vérification grâce à des mesures astronomique, Bouguer constate que le fil a plomb n'est pratiquement pas dévié, un peu comme si les montagnes n'avaient pas de masse ! Les montagnes ne pouvant êtres creuses, il ne comprend pas !



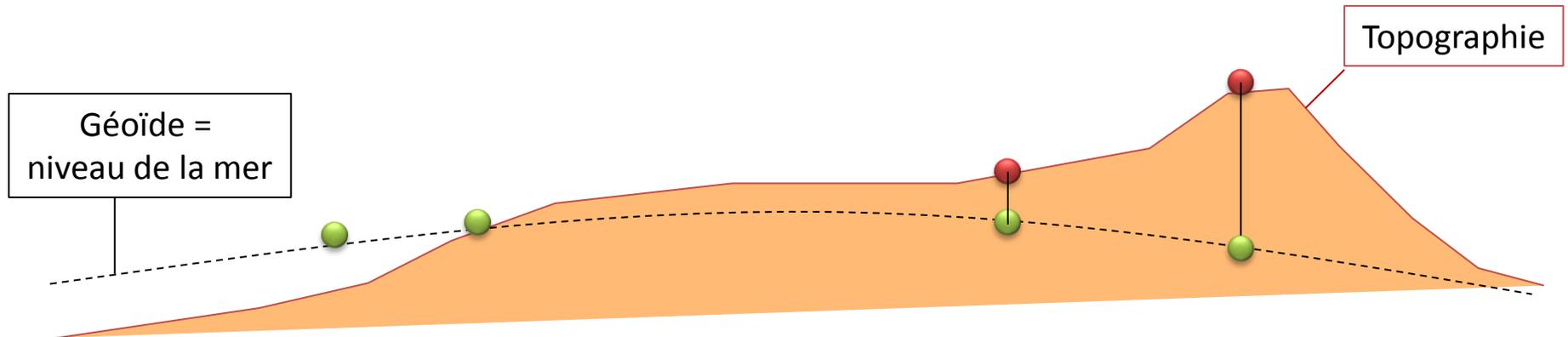
...Mais comme ça simplifie ses mesures, il ne cherche pas à comprendre plus que ça!
Il faudra attendre 150 ans pour qu'on explique cette anomalie, qui portera son nom
« anomalie de Bouguer » !!!

D'Isaac Newton à Pierre Bouguer

Au milieu du 19^{ème} siècle, on a déterminé la masse volumique de la Terre (5520 Kg m^3)
Comme les roches superficielles sont moins denses (de 2500 à 3000 Kg m^3), on suppose qu'une croûte «peu dense» repose sur du matériau plus dense.

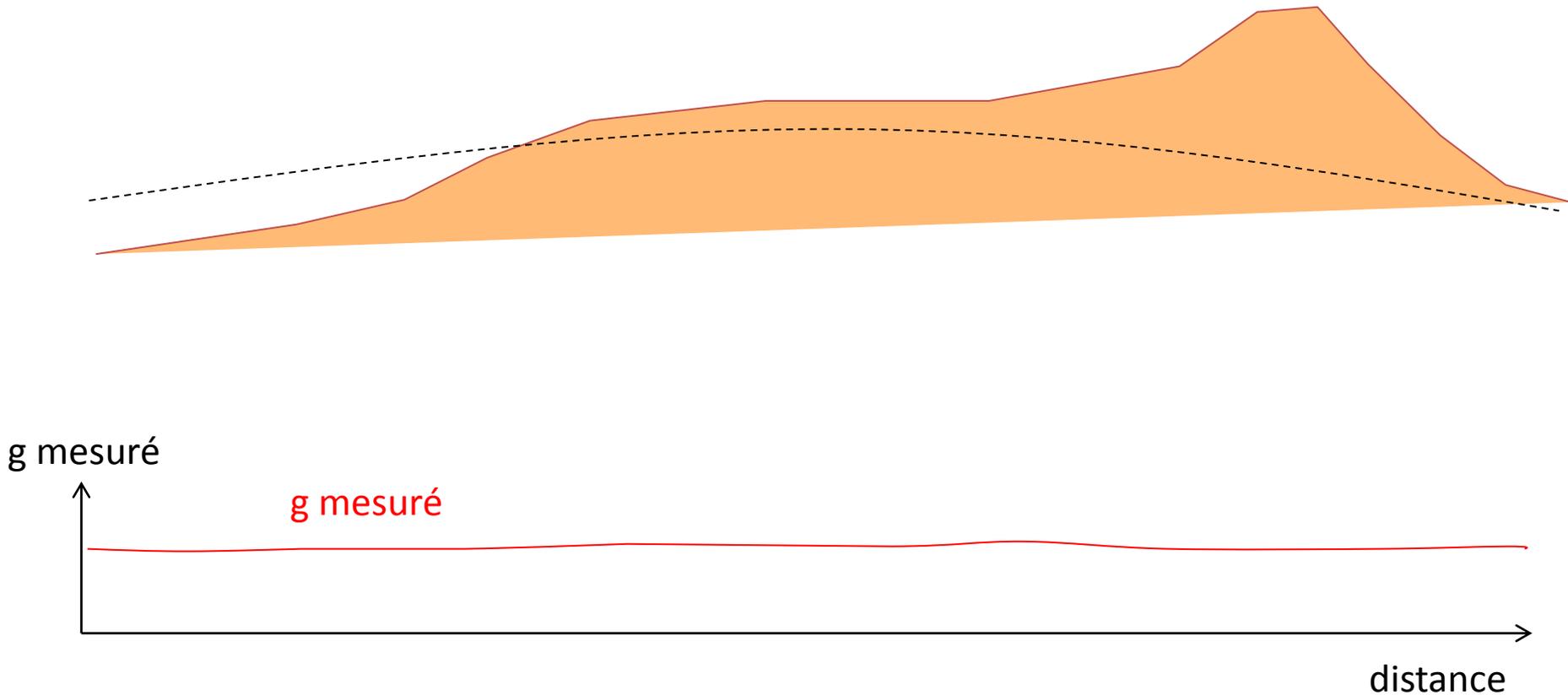
Par ailleurs, l'expansion coloniale fait qu'on dispose de mesures de gravité un peu partout dans le globe. On réalise toutes ces mesures en corrigeant les effets de l'altitude et de la latitude.

- Gravité mesurée, sans correction
- Valeur de gravité avec correction d'altitude



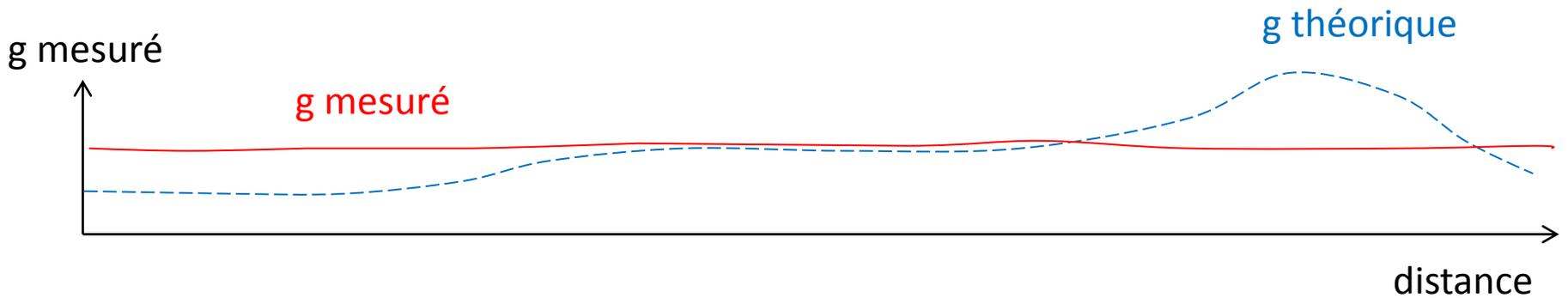
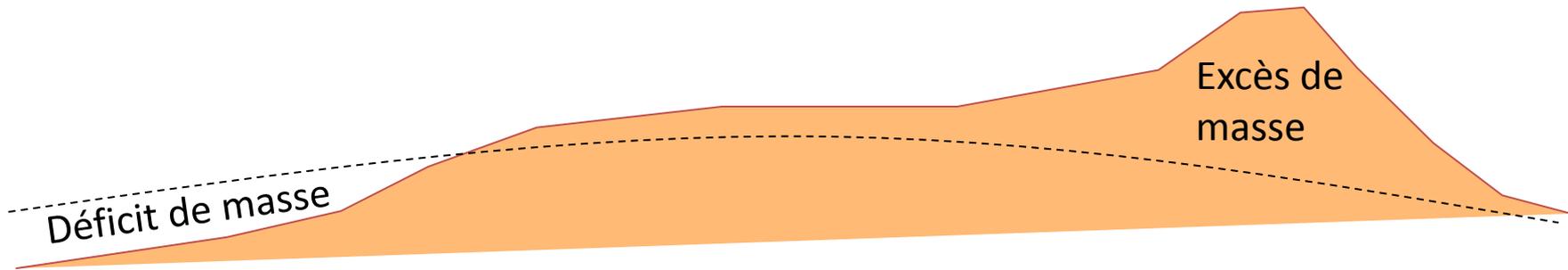
D'Isaac Newton à Pierre Bouguer

Fait surprenant: on s'aperçoit que la gravité est approximativement constante à la surface du globe (à 1/10 000 eme près, pour 90 % de la Terre)



D'Isaac Newton à Pierre Bouguer

Alors qu'en théorie, on devrait avoir des « creux » et des « bosses » !!!



Les modèles de Pratt et Airy

Pour expliquer que la gravité soit quasi-constante, on doit proposer un modèle qui montre que la masse ne varie pas en fonction de la distance, même si l'altitude varie.

John Henry Pratt (1809-1871)



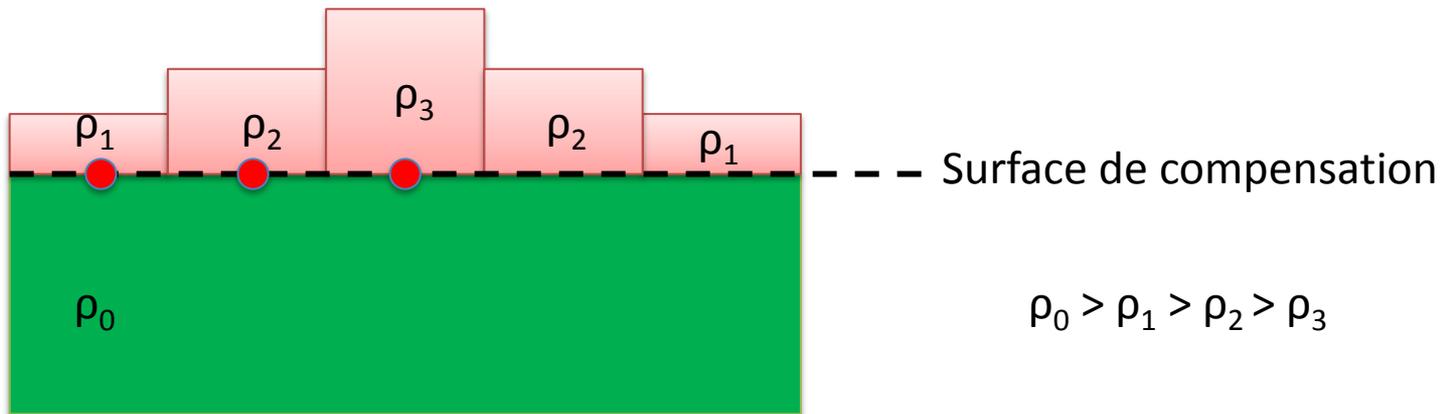
Georges Biddle Airy (1801-1892)



Les modèles de Pratt et Airy

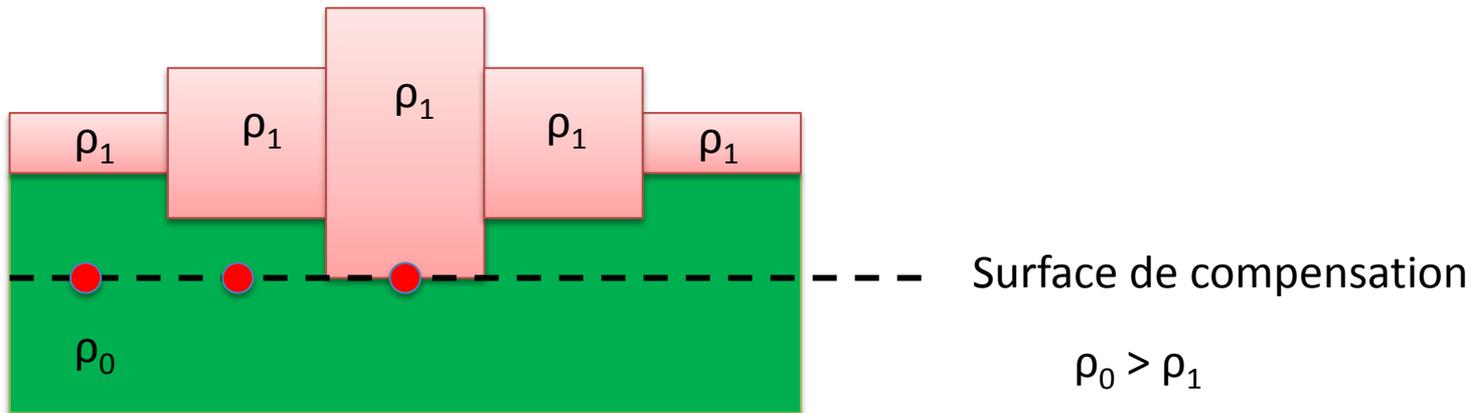
Dans le modèle de **Pratt**, on considère des blocs dont la **masse volumique varie**. Plus les éléments sont denses, plus ils sont minces. Ainsi la différence de topographie ne s'accompagne pas de différence de masse.

On peut définir une surface de compensation où la pression est la même partout.

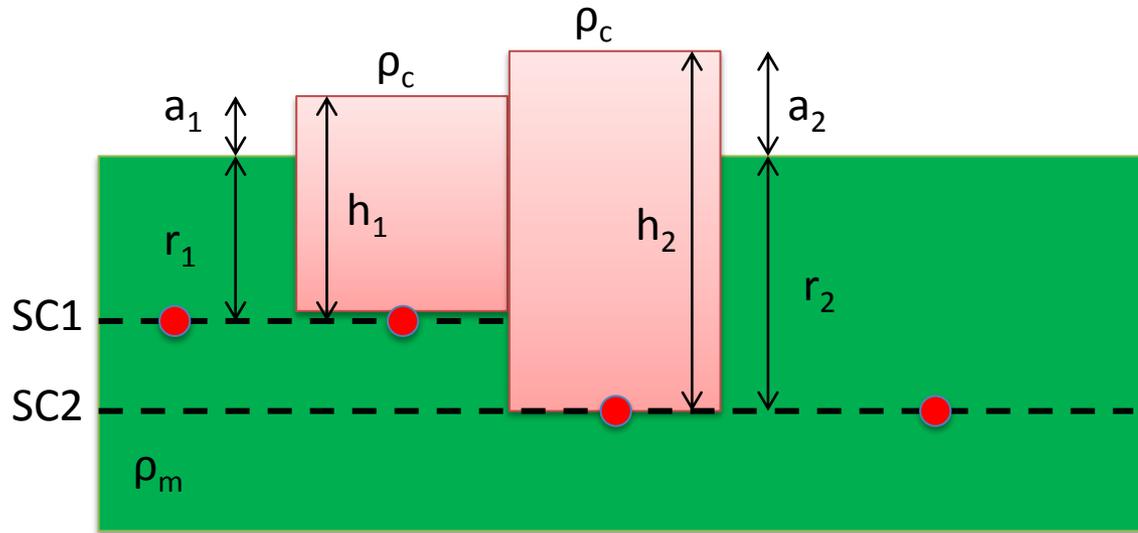


Les modèles de Pratt et Airy

Dans le modèle de **Airy**, la masse volumique des blocs ne varie pas. Les blocs, de **hauteur variable**, « flottent » sur un milieu de densité plus élevée.
Au niveau de la surface de compensation, la pression est la même.



Les modèles de Pratt et Airy



$$\begin{aligned}\rho_c &= 2,7 \\ \rho_m &= 3,3 \\ h_1 &= 35 \text{ Km}\end{aligned}$$

Au niveau de la surface de compensation SC1, les pressions sont identiques donc:

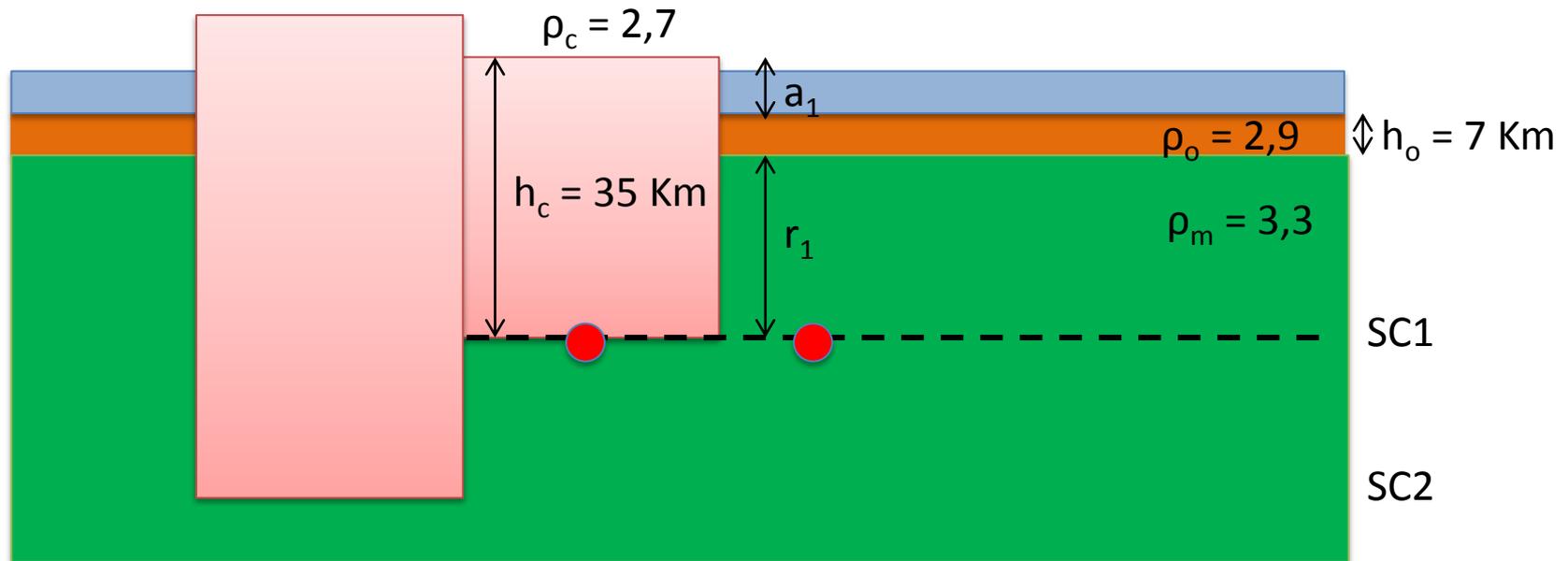
$$\rho_c \cdot h_1 = \rho_m \cdot r_1$$

Au niveau de la surface de compensation SC2, les pressions sont identiques donc:

$$\rho_c \cdot h_2 = \rho_m \cdot r_2$$

Les modèles de Pratt et Airy

La combinaison Pratt-Airy donne une bonne approche de la réalité naturelle de la dualité continent-océan



Au niveau de la surface de compensation SC1, les pressions sont identiques donc:

$\rho_c \cdot h_c = (\rho_o \cdot h_o) + (\rho_m \cdot r_1)$ si on néglige la masse de l'eau.

$$\rightarrow \rho_c \cdot h_c = (\rho_o \cdot h_o) + (\rho_m \cdot (h_c - h_o - a_1))$$

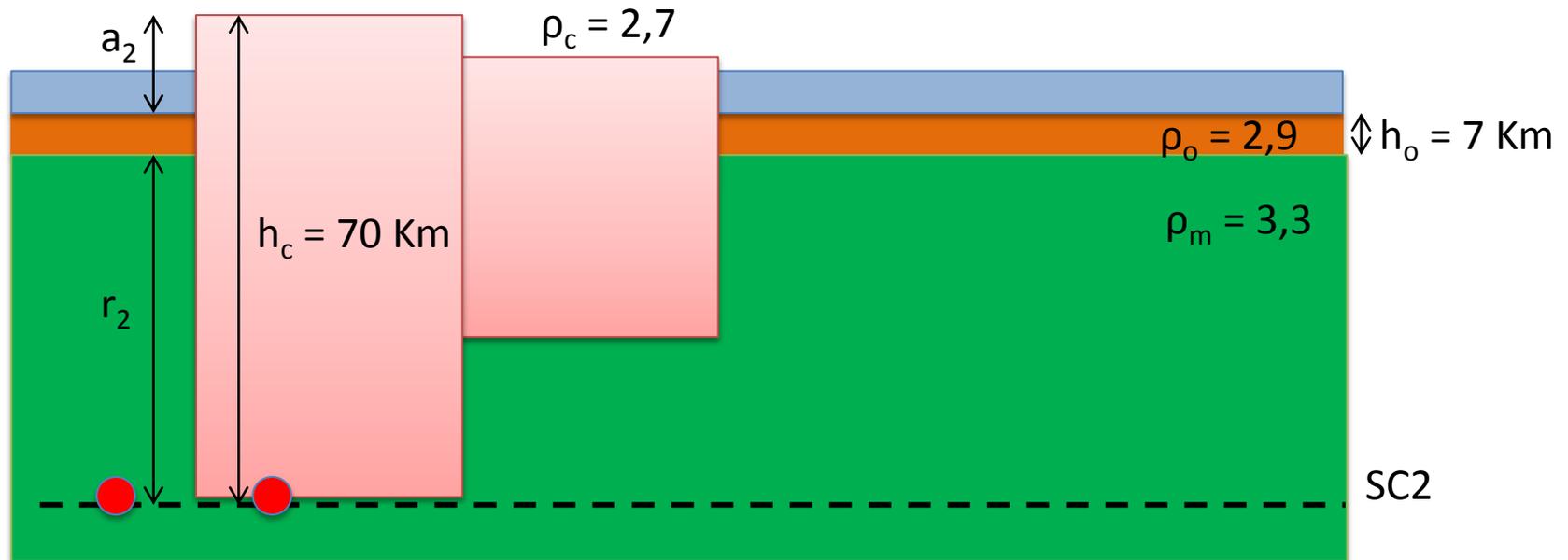
$$\rightarrow 2,7 \cdot 35 = (2,9 \cdot 7) + (3,3 \cdot (35 - 7 - a_1))$$

$$\rightarrow a_1 = 5,5 \text{ Km}$$

Un continent « standard » constitué d'une croûte de 35 Km d'épaisseur domine les plaines abyssales de 5,5 Km

Les modèles de Pratt et Airy

La combinaison Pratt-Airy donne une bonne approche de la réalité naturelle de la dualité continent-océan



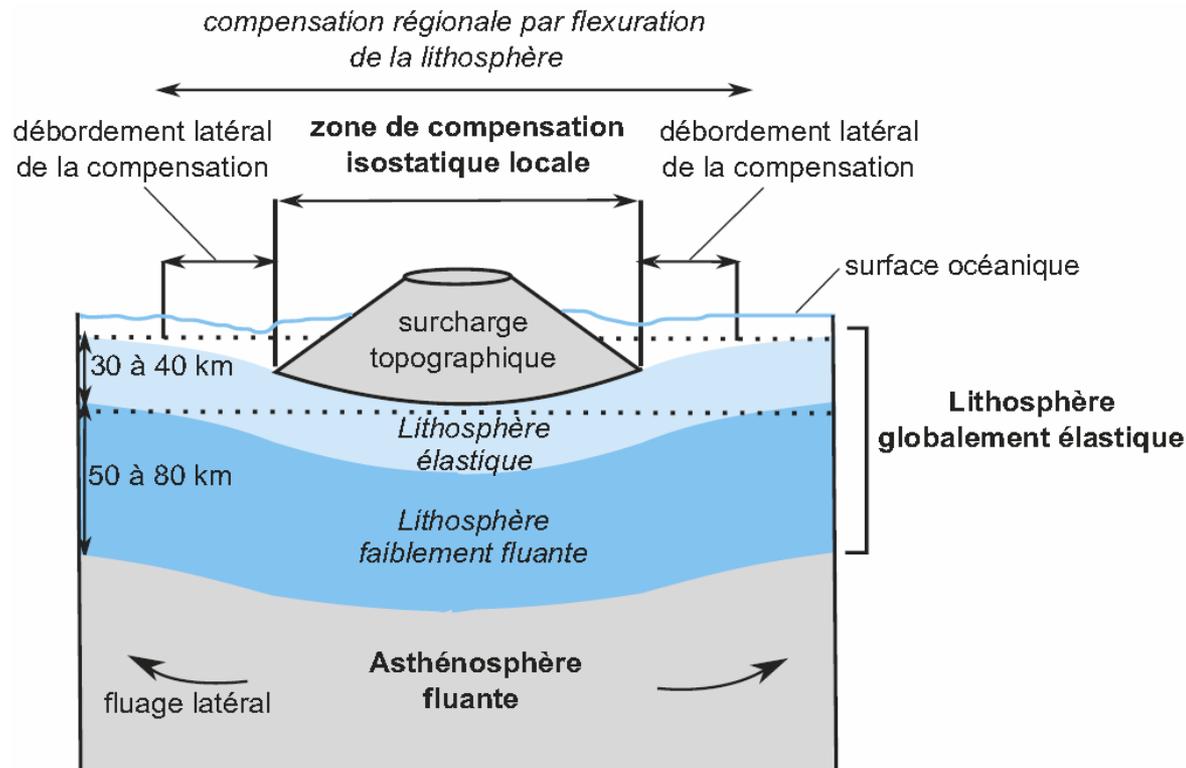
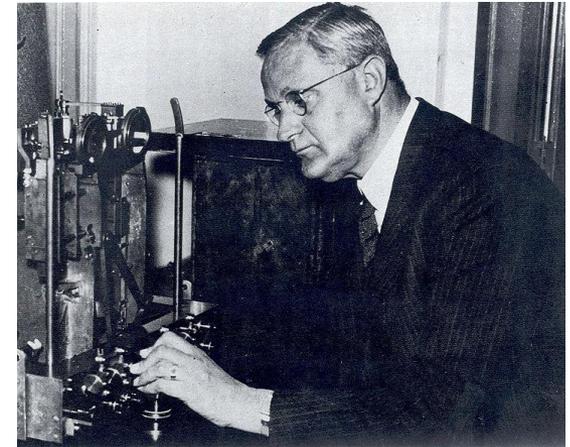
Au niveau de la surface de compensation SC2, les pressions sont identiques donc:

$\rho_c \cdot h_c = (\rho_o \cdot h_o) + (\rho_m \cdot r_2)$ si on néglige la masse de l'eau.

Le même calcul pour une chaîne de montagne dont l'épaisseur est doublée (70 Km) donne une altitude a_2 de 12,5 Km.

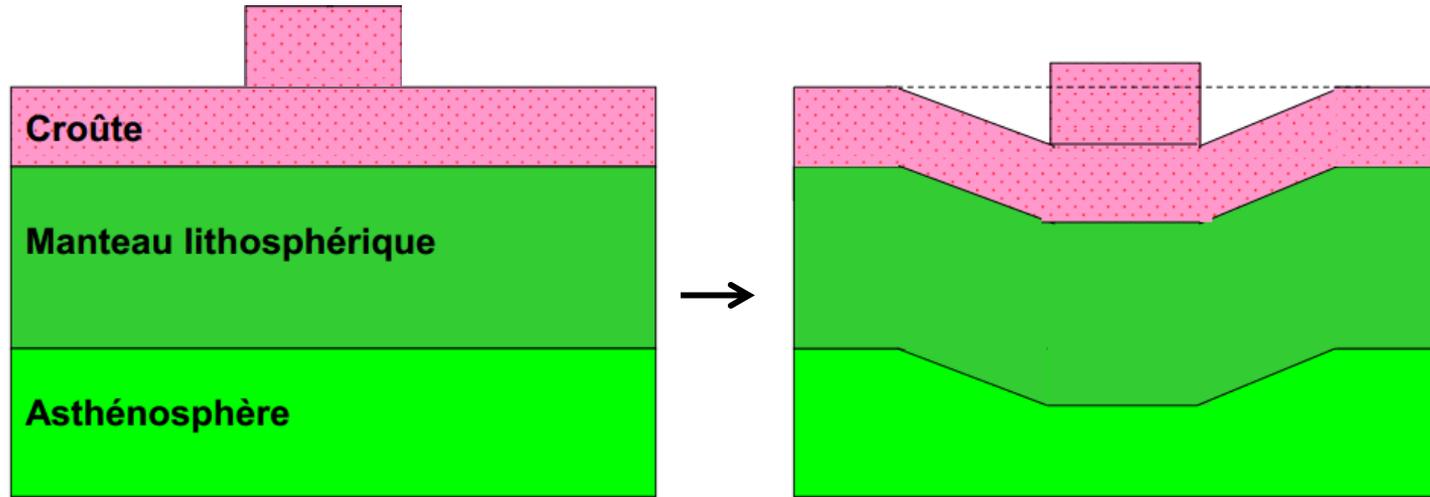
Le modèle de Vening-Meinesz

Il existe un **3eme modèle** mis au point dans les années 1930 par Felix Andries Vening Meinesz.
Ce modèle constitue une forme plus évoluée du modèle de Airy en prenant **en compte la flexuration** de la partie supérieure et élastique de la lithosphère au-dessus des niveaux plus fluants que constituent la partie inférieure de la lithosphère et l'asthénosphère sous-jacente.



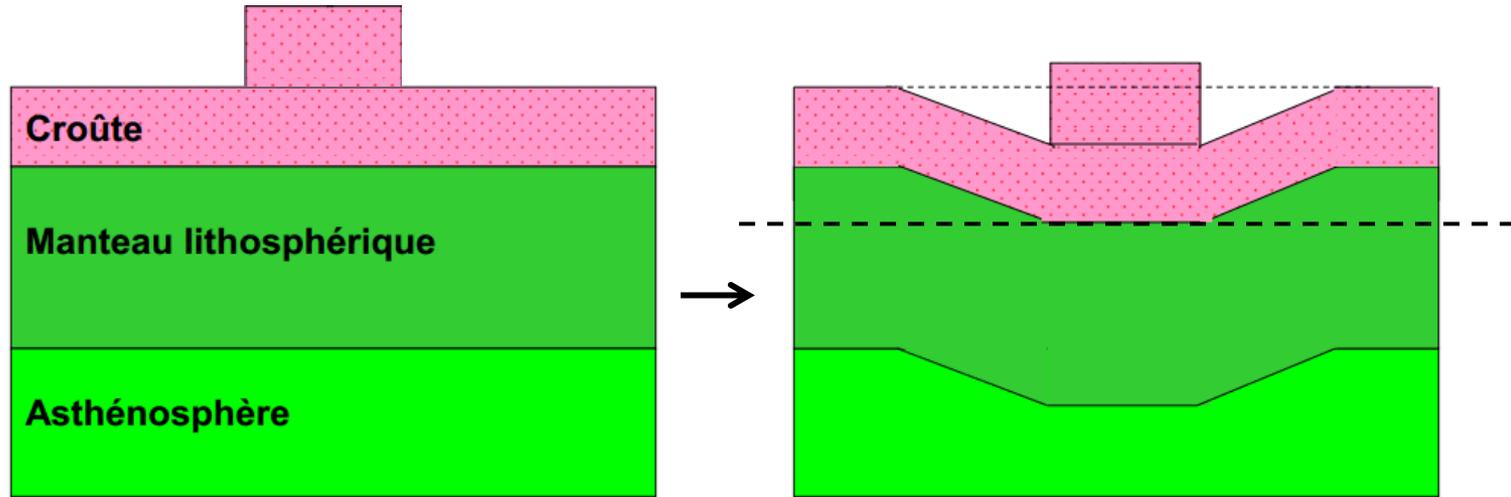
Le modèle de Vening-Meinesz

Dans ce modèle, l'enfoncement, conséquence de la surcharge, se répartit sur une surface plus grande, par « flexure » autour de la surcharge (même chose en cas de « décharge »)

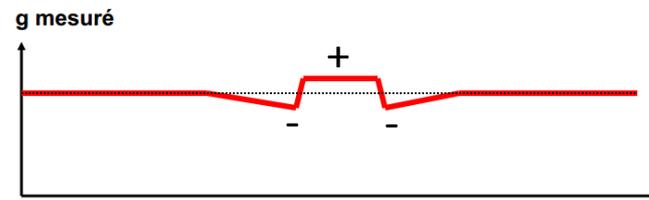


Le modèle de Vening-Meinesz

Dans ce modèle, l'enfoncement, conséquence de la surcharge, se répartit sur une surface plus grande, par « flexure » autour de la surcharge (même chose en cas de « décharge »)

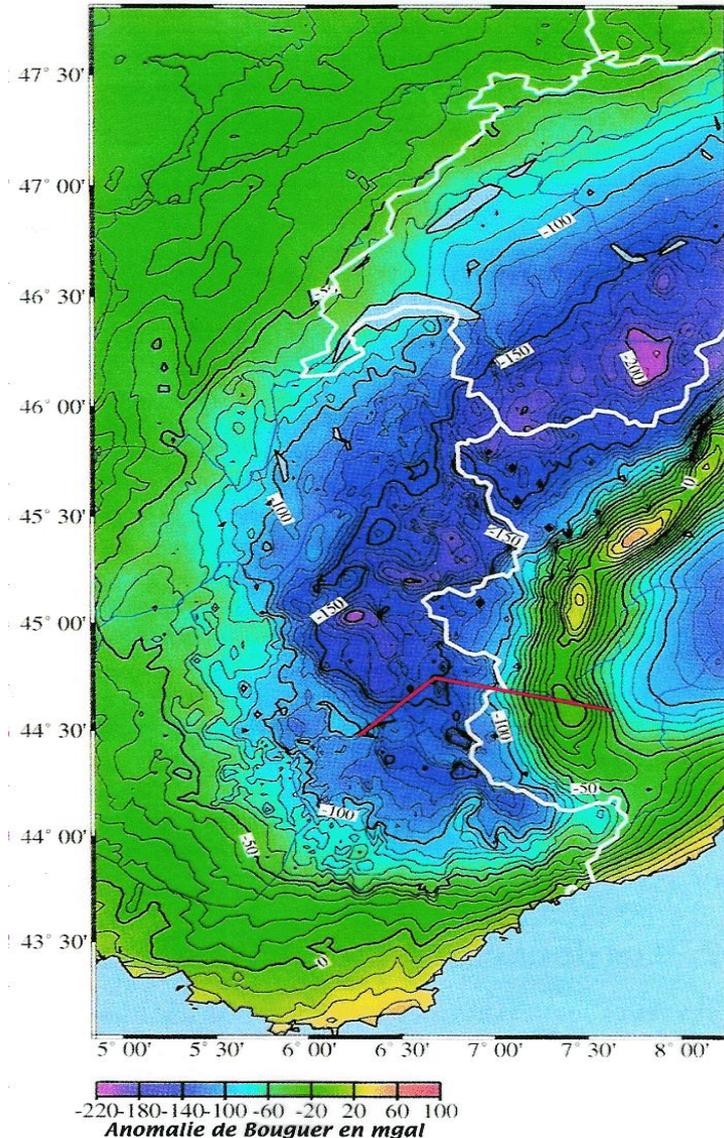


La flexuration type Vening Meinesz, fait apparaître un équilibre isostatique «global», mais peut entraîner, par flexuration, des **anomalies locales de gravité**.



L'anomalie de Bouguer

Données gravimétriques concernant les Alpes



Sous les alpes, on constate une **anomalie gravimétrique négative** !

Comment peut on obtenir ce résultat alors qu'on a vu qu'après correction d'altitude, la gravité est globalement constante à la surface du globe !!!

Alors... c'est quoi, cette anomalie de Bouguer ?

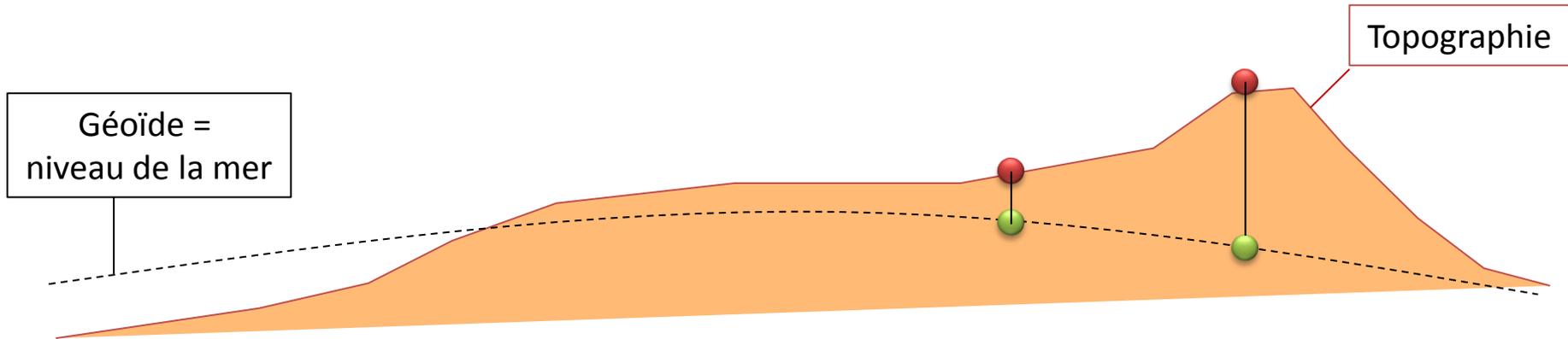


L'anomalie de Bouguer

Il faut revenir aux corrections que l'on établit lorsqu'on détermine la gravité :

1. On effectue une première correction d'altitude (déjà vu !)

- Gravité mesurée, sans correction
- Valeur de gravité avec correction d'altitude (ou à l'air libre)

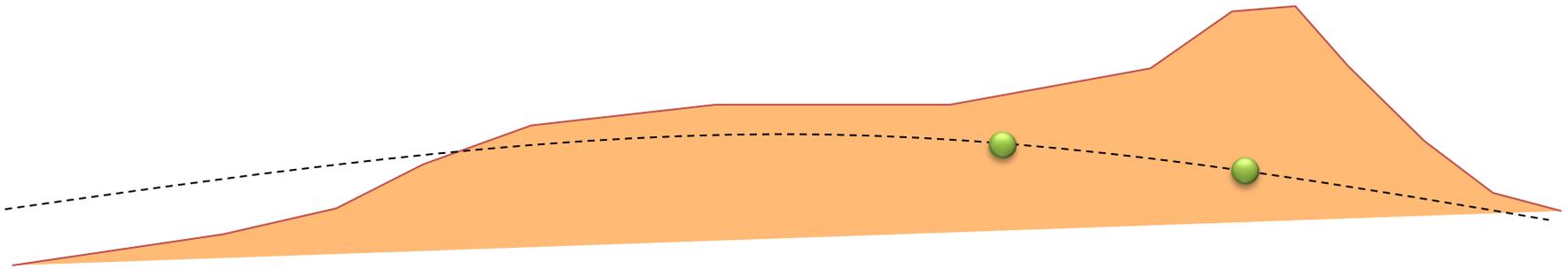


Dans cette correction, on fait comme si la mesure avait été faite au niveau du géoïde de référence (niveau de la mer). On fait comme si la montagne avait été aplanie, comprimée **mais en gardant sa masse**.

L'anomalie de Bouguer

2. Mais quand on détermine la valeur de la gravité, on effectue aussi une autre correction: **on néglige les effets de la gravité liés aux masses en excès** (montagnes et reliefs environnants). On parle de correction de plateau et de correction topographique

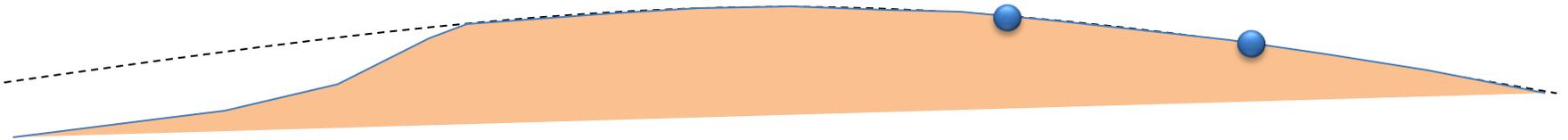
- Valeur de gravité avec correction d'altitude (ou à l'air libre)



L'anomalie de Bouguer

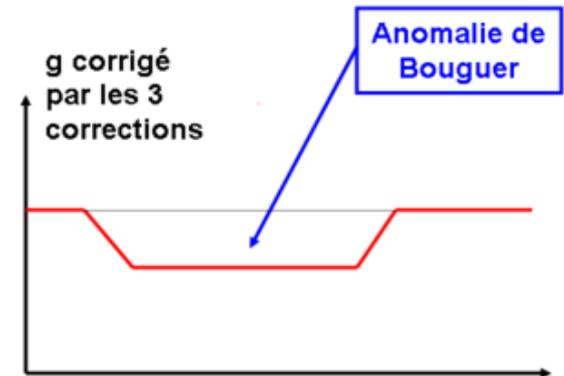
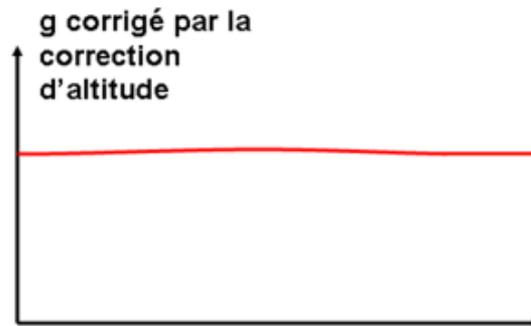
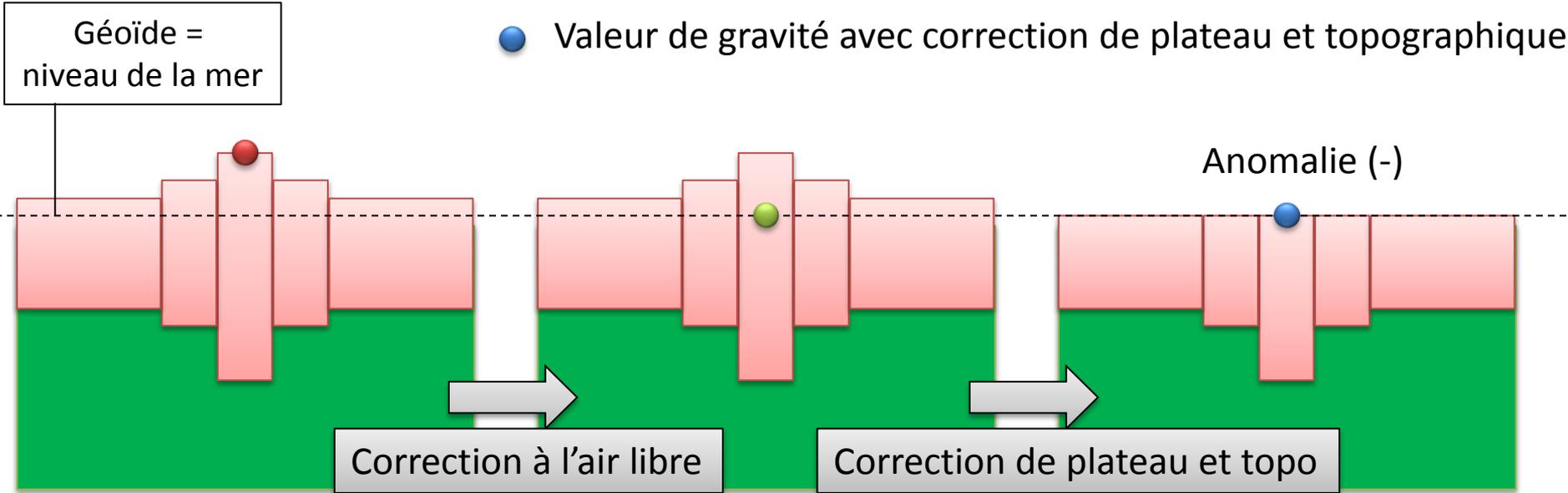
2. Mais quand on détermine la valeur de la gravité, on effectue aussi une autre correction: **on néglige les effets de la gravité liés aux masses en excès** (montagnes et reliefs environnants). On parle de correction de plateau et de correction topographique

- Valeur de gravité avec correction de plateau et topographique



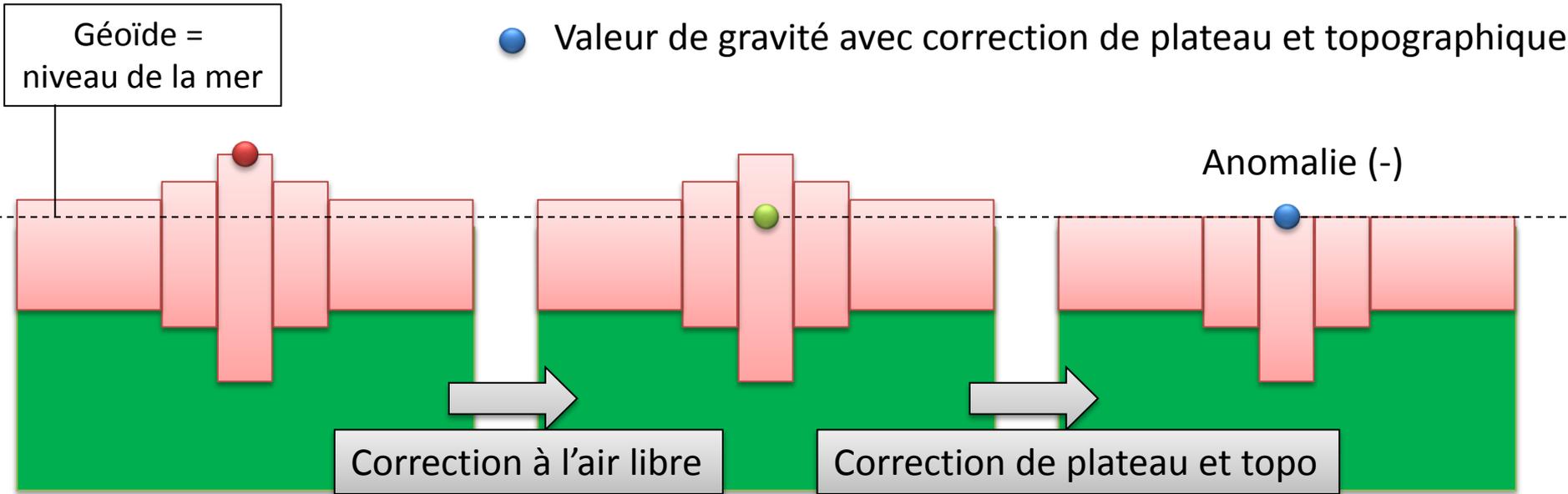
L'anomalie de Bouguer

- Gravité mesurée, sans correction
- Valeur de gravité avec correction d'altitude (ou à l'air libre)
- Valeur de gravité avec correction de plateau et topographique



L'anomalie de Bouguer

- Gravité mesurée, sans correction
- Valeur de gravité avec correction d'altitude (ou à l'air libre)
- Valeur de gravité avec correction de plateau et topographique



L'anomalie de Bouguer = variations de la gravité (par rapport à la gravité moyenne) après toutes ces corrections (pour simplifier latitude, altitude, de plateau et topographique)

L'anomalie de Bouguer

EN CONCLUSION:

L'**anomalie de Bouguer** correspond donc à la différence entre le champ de pesanteur mesuré, corrigé et le champ de pesanteur théorique.

Les **corrections** visent à garder d'une mesure que la partie renseignant sur les variations de masses en profondeur. Pour se faire, on la corrige des effets superficiels connus: **altitude** et **relief**.

* Correction d'altitude:

On se replace par le calcul sur un ellipsoïde de référence d'altitude égale à 0 (= **correction à l'air libre**)

* Correction des effets de masse d'un relief:

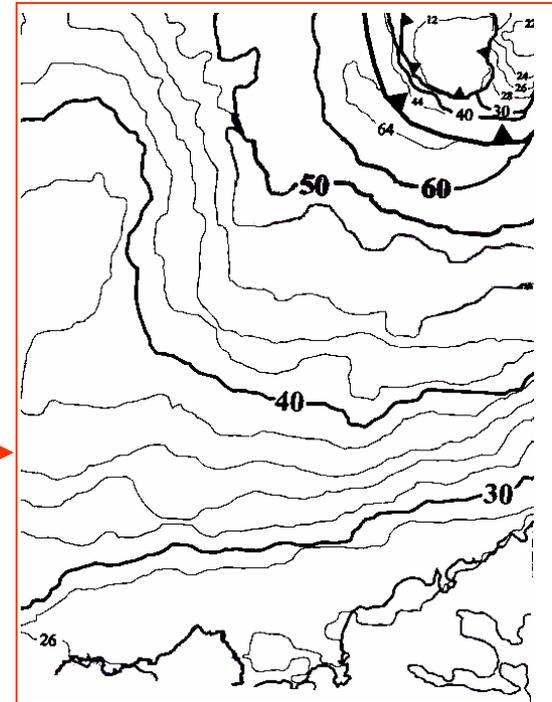
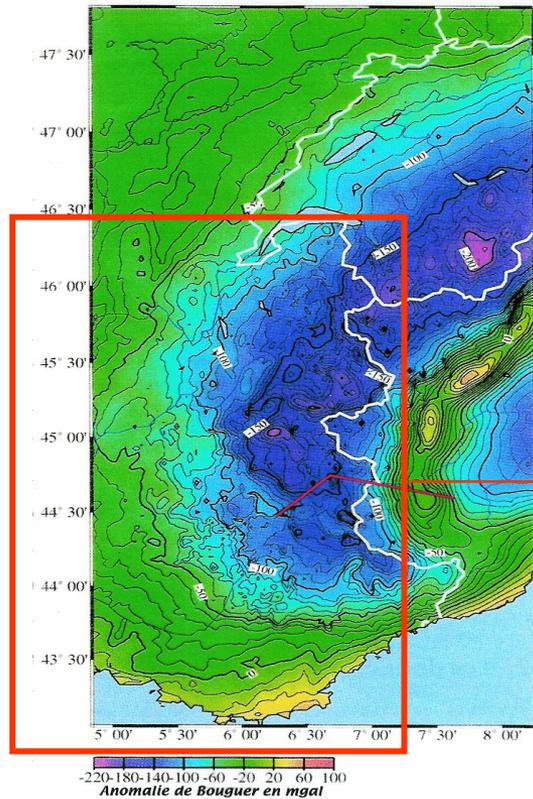
On enlève par le calcul la masse de roche comprise entre l'altitude h et l'altitude 0 (= **correction de plateau**). Elle dépend de l'altitude h et de la masse volumique de la roche.

* Correction topographique:

Prend en compte les reliefs entourant le point de mesure. On peut l'atablir à partir d'une carte topographique.

→ L'anomalie qui persiste après ces 3 corrections apporte une information sur les écarts entre la répartition réelle et la répartition théoriques des masses en profondeur.

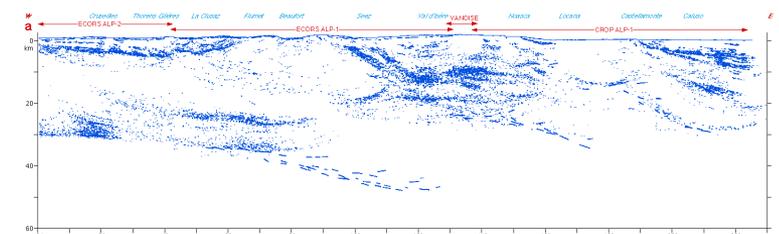
L'anomalie de Bouguer



Isobathes Moho

L'anomalie de Bouguer révélée dans les Alpes met donc bien en évidence un excès de matériel de faible densité (croûte) au dépend du manteau. Cela correspond bien à **l'approfondissement du moho** révélé par les études sismiques

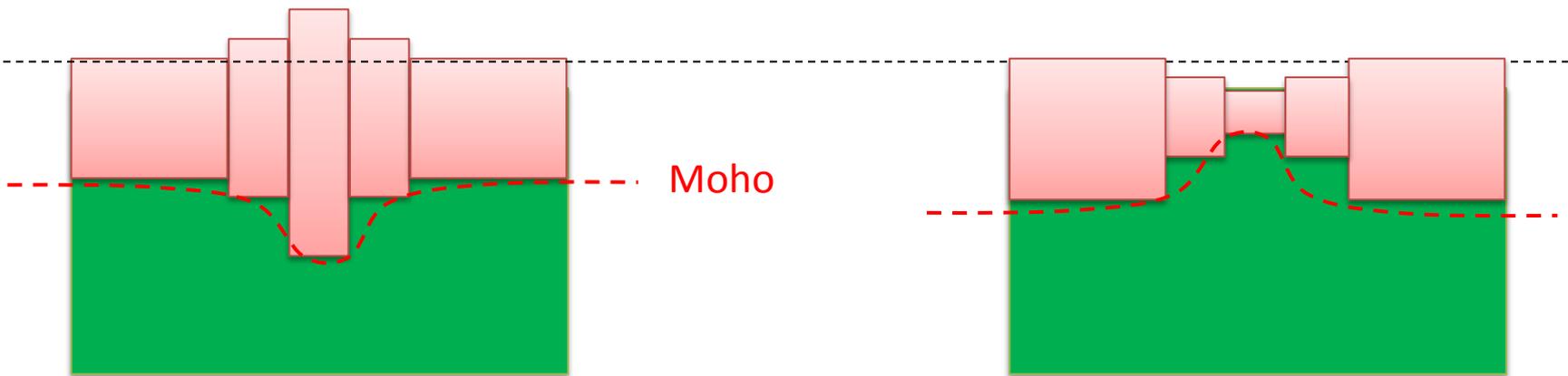
THE ECORS-CROP ALP DEEP SEISMIC TRAVERSE



L'anomalie de Bouguer

CONCLUSION : Après les corrections de plateau et de topo, on accentue les différences entre la gravité mesurée (proche de la gravité théorique) et la gravité calculée (après corrections).

Ce résultat montre bien que la Terre est en **équilibre isostatique** (ou hydrostatique, la rigueur) et que la structure profonde compense les inégalités topographiques:



A une montagne (**excès de masse superficiel**) correspond un **épaississement crustal** (excès de corps peu dense)

Inversement, à une dépression (**déficit de masse superficiel**) correspond un **amincissement crustal** et donc un excès de masse profond.

L'anomalie de Bouguer

