

Nom du candidat : CARONI

Prénoms : Erel

N° Candidat : A BCPST - 47121

Noms des auteurs :

BATOUCHE Agathe

PICHON Léa

THIERRY Margot

Dominante BIOLOGIE

**Dominante GÉOLOGIE**

MIXTE

**BANQUE AGRO-VETO - Session 2022  
T.I.P.E.**

Maximum 6 à 10 pages (illustrations comprises), 20 000 caractères maximum, Times New Roman 12 ou Arial 10, interligne simple espace compris.

**IMPORTANT** : *n'inscrire sur cette couverture aucune référence à l'établissement scolaire*

**TITRE :**

**RÉSUMÉ** (en six lignes) :

Cette étude traite de la prévention des risques associés à l'effondrement des marnières en Seine-Maritime. Trois grandes méthodes géophysiques ont été exploitées dans le but de détecter ces cavités anthropiques. La méthode électrique a été exploitée en parallèle sur un modèle analogique et sur une marnière connue. Sur le terrain, la méthode gravimétrique a également été utilisée. La méthode par détection infrarouge, exploitée sur différents modèles, a permis d'envisager des pistes prometteuses dans la détection de marnières sur le territoire.

**Nombre de caractères** (espaces compris) : 19 911 caractères

Le document, constitué uniquement de feuilles blanches A4, sera simplement agrafé, avec en couverture cette présentation.

Aucune couverture de couleur, cartonnée, rhodoïd ou autre.

*Il ne sera surtout pas relié avec une spirale, ou une réglette.*

# Détection de marnières en Seine-Maritime par des méthodes géophysiques

Le département de la Seine-Maritime est un territoire dont le sous-sol, riche en calcaire, a été beaucoup exploité au XIX<sup>e</sup> siècle par l'homme pour l'amendement des terres agricoles. Pour extraire la craie située à plusieurs mètres de profondeur, des cavités de profondeur variant de 10 m à 20 m ont été creusées sur l'ensemble du territoire normand et constituent ce qu'on appelle des marnières. Les acteurs locaux en dénombrent actuellement entre 60 000 et 80 000 en Haute-Normandie. Ces cavités anthropiques présentent aujourd'hui des risques d'effondrement et d'affaissement importants pouvant engendrer la destruction d'infrastructures communales ou privées situées à proximité. Les marnières représentent ainsi un enjeu de taille sur le territoire et leur détection permettrait de prévenir les risques associés à leur effondrement. Il semble donc nécessaire de les localiser pour pouvoir les recenser et avertir les populations locales de leur présence. Pour cela, on utilise actuellement des méthodes dites destructives comme le forage ou le sondage à la pelle mécanique. Ces méthodes impliquent de connaître au préalable la présence d'une marnière ainsi que son emplacement approximatif. Au contraire, des méthodes géophysiques basées sur la nature du sol commencent à être développées et utilisées car elles pourraient potentiellement permettre de repérer les marnières sans indices préalables et également de balayer une plus grande surface sans détruire les sols. Il serait donc intéressant de s'interroger sur la fiabilité de ces différentes méthodes géophysiques, la nécessité d'un éventuel croisement de ces méthodes pour repérer et prévenir les risques associés à la présence de marnières sur le territoire normand. Une méthode est-elle plus adaptée à un certain type de marnière ? Les matériaux comblant l'ancien puits d'accès à la marnière peuvent-ils permettre de la détecter ?

## Sommaire

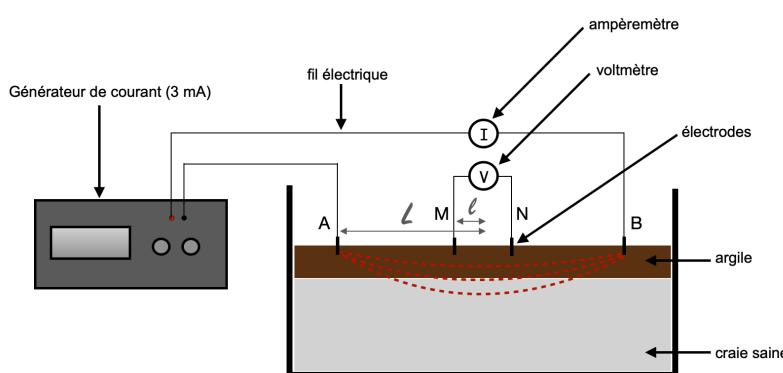
I.	Mesure de la résistivité apparente d'un terrain à 2 couches .....	2
II.	Détection de marnière par méthode électrique et modélisation informatique.....	4
	i) Mesure de résistivité électrique sur le site de Bretteville .....	4
	ii) Modélisation informatique de la marnière du site de Bretteville.....	5
III.	Recherche de marnière par microgravimétrie .....	7
IV.	Modélisation de puits de marnières et détection infrarouge .....	9
	Bibliographie .....	10

## I. Mesure de la résistivité apparente d'un terrain à 2 couches

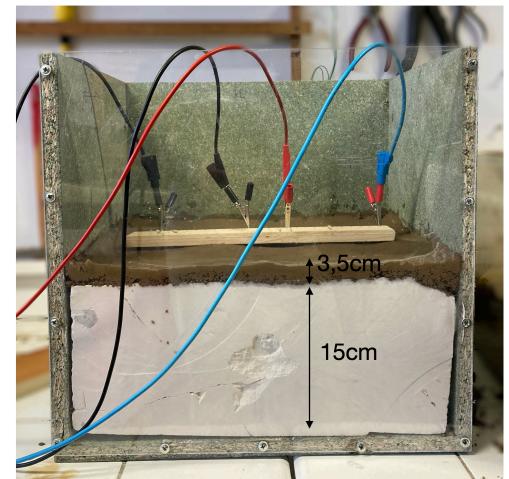
Le sol et le sous-sol conduisent l'électricité car ils contiennent de l'eau et des ions mobiles. Cependant, leurs propriétés conductrices dépendent de la composition et de l'état des roches qui les composent. Ainsi, 2 couches de sols de lithologie différente possèdent une capacité différente à conduire l'électricité et donc une résistivité différente. C'est cette différence de résistivité au sein du sous-sol que nous cherchons à détecter avec la méthode électrique. Cette méthode permet d'explorer le sous-sol à différentes profondeurs en y envoyant un courant connu entre une électrode d'entrée et une électrode de sortie (électrodes A et B *fig.1.a*), ce qui crée des différences de potentiels dans le sol et à sa surface. Mesurer ces tensions en surface pour des distances variables (distance L *fig.1.a*) permet de calculer la résistivité apparente  $\rho_a$  du sous sol traversé via la formule  $\rho_a = \pi \frac{L^2 - l^2}{2l} \frac{V}{I}$  <sup>(2)</sup>, avec V la tension mesurée (en volt), I le courant injecté (en ampère) et L et l les distances d'éloignement des électrodes (en mètres).

Comme la résistivité de l'argile varie de 5 à 100  $\Omega.m$  contre 1000 à 100 000  $\Omega.m$  pour la craie saine <sup>(1)</sup>, nous nous attendons à détecter une augmentation brutale de résistivité apparente à partir d'un certain éloignement des électrodes d'injection A et B (*fig 1.b*) *ie* lorsque le courant atteindra la couche inférieure de craie. La modélisation nous permettra de vérifier la fiabilité de la méthode électrique dans la détection d'un changement de milieu de résistivité différente (argile et craie). Si cette méthode permet de détecter la variation de résistivité lors du passage d'une couche d'argile à une couche de craie, elle pourrait éventuellement détecter la variation de résistivité lors du passage d'une couche de craie à une cavité, qui possède une résistivité très élevée et ainsi détecter la présence d'une marnière au sein d'une couche de craie.

Nous avons donc modélisé un sol calco-argileux composé d'une couche supérieure argileuse de 3,5 cm et d'une couche inférieure de craie de 15 cm. Le montage électrique utilisé est celui de Wenner-Schlumberger (*fig 1.a*) : un courant de 3 mA est injecté dans le sol entre les électrodes A et B puis nous relevons la tension entre les électrodes M et N. Les mesures de tension sont répétées en faisant varier L. Plus la valeur de L est élevée, plus les lignes de courants traversent le sol en profondeur.



*Figure 1.a Schéma du modèle avec le montage Wenner-Schlumberger*



*Figure 1.b Modèle vu de face*

En faisant varier L de 5 cm à 19 cm, nous obtenons les résistivités suivantes :

#### Mesure de la résistivité apparente sur le modèle

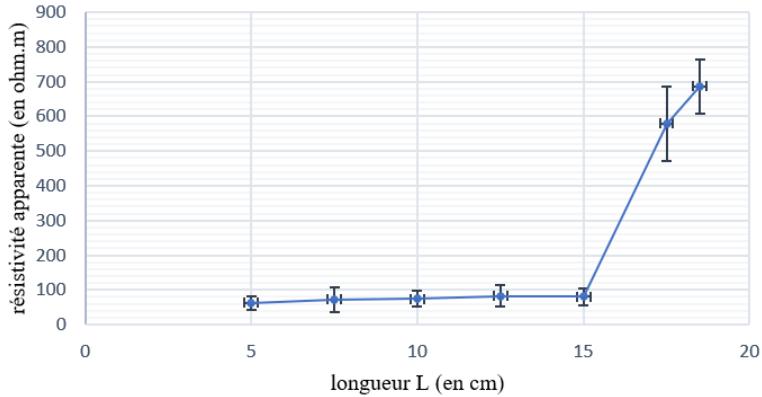


Figure 2. Mesure de la résistivité apparente sur le modèle

Nous observons une rupture nette dans la valeur de la résistivité apparente mesurée pour une valeur de L supérieure à 15 cm (fig 2). Les lignes de courant ont donc atteint la couche de craie située en profondeur et la différence de résistivité des 2 milieux s'est traduite par une augmentation soudaine de la tension V mesurée. On peut alors en déduire la profondeur de la couche de craie à environ  $L/4$  cm<sup>(2)</sup>, c'est à dire entre 3,8 cm et 4,4 cm ce qui est du même ordre de grandeur que la profondeur utilisée de 3,5 cm. La mesure de la résistivité apparente d'un sol via la méthode de Wenner-Schlumberger semble donc être fiable pour pouvoir observer un changement brutal de résistivité apparente, directement lié à la composition du matériau traversé par le courant.

Cependant, le modèle est ici très simplifié et n'intègre pas la totalité des paramètres que l'on observe dans les sols de Seine-Maritime. En effet, nous avons considéré ici un milieu tabulaire, composé de seulement 2 couches homogènes de craie saine et d'argile. En réalité, les couches du sous-sol ne sont pas parfaitement planes et le passage d'une couche à l'autre est bien plus progressif (passage par une couche de craie altérée entre celle d'argile et de craie saine par exemple). De plus les couches ne sont pas parfaitement homogènes et des matériaux inclus dans ces dernières pourraient fausser ou brûler les mesures de résistivité (intrusion d'un matériau très conducteur comme du métal par exemple ou alors une quantité d'eau plus importante qui augmente la conductivité ionique du sol).

Ainsi, sachant que la résistivité d'une cavité est considérée comme infinie, il serait intéressant de voir si un changement de résistivité entre la craie et une cavité serait notable, *i.e.* si la différence entre la résistivité de la craie et celle de l'air est suffisante pour pouvoir être détectée.

*Chaque point représente la moyenne calculée à partir de cinq mesures réalisées pour chacune des longueurs.*

*Les barres verticales représentent l'erreur standard, calculée avec une incertitude type pour chacun des points. Les barres horizontales représentent l'erreur standard, calculée avec une incertitude de type B pour chacun des points.*

## II. Détection de marnière par méthode électrique et modélisation informatique

Dans le cadre de notre étude, nous avons travaillé sur 2 marnières connues : l'une se situant sur une propriété privée à Barentin (49,52491°N, 0,94605°E) et l'autre le long d'une parcelle agricole à Bretteville (49,66275°N, 0,37200°E), deux communes de Seine-Maritime. Les résultats présentés ici concernent la marnière de Bretteville uniquement.

### i) Mesure de résistivité électrique

En association avec une équipe du BRGM, nous avons pu réaliser des mesures de résistivité électrique directement sur le terrain pour pouvoir les confronter avec les résultats obtenus par la modélisation. La marnière étudiée étant déjà connue et cartographiée (contours de la marnière en blanc sur la figure 4), nous avons réalisé un profil électrique (*fig 4, BRET 2*) qui recoupe la marnière en son milieu, du Nord-Est au Sud-Ouest.

Le matériel utilisé est :

- Un résistivimètre : Le SYSCAL TERRA de IRIS instruments®
- 96 électrodes en acier inoxydable
- 4 câbles électriques d'une longueur totale de 240 m
- 2 batteries de 95 Ah qui alimentent le résistivimètre

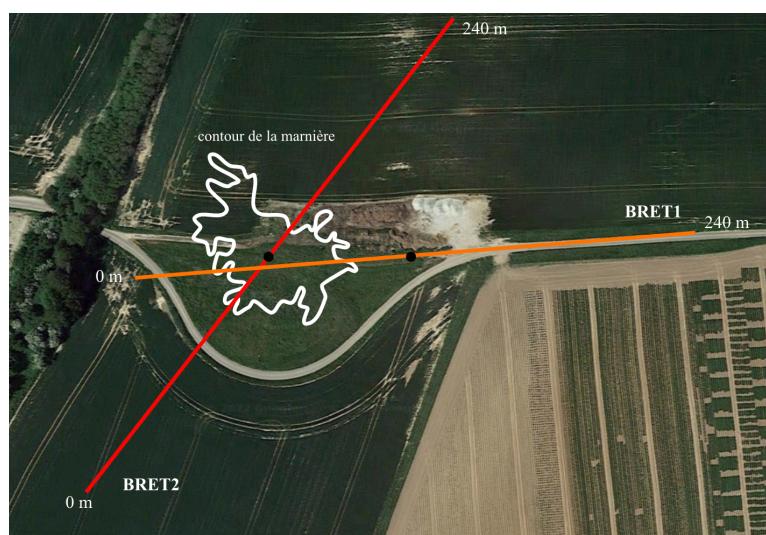


Figure 3.a Résistivimètre et batteries associées



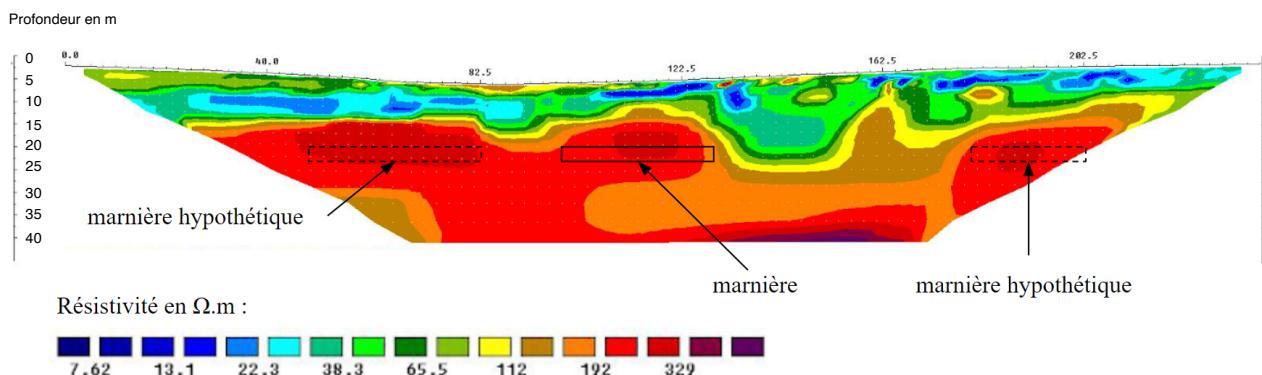
Figure 3.b Détail d'une électrode reliée au câble électrique

Figure 4. Tracés des 2 profils électriques BRET1 et BRET2 réalisés (en rouge) sur le site de Bretteville

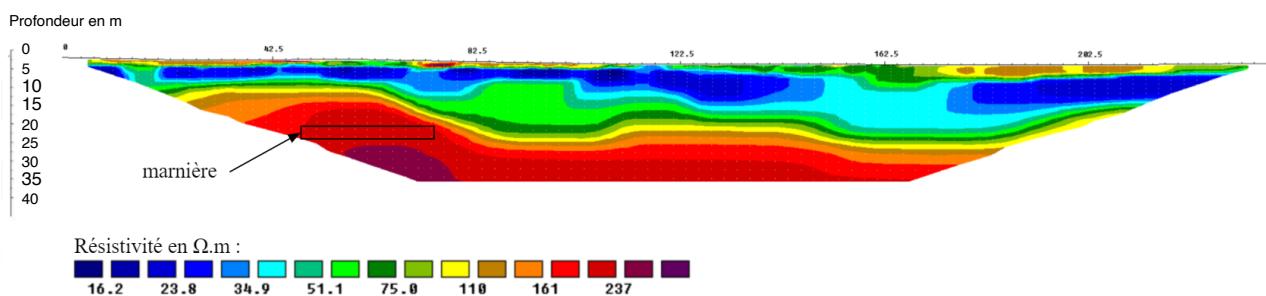


Un courant variant de 0,5 A à 1 A est injecté dans une électrode d'injection et une tension est mesurée entre deux autres électrodes (*fig 3.b*). Le montage utilisé est celui de Wenner-Schlumberger (*fig 1.a*). La résistivité apparente est ensuite calculée via le résistivimètre (*fig 3.a*) à partir du courant injecté, de la tension mesurée et des distances entre les électrodes. Une fois toutes les mesures obtenues, un logiciel d'inversion est utilisé pour obtenir une carte de résistivité.

Avec le montage Wenner-Schlumberger, nous obtenons les cartes de résistivité suivantes :



*Figure 5.a Carte de résistivité pour le profil BRET2*



*Figure 5.b Carte de résistivité pour le profil BRET1*

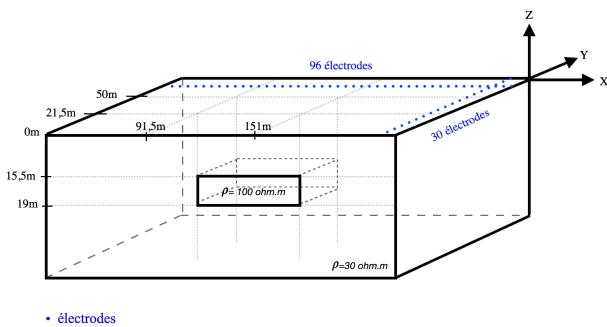
Pour le profil BRET2, (fig 5.a) nous observons une zone où la résistivité est plus élevée (environ 300  $\Omega\text{.m}$ ) là où se situe la marnière, ce qui est cohérent avec les résultats attendus puisque l'air possède une résistivité supérieure à celle de la craie : la marnière est bien détectée. Nous pouvons aussi distinguer deux autres zones où la résistivité est plus élevée et équivaut à la résistivité au niveau de la marnière. Il pourrait s'agir de deux autres marnières non recensées ou, pour la zone entre 49 m et 82 m, d'une partie des galeries qui appartenait à la marnière connue et qui aurait été séparée de cette dernière suite à un effondrement. De plus, pour le profil BRET1 (fig 5.b) la détection n'est pas très fiable car la marnière se situe en bordure de la carte de résistivité (fig 4). Ainsi les variations de résistivité qu'elle entraîne ne sont pas détectées dans leur ensemble.

## ii) Modélisation informatique de la marnière du site de Bretteville

Nous avons décidé de réaliser une modélisation informatique de la marnière du site de Bretteville à partir d'un logiciel spécialisé, Res3dmod. L'intérêt de la modélisation est de déterminer la distance maximale à laquelle nous pouvons réaliser un profil électrique sur le terrain en espérant détecter la marnière, c'est à dire la distance maximale à laquelle la résistivité est significativement différente de celle du terrain pour repérer la marnière. Cette distance nous permettra d'établir une zone de détectabilité de la marnière. Si la zone obtenue est trop large, elle ne permettra pas de localiser précisément la marnière, si elle est trop restreinte, elle diminuera la probabilité de détection (il

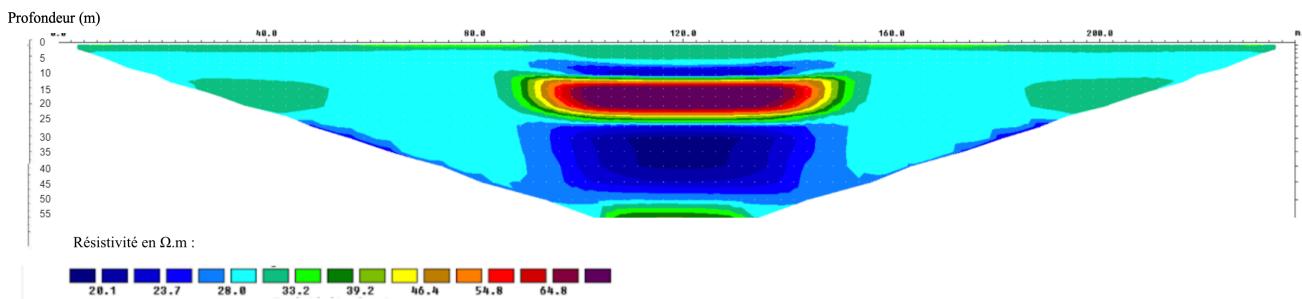
faudrait alors placer le profil juste au-dessus de la marnière). Le logiciel nous permet de simuler un terrain complet dans lequel se trouverait la marnière de Bretteville, puis de réaliser des coupes de résistivité apparente comme celles obtenues sur le terrain. Il s'agit ensuite d'inverser les données pour obtenir une carte de résistivité : nous utilisons pour cela le logiciel d'inversion Res2dinv en y insérant nos données modélisées. Nous pourrons alors comparer la carte modélisée et celle réellement obtenue sur le terrain (*fig. 5.a et 5.b*).

*Figure 6.a Vue en 3D du terrain modélisé*



Nous modélisons un terrain uniforme ( $\rho=30 \Omega.m$ ) comportant un pavé situé entre 15,5 m et 19 m de profondeur auquel on assigne une résistivité élevée ( $\rho=100 \Omega.m$ ) pour modéliser la marnière. On place ensuite 96 électrodes espacées de 2,5 m sur l'axe x et 30 électrodes sur l'axe y. Nous réalisons des coupes fictives de résistivité apparente parallèles à l'axe x. Nous effectuons un premier profil recoupant la marnière en son centre pour étudier la précision de détection en profondeur mais aussi la précision de la localisation selon les axes x et y.

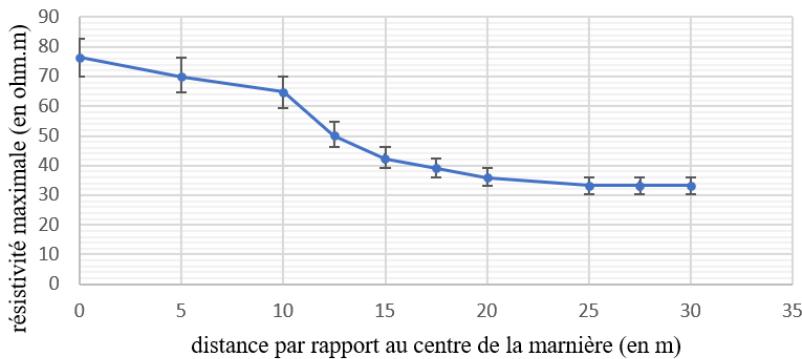
Avec un modèle Wenner-Schlumberger et après inversion nous obtenons la carte de résistivité suivante (*fig 6.b*):



*Figure 6.b Carte de résistivité d'une coupe parallèle à l'axe x pour y=35m*

Nous observons une zone située entre 100 et 145 m selon l'axe x et entre 9,8 et 22 m de profondeur où la résistivité atteint 80  $\Omega.m$ . Ainsi, nous retrouvons la position de la marnière sur l'axe x (position attendue entre 91,5 m à 151 m) mais pour ce qui est de la profondeur, la position obtenue est plus imprécise (profondeur attendue de 15,5 m à 19 m). Pour évaluer l'influence de la marnière sur la résistivité du terrain qui l'environne et ainsi déterminer jusqu'où nous pouvons détecter ses effets, nous réalisons une succession de coupes parallèles à l'axe x pour y allant de 0 m, centre de la marnière, jusqu'à 30 m.

Figure 6.c : Évolution de l'influence de la marnière sur la résistivité en fonction de la distance au centre de la marnière



Chaque point représente la résistivité maximale due à l'effet de la marnière.

Les barres verticales représentent l'erreur de lecture sur la valeur de la résistivité à partir de la carte de résistivité.

Sur le graphique (fig 6.c) nous pouvons constater que lorsque la distance au centre de la marnière est supérieure à 17 m, la résistivité maximale obtenue est déjà divisée par deux et à partir de 25 m l'effet de la marnière n'est plus visible puisque la résistivité maximale vaut  $33 \Omega \cdot \text{m}$  dans un terrain où la résistivité vaut  $30 \Omega \cdot \text{m}$ .

Ainsi nous pouvons en déduire que les changements de résistivité du terrain induits par la marnière ne sont détectables que dans un périmètre restreint (une quinzaine de mètres autour du centre de la cavité). De plus, cette méthode ne semble pas convenir pour une localisation précise de la marnière. En effet, la marnière ici prise en exemple est celle de Bretteville et son volume est d'environ  $3100 \text{ m}^3$  ce qui est plutôt conséquent, les marnières ayant un volume moyen de  $250 \text{ m}^3$ <sup>(4)</sup>. Son effet sur la résistivité du terrain est donc d'autant plus important et visible. De plus, nous modélisons la marnière comme une unique cavité alors qu'en réalité celle-ci est composée d'une multitude de galeries modifiant le passage des lignes de courant et donc les valeurs de résistivité apparentes obtenues.

D'après les résultats obtenus sur le terrain et les modélisations informatiques, la détection de marnière par méthode électrique est possible mais ne semble pas suffisante pour localiser précisément une marnière, la zone de détectabilité de la marnière étant trop restreinte. Il serait donc intéressant de croiser cette méthode avec d'autres méthodes de détections géophysiques.

### III. Recherche de marnière par microgravimétrie

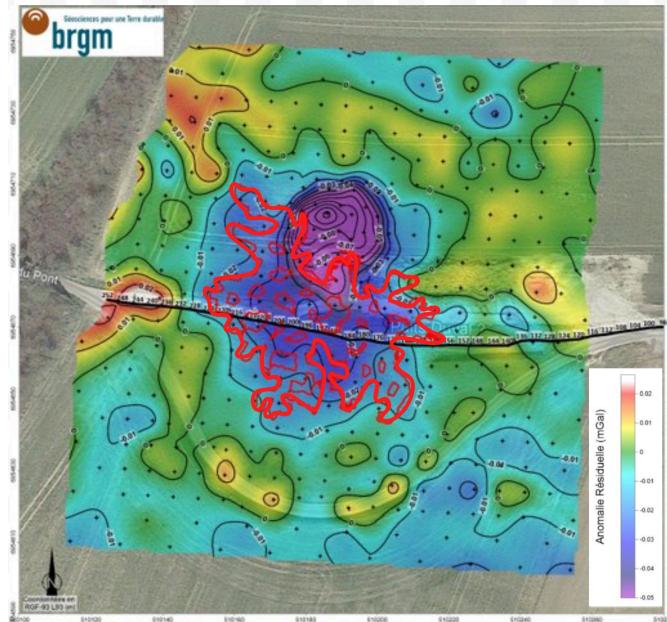
La microgravimétrie est une méthode géophysique qui consiste à mesurer les variations du champ de pesanteur terrestre. Ces variations nous indiquent un changement de densité du sol. Les marnières étant des cavités nous nous attendons à trouver des anomalies négatives, correspondant à un défaut de densité. Lors de notre manipulation sur le site, nous avons utilisé un gravimètre relatif à ressort (fig 7.a) qui utilise un point de référence auquel sont ensuite comparées les mesures effectuées. Une maille contenant l'emplacement des points de mesure à réaliser autour de la marnière est établie. À chaque point, une mesure du champ de pesanteur relatif est réalisée. Pour obtenir l'anomalie résiduelle qui rend compte des variations de masse peu profondes, les mesures de gravimétrie sont rectifiées par de multiples corrections.

On peut alors établir une carte des anomalies résiduelles (fig 7.b).

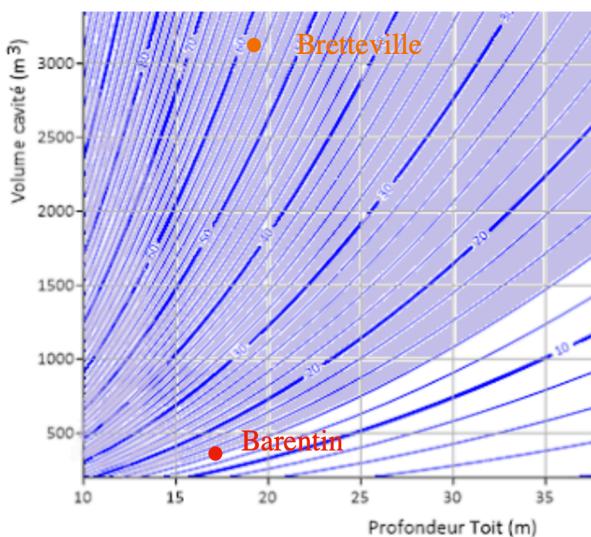


*Figure 7.a Manipulation du gravimètre SCINTREX CG-6 sur le site de Bretteville*

*Figure 7.b Carte des anomalies résiduelles de la marnière de Bretteville* →



La marnière étant déjà connue et cartographiée, les contours ont été dessinés en rouge (fig 7.b). Sur la carte, nous pouvons observer comme prévu une anomalie négative au niveau de la marnière, de l'ordre de  $-40 \mu\text{gal}$  et au nord des anomalies négatives allant jusqu'à  $-50 \mu\text{gal}$  qui sont dues à l'effet d'une décharge à cet emplacement. La méthode gravimétrique semble donc donner de bons résultats puisque les anomalies dues à la cavité sont bien marquées. Cependant, la marnière ici étudiée possède un gros volume ( $3100 \text{ m}^3$ ) et la méthode paraît moins adaptée à des marnières de plus faible volume comme celle de Barentin ( $330 \text{ m}^3$ ) qui se trouve à la limite du seuil de détectabilité<sup>(4)</sup> (Fig. 7.c). La méthode serait alors plus fiable dans la détection de marnières de gros volume comme celle de Bretteville. Ainsi, pour des anomalies de gravité négatives nous pourrions supposer qu'une marnière est présente dans la section de terrain étudiée, puis, confirmer ou réfuter cette hypothèse à l'aide d'autres méthodes géophysiques.

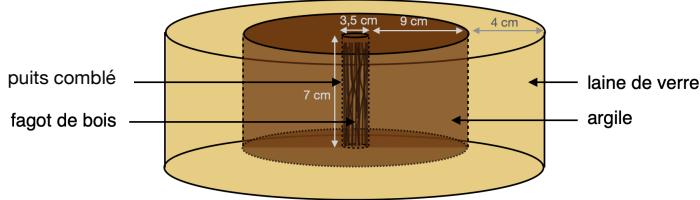


*Figure 7.c : Carte de détectabilité supposée donnant l'effet gravimétrique d'une cavité en fonction de sa profondeur et de son volume.*

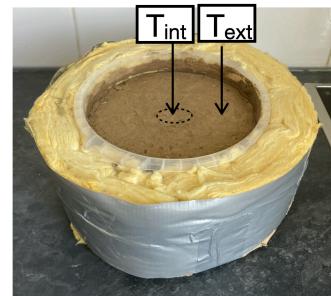
- Les lignes bleues correspondent à des lignes d'égale anomalie de 0 à  $100 \mu\text{gal}$ . Elles représentent l'intensité de l'anomalie.
- La zone bleue correspond à une anomalie gravimétrique attendue supérieure au seuil de détectabilité de  $14 \mu\text{gal}$ . En dessous de ce seuil, la cavité ne sera pas détectable.

## IV. Modélisation de puits de marnière et détection infrarouge

Comme vu précédemment, les méthodes électrique et gravimétrique ne se suffisent pas à elles seules. Il faut donc les recouper avec d'autres méthodes afin d'obtenir une meilleure probabilité de détection. L'une des méthodes géophysique pouvant être utilisée est la thermographie infrarouge. Elle permet de repérer les puits comblés via l'inertie thermique différentielle des matériaux du puits<sup>(3)</sup>. Nous avons donc modélisé 2 puits de marnière de diamètre de 3,5 cm avec 2 matériaux de comblement différents communément utilisés pour combler les puits de marnière<sup>(3)</sup> : fagot de bois (*fig 8.a et b - modèle A*) et gravier (*modèle B*). Le bac d'argile dans lequel se trouve le puits comblé est isolé avec de la laine de verre afin de limiter les pertes thermiques sur les bords. Un troisième bac sans puits est également créé. Nous plaçons les 3 modèles dans un réfrigérateur à 10° pendant 1 nuit puis nous les amenons dans un environnement chaud (entre 24°C et 26°C) pour modéliser un changement thermique nuit/jour. Avec une caméra infrarouge nous réalisons plusieurs clichés avec un intervalle de temps régulier de 5 minutes. L'expérience a été répétée 4 fois. L'anomalie de température dépend de la hauteur du bouchon de la marnière<sup>(3)</sup> et de la nature du bouchon. La quantité d'air présente dans le bouchon et de la diffusivité thermique du remblai modifient l'anomalie de température.



*Figure 8.a Schéma du modèle A vu de face*

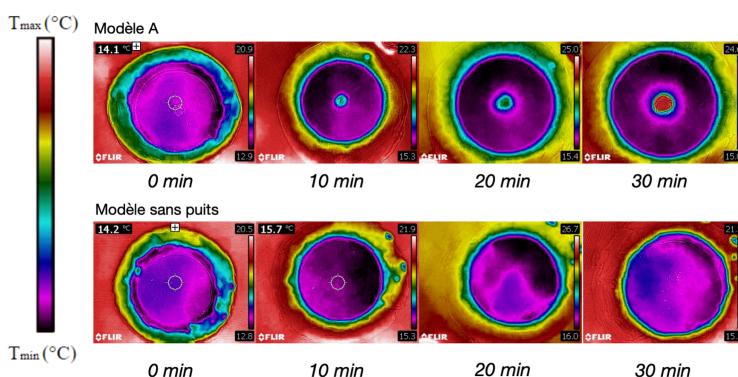
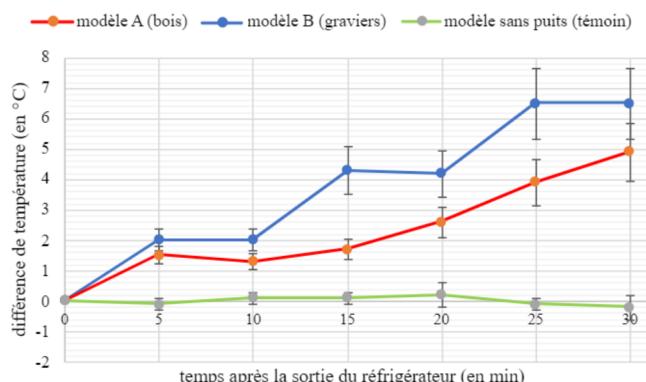


*Figure 8.b Photographie du modèle A vu de face et localisation des prises de températures*

*Figure 8. c Évolution du différentiel de température  $T_{int}-T_{ext}$  après sortie du réfrigérateur*

Chaque point représente la différence de température moyenne entre le centre du puits et un point situé à l'extérieur du puits, calculée à partir de quatre mesures.

Les barres verticales représentent l'erreur standard, calculée avec une incertitude type pour chacun des points.



*Figure 8.d Photographies du modèle A et du modèle sans puits à différents intervalles de temps (expérience n°3)*

Nous observons des anomalies de température positives au niveau des puits dans les 2 modèles (*fig 8.c*), les 2 puits se réchauffent plus rapidement que l'encaissant. Dans les 2 cas, les anomalies sont suffisamment élevées pour être visibles sur les photographies infrarouges dès la 10<sup>ème</sup> minute (*fig 8.d*). Ainsi, cette méthode de détection serait la seule qui permettrait de détecter une marnière dans un périmètre sans connaître au préalable sa position précise ou supposée (survol d'une zone par drone ou avion équipé d'une caméra infrarouge). Néanmoins, les matériaux de comblement diffèrent d'une marnière à une autre et ne sont pas systématiquement composés de bois ou de gravier. De plus, l'épaisseur de la couche de terre qui recouvre les matériaux de comblement du puits pourrait rendre impossible sa détection par infrarouge si celle-ci est trop grande. Enfin, l'anomalie étant plus ou moins marquée selon le matériau de comblement utilisé, nous pouvons alors imaginer des cas pour lesquels le matériau utilisé possède une inertie thermique semblable à celle de l'encaissant, rendant ainsi la détection impossible.

## CONCLUSION

D'après les résultats obtenus, les différentes méthodes utilisées sembleraient détecter la marnière et son puits lorsque sa localisation est déjà connue. Cependant, il paraît difficile de réussir à localiser précisément l'emplacement d'une marnière inconnue en utilisant indépendamment les méthodes. En recoupant les méthodes entre elles, la possibilité de détecter l'emplacement d'une marnière semble toutefois envisageable. En effet, si les méthodes gravimétrique et électrique laissent supposer la présence d'une cavité à un certain emplacement, il serait alors intéressant d'étudier la zone par méthode infrarouge pour détecter un éventuel puits et conclure quant à la présence d'une marnière. À l'inverse, la méthode infrarouge pourrait être appliquée pour découvrir d'éventuels puits sur une vaste zone puis les autres méthodes permettront d'attester ou non de la présence d'une cavité en profondeur du supposé puits. Toutefois, les résultats obtenus par ces différentes méthodes restent très variables, les caractéristiques du terrain étant totalement différentes d'un cas à un autre (topographie, lithographie...). Malgré ces variations, ces méthodes géophysiques semblent prometteuses dans la détection de marnières. Leurs applications pourraient donc permettre de localiser et de recenser une partie des marnières présentes en Seine-Maritime et ainsi, prévenir les risques liés à leur effondrement.

## BIBLIOGRAPHIE

- (<sup>1</sup>) Palacky G.J., “Application of the multifrequency horizontal-loop EM method in overburden investigations”, 1991. Consulté le 14/10/21
- (<sup>2</sup>) Jacques Dubois Et al., *La prospection électrique dans Géophysique*, ISBN 978-2-10-055398-3. Consulté le 23/09/21
- (<sup>3</sup>) Leonard Et al., « Utilisation de la radiométrie infrarouge thermique pour la localisation de marnières en Normandie », 2004. Consulté le 18/11/21
- (<sup>4</sup>) QUILLIEN Grégoire. « Détection des marnières et des puits de marnières par méthodes géophysiques ». Consulté le 16/09/21
- (<sup>5</sup>) IZARD Jean-Louis, « Les matériaux et l'inertie thermique », Juillet 2006. Consulté le 24/02/21

Nous remercions M. Gourry, ingénieur géophysicien, et son équipe du BRGM (DRP - Unité IGT) pour nous avoir encadrées lors de nos manipulations.