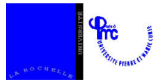


programme archéologique de **Chambord**

## Rapport sur la prospection microgravimétrique au château de Chambord.

Equipe géophysique La Rochelle - Paris VI : Nicolas FLORSCH, Isabelle GUYOT, Christian CAMERLYNCK, Muriel LLUBES, Delphine ORSEAU – 1999



Centre Littoral De Géophysique (Université de La Rochelle)  
Département de Géophysique Appliquée (Université Pierre et Marie Curie)

### Introduction

La microgravimétrie est sans contexte la plus délicate des méthodes géophysiques. Elle consiste à mesurer le champ de pesanteur. Tout le monde a en mémoire la valeur de  $g$  sous nos latitudes :  $9,8 \text{ m/s}^2$ . L'unité pratique pour le microgravimétricien est le milliGal (mGal) ou le microGal ( $\mu\text{Gal}$ ). La valeur de la pesanteur vaut ainsi  $980000000 \mu\text{Gal}$ . Les structures que l'on cherche à détecter pour des latrines du type de Chambord sont de quelques dizaines de  $\mu\text{Gal}$  au plus. Il faut donc être capable de mesurer la pesanteur à mieux que quelques 2 ou 3  $\mu\text{Gal}$  près. Cette sensibilité représente le  $1/500\,000\,000$ ème du champ terrestre !

Le principe de l'instrument, le microgravimètre, est particulièrement simple : il fonctionne avec une masse ( $m$ ) accrochée à un ressort. Ce dernier s'allonge d'autant plus que le poids  $P=mg$  est plus important, d'où l'obtention de  $g$  par la mesure de cet allongement. La construction, cependant, est extrêmement délicate. Le ressort se dilate avec la chaleur, aussi la chambre du système doit être thermostatée à mieux que le millième de degré. Par ailleurs, si l'on penche l'instrument, la pesanteur varie comme le cosinus qu'il fait avec la verticale vraie. On doit assurer la verticalité à mieux que la seconde d'arc près ( $1/3600^\circ$ ). Le ressort est en silice fondue, et on imagine aisément qu'il n'est pas facile à fabriquer !

Le microgravimètre dont dispose l'Université de La Rochelle, un « Scintrex CG3-M » permet d'atteindre la précision et la sensibilité requises. Cependant, il ne suffit pas de disposer d'un tel instrument. En effet, le champ de pesanteur, dans l'instrument qui le mesure, est fonction des masses qui voisinent l'appareil. C'est la loi de Newton, dite d'attraction universelle, qui gouverne le phénomène physique que l'on exploite. Tout d'abord, le champ de pesanteur varie très fortement avec l'altitude :  $300 \mu\text{Gal}$  de diminution pour 1 m d'élévation. Cela implique que si l'on veut mesurer d'infimes variations, il faudra corriger les mesures de l'altitude de l'instrument, altitude qui devra être connue à mieux que quelques mm près ! Ensuite, une cavité est détectée grâce à l'absence de masse qu'elle représente dans un milieu par ailleurs assez homogène.

Homogène ? C'est du moins l'hypothèse que l'on doit faire pour interpréter les résultats. Mais nous ne sommes pas en terrain plat ! Toutes les structures du château, murs, tours etc. agissent par attraction sur la masse interne du gravimètre. L'inhomogène n'est pas tant sous l'instrument qu'au-dessus de celui-ci. Afin de cerner la contribution de la cavité seule, il faut calculer (nous disons « modéliser ») les attractions de toutes les masses proches de la cible. Ensuite, il faut retirer ces contributions des mesures brutes. D'autres causes affectent le champ de pesanteur, comme les forces dues aux planètes (celles même qui causent les marées). Elle atteignent une centaine de  $\mu\text{Gal}$  et varient constamment dans la journée.

Enfin, l'instrument n'est pas parfait. Le ressort en silice fondue, qui soutient la masse d'épreuve de l'instrument, se déforme lentement dans le temps. Il en résulte une dérive réputée plus ou moins linéaire dans une journée,

que l'on mesure par retours horaires à une station de référence, arbitrairement choisie sur le prospect, station qui sert de « base ».

En fin de compte, les procédures à appliquer tant sur le terrain (mesures des altitudes, repérage des masses, estimation des densités de ces corps, corrections de marée de dérive) qu'au retour au bureau (modélisation des effets attractifs des structures) sont extrêmement complexes et délicates. Pour les modélisations, il convient d'estimer les attractions de toutes les structures massives avoisinant la mesure et ce à chaque point de mesure. Comme seules les attractions dues aux structures élémentaires (sphère, cube etc.) sont simples à évaluer, il faut découper les tours et autres murs en « tranches » élémentaires, dont on calcule les effets individuels avant de les additionner. Il faut, dans ce processus, tenir compte des dénivelés, non seulement en terme de variation d'altitude, mais également de structures attirantes : une simple dalle modifie le résultat.

Pour corriger les mesures brutes effectuées dans le château, il a fallu plus de deux cents heures de travail, passées à modéliser plusieurs centaines d'objets individuels qui sont autant de parties du tout qui constituent une tour et même les lapidaires qui y sont entreposés ou exposés. Pour la Tour de Parme, 118 mono-structures ont été nécessaires. Pour celle du Chaudron, et du fait des niveaux variables sur la zone prospectée, c'est 886 structures qui ont été nécessaires, sous la forme de parallélépipèdes ou de cylindres élémentaires !

Nous espérons que ce travail important, relevant plus de la recherche que d'un service industriel classique, contribuera à faire connaître et aimer l'histoire du château. En tout cas, il a le mérite de nous avoir mobilisé sur des difficultés techniques insoupçonnées. Pour finir, un nouveau programme de modélisation, mieux adapté à l'élaboration de modèles complexes, est sorti de nos neurones (lesquels travaillent en équipe !). Il a été élaboré après le gros du travail. Nul doute qu'il servira dans le futur.

Nous remercions l'équipe « latrines » du château, en particulier Dominic Hofbauer et Jean-Sylvain Caillou, pour leur accueil chaleureux et leur bonne humeur. Souvenir impérissable !

### Considérations générales

Dans un premier temps, il convient d'avoir une idée de ce que l'on va devoir mesurer. On effectue donc une modélisation en prenant en compte des dimensions réalistes pour les cavités. Désignant par  $L$  et  $l$  les longueurs selon  $(x,y)$  et  $h$  la hauteur d'une cavité, nous avons effectuée le calcul pour cavités voisines de dimensions respectives :  $(L, l, h)$  égales à  $(5, 7, 2.5)$  et  $(2.5, 5, 2)$  (en mètres). On a supposé que le toit des cavités se situait à 1 m de profondeur sous le sol. Une plate-forme et une tour cylindriques constituent l'environnement de cette modélisation.

La **Figure 1** montre le positionnement relatif de ces structures et surtout l'anomalie produite, négative (plus exactement en creux) relativement à son voisinage, comme attendu. La cavité la plus grande, qui fait presque 90 m<sup>3</sup>, est facilement détectée. L'amplitude atteint pratiquement 0.08 mGal (80 µGal). La plus petite, de volume égal à 25 m<sup>3</sup>, ne produit qu'un faible signal, inférieur à une vingtaine de µGal. On ne peut être certain de discerner une telle anomalie dans des données réelles que si d'innombrables précautions ont été prises.

Observons également les dimensions des anomalies proprement dites. Afin de bien les représenter, une maille de mesure d'au plus 2 m est nécessaire, sous peine de « passer à côté ». Sur le site de Chambord, le maillage utilisé sera bien de cet ordre de grandeur, mais non régulier : il faut s'adapter aux couloirs, aux murs.

### Prospection sur la Tour dite « Robert de Parme » (aile royale)

La **Figure 2** donne la carte obtenue à partir des mesures brutes (corrigées néanmoins de la dérive instrumentale et des forces de marée). On peut certes y lire une anomalie négative (en creux), mais il est difficile d'en déterminer le niveau de référence. En outre, comme indiqué plus haut, il faut connaître la contribution des structures et la retirer, sinon comment savoir si ce ne sont pas les infrastructures connues qui la créent ?

C'est sur la **Figure 3a** qu'est représentée l'attraction des structures du château. Le champ gravimétrique est calculé même à l'intérieur des structures. Sur la **Figure 3b**, on donne l'anomalie interpolée mais à partir des valeurs anomaliques données uniquement aux points de mesure. C'est par soustraction de ces données aux seuls points de mesure et des données brutes aux mêmes points que l'on obtient le champ final, dont la représentation est donnée sur la **Figure 4**.

La **Figure 5**, pour finir, replace la carte géophysique dans son contexte architectural.

## Interprétation

Une régionale, notable sur la droite de la **Figure 4**, (en rouge), est due aux structures non prises en compte à l'extérieur du secteur. Etant quasi plane, elle ne gêne pas l'interprétation.

Une belle anomalie négative apparaît pour  $x$  compris entre  $-4$  et  $-2$  et  $y$  compris entre  $+3$  et  $+6$  (environ). Relativement à un niveau moyen pris vers  $82.49$  mGal, elle représente une cinquantaine de  $\mu\text{Gal}$ . Il y a de fortes chances que l'on ait là, à l'aplomb de cette anomalie, les latrines recherchées dans cette tour. La cavité supposée se situe dans la salle d'exposition consacrée aux selles de cheval.

Il est malheureusement impossible de savoir si cette cavité est faite de deux parties. On peut toutefois, à l'aide d'une formule dite « d'excès de masse », chercher à en connaître le volume. On prévoit de la sorte un volume compris entre  $8$  et  $14$  m<sup>3</sup> de vide (partie non comblée).

Par ailleurs, on peut faire une estimation de la profondeur du centre de la cavité. On obtient environ  $2$  m. Comme il n'est pas possible au géophysicien de déterminer la forme précise de la cavité, il est difficile d'estimer à quelle profondeur le toit de la cavité serait rencontré : probablement  $1$  m à  $1.5$  m ?

## Prospection sur la Tour du Chaudron

La démarche utilisée est exactement la même si ce n'est que, compte tenu des dénivelés en présence, les modélisations ont été particulièrement laborieuses.

La **Figure 6** montre la carte déduite des mesures brutes, corrigées comme précédemment. Sur la **Figure 7**, on a représenté, à titre d'exemple, des résultats de calcul intermédiaires destinés à la modélisation des effets des infrastructures du château. En réalité, plusieurs cartes de ce type doivent être calculées, pour chaque niveau de mesure (puisque'il existe des dénivelés entre salles ou entre salles et couloirs).

La **Figure 8** donne le détail de la modélisation et de l'extrait qui en est fait aux points de mesure pour la grande salle. Sur la Figure 9, enfin, on a représenté l'anomalie obtenue après l'ensemble des traitements, et sur la Figure 10, la localisation par rapport aux structures architecturales.

## Interprétation

Il existe à nouveau une anomalie notable, sous forme d'un creux, à cheval entre la grande salle et l'annexe. Elle est bien indiquée sur la Figure 10. On trouve un volume de vide compris probablement entre  $10$  et  $15$  m<sup>3</sup>. Si cavité il y a (et c'est bien probable), elle est allongée selon un axe (N-W) - (S-W). Les ordres de grandeurs de profondeur sont les mêmes que pour la Tour de Parme :  $2$  m environ pour le centre de la cavité.

A l'Est, on observe, dans la direction du centre de la tour, un gradient important (en bleu). S'agit-il des prémisses d'une anomalie de cavité plus importante ? Seule une nouvelle prospection, exhaustive dans ce secteur, permettrait de l'affirmer.

## Conclusion

Les géophysiciens pensent avoir détecté deux cavités, dont le volume devrait dépasser les  $10$  m<sup>3</sup>. Cependant, le processus de traitement est particulièrement complexe, et nous ne dirons pas qu'il y a certitude.

Nous suggérons d'effectuer de petits forages (quelques centimètres de diamètre) à l'aplomb des anomalies rencontrées, afin de s'assurer de la présence effective de vides. Le cas échéant, l'utilisation d'un endoscope permettrait une première exploration visuelle des cavités supposées.

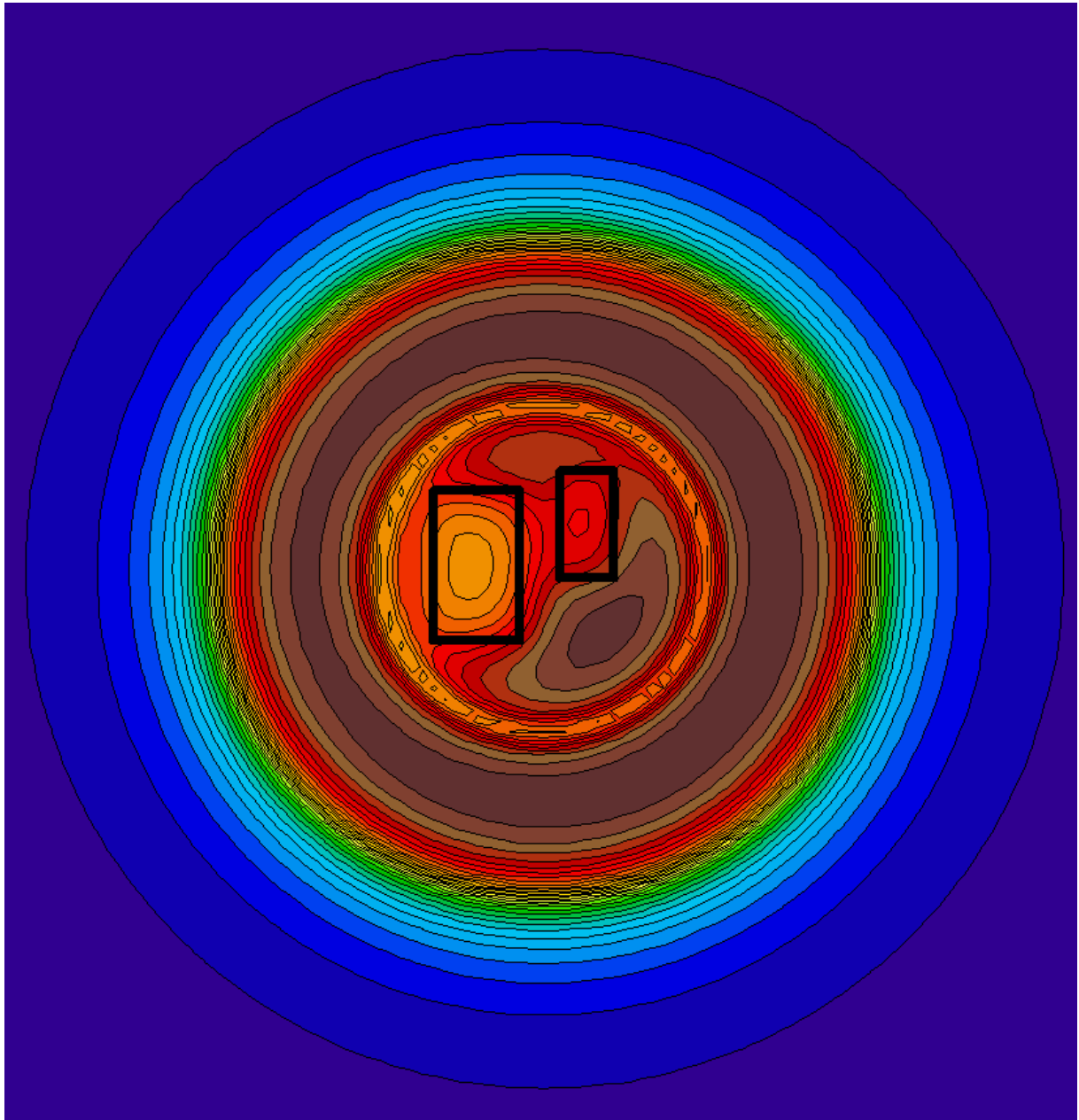
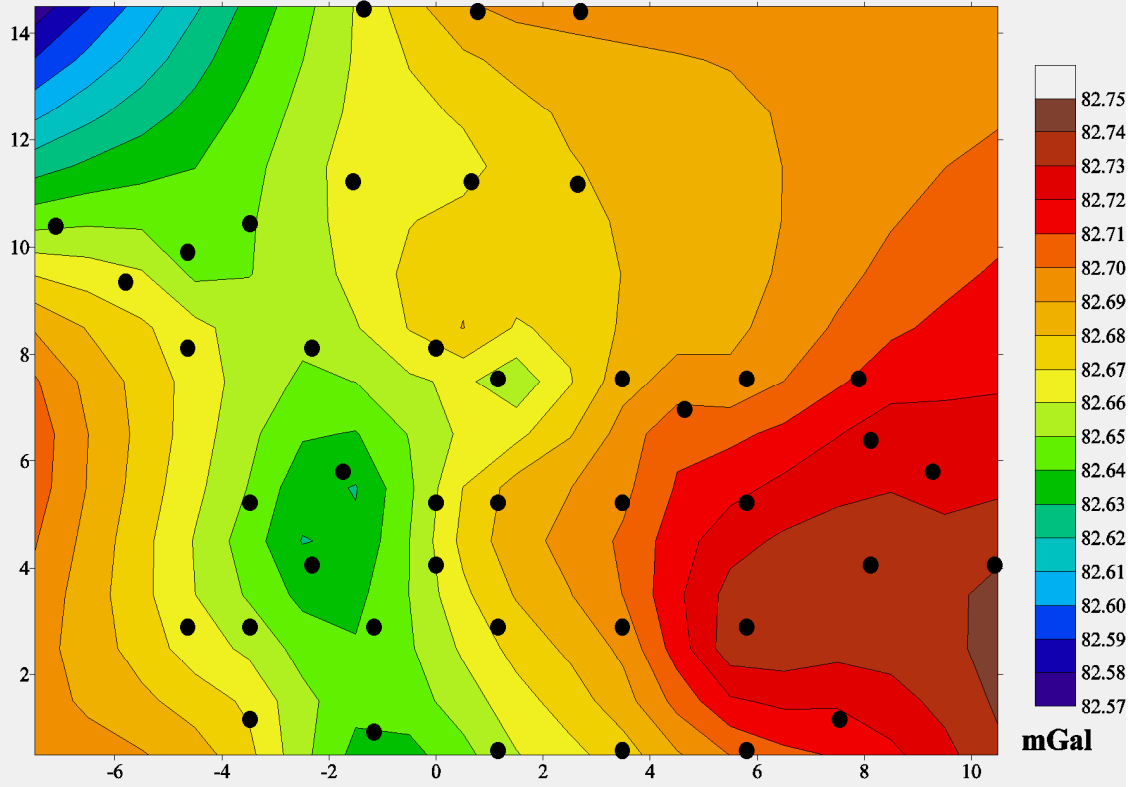


Figure 1

## TOUR ROBERT DE PARME

Figure 2 : anomalie mesurée corrigée  
des effets de dérive instrumentale



• point de mesure

Figure 2

# TOUR ROBERT DE PARME

## modélisation des structures

Figure 3a : Anomalie modélisée du niveau -1 et du RDC

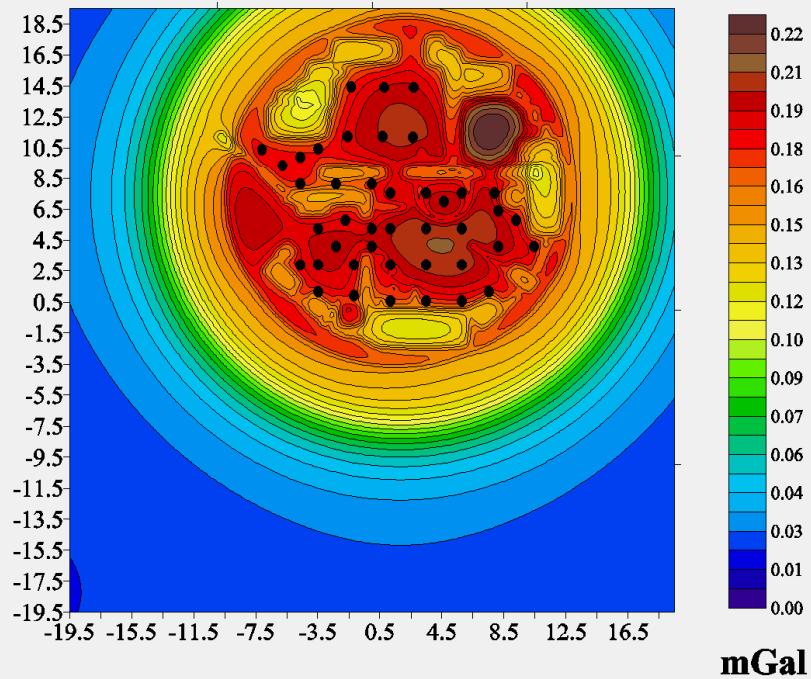
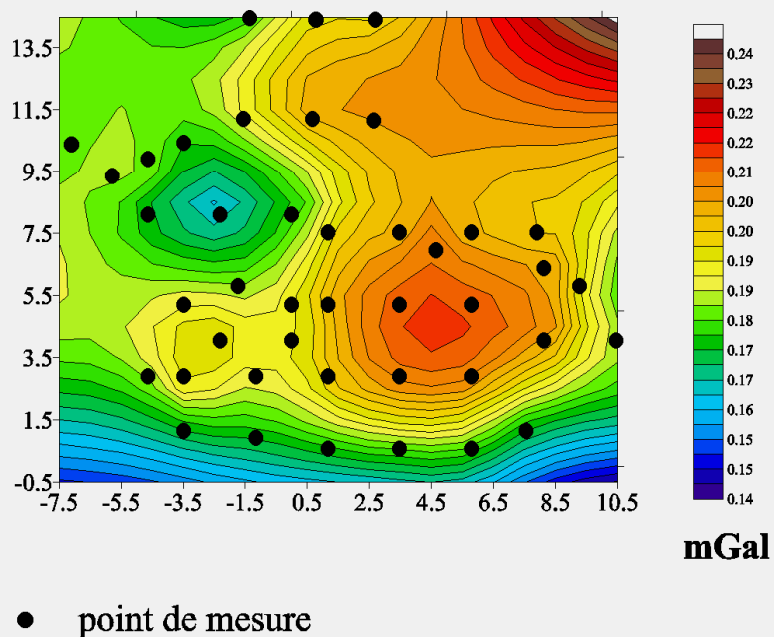


Figure 3b : Anomalie modélisée du niveau -1 et du RDC réduite aux points de mesures



# TOUR ROBERT DE PARME

## Figure 4 : Carte gravimétrique finale

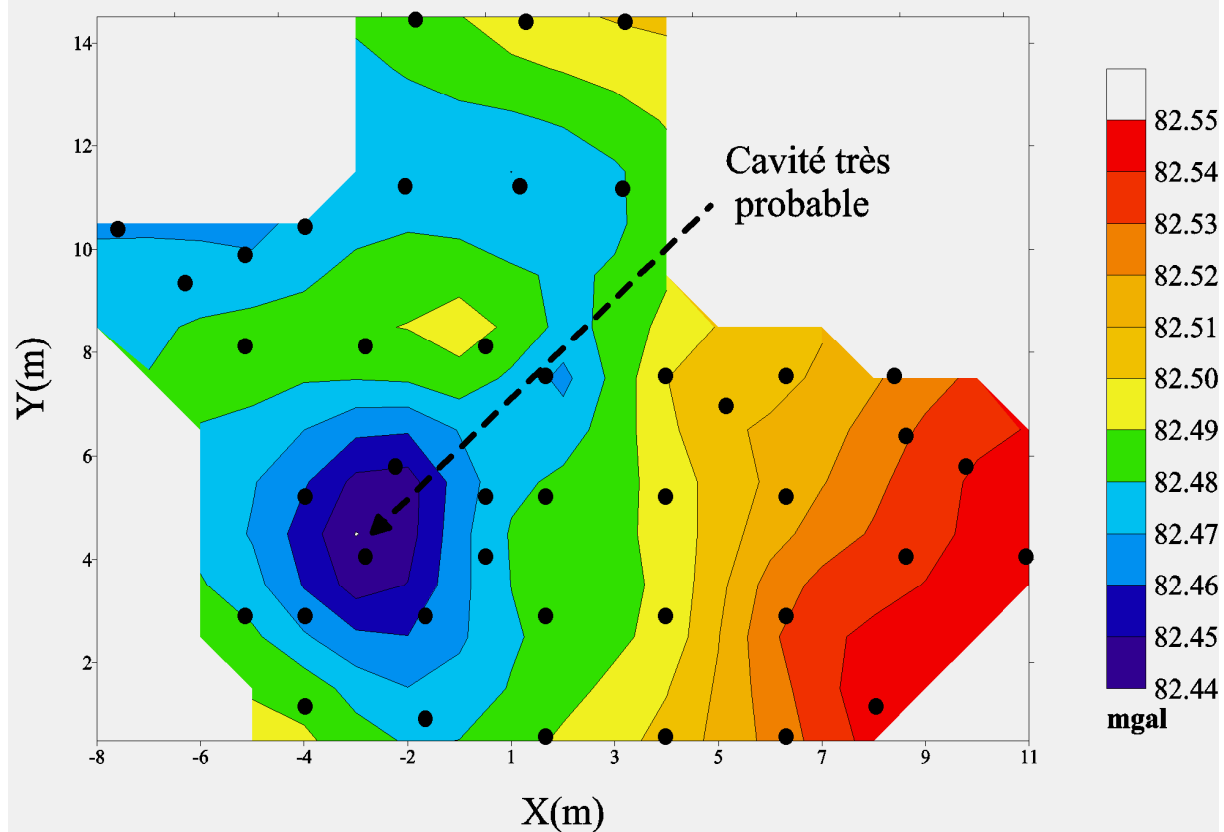


Figure 4

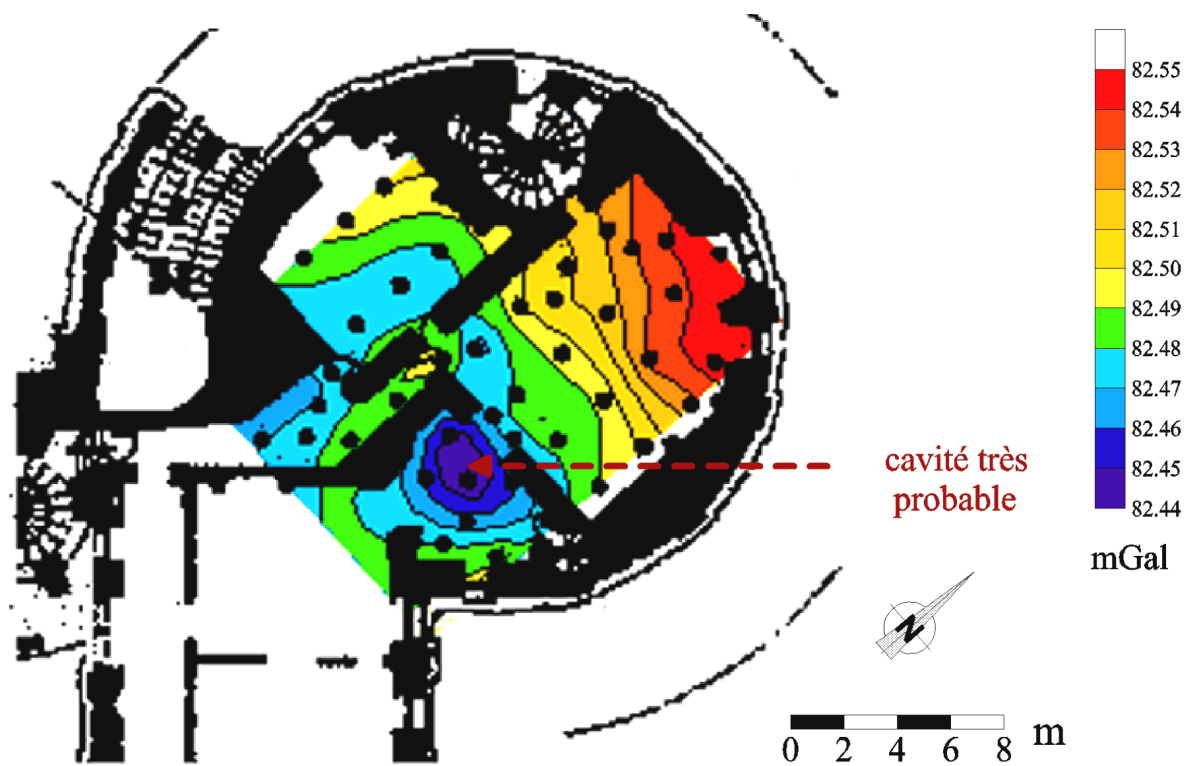


Figure 5



# TOUR DU CHAUDRON

**Figure 6 : Anomalie mesurée corrigée  
des effets de dérive instrumentale**

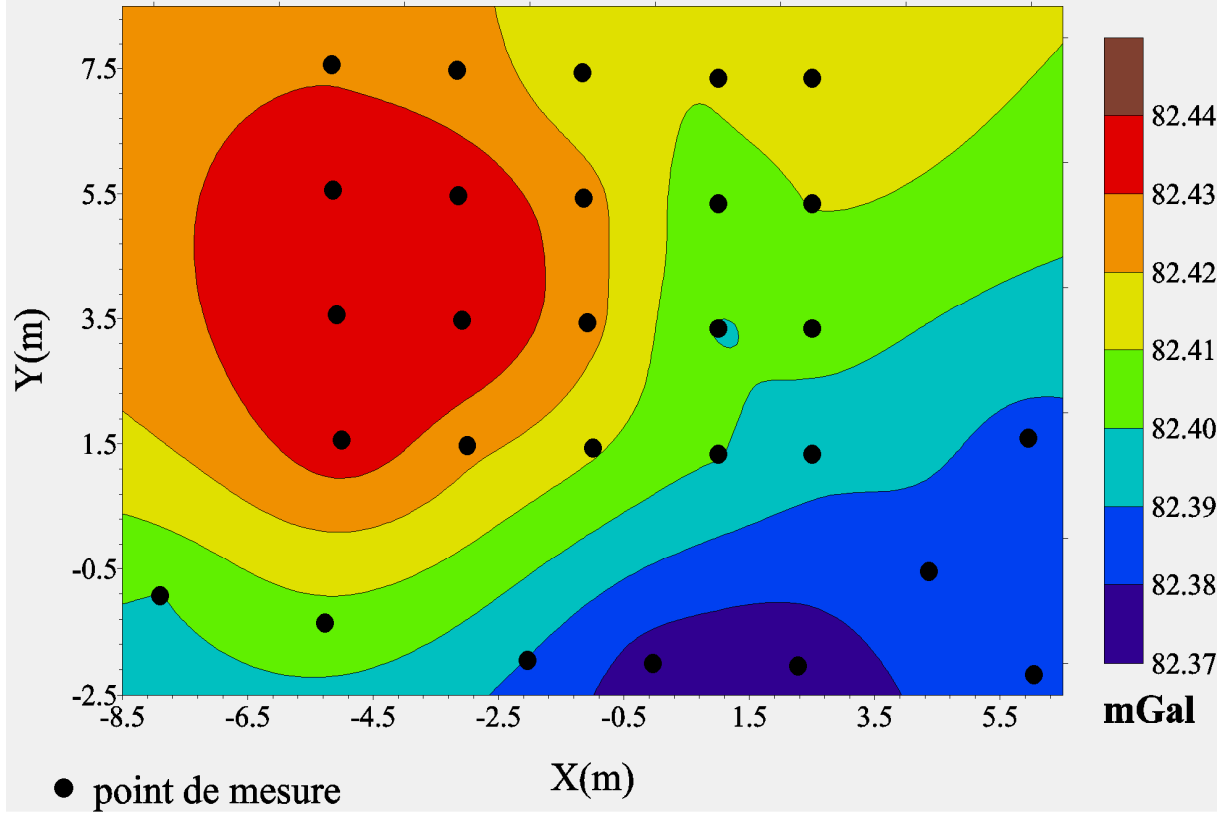
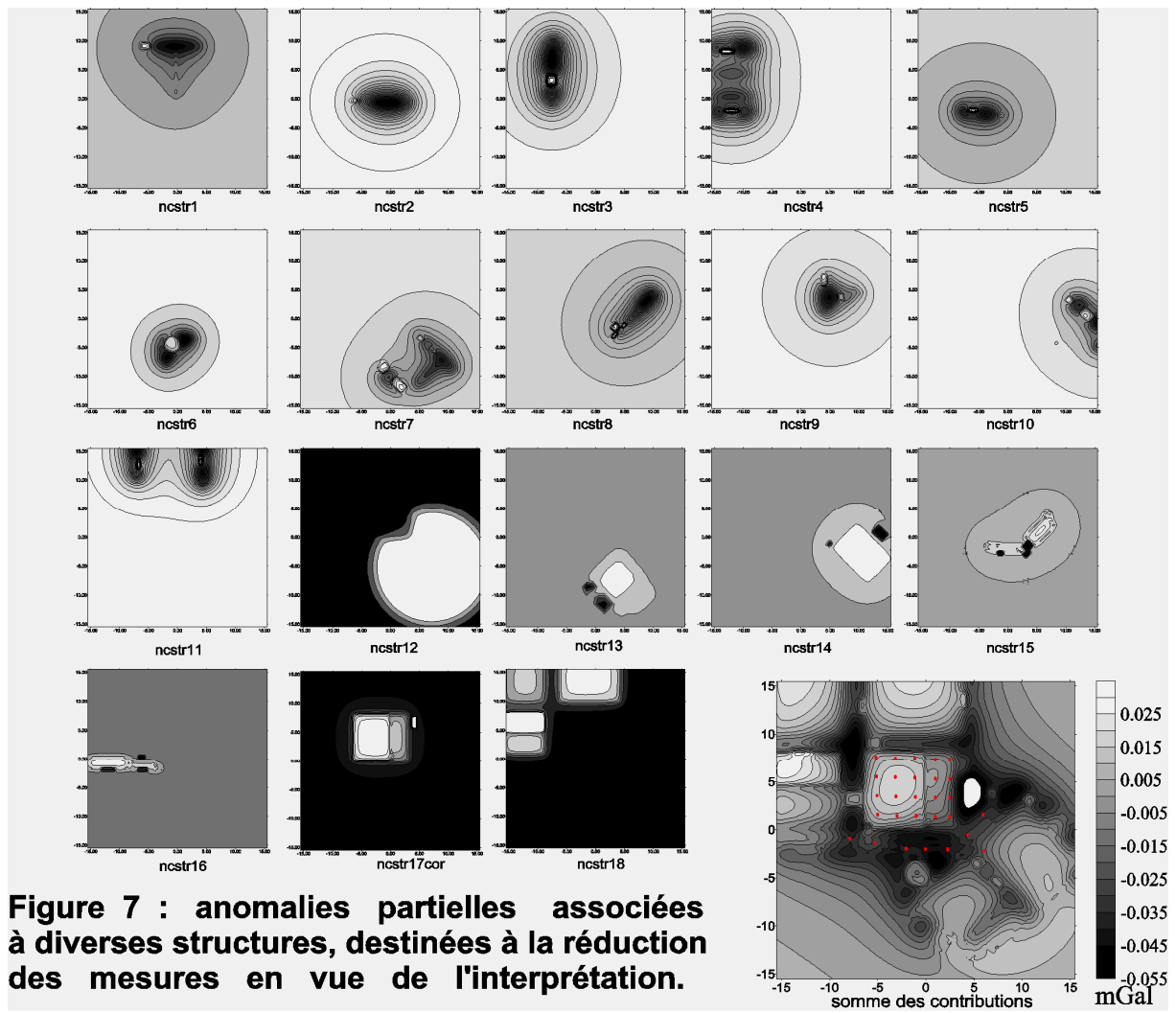


Figure 6

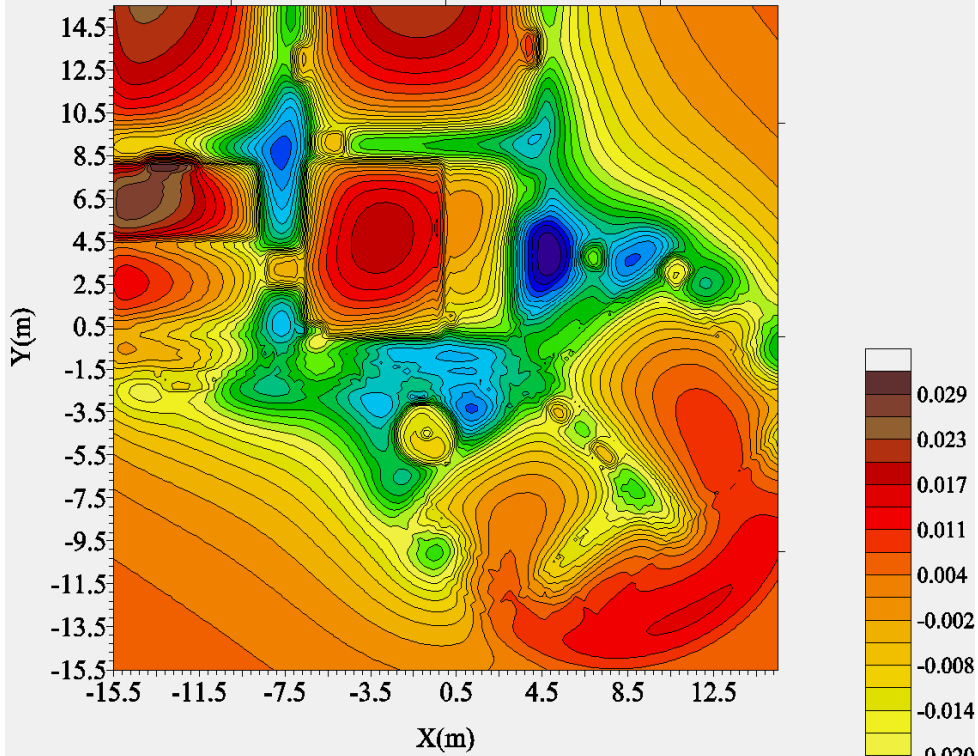


**Figure 7 : anomalies partielles associées à diverses structures, destinées à la réduction des mesures en vue de l'interprétation.**

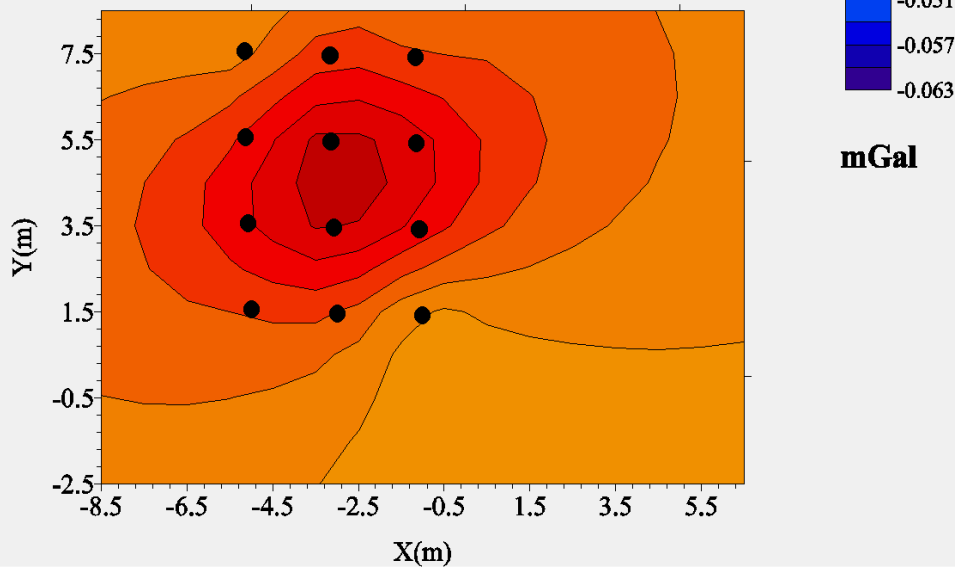
# TOUR DU CHAUDRON

## modélisation des structures

**Figure 8a : Anomalie modélisée au niveau de la grande salle de mesures**



**Figure 8b : Anomalie modélisée au niveau de la grande salle de mesure réduite aux points de mesure**



# TOUR DU CHAUDRON

## Figure 9 : Carte gravimétrique finale

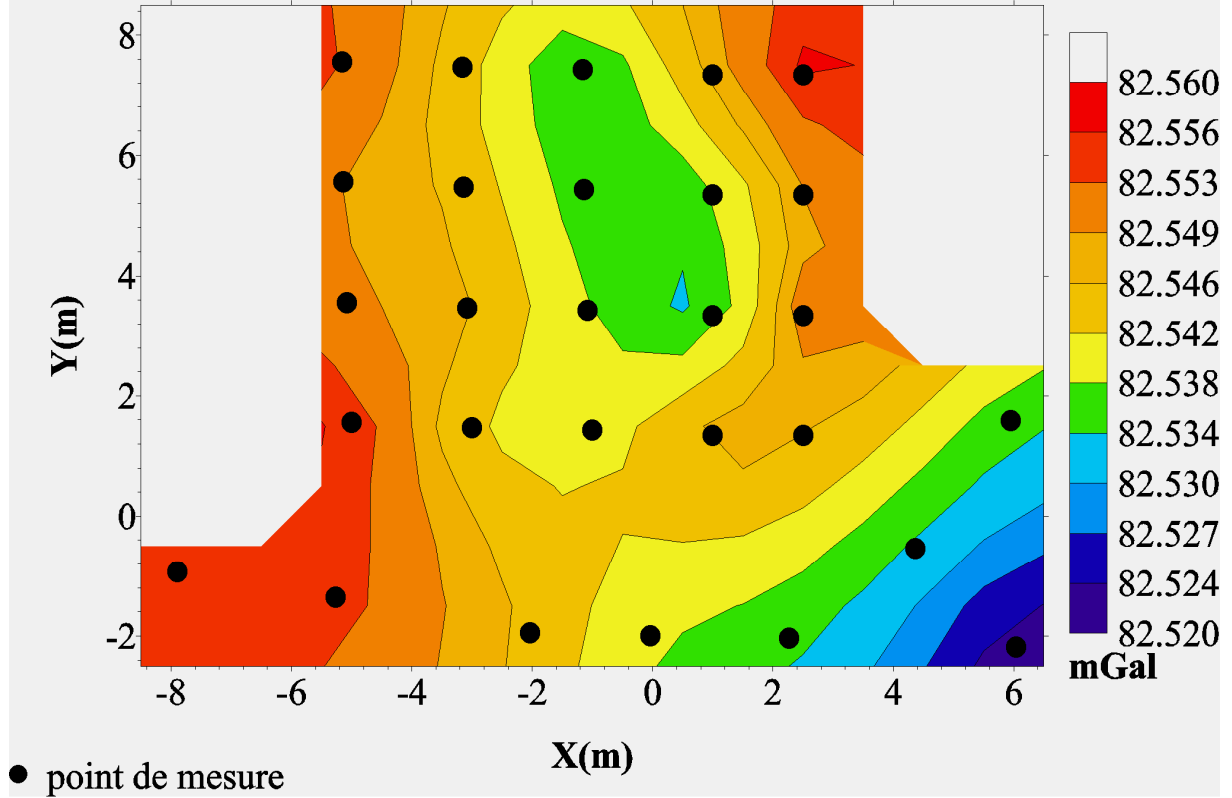


Figure 9

# Site de Chambord - tour du Chaudron- Figure 10 : Anomalie microgravimétrique

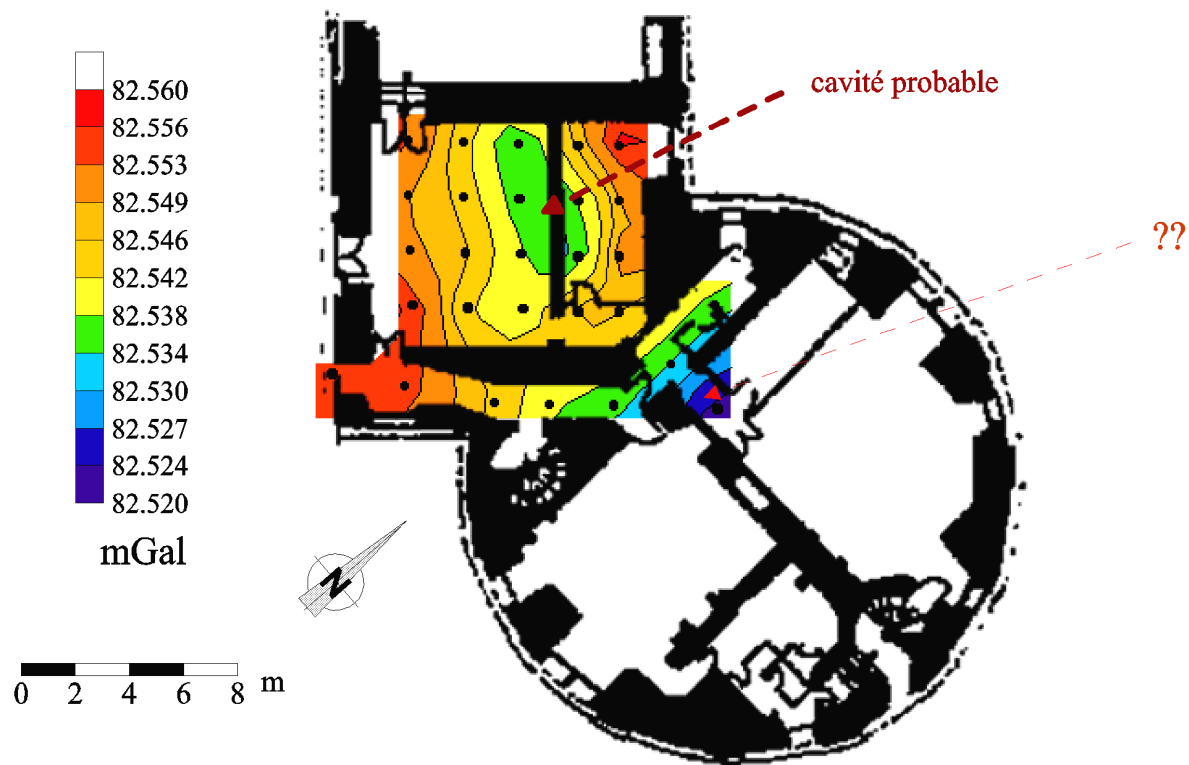


Figure 10