

# Amélioration de la connaissance géologique et hydrogéologique du sous-bassin de Marchésieux

hib-2 d7-hia

# Phase 2 : Résultats des investigations géophysiques

Rapport final BRGM/RP-65218-FR Novembre 2015



.89 3740,46 -625.5





# Amélioration de la connaissance géologique et hydrogéologique du sous-bassin de Marchésieux.

# Phase 2 : Résultats des investigations géophysiques

Rapport final

BRGM/RP-65218-FR

Novembre 2015

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2012-2015

B. Vittecoq, T. Jacob, J.M. Baltassat, F. Mathieu, F. Paquet, A. Bitri, K. Samyn et O. Dugué



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



**Mots-clés** : Gravimétrie, sismique, profils électriques, RMP, Marchésieux, faluns de Bohon, Marnes du Bosq d'Aubigny

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Vittecoq B.,** Jacob T., Baltassat J.M., Mathieu F., Paquet F., Bitri A., Samyn K., et Dugué O. (2015) Amélioration de la connaissance géologique et hydrogéologique du sous-bassin de Marchésieux. Phase 2 : Résultats des investigations géophysiques. Rapport final. BRGM/RP-65218-FR.

© BRGM, 2015, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

### Synthèse

e bassin de Sainteny-Marchésieux représente une réserve aquifère particulièrement intéressante à l'échelle du département de la Manche puisqu'il alimente en eau potable 15% de la population du département. Le sous-bassin de Sainteny au nord-ouest (environ 35 km<sup>2</sup>) est exploité à raison de 4 à 5 millions de m<sup>3</sup>/an, tandis que le sous-bassin de Marchésieux, plus vaste (environ 100 km<sup>2</sup>) est actuellement très peu exploité (0.15 Mm<sup>3</sup>/an). Les connaissances disponibles ne permettaient pas d'évaluer précisément l'extension et la nature des différentes formations géologiques en place, ainsi que les potentialités des aquifères associés. L'Agence de l'Eau Seine-Normandie, le Conseil Départemental de la Manche et le BRGM ont ainsi initié en 2012 un projet visant à améliorer la connaissance géologique et hydrogéologique du sous-bassin de Marchésieux et les relations entre aquifères et zones humides. Le présent rapport synthétise les résultats des prospections géophysiques qui ont été réalisées entre décembre 2012 et juillet 2015. Plusieurs méthodes complémentaires ont été employées, chacune avec un objectif précis.

Deux campagnes sismiques ont été réalisées. La première avait pour objectif de définir la profondeur d'investigation envisageable et la résolution des formations de remplissage, en se calant sur le forage carotté de Marchésieux (réalisé par le BRGM il y a une trentaine d'années), recoupant toute la série sédimentaire du bassin jusqu'au socle sous-jacent. Le second objectif était de rechercher une faille supposée séparant les sous-bassins de Sainteny et Marchésieux. Les deux profils sismiques réalisés dans cet objectif ont permis de conclure qu'aucun accident tectonique majeur ne pouvait être observé entre ces deux sous-bassins et qu'un contact de type faille entre les deux sous-bassins était peu probable. Le profil de calage sur le forage carotté a quant à lui permis de mettre en évidence que le toit du Permien, constituant le substratum du sous-bassin pouvait être parfaitement imagé, ainsi que les principales interfaces sédimentaires. Sur la base de ces résultats, une seconde campagne de mesures sismigues a été engagée, et 16.4 km de profils sismiques ont été réalisés, dont notamment un long profil de 14 km recoupant le bassin selon une direction SO-NE. Le contact socle permien/remplissage sédimentaire plio-quaternaire a ainsi pu être mis en évidence sur l'ensemble des profils, ainsi que les différents remplissages sédimentaires. De plus, un des profils sismiques semble montrer le contact entre les faluns de Blehou (aquifère capté dans le sous-bassin de Saintenv) et les formations plio-quaternaires de Marchésieux : ce contact en biseau écarte l'hypothèse tectonique envisagée dans les études précédentes et suggère une morphologie sédimentaire (érosion/dépôts).

Les mesures gravimétriques ont permis de réaliser une carte du toit du permien (ou de la base des formations sédimentaires), en se calant sur les forages ayant recoupé le socle et sur l'ensemble des profils sismiques décrits ci-dessus. Cette carte permet ainsi d'évaluer avec une bonne précision (incertitude de l'ordre d'une dizaine de mètre) l'épaisseur du remplissage sédimentaire (et donc globalement des aquifères associés) et permettra d'améliorer de façon significative les différentes modélisations géologiques et hydrogéologiques et les futures prospections. Cette carte permet également de mettre en évidence que le toit du substratum permien remonte vers le nord-est entrainant un dépôt des formations sédimentaires susjacentes « en biseau ». L'écoulement des eaux souterraines serait ainsi fortement contraint par cette morphologie et les marais (situés entre Saint-André /Saint-Georges de Bohon et Carentan / Saint hilaire Petitville) constitueraient ainsi l'exutoire principal du sous-bassin de Marchésieux. La carte de la base du sous-bassin de Marchésieux obtenue par gravimétrie révèle des contours, des complexités et une structuration insoupçonnée jusqu'alors.

Les profils ou tomographies électriques ont permis une caractérisation plus détaillée du remplissage sédimentaire, en distinguant les horizons argileux et marneux des horizons plus sableux, coquilliers ou de faluns. Ils ont également permis de mettre en évidence que les marais et zones humides, dont les épaisseurs varient entre quelques mètres et une quinzaine de mètres maximum, reposaient systématiquement sur des niveaux très argileux dont l'épaisseur peut atteindre une vingtaine à une trentaine de mètres, les séparant ainsi des aquifères sous-jacents. Enfin, les horizons résistants, correspondant aux sables de Saint-Vigor, identifiés dans le secteur de Raids / Saint-sébastien-de-Raids, tendent à montrer que ce secteur, correspondant à la limite entre le sous-bassin de Sainteny et le sous-bassin de Marchésieux, pourrait constituer une zone préférentielle de recharge de ces deux sous-bassins, comme cela semble également montré par les différentes cartes piézométriques.

Enfin, les sondages RMP présentent d'excellentes conditions de rapport signal/bruit et conduisent à discriminer différents faciès plus ou moins aquifères. Ils ont notamment permis de mettre en évidence que :

- (1) les faluns de Bohon, dont l'épaisseur peut atteindre 80 à 100 m à l'aval du sousbassin (communes de Saint-André et Saint-Georges de Bohon) présentent de très bonnes caractéristiques hydrogéologiques avec des teneurs en eau RMP importantes et de bonnes transmissivités ;
- (2) les marnes du Bosq d'Aubigny dans leur faciès sableux ont également des caractéristiques hydrodynamiques intéressantes. Ces faciès favorables sont observés dans la partie NE alors que des caractéristiques moins favorables définissent un faciès qualifié d'argileux dans la partie SO.
- (3) le rôle d'aquitard des horizons argileux séparant les tourbières et zones humides des aquifères sous-jacent.
- (4) Le rôle d'aquitard du substratum permien vers le Nord-ouest du sous-bassin.

Cette première application de la RMP en Normandie, dans le sous-bassin de Marchésieux, a permis d'esquisser les relations liant les paramètres RMP et les paramètres hydrodynamiques des différents faciès rencontrés et deux relations distinctes ont pu être définies pour les Marnes du Bosq d'Aubigny d'une part et les faluns de Bohon d'autre part.

Les prospections géophysiques réalisées dans le cadre de ce programme ont ainsi permis d'améliorer de façon très significative la connaissance géologique et hydrogéologique de ce secteur et d'apporter des éléments tangibles aux différentes interrogations prévalentes (morphologie du socle, épaisseur et extension des différentes formations sédimentaires, contact entre formations de Sainteny et de Marchésieux, relations aquifères-zones humides, caractéristiques hydrodynamiques). La stratégie d'exploration multi-méthodes appliquée sur le sous-bassin de Marchésieux conduit à une caractérisation ciblée répondant avec efficacité et discernement aux besoins du projet :

- une caractérisation géométrique d'ensemble du bassin est produite en premier lieu à partir de la gravimétrie,
- la caractérisation géométrique (profondeurs et épaisseurs) des différents faciès aquifères et du substrat du bassin est quantifiée avec précision à partir des profils sismiques réflexion qui servent aussi avec les forages profonds à l'étalonnage du modèle gravimétrique,
- les tomographies électriques permettent de préciser l'interprétation des différents faciès aquifères et du substratum,
- les faciès aquifères sont encore précisés par les paramètres RMP qui conduisent à une évaluation de caractéristiques hydrodynamiques étalonnées à partir des résultats des pompages d'essai.

## Sommaire

1. Intro	oduction	15
1.1.	. CONTEXTE GENERAL	15
1.2.	. OBJECTIFS DE L'ETUDE	16
2. Inve	estigations sismiques	17
2.1.	ACQUISITION DES DONNEES	17 17 22 22 24
2.2.	. TRAITEMENT DES DONNEES 2.2.1. Méthodologie 2.2.2. Vitesses sismiques	25 25 27
2.3.	RESULTATS ET INTERPRETATIONS 2.3.1.Résultats 2.3.2.Interprétation	30 30 39
3. Inve	estigations gravimétriques	49
<b>3. Ιηνε</b> 3.1.	ACQUISITION ET TRAITEMENTS	49 49 50 51 52 53 55
3. Inve 3.1. 3.2.	ACQUISITION ET TRAITEMENTS	49 49 50 51 52 55 55 55 59 60 64
3. Inve 3.1. 3.2. 3.3.	ACQUISITION ET TRAITEMENTS	49 49 50 51 52 55 55 55 59 60 64 70
<ol> <li>3.1.</li> <li>3.2.</li> <li>3.3.</li> <li>4. Investion</li> </ol>	ACQUISITION ET TRAITEMENTS	49 49 50 51 52 55 55 55 59 60 64 70 71

4.1.3. Principe de la méthode du panneau électrique       1         4.1.4. Configuration d'acquisition des panneaux électriques       1         4.1.5. Paramètres d'acquisition des mesures       1         4.1.6. Positionnement des mesures       1         4.1.7. Traitement des données       1         4.1.8. Inversion des données avec le logiciel RES2DINV       1         4.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS       1         4.2.1. Coupe de résistivité MAR 1 (Illustration 44 et Illustration 45)       1         4.2.2. Coupe de résistivité MAR 2       1         4.2.3. Coupe de résistivité MAR 3       2         4.2.4. Coupe de résistivité MAR 4       1         4.2.5. Coupe de résistivité MAR 5       1         4.2.6. Coupe de résistivité MAR 6       1         4.2.7. Coupe de résistivité MAR 7       1         4.3. CONCLUSION DES TOMOGRAPHIES ELECTRIQUES       10         5.1. ACQUISITION DES MESURES       10         5.2. TRAITEMENT DES DONNEES       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3. Sondage MARCH4       10         5.3. Sondage MARCH4       10         5.3. Sondage MARCH4       11         5.3.5. Sondage RMP       11         5.3.6. Sondage RMP March 10       11         5.3.7. S	4.1.2. Travaux réalisés	73
4.1.4. Configuration d'acquisition des panneaux électriques       1         4.1.5. Paramètres d'acquisition       1         4.1.6. Positionnement des mesures       1         4.1.7. Traitement des données       1         4.1.7. Traitement des données avec le logiciel RES2DINV.       1         4.1.8. Inversion des données avec le logiciel RES2DINV.       1         4.2.1. Coupe de résistivité MAR 1 (Illustration 44 et Illustration 45)       1         4.2.2. Coupe de résistivité MAR 2       2         4.2.3. Coupe de résistivité MAR 3       2         4.2.4. Coupe de résistivité MAR 4       2         4.2.5. Coupe de résistivité MAR 5       2         4.2.6. Coupe de résistivité MAR 6       2         4.2.7. Coupe de résistivité MAR 7       2         4.3. CONCLUSION DES TOMOGRAPHIES ELECTRIQUES       10         5.1. ACQUISITION DES MESURES       10         5.2. TRAITEMENT DES DONNEES       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3.1. Sondage MARCH6       11         5.3.2. Sondage MARCH6       11         5.3.5. Sondage MARCH8       11         5.3.6. Sondage RMP       11         5.3.7. Sondage RMP March 10       11         5.3.8. Sondage RMP March 10       11         5.4. CARACTER	4.1.3. Principe de la méthode du panneau électrique	74
4.1.5. Paramètres d'acquisition       1         4.1.6. Positionnement des mesures       1         4.1.7. Traitement des données avec le logiciel RES2DINV       1         4.1.8. Inversion des données avec le logiciel RES2DINV       1         4.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS.       1         4.2.1. Coupe de résistivité MAR 1 (Illustration 44 et Illustration 45)       1         4.2.2. Coupe de résistivité MAR 2       1         4.2.3. Coupe de résistivité MAR 3       1         4.2.4. Coupe de résistivité MAR 4       1         4.2.5. Coupe de résistivité MAR 5       1         4.2.6. Coupe de résistivité MAR 6       2         4.2.7. Coupe de résistivité MAR 7       1         4.3. CONCLUSION DES TOMOGRAPHIES ELECTRIQUES       10         5.1. ACQUISITION DES MESURES       10         5.2. TRAITEMENT DES DONNEES       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3. Sondage MARCH1, MARCH2, MARCH7       10         5.3.4. Sondage MARCH4       11         5.3.5. Sondage MARCH5       11         5.3.6. Sondage MARCH5       11         5.3.6. Sondage RMP March 10       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5.	4.1.4. Configuration d'acquisition des panneaux électriques	74
4.1.6. Positionnement des mesures       1         4.1.7. Traitement des données       1         4.1.8. Inversion des données avec le logiciel RES2DINV       1         4.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS.       1         4.2.1. Coupe de résistivité MAR 1 (Illustration 44 et Illustration 45)       1         4.2.2. Coupe de résistivité MAR 2       1         4.2.3. Coupe de résistivité MAR 2       1         4.2.4. Coupe de résistivité MAR 3       2         4.2.5. Coupe de résistivité MAR 4       1         4.2.6. Coupe de résistivité MAR 5       2         4.2.7. Coupe de résistivité MAR 6       2         4.2.8. Coupe de résistivité MAR 7       2         4.3. CONCLUSION DES TOMOGRAPHIES ELECTRIQUES       10         5.1. ACQUISITION DES MESURES       10         5.2. TRAITEMENT DES DONNEES       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3.1. Sondage MARCH6       10         5.3.2. Sondage MARCH6       11         5.3.3. Sondage MARCH6       11         5.3.4. Sondage MARCH8       11         5.3.5. Sondage RMP       11         5.3.6. Sondage RMP March 10       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12 <th>4.1.5. Paramètres d'acquisition</th> <td>74</td>	4.1.5. Paramètres d'acquisition	74
4.1.7. Traitement des données avec le logiciel RES2DINV       1         4.1.8. Inversion des données avec le logiciel RES2DINV       1         4.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS       1         4.2.1. Coupe de résistivité MAR 1 (Illustration 44 et Illustration 45)       1         4.2.2. Coupe de résistivité MAR 2       2         4.2.3. Coupe de résistivité MAR 2       2         4.2.4. Coupe de résistivité MAR 3       2         4.2.5. Coupe de résistivité MAR 5       2         4.2.6. Coupe de résistivité MAR 5       2         4.2.7. Coupe de résistivité MAR 7       2         4.2.8. Coupe de résistivité MAR 7       2         4.3. CONCLUSION DES TOMOGRAPHIES ELECTRIQUES       10         5.1. ACQUISITION DES MESURES       10         5.2. TRAITEMENT DES DONNEES       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3.1. Sondage MARCH1, MARCH2, MARCH7       10         5.3.4. Sondage MARCH3       10         5.3.5. Sondage MARCH4       10         5.3.6. Sondage MARCH5       11         5.3.7. Sondage MARCH8       11         5.3.8. Sondage RMP March 10       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCL	4.1.6. Positionnement des mesures	74
4.1.8. Inversion des données avec le logiciel RES2DINV.       1         4.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS.       1         4.2.1. Coupe de résistivité MAR 1 (Illustration 44 et Illustration 45)       1         4.2.2. Coupe de résistivité MAR 2       1         4.2.3. Coupe de résistivité MAR 2       1         4.2.4. Coupe de résistivité MAR 3       1         4.2.5. Coupe de résistivité MAR 4       1         4.2.6. Coupe de résistivité MAR 5       1         4.2.7. Coupe de résistivité MAR 6       1         4.2.8. Coupe de résistivité MAR 7       1         4.3. CONCLUSION DES TOMOGRAPHIES ELECTRIQUES       10         5.1. ACQUISITION DES MESURES       10         5.2. TRAITEMENT DES DONNEES       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3.1. Sondage MARCH1, MARCH2, MARCH7       10         5.3.2. Sondage MARCH6       11         5.3.3. Sondage MARCH6       11         5.3.4. Sondage MARCH8       11         5.3.7. Sondage RMP March 10       11         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       11         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       11         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       11         5.6. CONCLUSION DES	4.1.7. Traitement des données	75
4.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS       1         4.2.1. Coupe de résistivité MAR 1 (Illustration 44 et Illustration 45)       1         4.2.2. Coupe de résistivité MAR 2       1         4.2.3. Coupe de résistivité MAR 2       1         4.2.4. Coupe de résistivité MAR 3       1         4.2.5. Coupe de résistivité MAR 4       1         4.2.6. Coupe de résistivité MAR 4       1         4.2.6. Coupe de résistivité MAR 5       1         4.2.7. Coupe de résistivité MAR 6       1         4.2.8. Coupe de résistivité MAR 7       1         4.3. CONCLUSION DES TOMOGRAPHIES ELECTRIQUES       10         5.1. ACQUISITION DES MESURES       10         5.2. TRAITEMENT DES DONNEES       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3.1. Sondages MARCH1, MARCH2, MARCH7       11         5.3.2. Sondage MARCH6       10         5.3.4. Sondage MARCH6       10         5.3.5. Sondage MARCH8       11         5.3.6. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.7. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.8. Sondage RMP MARCH 9       11         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12 <th>4.1.8. Inversion des données avec le logiciel RES2DINV</th> <th>75</th>	4.1.8. Inversion des données avec le logiciel RES2DINV	75
4.2.1.Coupe de résistivité MAR 1 (Illustration 44 et Illustration 45)       1         4.2.2.Coupe de résistivité SAY 1       8         4.2.3.Coupe de résistivité MAR 2       8         4.2.4.Coupe de résistivité MAR 3       8         4.2.5.Coupe de résistivité MAR 4       9         4.2.6.Coupe de résistivité MAR 5       6         4.2.7.Coupe de résistivité MAR 5       6         4.2.7.Coupe de résistivité MAR 7       9         4.2.8.Coupe de résistivité MAR 7       9         4.3.CONCLUSION DES TOMOGRAPHIES ELECTRIQUES       10         5.1.ACQUISITION DES MESURES       10         5.2.TRAITEMENT DES DONNEES       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       11         5.3.1. Sondages MARCH1, MARCH2, MARCH7       10         5.3.2. Sondage MARCH6       10         5.3.3. Sondage MARCH6       10         5.3.4. Sondage MARCH5       11         5.3.5. Sondage MARCH8       11         5.3.6. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.7. Sondage RMP MARCH 9       11         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12      <	4.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS	76
4.2.2. Coupe de résistivité SAY 1	4.2.1. Coupe de résistivité MAR 1 (Illustration 44 et Illustration 45)	76
4.2.3. Coupe de résistivité MAR 2       4         4.2.4. Coupe de résistivité MAR 3       8         4.2.5. Coupe de résistivité MAR 4       9         4.2.6. Coupe de résistivité MAR 5       9         4.2.7. Coupe de résistivité MAR 6       9         4.2.8. Coupe de résistivité MAR 7       9         4.3. CONCLUSION DES TOMOGRAPHIES ELECTRIQUES       10         5. Sondages RMP       10         5.1. ACQUISITION DES MESURES       10         5.2. TRAITEMENT DES DONNEES       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3.1. Sondages MARCH1, MARCH2, MARCH7       10         5.3.2. Sondage MARCH4       10         5.3.3. Sondage MARCH5       11         5.3.5. Sondage MARCH4       10         5.3.5. Sondage MARCH5       11         5.3.6. Sondage MARCH6       11         5.3.7. Sondage MARCH8       11         5.3.8. Sondage RMP March 10       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP	4.2.2.Coupe de résistivité SAY 1	81
4.2.4. Coupe de résistivité MAR 3       8         4.2.5. Coupe de résistivité MAR 4       9         4.2.6. Coupe de résistivité MAR 5       9         4.2.7. Coupe de résistivité MAR 6       9         4.2.7. Coupe de résistivité MAR 7       9         4.2.8. Coupe de résistivité MAR 7       9         4.3. CONCLUSION DES TOMOGRAPHIES ELECTRIQUES       10         5. Sondages RMP       10         5.1. ACQUISITION DES MESURES       10         5.2. TRAITEMENT DES DONNEES       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3.1. Sondage MARCH1, MARCH2, MARCH7       10         5.3.2. Sondage MARCH4       10         5.3.4. Sondage MARCH5       11         5.3.5. Sondage MARCH5       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         5.	4.2.3. Coupe de résistivité MAR 2	
4.2.5. Coupe de résistivité MAR 4	4.2.4. Coupe de résistivité MAR 3	87
4.2.6. Coupe de résistivité MAR 5       5         4.2.7. Coupe de résistivité MAR 6       5         4.2.8. Coupe de résistivité MAR 7       5         4.3. CONCLUSION DES TOMOGRAPHIES ELECTRIQUES       10         5. Sondages RMP       10         5.1. ACQUISITION DES MESURES       10         5.2. TRAITEMENT DES DONNEES       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3.1. Sondages MARCH1, MARCH2, MARCH7       10         5.3.2. Sondage MARCH6       10         5.3.3. Sondage MARCH4       10         5.3.4. Sondage MARCH5       11         5.3.5. Sondage MARCH5       11         5.3.6. Sondage MARCH5       11         5.3.7. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.8. Sondage RMP MARCH 9       11         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       11         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       11         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP	4.2.5. Coupe de résistivité MAR 4	90
4.2.7. Coupe de résistivité MAR 6       5         4.2.8. Coupe de résistivité MAR 7       5         4.3. CONCLUSION DES TOMOGRAPHIES ELECTRIQUES       10         5. Sondages RMP       10         5.1. ACQUISITION DES MESURES       10         5.2. TRAITEMENT DES DONNEES       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3.1. Sondages MARCH1, MARCH2, MARCH7       10         5.3.2. Sondage MARCH6       10         5.3.4. Sondage MARCH6       10         5.3.5. Sondage MARCH5       11         5.3.6. Sondage MARCH8       11         5.3.7. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.8. Sondage RMP March 10       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         5.7. WALL       14	4.2.6. Coupe de résistivité MAR 5	92
4.2.8. Coupe de résistivité MAR 7       1         4.3. CONCLUSION DES TOMOGRAPHIES ELECTRIQUES       10         5. Sondages RMP       10         5.1. ACQUISITION DES MESURES       10         5.2. TRAITEMENT DES DONNEES       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3.1. Sondages MARCH1, MARCH2, MARCH7       10         5.3.2. Sondage MARCH6       10         5.3.3. Sondage MARCH6       10         5.3.4. Sondage MARCH5       11         5.3.5. Sondage MARCH5       11         5.3.6. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.7. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.8. Sondage RMP March 10       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         6. Conclusion       12	4.2.7.Coupe de résistivité MAR 6	95
4.3. CONCLUSION DES TOMOGRAPHIES ELECTRIQUES.       10         5. Sondages RMP.       10         5.1. ACQUISITION DES MESURES       10         5.2. TRAITEMENT DES DONNEES.       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3. 1. Sondages MARCH1, MARCH2, MARCH7       10         5.3.2. Sondage MARCH6       10         5.3.4. Sondage MARCH4       10         5.3.5. Sondage MARCH5       11         5.3.6. Sondage MARCH8       11         5.3.7. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.8. Sondage RMP March 10       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         5.7. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.8. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         5.9. CONCLUSION	4.2.8. Coupe de résistivité MAR 7	
5. Sondages RMP	4.3. CONCLUSION DES TOMOGRAPHIES ELECTRIQUES	100
5.1. ACQUISITION DES MESURES       10         5.2. TRAITEMENT DES DONNEES       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3.1. Sondages MARCH1, MARCH2, MARCH7       10         5.3.2. Sondage MARCH6       10         5.3.3. Sondage MARCH6       10         5.3.4. Sondage MARCH3       10         5.3.5. Sondage MARCH5       11         5.3.6. Sondage MARCH5       11         5.3.7. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.8. Sondage RMP MARCH 9       11         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP </th <th>5. Sondages RMP</th> <th> 101</th>	5. Sondages RMP	101
5.2. TRAITEMENT DES DONNEES       10         5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3.1. Sondages MARCH1, MARCH2, MARCH7       10         5.3.2. Sondage MARCH6       10         5.3.3. Sondage MARCH6       10         5.3.4. Sondage MARCH3       10         5.3.5. Sondage MARCH3       10         5.3.6. Sondage MARCH3       11         5.3.7. Sondage MARCH8       11         5.3.8. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.8. Sondage RMP March 10       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         6. Conclusion       12	5.1. ACQUISITION DES MESURES	101
5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP       10         5.3.1. Sondages MARCH1, MARCH2, MARCH7       10         5.3.2. Sondage MARCH6       10         5.3.3. Sondage MARCH4       10         5.3.4. Sondage MARCH3       10         5.3.5. Sondage MARCH5       11         5.3.6. Sondage MARCH8       11         5.3.7. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.8. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.8. Sondage RMP March 10       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         6. Conclusion       12	5.2. TRAITEMENT DES DONNEES	105
5.3.1. Sondages MARCH1, MARCH2, MARCH7       10         5.3.2. Sondage MARCH6       10         5.3.3. Sondage MARCH4       10         5.3.4. Sondage MARCH3       10         5.3.5. Sondage MARCH5       11         5.3.6. Sondage MARCH8       11         5.3.7. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.8. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.8. Sondage RMP March 10       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         6. Conclusion       12	5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP	106
5.3.2. Sondage MARCH6       10         5.3.3. Sondage MARCH4       10         5.3.4. Sondage MARCH3       10         5.3.5. Sondage MARCH5       11         5.3.6. Sondage MARCH5       11         5.3.7. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.8. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.8. Sondage RMP March 10       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         6. Conclusion       12	5.3.1. Sondages MARCH1, MARCH2, MARCH7	106
5.3.3. Sondage MARCH4       10         5.3.4. Sondage MARCH3       10         5.3.5. Sondage MARCH5       11         5.3.6. Sondage MARCH8       11         5.3.7. Sondage RMP MARCH 9       11         5.3.8. Sondage RMP MARCH 9       11         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         6. Conclusion       12         7. Dittingen bits       12	5.3.2. Sondage MARCH6	109
5.3.4. Sondage MARCH3       10         5.3.5. Sondage MARCH5       17         5.3.6. Sondage MARCH8       17         5.3.7. Sondage RMP MARCH 9       17         5.3.8. Sondage RMP March 10       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         6. Conclusion       12	5.3.3. Sondage MARCH4	109
5.3.5. Sondage MARCH5       17         5.3.6. Sondage MARCH8       17         5.3.7. Sondage RMP MARCH 9       17         5.3.8. Sondage RMP March 10       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         6. Conclusion       12	5.3.4. Sondage MARCH3	109
5.3.6. Sondage MARCH8       17         5.3.7. Sondage RMP MARCH 9       17         5.3.8. Sondage RMP March 10       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         6. Conclusion       12	5.3.5. Sondage MARCH5	115
5.3.7. Sondage RMP MARCH 9       17         5.3.8. Sondage RMP March 10       12         5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         6. Conclusion       12	5.3.6. Sondage MARCH8	115
5.3.8. Sondage RMP March 10	5.3.7. Sondage RMP MARCH 9	115
5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES       12         5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         6. Conclusion       12         7. Dit it       14	5.3.8. Sondage RMP March 10	120
5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP       12         5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP       12         6. Conclusion       12         7. Dit it       14	5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES	121
5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP		
6. Conclusion	5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP	121
	5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP 5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP	121 125
7. Bibliodraphie	5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP 5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP 3. Conclusion	121 125 <b> 126</b>

#### Liste des illustrations

Illustration 1 : Lo	ocalisation de la zone d'étude, du sous-bassin hydrogéologique de Marchésieux et représentation des cours d'eau pérennes (BDTOPO)
Illustration 2 – L	ocalisation des profils sismiques haute résolution (SHR, en violet)
Illustration 3 : E	xemple de tir sismique, montrant la distinction entre les ondes sismiques de surface et une onde réfléchie sur une interface géologique
Illustration 4 : G	auche) exemple de dispositif d'enregistrement sismique composé de 48 géophones espacés de 5 m ; Droite) exemple de source sismique de type chute de poids.19
Illustration 5 : Ex	xemple de filtrage fréquentiel appliqué sur un tir sismique. Cette opération permet de mieux faire sortir l'onde réfléchie du bruit ambiant
Illustration 6 : E	xemple de correction NMO appliquée pour la collection cdp=250m avec une vitesse de 1800 m/s. Cette opération permet d'horizontaliser l'hyperbole de réflexion. 20
Illustration 7: Ex	emples de tirs sismiques bruts du profil SHR03 avec application d'un gain de type AGC. Les flèches indiquent : bleue : l'onde P directe; rouge : l'onde P réfractée ; jaune : les réflexions des ondes P ; magenta : les ondes de surface ; blanche : l'onde aérienne
Illustration 8 : E	xemple de tirs sismiques bruts pour le profil Marchesieux (gauche) sur lesquels ont distingue clairement les différents train d'ondes. Tir du profil Santeny 2 perturbé par les conditions climatiques (droite)
Illustration 9 : Pl	notographies illustrant des étapes de mise en œuvre de la campagne de sismique réflexion haute-résolution
Illustration 10 - I	Etapes de traitement sismique réalisées sur un exemple de tir du profil SHR04 : a) tir sismique brut, b) tir sismique après AGC, filtrage fréquentiel, application d'un mute et normalisation des traces et c) tir sismique après application de la correction NMO.
Illustration 11 : I	Exemple d'analyse de vitesse par « semblance » (gauche) réalisée à partir des données de sismique réflexion pour le point milieu 1300 m du profil SHR03. Après correction de la vitesse NMO, Les réflecteurs s'horizontalisent (droite)
Illustration 12 : I	Exemple d'analyse de vitesse par « semblance » réalisée à partir des données de sismique réflexion pour les points milieux communs 160 et 280 du profil HR_MAR1.
Illustration 13 : F	Répartition des vitesses Vnmo sur la section sismique temps double d'une portion du profil SHR04
Illustration 14 : I	Résolution sismique verticale en fonction de la fréquence et des vitesses sismiques. 
Illustration 15 : S	Section sismique temps double du profil HR_MAR1 avec modèle de vitesse NMO associé
Illustration 16 : S	Section sismique temps double du profil HR_SAY1 avec modèle de vitesse NMO associé
Illustration 17: S	Section sismique temps double du profil HR_SAY2 avec modèle de vitesse NMO associé
Illustration 18 : 0	Coupe sismique temps migrée du profil SHR01
Illustration 19:0	Coupe sismique temps migrée du profil SHR02
Illustration 20 : 0	Coupe sismique temps migrée du profil SHR03
Illustration 21 : 0	Coupe sismique temps migrée du profil SHR04
Illustration 22 : 0	Coupe sismique temps migrée du profil SHR05

Illustration 23	: Colonne lithostratigraphique simplifiée des terrains rencontrés sur la carte géologique au 1/50 000 - feuille de Carentan (modifié d'après Baize et al., 1997b). 
Illustration 24	: Coupe synthétique de la série crétacée et cénozoïque du Cotentin et lacunes de sédimentation ou d'érosion associées (modifié d'après Dugué et al., 2009) 40
Illustration 25	coupe schématique figurant les variations latérales et l'empilement des formations plio-pléistocène du bassin de Sainteny-Marchésieux. « LSM » correspond au forage 01176X0045/S1 de Marchésieux. Modifié d'après Dugué(2003)
Illustration 26	: Interprétation du profil sismique SHR01 (exagération verticale sur les profils sismiques : ~4x)
Illustration 27	: Interprétation des profils sismiques HR_SAY1SHR01 (exagération verticale sur les profils sismiques : ~4x)
Illustration 28	carte d'implantation des stations gravimétriques. Croix bleues : stations historiques, croix rouges : stations acquises en 2013, triangles bleus : stations acquises en 2014. Le polygone noir représente les limites du sous-bassin de Marchésieux.50
Illustration 29	a) photographie de la base sur le perron de l'église de Sainteny, b) plan de positionnement du trépied du gravimètre51
Illustration 30	: histogramme des reprises gravimétriques en valeur absolue et pourcentage cumulé. Les traits verts horizontaux et verticaux indiquent le pourcentage cumulé à 68% et la valeur de l'erreur associée, respectivement
Illustration 31	: histogramme des reprises du positionnement vertical en valeur absolue et pourcentage cumulé. Les traits verts horizontaux et verticaux indiquent le pourcentage cumulé à 68% et la valeur de l'erreur associée, respectivement . 54
Illustration 32	anomalie de Bouguer (mGal) pour une densité de réduction de 2.67 g.cm <sup>-3</sup> . Le polygone noir représente les limites du sous-bassin de Marchésieux. Les points noirs sont les stations gravimétriques
Illustration 33	Anomalie régionale ajustée (mGal). Le polygone noir représente les limites du sous- bassin de Marchésieux. Les points noirs sont les stations gravimétriques 57
Illustration 34	anomalie résiduelle (mGal). Le polygone noir représente les limites du sous-bassin de Marchésieux. Les points noirs sont les stations gravimétriques58
Illustration 35	: Anomalie résiduelle surimposée avec les linéaments gravimétriques (traits noirs) décelés60
Illustration 36	: informations sur la profondeur du socle utilisées : losanges rouges : forages recoupant le socle (epaisseur de sédiments indiquée au dessus), traits bleus : profils sismiques de 2013, traits violets : profils sismqiues de 2014, fond géologique tiré de la carte géologique harmonisée
Illustration 37	relation entre épaisseur de sédiment donné par sismique et forages et l'anomalie résiduelle. La droite rouge est ajustée aux données (points noirs) par moindres- carrés
Illustration 38	altitude du fond du bassin à partir de la relation entre épaisseur de sédiment donnée par sismique et forages (points rouges) et l'anomalie résiduelle
Illustration 39	schéma du processus itératif d'estimation de la profondeur du bassin
Illustration 40	: résultats pour un contraste de densité de -0.9 g.cm <sup>-3</sup> entre socle et sédiments. a): anomalie régionale estimée, b) anomalie résiduelle obtenue à partir de l'anomalie régionale, c) altitude inversée du fond du bassin, d) écart entre l'anomalie résiduelle et l'effet du model (mGal), e) écart en altitude entre forages, sismiques et l'altitude du modèle (m)
Illustration 41	: idem que pour Illustration 40, mais pour un contraste de -0.7 g.cm <sup>-3</sup> entre socle et sédiments

Illustration 42 :	idem que pour Illustration 40, mais pour un contraste de -0.5 g.cm <sup>-3</sup> entre socle et sédiments
Illustration 43 -	- Localisation des panneaux électriques (en rouge) sur fond topographique IGN au 1/2500072
Illustration 44 :	localisation du profil électrique MAR1 sur la commune de Marchésieux, lieu-dit Champeau. Les courbes isovaleur bleues correspondent au toit du substratum défini par gravimétrie calée sur les résultats sismiques et de forage. Le trait rose correspond aux profils sismiques
Illustration 45 :	profil électrique MAR179
Illustration 46 :	Superposition des profils sismiques et électriques au droit du forage carotté de Marchésieux (la légende des résistivités est indiquée sur l'Illustration 45) 80
Illustration 47 :	Superposition du profil sismique et du profil électrique SAY1 (échelle de couleur de résistivités sur l'Illustration 48)
Illustration 48 :	profil électrique SAY182
Illustration 49 :	profil électrique « MAR2 » réalisé rue de la Cane à Saint-André-de-Bohon 85
Illustration 50 :	localisation du profil électrique MAR2 (en rouge) sur la commune de Saint-André-de- Bohon. Les courbes isovaleur bleues correspondent au toit du substratum défini par gravimétrie calée sur les résultats sismiques et de forage. Le trait rose correspond aux profils sismiques
Illustration 51:	profil électrique MAR3 réalisé le long de la RD339 de Feugères vers la Groudie.88
Illustration 52 :	localisation des profils MAR3 et MAR4 (en rouge). Les courbes isovaleur bleues correspondent au toit du substratum défini par gravimétrie calée sur les résultats sismiques et de forage. Le trait rose correspond aux profils sismiques
Illustration 53 :	Profil électrique MAR4, réalisé le long de la RD900 au droit du lieu dit « le relais ». 
Illustration 54 :	Profil électrique MAR5 sur la commune de Raids sur la route à l'Ouest du Hameau la Hougue
Illustration 55 :	localisation du profil MAR5 (en rouge). Les courbes isovaleur bleues correspondent au toit du substratum défini par gravimétrie calée sur les résultats sismiques et de forage. Le trait rose correspond aux profils sismiques
Illustration 56 :	Profil électrique MAR6 (haut : inversion avec une profondeur de 80 m, bas : profondeur d'investigation réduite à 30 m pour une meilleure résolution des horizons de sub-surface)
Illustration 57 :	localisation des profils électriques MAR 6 et MAR 7 (traits rouges). Les courbes isovaleur bleues correspondent au toit du substratum défini par gravimétrie calée sur les résultats sismiques et de forage. Le trait rose correspond aux profils sismiques
Illustration 58 :	profil électrique MAR7. (haut : inversion avec une profondeur de 80 m, bas : profondeur d'investigation réduite à 30 m pour une meilleure résolution des horizons de sub-surface)
Illustration 59 :	Localisation des investigations RMP (carré bleu) sur fond topographique de l'IGN au 1/25000, des sondages MARCH1 à MARCH10. Les croix noires correspondent aux mesures de bruit EM (avec valeur associée en $\mu$ V)102
Illustration 60 :	<ul> <li>Comparaison des bruits ambiants rencontrés sur les différents sites au mois de mars 2015 (rond noir), au mois d'avril 2015 (carré noir) et au mois de juillet 2015 (triangle noir) tels que mesuré avec le testeur de bruit Iris Instrument et évalués comme le produit du bruit NUMIS, après filtrage par la racine du nombre de stack.</li> </ul>

Illustration 61 -	De gauche à droite et de haut en bas, effet de différents traitements sur le sondage MARCH7 : stack simple, notch 50Hz (Prodiviner) + stack, despiking + traitement multicanal + stack, despiking + soustraction avec otpim filter sur voie 2 + stack.105
Illustration 62 :	Carte d'implantation des sondages RMP1-2-7.Les boucles RMP sont représentées en rouge, le profil sismique correspond au trait rose et le profil électrique au trait rouge. Les traits bleus correspondent à l'altitude du substratum déterminée par la gravimétrie
Illustration 63 :	Résultats des sondages RMP MARCH1, MARCH2 et MARCH7, présentés sur les coupes de panneau électrique et de sismique SHR01108
Illustration 64 :	Carte d'implantation du sondage RMP MARCH6110
Illustration 65 :	Résultats du sondage RMP MARCH6 présentés sur les coupes de panneau électrique et de sismique SHR01111
Illustration 66 :	Carte d'implantation du sondage RMP MARCH4112
Illustration 67 :	Carte de localisation des sondages RMP MARCH3 et 5 113
Illustration 68 :	Résultats du sondage RMP MARCH3 présentés sur les coupes de panneau électrique SAY1 et de sismique SHR04 et SAY1
Illustration 69 :	Résultats du sondage RMP MARCH5 présentés sur les coupes de panneau électrique MAR6 et de sismique SHR03116
Illustration 70 -	Résultats du sondage RMP MARCH8 présentés sur la coupe sismique SAY2.117
Illustration 71 -	- Carte de localisation du sondage RMP MARCH9117
Illustration 72 -	Carte de localisation du sondage RMP MARCH8118
Illustration 73 -	Résultats du sondage RMP MARCH9 présentés sur les coupes de panneau électrique MAR7119
Illustration 74 -	Carte de localisation du sondage RMP MARCH10.
Illustration 75 -	- Synthèse des résultats RMP122
Illustration 76 -	- Caractéristiques hydrodynamiques des sondages RMP issues de l'inversion des sondages RMP. La transmissivité RMP (en haut à gauche) est évaluée en utilisant la constante de transfert C=7 . $10^{-9}$ m.ms <sup>2</sup> et la constante de relaxation T <sub>1</sub> ) 123
Illustration 77 -	- Comparaison des caractéristiques RMP avec les transmissivités des pompages d'essais.La tranmissivité RMP présentée sur le graphe en haut à gauche est calculée avec la constante C=7 . 10 <sup>-9</sup> m.ms <sup>2</sup> et la constante de relaxation T <sub>1</sub> .124
Illustration 78 -	- Relation entre les caratéristiques hydrodynamiques RMP et les transmissivités hydriodynamiques des pompages d'essai associé de la région de Marchésieux en regard des relations définies pour d'autre environnement hydrogéologique (adapté de Boucher 2007)
Illustration 79 :	Carte de localisation en Lambert 93 des stations gravimétriques. Les croix grises représentent les stations historiques, les croix bleues les nouvelles stations. En fond, l'anomalie de Bouguer en mgal (densité de réduction 2.3, réseau RGF83) à partir des données historiques. Le polygone noir marque les limites du bassin de Sainteny-Marchésieux ; le profil AA', passant au mieux par les nouvelles stations, est représenté
Illustration 80 :	a : histogramme de la valeur de l'erreur pour mesure GPS, et pourcentage cumulé en rouge, b : histogramme des écarts maximum des mesures à chaque station gravimétriques, et pourcentage cumulé134
Illustration 81 :	Anomalie de Bouguer aux points de mesures, projetés sur le profil AA' (cercles noirs), et valeurs de l'anomalie de Bouguer interpolée selon le profil (ligne de bleue)

Illustration 8	82 : 1	topographie (ligne noire) et profondeur interpolée du toit du permien (ligne bleue en pointillée) selon le profil AA'. Les forages et leurs noms BSS sont représentés.140
Illustration 8	33 a	: Anomalie de Bouguer, anomalie régionale aux points de calage, et anomalie régionale interpolée pour un contraste de densité de -0.4 g cm <sup>-3</sup> entre sédiments tertiaires et pélites. b : anomalie résiduelle obtenue
Illustration 8	84 a	: Anomalies résiduelles modélisées (lignes) et mesurées (points noirs), obtenues pour différents contraste de densités $\Delta \rho$ entre sédiments tertiaires et les pélites permiennes, b : interfaces sédiments tertiaires – pélites permiennes déterminées par modélisation directe 2D en fonction du contraste de densité $\Delta \rho$
Illustration 8	85 : 9	schéma interprétatif de l'épaisseur des bassins de Marchésieux et de Sainteny à partir de la Illustration 84b. Le remplissage jaune représente le remplissage sédimentaire, les traits noirs en tirets représentent les failles pressenties 143
Illustration 8	86 : I	Principe de la mesure en courant électrique continu
Illustration 8	87 : I	Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant, M et N, les électrodes de potentiel (0 < $\theta$ , $\Phi$ < $\pi$ )160
Illustration 8	88 : (	Configuration dipôle-dipôle 161
Illustration 8	89 : 0	Configuration de Schlumberger 161
Illustration 9	0 : 0	Configuration dipôle-dipôle 161
Illustration 9	)1:(	Configuration Wenner
Illustration 9	)2 : I	Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner 162
Illustration 9	)3 : I	Résultats complets (en images) d'une inversion. En haut la pseudo-section de résistivité apparente mesurées. En bas, le modèle de résistivité issu de l'inversion. Au centre, la pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité. L'erreur (RMS) constitue la différence entre les deux premières pseudo-sections (ici 4.4%)
Illustration 9	94 -	Résultat de l'inversion de la Illustration 93 avec la topographie
Illustration 9	95 -	Principe de mesure RMP 175
Illustration 9	6 - 8	Schéma fonctionnel du dispositif instrumental 175
Illustration 9	7 -	Équipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS $^{+}$ » sur site 176
Illustration 9	8 - 8	Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception 177
Illustration 9	9 - 3	Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception à deux pulses pour la mesure de T $_1$
Illustration 1	00 -	- Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception en écho de spin (SE) pour la mesure de T <sub>2</sub> (d'après Legchenko et al. 2010)
Illustration 1	01 -	- Exemple de dispositif de mesure de l'imagerie 3D RMP (9 boucles)
Illustration 1	02 -	- Résultats d'inversion des données théoriques
Illustration 1	03 -	- Exemple de Sondage RMP en milieu sédimentaire. a) courbes de sondage ; b) log vertical de teneur en eau, W et de temps de décroissance, T1 obtenu par inversion du sondage RMP; c) log de perméabilité RMP obtenue par combinaison des paramètres RMP W et T1
Illustration 1	04 -	- Fonctions de transfert entre résultats RMP et transmissivité par pompage obtenues dans différents environnements géologiques (modifié d'après Boucher 2007, Estimation des propriétés hydrodynamique des aquifères par RMP, Thèse de l'Université d'Orléans)

#### Liste des annexes

Annexe 1	Rapport de l'acquisition gravimétrique effectuée en 2013	131
Annexe 2	Données gravimétriques	145
Annexe 3	Principe de la méthode de tomographie électrique de résistivité	157
Annexe 4	Paramètre d'inversion des tomographies électriques	165
Annexe 5	Principe de la méthode des sondages par Résonance Magnétique des Protons	173
Annexe 6	Résultats des sondages RMP et caractéristiques hydrodynamiques des forages as	ssociés 185
Annexe 7	Données RMP	189

## 1. Introduction

Le bassin de Sainteny-Marchésieux représente une réserve aquifère particulièrement intéressante à l'échelle du département de la Manche puisqu'il alimente en eau potable un quart de la population du département. Le sous-bassin de Sainteny au nord-ouest (environ 35 km<sup>2</sup>) est exploité à environ 4 millions de m<sup>3</sup>/an, tandis que le sous-bassin de Marchésieux, plus vaste (environ 100 km<sup>2</sup>) est actuellement très peu exploité (0.15 Mm<sup>3</sup>/an). Les connaissances disponibles ne permettent pas d'évaluer précisément les potentialités des aquifères le constituant, les estimations variant de quelques millions de m<sup>3</sup>/an à quelques dizaines de millions de m<sup>3</sup>/an.

De plus, des travaux de recherche réalisés par l'université de Rennes entre 2001 et 2012 essentiellement dans le sous-bassin de Sainteny ont mis en évidence la fragilité des zones de marais et tourbières et la nécessité de veiller à mieux appréhender les impacts entre les prélèvements d'eau souterraine et les zones humides.

L'Agence de l'Eau Seine-Normandie, le Conseil Général de la Manche et le BRGM ont ainsi initié en 2012 un projet visant à améliorer la connaissance géologique et hydrogéologique du sous-bassin de Marchésieux, et en particulier, le potentiel de la ressource en eau souterraine et les relations avec les zones humides, celles-ci représentant environ 30% de la superficie du sous-bassin de Marchésieux.

Ce projet est réalisé en concertation avec la DREAL Basse-Normandie, la DDTM de la Manche, les universités de Caen et Rennes, le Parc naturel régional des marais du Bessin et du Cotentin (PNRMCB), le SYMPEC et le syndicat départemental des eaux de la Manche. Le présent rapport s'inscrit dans la seconde phase du projet et vise à synthétiser les prospections géophysiques réalisées.

#### 1.1. CONTEXTE GENERAL

Le sous-bassin de Marchésieux s'inscrit dans un environnement déjà impacté par l'activité anthropique et dans un système hydrologique complexe. Il appartient au système hydrogéologique du bassin de Sainteny-Marchésieux. La zone d'étude, représentée sur l'Illustration 1, se situe au centre du département de la Manche, entre Carentan au Nord-Est et Périers au Sud-Ouest. La zone se caractérise par un relief peu élevé, variant environ entre 45 m et 2 m d'altitude.

Le sous-bassin de Marchésieux est parcouru par la Taute et sa basse vallée. Sa superficie est de 88 km<sup>2</sup>. Les cours d'eau s'écoulent globalement selon la direction sud-ouest à nordest. La superficie des zones humides (cf. Illustration 1) comprises dans le sous-bassin de Marchésieux est de 27 km<sup>2</sup>.

#### 1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE



Illustration 1 : Localisation de la zone d'étude, du sous-bassin hydrogéologique de Marchésieux et représentation des cours d'eau pérennes (BDTOPO)

L'objectif du projet est d'améliorer la connaissance géologique et hydrogéologique du sousbassin de Marchésieux, de mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère et ses relations avec les zones humides, et d'évaluer son exploitabilité pour l'alimentation en eau potable (AEP).

L'étude s'articule en trois phases, qui se sont déroulées sur trois ans (2012-2015) :

- Phase 1 Synthèse et exploitation des données existantes
- Phase 2 Amélioration de la connaissance géologique Prospections géophysiques et géologiques
- Phase 3 Amélioration de la connaissance hydrogéologique Investigations

Le présent rapport s'inscrit dans la phase 2 du projet et synthétise les résultats des prospections géophysiques réalisées.

A l'issu de ces prospections géophysiques, cinq forages seront implantés pour caractériser la nature des formations sous-jacentes et plusieurs pompages d'essais seront réalisés pour évaluer les paramètres hydrodynamiques des aquifères associés.

## 2. Investigations sismiques

#### 2.1. ACQUISITION DES DONNEES

Deux campagnes de mesures sismiques réflexion haute-résolution ont été réalisées. Une première en 2013 pour un linéaire de 2.2 km puis une seconde en 2014 avec un linéaire total de 16.4 km.

La première campagne avait plusieurs objectifs : (1) tester cette méthode au droit de trois sites caractéristiques des différentes formations susceptibles d'être rencontrées, (2) caler les profils au droit du forage carotté de Marchésieux, (3) recouper la faille supposée entre les faluns de Blehou (côté sous-bassin de Sainteny) et les marnes du bosq d'Aubigny (côté sous-bassin Marchésieux), l'existence de cette faille étant sujet à débats et (4) permettre de dimensionner au mieux la seconde campagne sismique.

Sept profils sismiques ont ainsi été réalisés :

- MAR1 950 m (2013) à Marchésieux, au droit du forage carotté
- SAY1 700 m (2013)
- SAY2 550 m (2013)
- SHR 1 10400 m (2014) De Feugères à Saint-André-de-Bohon
- SHR 2 2000 m (2014) sur la commune de Saint-André-de-Bohon
- SHR 3 2000 m de Saint-André-de-Bohon à Auxais
- SHR 4 1500 m (2014) sur la commune d'Auxais au droit du forage du château d'Auxais
- SHR 5 500 m d'Auxais vers Sainteny

L'espacement entre les géophones était de 5 m (avec des traces de 96 géophones, avec déplacement de 48 à l'avancement) et l'espacement entre les sources de 10 m, la nature de la source étant une chute de poids.

Leurs implantations sont présentées dans l'Illustration 2.

#### 2.1.1. Principe de la sismique reflexion haute résolution

La sismique réflexion est une technique de mesure indirecte qui consiste à enregistrer en surface des échos issus de la propagation dans le sous-sol d'une onde sismique provoquée. Ces échos sont générés par les hétérogénéités du sous-sol (contraste d'impédance entre deux formations géologiques). Le passage par exemple d'une couche d'argile à une couche de sable dans une colonne sédimentaire va se traduire par la présence d'un réflecteur sur les enregistrements. Le temps d'arrivée de la réflexion permet de situer la position de cette transition dans l'espace ; l'amplitude de l'écho apporte des informations sur certains paramètres physiques des milieux en contact. En sismique réflexion, l'enregistreur sismique fournit les temps de propagation des ondes sismigues entre le point d'impact et les divers capteurs (géophones) du profil (Illustration 3). La prospection sismigue a pour base l'étude de ce temps de propagation. Connaissant la distance qui sépare le point d'impact des capteurs, on construit un diagramme temps-distance. Les temps sont en ordonnée et les distances en abscisse. Cette méthode est une étape de base de l'interprétation graphique qui permet, d'identifier les différents types d'ondes (ondes P, ondes S, ondes de surface) et les réflexions visibles sur les enregistrements pour mettre en place une séquence de traitement adéquate.

En résumé, ce type d'études sismiques fournit une image de la structure du sous-sol, et dans certains cas des informations sur sa nature.



Illustration 2 – Localisation des profils sismiques haute résolution (SHR, en violet).



Illustration 3 : Exemple de tir sismique, montrant la distinction entre les ondes sismiques de surface et une onde réfléchie sur une interface géologique.

Les mesures sont réalisées en couverture multiple afin d'optimiser le rapport signal-sur-bruit en déplaçant la source et la ligne de géophones le long d'un profil (Illustration 4). Les géophones sont alignés avec un espacement régulier qui peut-être de 2, 5,10 m, etc. Le déport entre la source et le premier géophone est appelé offset d'origine. Différentes sources sismiques peuvent être utilisés en terrestre (Marteau, chute de poids, charges explosives) (Illustration 4).





Illustration 4 : Gauche) exemple de dispositif d'enregistrement sismique composé de 48 géophones espacés de 5 m ; Droite) exemple de source sismique de type chute de poids.

Le traitement de sismique réflexion a pour but l'amélioration du rapport signal/bruit et la mise en forme de l'information pour faciliter l'interprétation. Il n'existe pas de protocole de traitement universel. Celui-ci doit être adapté en fonction du matériel utilisé, de la configuration d'acquisition, des conditions de terrain et de la géologie. Un processus itératif est souvent nécessaire pour choisir convenablement les paramètres optimaux du traitement et converger vers la meilleure section sommation possible (stack).



Un exemple de séquence de traitement est présenté ci-dessous.

Illustration 5 : Exemple de filtrage fréquentiel appliqué sur un tir sismique. Cette opération permet de mieux faire sortir l'onde réfléchie du bruit ambiant.



Illustration 6 : Exemple de correction NMO appliquée pour la collection cdp=250m avec une vitesse de 1800 m/s. Cette opération permet d'horizontaliser l'hyperbole de réflexion.

Séquences de traitement	Descriptif de l'opération
Edition des traces	L'édition consiste à analyser chaque tir sismique de façon à juger de sa qualité et écarter les enregistrements trop bruités. Le bilan permet de savoir si l'opération de l'acquisition a rempli sa mission et si des cibles sont déjà visibles.
Correction des amplitudes	Même en milieu homogène et élastique, le mouvement des particules s'atténue au cours de la propagation à cause de l'expansion des fronts d'ondes. C'est l'atténuation géométrique ou atténuation par divergence qu'il faut donc corriger.
Mise à jour de la géométrie	Cette séquence permet d'implémenter les positions de la source et des récepteurs dans les headers des fichiers de données sismiques.
Corrections statiques	Il s'agit des corrections de topographie ou de différence de temps de déclenchement de l'enregistrement.
Filtrage fréquentiel	Il permet de filtrer des fréquences "inutiles" dans la bande fréquentielle du tir sismique (Illustration 5).
Mise en collection de point milieux communs	Le point milieu est le point situé au milieu du segment source-récepteur et correspond à l'endroit où l'onde réfléchie enregistrée sur le tir sismique, rebondit à l'interface entre deux couches géologiques.
Correction dynamiques (NMO)	Les corrections dynamiques consistent à « horizontaliser » les hyperboles de réflexion sur les CMP afin de pouvoir effectuer la sommation à temps constant (Illustration 6).
Sommation en points milieux communs (stack)	Cette étape permet d'additionner l'énergie des différentes traces d'un même CMP pour faire ressortir la cible. La collection CMP devient donc une trace sommée.
Migration temps	Cette opération permet de positionner les réflexions observées sur la coupe somme dans la position des réflecteurs qui leur ont donné naissance. Sur une coupe somme, on suppose que la source est confondue avec le récepteur.
Conversion temps profondeur	Cette opération permet de convertir la coupe somme en temps en une coupe sommes en profondeur à partir de la vitesse des ondes sismiques dans le milieu.

#### 2.1.2. Matériel

L'acquisition des profils sismiques a été réalisée à l'aide de centrales d'acquisition sismiques Stratavizor 48 traces et Geode 24 traces (Geometrics, USA) connectées à 4 flûtes de 24 traces, soit 96 traces régulièrement espacées de 5 mètres sur 595 m. La source sismique était de type chute de poids accélérée GISCO ESS 500 (marteau de 227 Kg, énergie déployée 1022 J, vitesse d'impact au sol 3,04 m/s). L'espacement entre les points sources était de 10 m. Le matériel utilisé comprend (Illustration 9):

- 1 Stratavizor NZ 48 traces Geometrics
- 3 Geode 24 traces Geometrics
- 5 flûtes sismiques d'inter-trace 5 m
- 120 géophones de fréquence centrale 10 Hz
- 1 source sismique chute de poids accélérée GISCO ESS 500
- 2 claies de portages
- 5 batteries de voiture 110 Ah
- 1 GPS différentiel Trimble
- 1 micro-ordinateur portable
- 2 véhicules

Le mode opératoire a été réalisé selon les recommandations du code de bonne pratique de la géophysique appliquée édité par l'AGAP (système qualité – recommandations fondées sur la norme européenne EN 29001, pour l'assurance de la qualité des prestations de services en géophysique) dont le BRGM est un membre fondateur.

#### 2.1.3. Mise en œuvre

La centrale d'acquisition Geometrics Stratavizor NZ est configurée en 48 canaux et est reliée à 2 centrales d'acquisition Geometrics Geode de 24 canaux chacune, totalisant ainsi 96 canaux le long de la ligne sismique. Le courant nécessaire au fonctionnement des appareils de mesure est délivré par des batteries 12V.

Les flûtes sismiques sont déroulées manuellement et/ou au moyen d'un véhicule léger assurant des rotations entre l'avant et l'arrière du dispositif. Les tirs sismiques sont réalisés depuis une extrémité du dispositif jusqu'en son milieu. A l'avancement, 2 flûtes sont alors démontées afin d'être réinstallées en fin de dispositif.

L'acquisition se fait ainsi en continu, avec une couverture multiple, en décalant les géophones actifs.

En 2013, les conditions de bruit durant l'acquisition du profil Marchésieux et Sainteny 1 étant globalement bonnes ; celles-ci n'ont pas entraîné de bruitage du signal. Les enregistrements unitaires sont donc de bonne qualité avec des réflexions identifiables sur l'ensemble des deux profils. Par contre les conditions climatiques (pluie, vent) ont perturbé l'acquisition du profil Sainteny 2. Les tirs unitaires sont bruités et les réflexions sont difficiles à identifier.

En 2014 Les conditions de bruit durant le déroulement des opérations sismiques étant globalement bonnes, les enregistrements sont de bonne qualité dans l'ensemble. L'Illustration 8 montre des exemples de données brutes.



Illustration 7: Exemples de tirs sismiques bruts du profil SHR03 avec application d'un gain de type AGC. Les flèches indiquent : bleue : l'onde P directe; rouge : l'onde P réfractée ; jaune : les réflexions des ondes P ; magenta : les ondes de surface ; blanche : l'onde aérienne.



Illustration 8 : Exemple de tirs sismiques bruts pour le profil Marchesieux (gauche) sur lesquels ont distingue clairement les différents train d'ondes. Tir du profil Santeny 2 perturbé par les conditions climatiques (droite)



Centrale d'acquisition Stratavizor NZ et connections



Géophone vertical 10 Hz relié à une flûte sismique



Illustration 9 : Photographies illustrant des étapes de mise en œuvre de la campagne de sismique réflexion haute-résolution.

#### 2.1.4. Positionnement des profils

En 2013 les levés de positionnement ont été réalisés au moyen d'un GPS de type Garmin 2s. La précision des mesures est métrique en X et Y. Les levés GPS ont été réalisées aux points caractéristiques des profils sismiques et systématiquement tous les 10 m.

En 2014 les profils sismiques ont été positionnés (coordonnées X, Y dans le système Lambert 93) avec un GPS Trimble GeoXH 6000 associé à une antenne externe de type Tornado. Ce récepteur permet de capter les satellites GPS ainsi que les satellites GLONASS (en moyenne entre 14 et 20 satellites). Les valeurs obtenues sont corrigées en post-traitement, à l'aide des éphémérides de l'IGN. Ce post-traitement permet d'aboutir à une précision en X, Y de l'ordre de 10 cm (dans les conditions optimales d'utilisation).

La précision sur les levés altimétriques (Z) est fonction de la couverture végétale et du relief. Les valeurs de Z qui sont affectées d'une précision anormalement élevée et qui paraissent s'écarter significativement du profil topographique sont retirées du jeu de données.

#### 2.2. TRAITEMENT DES DONNEES

#### 2.2.1. Méthodologie

Le but du traitement sismique réflexion est de convertir les données brutes enregistrées sur le terrain en sections sismiques montrant l'agencement des réflecteurs le long des profils. Ces réflecteurs donnent une image des différences de lithologie des couches du sous-sol. Le traitement des mesures est fait au moyen de séquences de programmes élaborés visant à faire ressortir les informations utiles – élimination des bruits parasites – et améliorer le pouvoir de résolution.

La séquence de traitement varie d'une étude à l'autre, selon la profondeur de l'objectif, la nature des terrains et les paramètres d'enregistrement. Les séquences des traitements appliqués sur les données sont optimisées en fonction de la source utilisée, du dispositif d'acquisition, du contexte géologique et des objectifs recherchés.

Pour les différents traitements, nous avons utilisé les programmes de SeismicUnix (SU).

La séquence de traitement ci-après résume les étapes de traitement appliquées. De nombreux essais sont nécessaires pour chaque phase de traitement.

#### Pré-traitement

- Edition et mise en forme des données
- Contrôle de la géométrie
- Suppression des traces bruitées
- Correction statique du t<sub>0</sub> de déclenchement

#### Amélioration signal / bruit (Illustration 10)

- AGC avec fenêtre glissante
- Analyse fréquentielle
- Filtrage en fréquence
- Mute
- Normalisation des amplitudes

#### <u>Assemblage</u>

- Mise en collection points milieux communs (CMP)
- Analyse de vitesse (par semblance)
- Corrections dynamiques (NMO) (Illustration 10)
- Corrections statiques résiduelles
- Sommation horizontale Stack

#### Traitement post-stack

- Déconvolution FX
- AGC
- Migration temps de Stolt
- Filtrage
- Conversion temps-profondeur



Illustration 10 - Etapes de traitement sismique réalisées sur un exemple de tir du profil SHR04 : a) tir sismique brut, b) tir sismique après AGC, filtrage fréquentiel, application d'un mute et normalisation des traces et c) tir sismique après application de la correction NMO.

#### 2.2.2. Vitesses sismiques

• Sismique réfraction

Nous avons réalisé une analyse de la vitesse des premières arrivées de l'onde P afin de déterminer la vitesse sismique des premiers terrains. Les terrains proches de la surface (épaisseur d'environ 5 m) ont une vitesse sismique comprise de l'ordre de 800 m/s puis sont suivis par des terrains de vitesse sismique comprise entre 1500 et 2000 m/s.

• Analyse de vitesse

Cette analyse se réalise en plusieurs étapes avec de nombreux essais. Nous déterminons les vitesses NMO à partir des données de sismique réflexion par la courbure indicatrice des principaux réflecteurs, par « semblance » et par stack à vitesse constante (*Constant Velocity Stack ou CVS*). Les réflecteurs s'horizontalisent pour les différents CMP pour certaines vitesses et à des temps donnés (Illustration 11).

Les vitesses utilisées sont les vitesses de NMO (Vnmo = vitesse de sommation ou de stack) dont la précision est affectée par la longueur réduite des dispositifs en sismique réflexion haute résolution. Pour le traitement, nous avons réalisé une analyse de vitesse NMO (vitesse de sommation) par « semblance » à partir des données de sismique réflexion (Illustration 12). Pour la conversion temps – profondeur les vitesses NMO sont converties en vitesse d'intervalle au moyen de la formule de DIX. Pour cette conversion, on tient également compte des faibles vitesses (~800 m/s) des terrains de la très proche surface.



Illustration 11 : Exemple d'analyse de vitesse par « semblance » (gauche) réalisée à partir des données de sismique réflexion pour le point milieu 1300 m du profil SHR03. Après correction de la vitesse NMO, Les réflecteurs s'horizontalisent (droite).



Illustration 12 : Exemple d'analyse de vitesse par « semblance » réalisée à partir des données de sismique réflexion pour les points milieux communs 160 et 280 du profil HR\_MAR1.

Pour ceci, on distingue principalement :

La vitesse instantanée est la vitesse V à une profondeur donnée P :

$$V = \frac{\Delta P}{\Delta t}$$

La vitesse moyenne à une profondeur donnée :

$$V_M = \frac{m}{s}$$

Où m est la profondeur d'un horizon et s le temps simple à cet horizon.

La vitesse moyenne quadratique VRMS ou *Velocity Root Mean Square,* cette vitesse se rapproche de la vitesse de sommation :

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum V_i^2 * t_i}{\sum t_i}}$$

La vitesse de tranche ou Interval Velocity :

$$V_{\rm int} = \frac{\Delta P}{\Delta T}$$

La formule de Dix relie la vitesse de tranche et la vitesse RMS :

$$V_{\text{int}} = \left[\frac{V_{RMS}^2 n * t_n - V_{RMS}^2 n - 1 * t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}\right]^{1/2}$$

La **vitesse apparente** correspond à la vitesse de déplacement du front d'onde le long d'une ligne de géophones. C'est l'inverse de la pente en sismique réfraction, et la vitesse donnée par la courbure de l'hyperbole de réflexion.

La vitesse de tranche (ou d'intervalle) ainsi calculée par la formule de DIX est donc une vitesse quadratique moyenne. Ces vitesses de tranche tirées de l'analyse de vitesses (vitesses quadratiques moyennes) sont généralement supérieures aux vitesses de tranche tirées de mesures de carottage sismique (vitesses moyennes), dans une mesure qui dépend de l'hétérogénéité de l'intervalle considéré. Etant donné la précision des vitesses calculées, une marge d'erreur de 5 à 10 % est toujours possible.

Un exemple de modèle de vitesse NMO utilisé sur le profil SHR04 est présenté sur l'Illustration 13.

La qualité des sections sismiques obtenues est satisfaisante. Les fréquences obtenues sur les sections finales atteignent 80 à 100 Hz. Le diagramme de l'Illustration 14 montre la résolution verticale (capacité à séparer 2 horizons différents en profondeur) théorique en fonction des fréquences sismiques et de la vitesse sismique. Pour cette campagne, en fonction des fréquences et des vitesses sismiques obtenues, la résolution verticale est en moyenne de 5 m.



Illustration 13 : Répartition des vitesses Vnmo sur la section sismique temps double d'une portion du profil SHR04.



Illustration 14 : Résolution sismique verticale en fonction de la fréquence et des vitesses sismiques.

#### 2.3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

#### 2.3.1. Résultats

Les Illustration 15Illustration 17 présentent les coupes sismiques obtenues après traitement sismique réflexion sur les données haute-résolution des profils MAR1, SAY1 et 2 réalisées en 2013 puis des profils SHR01 à SHR 05 réalisés en 2014.



Illustration 15 : Section sismique temps double du profil HR\_MAR1 avec modèle de vitesse NMO associé.



Illustration 16 : Section sismique temps double du profil HR\_SAY1 avec modèle de vitesse NMO associé.



Illustration 17 : Section sismique temps double du profil HR\_SAY2 avec modèle de vitesse NMO associé.



Illustration 18 : Coupe sismique temps migrée du profil SHR01.



Illustration 19 : Coupe sismique temps migrée du profil SHR02.




Illustration 21 : Coupe sismique temps migrée du profil SHR04.

Résultats des investigations géophysiques sur le sous-bassin de Marchésieux



Illustration 22 : Coupe sismique temps migrée du profil SHR05.

BRGM/RP-65218-FR - Rapport final

#### 2.3.2. Interprétation

L'interprétation sismique des profils acquis en 2013 et 2014 a été réalisée à partir des recommandations établies par Mitchum et al. (1977). Les surfaces et unités sismiques identifiées sur chacun des profils sont ensuite corrélées entre profils sur la base de leur similitudes (géométrie, faciès sismique). Les attributions stratigraphiques des unités sismiques ont été effectuées sur la base des informations cartographiques (carte géologique de la France au 1/50 000 – Feuille Carentan – Baize et al., 1997a) et des données de sub-surfaces brutes ou harmonisées dans le cadre de publications scientifiques (sondages) disponibles (base de données BSS ; Baize, 1998 ; Dugué et al., 2000 ; Dugué, 2003 ; Dugué et al., 2009). Les grands traits stratigraphiques de la zone sont résumés dans les Illustration 23 à Illustration 25.



Illustration 23 : Colonne lithostratigraphique simplifiée des terrains rencontrés sur la carte géologique au 1/50 000 - feuille de Carentan (modifié d'après Baize et al., 1997b).



Illustration 24 : Coupe synthétique de la série crétacée et cénozoïque du Cotentin et lacunes de sédimentation ou d'érosion associées (modifié d'après Dugué et al., 2009).



Illustration 25 : coupe schématique figurant les variations latérales et l'empilement des formations pliopléistocène du bassin de Sainteny-Marchésieux. « LSM » correspond au forage 01176X0045/S1 de Marchésieux. Modifié d'après Dugué(2003).

Parmi les huit profils acquis, seuls sept ont fait l'objet d'une interprétation poussée (Illustration 26) 26) 26) 26) 27). En effet, le profil HR\_SAY2 (2013), à cause des conditions délicates lors de l'acquisition, n'offre pas une qualité suffisante pour imager les géométries sédimentaires du bassin Sainteny-Marchésieux et aucun forage proche ne permet d'aider à l'interprétation. Le profil SHR01 (2014), d'une longueur de 10,4 km se superpose au profil « test » HR\_MAR1 (2013) sur la majeure partie de ses 950 m. Le profil HR\_MAR1 a ainsi été utilisé pour l'interprétation mais n'est pas présenté ici car redondant avec le profil SHR01.

### Surfaces et unités sismiques principales :

L'interprétation des profils sismiques (terminaisons des réflecteurs sismiques, faciès) permet de mettre en évidence l'existence de plusieurs surfaces de discontinuité majeures. Les corrélations entre profils montrent ainsi deux surfaces principales :

Surface 1 (S1) : elle est visible uniquement sur le profil SHR01, à son extrémité sud-ouest, comme un réflecteur de forte amplitude. Elle est de faible extension (0.3 à 1 km selon l'axe SO-NE du profil) et présente une forme concave. Elle apparaît discontinue, ce qui suggère des décalages par des failles d'apparence normale, dont les jeux pourraient varier entre 10 et 50 m. S1 sépare 2 unités sismiques U1 et U2. Sur le profil SHR01, vers le NE, S1 est tronquée par la surface S2. La terminaison de S1 vers le SO n'est pas clairement vue sur le profil (Illustration 26). La présence de failles normales à fort rejet (plusieurs dizaines de mètres) pourrait expliquer cette observation.

 Surface 2 (S2) : elle est reconnue sur la totalité des profils acquis en 2013 et 2014 comme un réflecteur continu de très forte amplitude. De forme ondulée, sa profondeur estimée varie entre 20 et 160 m environ. Son extension est « régionale », à l'échelle du bassin Sainteny-Marchésieux. A l'extrémité SO du profil SHR01, en bordure du bassin, les failles normales à fort rejet, décrites cidessus, affectent possiblement S2 et l'unité U1 atteint potentiellement la surface. S2 sépare les unités sismiques U1-U2 de l'unité sus-jacente U3.

D'autres surfaces de discontinuité « mineures » sont visibles au sein de l'unité U3, et permettent de distinguer des sous-unités dont l'extension n'est cependant pas évidente. Ces surfaces sont parfois difficiles à caractériser car visuellement peu marquées. Néanmoins, les géométries des réflecteurs (ou faciès) de part et d'autre, permettent de les mettre en évidence. Les plus marquantes sont visibles sur le profil SHR01 et SHR05. Elles sont utilisées dans la phase d'attribution stratigraphique, en appui aux données géologiques, pour déterminer la géométrie des grandes formations connues par ailleurs à partir des affleurements et forages sur la zone (Baize, 1998 ; Dugué et al., 2000 ; Dugué, 2003 ; Dugué et al., 2009).

- Unité sismique 1 (U1) : elle est présente sur tous les profils sismiques (2013 et 2014). Elle se caractérise par un faciès sismique à réflecteurs discontinus, de faible amplitude, globalement chaotiques. Les variations latérales du faciès sismique semblent directement corrélées aux variations de qualité d'acquisition (variations des conditions lors de l'acquisition). U1 est, de par son faciès chaotique, considéré ici comme socle acoustique.
- Unité sismique 2 (U2) : elle est comprise entre S1 et S2, dans la partie SO du profil SHR1. Elle se caractérise par un faciès sismique à réflecteurs parallèles d'amplitude moyenne à forte et globalement continus. La géométrie concave des réflecteurs et leur aspect discontinu reprennent ceux de S1. Les réflecteurs sont tronqués par S2 vers le NE. Vers le SO, les réflecteurs semblent se terminer sur un accident (faille normale remontant l'unité U1). La continuité de U2 (et S1) au SO de cette accident n'est pas certaine.
- Unité sismique 3 (U3) : elle est présente sur tous les profils au-dessus de S2 et a donc une extension « régionale » à l'échelle du bassin de Sainteny-Marchésieux. Elle se caractérise par des réflecteurs sismiques subparallèles, qui reprennent globalement la morphologie de S2. Leur continuité, leur amplitude et leur fréquence varient aussi bien verticalement que latéralement, déterminant ainsi plusieurs faciès sismiques superposés ou juxtaposé et pouvant être localement séparés par des surfaces « mineures » de discontinuité.

# - Attributions stratigraphiques prévisionnelles :

Les corrélations des unités sismiques et surfaces entre les profils et leurs attributions stratigraphiques sont testées en utilisant les données et informations géologiques disponibles (coupes géologiques des sondages BSS, bibliographie, cartographie géologique).

U1 : L'unité sismique U1 est décrite comme un socle acoustique (faciès sismique chaotique). Elle est atteinte par plusieurs sondages (01176X0067/S17; 01176X0036/S3; 00176X0045/S1; 01176X0061/F; 01172X0121/S15; 01172X0075/FE1) situés sur ou à proximité des profils sismiques, où elle est décrite comme « argile rouge permienne ». A l'extrémité sud-ouest du profil SHR01, U1 semble remonter en surface à la faveur de failles normales. A cet endroit, les terrains cartographiés correspondent à la « Diorite de Coutances », d'âge néoprotérozoïque (584±4 Ma – Guerrot et al., 1989). A partir de ces observations, U1 pourrait correspondre à un

substratum d'âge anté-mésozoïque, incluant (i) le paléozoïque dominé par les terrains permiens (Pélites rouges de Saint-Jean-de-Daye) sous le bassin de Sainteny-Marchésieux (Carte 50K), et latéralement, sur la bordure sud-ouest du bassin, à (ii) la Diorite de Coutances (néoprotérozoïque). Si la cartographie suggère un contact faillé en surface entre les deux lithologies, celui-ci n'est pas clairement identifiable en profondeur sur la sismique. U1 est limité au sommet par S1 (sous U2) et S2 (sous U3).

U2 : Le faciès sismique de l'unité U2 décrit ci-dessus suggère un empilement sédimentaire déformé (faille et plissement), préservé dans un petit bassin effondré à la faveur de failles normales. Cette unité n'est recoupée par aucun sondage permettant une attribution stratigraphique directe. U2 est néanmoins préservée entre U1 (Permien) et U3 (Pliocène supérieur ici – voir ci-dessous). La surface S2 au toit de l'unité U2 semble érosive, ce qui suppose que les dépôts de U2 soient clairement antérieurs aux dépôts de U3. Plusieurs possibilités sont alors envisageables quant à l'âge et la nature des dépôts correspondants à U2.

- Hypothèse 1 : U2 correspondrait aux premiers dépôts reconnus localement autour du bassin, au-dessus du Permien, à savoir les « sables, cailloutis, argiles et calcrètes » du Norien/Trias supérieur (Baize et al., 1997a,b). Cette hypothèse « Trias » est soutenue par (i) les variations latérales des épaisseurs, les variations d'altitude du mur des dépôts possiblement triasiques et par les déformations tectoniques reconnues sur la carte géologique au 1/50 000 (Baize et al., 1997a,b). De plus, La localisation d'U2 au sudouest du bassin de Sainteny-Marchésieux la positionne dans l'alignement (SSE-NNW) de la limite occidentale des affleurements du Trias (Feuille Bricquebec-Surtainville, Graindor et al., 1976). Au vu des structures affectant les dépôts sur le profil SHR01, une origine tectonique à cet alignement pourrait être avancée (voir aussi le paragraphe sur l'interprétation géologique des données gravimétriques). La présence de dépôts mésozoïques postérieurs (jurassiques et crétacés) au sein de U2, bien qu'envisageable, reste peu probable, au vu de l'épaisseur totale de U2 et des relations entre dépôts mésozoïques dans le secteur.
- Hypothèse 2 : U2 correspondrait à des dépôts cénozoïques antérieurs à ceux décrits localement dans le sud-ouest du bassin de Sainteny-Marchésieux : les Grès de Marchésieux datés du Pliocène supérieur. Il pourrait ainsi s'agir de dépôts équivalents au Falun du Bléhou (Miocène moyen) retrouvés dans la partie nord du bassin, ou de dépôts éo-oligocènes (Falun de Fréville Lutétien moyen à Bartonien ; Argiles à Corbules et Marnes à Bithinies Oligocène inférieur) situés au nord, au-delà du bassin (Graindor et al., 1976 ; Dugué et al., 2009). Cette hypothèse impliquerait un effondrement tectonique permettant de préserver localement les terrains éo-oligocènes sous le sud-ouest du bassin miocène moyen/plio-pléistocène de Sainteny-Marchésieux. Une telle phase de déformation peut être envisagée par analogie au bassin de Rennes, dans lequel les remplissages éo-oligocènes sont préservés sous couverture miocène, par le jeu de failles NNW-SSE entre l'Oligocène supérieur et le Miocène moyen (Thomas, 1999 ; Trautmann et al., 1999).

Le prélèvement par sondage de l'unité sismique U2 permettrait de vérifier les hypothèses proposées.

U3 : le faciès sismique et les géométries de l'unité U3 traduisent un remplissage constitué de dépôts variés avec passages latéraux de faciès sédimentaires/lithologies. Ces variations sont subtiles et il est par conséquent difficile de localiser des limites franches au sein du remplissage sédimentaire. Il est nécessaire de s'appuyer sur les coupes géologiques issues des sondages disponibles à proximité des profils sismiques pour proposer des attributions stratigraphiques et

des variations latérales supposées. Les attributions reposent sur les études récentes du bassin réalisées par Baize (1998), Dugué et al., (2000, 2009) et Dugué (2000).

- Les dépôts de U3 situés le plus bas stratigraphiquement parlant sont retrouvés dans la partie nord du bassin Sainteny-Marchésieux et sont imagés sur les profils HR\_SAY1 et SHR05. Ils sont séparés des dépôts antérieurs par une surface d'apparence érosive (SHR05). Le forage 01172X0075/FE1 (Sainteny-Bois Grimot profil HR\_SAY1) recoupe la totalité de U3 et la partie basale y est identifiée comme la formation miocène du « Falun de Bléhou ». L'absence de ces dépôts vers le sud était attribuée sur la base des sondages, à une surface d'érosion à la base des dépôts plio-pléistocènes (Baize et al., 1997 ; Baize, 1998 ; Dugué, et al., 2009). Cette hypothèse est ici renforcée par la présence d'une surface d'érosion visible sur le profil SHR05, et possiblement sur HR\_SAY1.
- Le reste du remplissage sédimentaire imagé dans U3 est constitué par les dépôts pliocènes et pléistocènes du bassin de Saintenv-Marchésieux. Les coupes géologiques de treize sondages proches des profils sismigues ont été utilisées pour effectuer les attributions stratigraphiques par projection (Illustration 26Illustration 27). Les limites entre les formations ont été placées soit sur des surfaces de discontinuités, soit sous la forme de passages latéraux de faciès sédimentaires à l'endroit des variations de faciès sismiques. Les formations principales reconnues dans la littérature (Dugué, 2003; Duqué et al., 2009), ainsi que leur empilement est globalement retrouvé. Il est ainsi possible de distinguer les Grès de Marchésieux, les Marnes du Bosg d'Aubigny (faciès sableux et faciès argileux), le Falun de Bohon, ainsi gu'un ensemble regroupant les Marnes de St Nicolas de Pierrepont, les Sables de St-Vigor, et les Sables de la Lande de Millières (Illustration 26Illustration 27). Le profil SHR01 permet d'observer l'agencement possible des formations les unes par rapport aux autres (Illustration 27). Ainsi, on peut proposer la présence en base de bassin des formations des Marnes du Bosq, des Grès de Marchésieux et des Faluns de Bohon, qui se succèdent dans cet ordre du sud-ouest vers le nord-ouest, avec des passages latéraux imposés par les informations géologiques des sondages. Cette succession diffère de la coupe d'agencement des formations et faciès proposée par Dugué et al. (2003) et résumée dans l'Illustration 25, qui propose l'intercalation des Marnes du Bosq d'Aubigny entre Grès de Marchésieux et Faluns de Bohon. Cependant, la présence d'un faciès sismique à réflecteurs parallèles et haute fréquence (entre les km 7 et 8) pourrait suggérer la présence de dépôts associés aux Marnes du Bosq. Il y aurait ainsi une concordance entre les observations sismiques et le modèle établi dans Dugué et al. (2003). Audessus, les Marnes du Bosq sont retrouvées sur la majeure partie du bassin, à l'exception de la partie orientale où les Faluns de Bohon dominent, comme proposé sur les profils SHR01, SHR02, et le profil SHR3, où un passage latéral est envisagé (réflecteurs continus associés au Marnes du Bosq au sud-ouest, passant à des réflecteurs discontinus des Faluns de Bohon vers le nord-est). Les Faluns de Bohon se développent latéralement aux Marnes du Bosq vers le sud-ouest où ils se biseautent progressivement en bordure de bassin. Les Marnes de Saint-Nicolas de Pierrepont et les sables de Saint-Vigor sont retrouvés en sommet mais n'ont pu être distingués l'un de l'autre sur la sismique. Les Sables des Lande de Millières sont également à considérer dans cet ensemble.

La qualité des images sismiques obtenues lors des deux campagnes d'acquisitions, et les corrélations aux sondages disponibles ont permis de réaliser (i) une distinction de plusieurs unités sismiques et (ii) leur attribution stratigraphique aux formations connues dans le bassin. L'interprétation préliminaire est cohérente et l'imagerie sismique offre ainsi une vision géométrique plus fine de l'agencement des différentes formations géologiques au sein du bassin de Sainteny-Marchésieux. Certaines attributions ou transitions restent supposées du fait (i) d'un manque de calage au puits ou (ii) de géométries trop fines ou complexes pour être correctement imagées sur les données sismiques. Les sondages prévus dans la suite du projet devraient permettre de lever certaines de ces incertitudes.

Les premiers résultats montrent ainsi la présence d'un petit bassin de type graben, préservé sous le bassin plio-pléistocène, le long de la bordure sud-ouest. L'âge des dépôts n'est pas encore connu et nécessitera des prélèvements par sondage.

Concernant le remplissage plio-pléistocène du bassin de Sainteny-Marchésieux, les observations principales sont :

- Le Falun de Bléhou est présent uniquement au nord du bassin. Il semble tronqué au sommet par une surface d'érosion qui correspond localement à la base des Marnes du Bosq d'Aubigny. Ces observations corroborent les modèles proposés entre autre par Baize (1998).
- La série plio-pléistocène est globalement retrouvée et les observations et interprétations tendent à confirmer les résultats des études antérieures établies sur la base des forages (Dugué et al., 2003). Les Marnes du Bosq d'Aubigny constituent l'essentiel du remplissage du bassin, à l'exclusion (i) de sa partie orientale où seuls les Faluns de Bohon sont retrouvés et (ii) du centre du bassin où les Grès de Marchésieux sont rencontrés (autour du forage 01176X0045/S1 – LSM).

#### - Aspects structuraux :

Sur l'ensemble des profils sismiques obtenus, la déformation apparaît sous la forme (i) de failles sub-verticales ou pendage fort, à jeu décamétrique à pluri-décamétrique apparent normal, ou (ii) de flexures de faible amplitude.

Les failles sont vues principalement sur la partie sud-ouest du profil SHR01 (Illustration 26), où elles affectent le toit du socle (S1) et le remplissage de l'unité sismique U2. Le prolongement de ces failles au sein du remplissage plio-pléistocène de l'unité U3 n'est pas vu avec certitude. La distribution de ces failles sur SHR01 dessine un petit graben de moins d'un kilomètre de largeur et de 50 à 70 m d'épaisseur (U2). L'absence de profil à proximité ne permet pas de corréler les failles et d'en obtenir la direction principale. La faille la plus au sud-ouest semble jouer le rôle de bordure strucutrale pour le bassin de Sainteny-Marchésieux. Elle pourrait être ainsi un segment de la Faille Bordière du Bassin de Carentan (FBB dans Baize et al., 1997). Deux autres failles normales supposées sont indiquées sur le profil SHR01, vers le km 7. Le maillage sismique seul ne permet pas de proposer des orientations pour ces accidents.

Une faille est supposée sur le profil HR\_SAY1 (Illustration 27). Son jeu apparent normal infradécamétrique abaisse le bloc « sud-est » (selon le profil sismique). Cette faille pourrait correspondre à une faille normale supposée par Baize et al. (1997), dite faille ou accident de Sainteny (« SAI » dans Baize et al., 1997a). D'autres failles à jeu plus réduit peuvent être suspectées mais la résolution verticale de la sismique ne permet pas de les identifier.

Les flexures identifiables à partir de la morphologie de S1 (base des dépôts pliopléistocènes) et des réflecteurs (strates) à l'intérieur du remplissage montrent un approfondissement du bassin au niveau du forage 01176X0045/S1 à Marchésieux (profil SHR01 vers le km 6). Le maillage sismique seul ne permet pas de préciser les orientations de ces flexures.

L'interprétation sismique, croisée avec une interprétation de la morphologie du « fond du bassin », générée à partir des données gravimétriques, va pouvoir aider à améliorer le schéma structural de la zone d'étude (voir chapitre suivant).

#### Résultats des investigations géophysiques sur le sous-bassin de Marchésieux





Illustration 26 : Interprétation du profil sismique SHR01 (exagération verticale sur les profils sismiques : ~4x).





# 3. Investigations gravimétriques

Les investigations gravimétriques sur le bassin de Marchésieux-Sainteny ont pour but de définir la morphologie générale (structure) ainsi que la profondeur du bassin sédimentaire tertiaire et quaternaire de Sainteny-Marchésieux reposant sur le socle ancien (terrains du Primaire pour les plus anciens).

Elles se sont déroulées en deux temps. Un profil 'test' a été mesuré en janvier 2013, dont l'interprétation a été prometteuse (voir le rapport d'acquisition en annexe 1). Il a ensuite été décidé de couvrir l'ensemble du bassin de Marchésieux-Sainteny de mesures gravimétriques. Cette seconde campagne d'environ 400 points s'est déroulée en janvier 2014.

Ce chapitre présente l'acquisition et les résultats et interprétations des investigations gravimétriques. L'interprétation gravimétrique n'étant jamais univoque, des données indépendantes de profondeur du bassin issues des investigations sismiques et des données de forages y sont intégrées et servent à contraindre la modélisation gravimétrique.

# 3.1. ACQUISITION ET TRAITEMENTS

### 3.1.1. Implantation

Le levé de terrain été effectué en deux phases :

- 55 stations gravimétriques ont été acquises les 9 et 10 janvier 2013
- 425 stations gravimétriques ont été acquises entre le 20 et le 29 janvier 2014

Les stations sont représentées à l'Illustration 28, et présentent une couverture homogène de l'ordre de 2 à 3 stations par km<sup>2</sup> du bassin de Marchésieux-Sainteny, à l'exception des zones de marais largement ennoyées pendant la période d'acquisition.



Illustration 28 : carte d'implantation des stations gravimétriques. Croix bleues : stations historiques, croix rouges : stations acquises en 2013, triangles bleus : stations acquises en 2014. Le polygone noir représente les limites du sous-bassin de Marchésieux.

### 3.1.2. Matériel et mode opératoire

Les mesures gravimétriques ont été réalisées à l'aide des gravimètres relatifs Scintrex CG5 n°028 et n° 539 du BRGM. En janvier 2013, le gravimètre n°539 a été utilisé, son coefficient de calibration étant de 1.000696, coefficient établi sur la ligne de calibration ligne Montpellier – Aigoual en mars 2012. En Janvier 2014, les deux gravimètres ont été utilisés, leur coefficient de calibration étant de 1.000607 pour le n° 539, et de 0.999829 pour le n°028, coefficients établis sur la ligne de calibration BRGM – BIPM immédiatement à la suite de la mission d'acquisition, en février 2014.

Les mesures ont été réalisées sur trépied bas et la hauteur de mesure a été notée et prise en compte lors de la réduction des données. L'ensemble des valeurs de g de la campagne sont ainsi rapportées au niveau du sol. A chaque occupation de station, trois mesures de 60 s ont

été effectuées à minima, et plus si les conditions de bruit ambiant ou d'inclinaison de l'instrument étaient défavorables. Deux programmes de mesure, débutant et finissant par une mesure à la base de Sainteny (voir section suivante), ont été effectués par jour et par opérateur, dont la durée n'a pas excédée 5 h.

Le positionnement des stations gravimétriques a été réalisé à l'aide d'un GPS Trimble Geo XH6000 (utilisant les constellations GPS et Glonass). Les données enregistrées ont été posttraitées à l'aide du logiciel PathFinder Office, en différentiel de la base permanente de Saint Lo, intégrée au Réseau GNSS permanent de l'IGN, pour une longueur de base comprise entre 25 et 35 km environ.

A chaque occupation de station, 3 acquisitions GPS de 60 s ont été réalisées.

#### 3.1.3. Références gravimétriques

La base gravimétrique de référence pour l'acquisition est la base de MILLIERES III, base du réseau géodésique Français de l'IGN. La valeur de g a été déterminée à cette base avec un gravimètre absolu A10 de Microg-Lacoste en 2011, et est de:

g = 980996.771 +- 0.020 mGal

Une base opérationnelle a été établie sur le perron de l'église de Sainteny (Illustration 29) et elle a été raccordée à la base de MILLERES III par deux allers et retours gravimétriques effectués en janvier 2013 et en janvier 2014.

La valeur de g à cette base est estimée à :



Illustration 29 : a) photographie de la base sur le perron de l'église de Sainteny, b) plan de positionnement du trépied du gravimètre

# 3.1.4. Réduction des données vers l'anomalie de Bouguer

La réduction des données gravimétriques vise à corriger tous les effets (variations temporelles, différences d'altitudes, effets topographiques, etc.) qui influent sur les données acquises brutes et qui ne présentent pas d'intérêt pour l'interprétation géologique des données.

Les réductions de données suivantes ont été réalisées:

- o correction de la marée terrestre gravimétrique (algorithme de Longman, 1959)
- correction de la dérive du gravimètre, déterminée par la première et dernière occupation de la station de base au sein d'un programme de mesure,
- retrait du g théorique (formule GRS80) ce qui permet de passer d'une valeur de g à une anomalie,
- correction d'air libre compensation des effets des variations d'altitude entre les stations,
- corrections de relief (correction de plateau + corrections de terrain) pour compenser l'effet des reliefs à proximité des points mesures.

Ainsi, l'anomalie de Bouguer A<sub>B</sub> s'exprime ainsi:

$$A_{\rm B} = g_{\rm mes} - g_{\rm th} + 0.3086.h - 2\pi G \rho_{\rm B} h + \rho_{\rm B} T \quad (1)$$

où  $\rho_B$  est la densité de réduction de Bouguer, *h* l'altitude du point considéré (en mètres), *G* la constante de gravitation universelle et *T* est la correction de terrain pour un terrain de densité 1.

La densité  $\rho_B$  de réduction a été choisie à 2.67, valeur classiquement utilisée, car étant la densité moyenne de la croûte terrestre. La densité de l'eau de mer est égale à 1.03.

Les corrections de terrain (CT) ont été réalisées pour chaque station entre 0 et 167 km avec des routines intégrant les effets terre-mer, basées sur le calcul par prismes suivant le protocole suivant:

- Sur le terrain, estimation des CT entre 0 et 53 m (zones B et C des corrections de Hammer),
- Sur terre, les CT sont calculés sur un carré de 15 km de côté autours de chaque station avec un MNT IGN à maille de 25 m (la zone 0 -53 m y est exclue), au-delà et jusqu'à 167 km, les CT sont calculées avec un MNT IGN de maille 250m.
- En mer, les CT sont calculées à partir de la bathymétrie ETOPO2 (<u>http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/01mgg04.html</u>), interpolée à la maille de 1 km x 1 km

#### 3.1.5. Précision de l'anomalie de Bouguer

L'erreur totale sur l'anomalie de Bouguer est évaluée classiquement comme la somme quadratique des erreurs élémentaires sur les variables entrant dans son calcul, soit :

$$\varepsilon_{AB} = \sqrt{\varepsilon_g^2 + \varepsilon_{gth}^2 + \varepsilon_z^2 + \varepsilon_{CT}^2} \quad (2)$$

Le détail de ces erreurs est détaillé ci-après.

#### • Erreur sur g ( $\varepsilon_g$ )

Cette erreur est estimée à partir de l'histogramme des écarts sur les stations occupées plusieurs fois au cours des programmes successifs, appelées reprises. Ces écarts donnent une bonne indication de la précision de l'étude. Ici, 45 reprises (soit 9.4% des stations) ont été effectuées, dont la valeur maximale est inférieure à 0.030 mgal. On considère que l'erreur moyenne d'un levé gravimétrique est donnée par la valeur à 68 pourcent des écarts cumulés. Cette valeur est ici de 11.5 µgal (Illustration 30)



Illustration 30 : histogramme des reprises gravimétriques en valeur absolue et pourcentage cumulé. Les traits verts horizontaux et verticaux indiquent le pourcentage cumulé à 68% et la valeur de l'erreur associée, respectivement

L'erreur moyenne sur la mesure de g est ainsi égale à 0,011 mGal.

#### · Erreur sur l'altitude (εz)

Les reprises gravimétrique ont été presque systématiquement associées à des reprises de mesure GPS. On compte en effet 30 reprises GPS pour l'étude. Les reprises GPS permettent d'appréhender la précision du positionnement sur la composante verticale. De même que pour

les reprises gravimétriques, on considère que l'erreur moyenne sur Z est donnée par la valeur à 68 pourcents des écarts cumulés (Illustration 31). Celle-ci est de 20 cm.



Illustration 31 : histogramme des reprises du positionnement vertical en valeur absolue et pourcentage cumulé. Les traits verts horizontaux et verticaux indiquent le pourcentage cumulé à 68% et la valeur de l'erreur associée, respectivement

L'erreur moyenne de 0.2 m est considérée et correspond à une erreur sur l'anomalie de Bouguer équivalente à 0,04 mGal pour une densité de 2,67.

### - Erreur sur g<sub>th</sub> (ε<sub>gth</sub>)

L'erreur sur  $g_{th}$  est fonction de l'erreur sur le positionnement en latitude. En référence aux erreurs de positionnements en altitude détaillées précédemment, les erreurs sur la latitude sont évaluées à 0.01 m en moyenne sur l'ensemble de l'étude, ce qui correspond à une erreur négligeable sur  $g_{th}$ .

### · Erreur sur les corrections topographiques (ε<sub>CT</sub>)

L'erreur sur les CT provient :

- de la résolution des MNTs utilisés : les variations de reliefs sont d'autant mieux restitués que le MNT a une maille fine.
- de la précision des MNTs utilisés
- du positionnement en X,Y,Z des stations gravimétriques

Comme le champ de gravité décroit avec l'inverse de la distance au carré, il est important que le MNT utilisé en champ proche sur la zone 0 - 5 km soit le plus résolu et le plus précis possible. Au-delà, un MNT moins résolu est généralement utilisé, la perte de résolution et de précision ayant un moindre impact sur la valeur de la CT.

L'écart d'altitude entre les stations et le MNT à 25 m est un paramètre important affectant la justesse des CT dans la zone à 5 km des stations. Cet écart en chaque station a été calculé, il est statistiquement de -0.47  $\pm$  1.33 m. Rappelons toutefois qu'un MNT n'est pas une référence d'altitude exacte en tout point.

Dans le contexte relativement plat du bassin de Marchésieux, l'erreur sur les CT est considérée en moyenne égale à 20% de la valeur maximale de la CT, soit 0,05 mGal.

# • Erreur totale sur l'anomalie de Bouguer (ε<sub>AB</sub>)

D'après l'équation (2), et sur la base des erreurs explicitées ci-dessus, l'erreur moyenne totale sur l'anomalie de Bouguer est donc  $\varepsilon_{AB} = 0.065$ mGal.

## 3.1.6. Intégration des données historiques

Les stations historiques ont d'abord été repositionnées en (x,y) selon les routes car elles tombaient hors des routes dans la base de données gravimétrique. Les mesures lors de la réalisation du CGF65 et du RGF83 ont en effet été faites exclusivement sur route, par une ouverture dans le plancher d'une Estafette.

L'anomalie de Bouguer a ensuite été recalculée à partir des valeurs de g présentes dans la base de données gravimétrique selon le traitement décrit en section 3.1.4.

L'ensemble des stations gravimétriques historiques est rattaché aux réseaux gravimétriques du BRGM, tel le CGF65 ou plus récemment le RGF83. Les bases de ces réseaux sont modifiées ou détruites en proximité immédiate de la zone d'étude, les rendant inadéquates pour un rattachement précis de cette étude. La formule de passage entre le réseau de l'IGN, utilisé dans cette étude, et ceux du BRGM n'étant pas établie, 17 nouvelles stations ont été mesurées à moins de 100 m de stations historiques (Illustration 28). L'écart sur l'anomalie de Bouguer pour une densité de 2.6 entre les nouvelles et les anciennes stations est de 0.530 +- 0.083 mGal. Cette valeur est utilisée pour raccorder les anciennes stations aux nouvelles stations.

# 3.2. **RESULTATS ET INTERPRETATION**

### 3.2.1. Anomalie de Bouguer, anomalie régionale, et anomalie résiduelle

L'anomalie de Bouguer est fonction de l'ensemble des variations de densité sous la surface topographique : ces variations peuvent être localisées superficiellement ou en profondeur. Les valeurs élevées de l'anomalie de Bouguer sont caractéristiques de roches denses, alors que les valeurs faibles caractérisent des matériaux moins denses.

L'anomalie de Bouguer pour une densité de réduction de 2.67 g cm<sup>-3</sup> est présentée à Illustration 32. Les méthodes de Parasmis et de Nettleton ne donnant pas de résultats satisfaisants dans le contexte à topographie plane de la zone d'étude, une densité de 2.67 g cm<sup>-3</sup> est choisie car c'est la densité moyenne de la croute terrestre. Notons que l'anomalie de Bouguer est peu influencée par le choix de la densité de réduction, du fait d'une topographie plane proche du niveau de la mer.

De fortes valeurs de l'anomalie de Bouguer, supérieures à 20 mGal, sont observées au sudouest de la zone (Illustration 32). Celles-ci sont à l'aplomb de roches métamorphiques denses du Briovérien affleurant au sud-ouest du bassin de Sainteny-Marchésieux. Ces fortes valeurs sont agencées selon une direction nord-est sud-ouest, présentant une forme en 'collier de perles'. Une discontinuité franche de direction N150° est observée au sud au sein de cette zone à forte valeur de l'anomalie de Bouguer. L'anomalie de Bouguer décroit de part et d'autre de cette zone à forte valeur, selon un gradient de direction nord-ouest sud-est, et atteint une dynamique totale sur la zone d'étude de 25 mGal. On remarque dès lors que l'anomalie de Bouguer présente une forme complexe, liée à un contexte géologique également complexe, notamment pour ce qui est du socle anté-triasique.



Illustration 32 : anomalie de Bouguer (mGal) pour une densité de réduction de 2.67 g.cm<sup>-3</sup>. Le polygone noir représente les limites du sous-bassin de Marchésieux. Les points noirs sont les stations gravimétriques.

Pour isoler et faire ressortir les anomalies venant de sources superficielles, une surface dite 'régionale', rendant compte des sources profondes, est soustraite à l'anomalie de Bouguer. La détermination de cette surface régionale n'est pas triviale. Si la géométrie et la densité des terrains en profondeur sont connues, cette surface peut être modélisée précisément. En pratique, la géologie des terrains en profondeur et leur densité ne sont que rarement connus, et la détermination du régional est nécessairement approximative.

Nous approximons l'anomalie régionale en ajustant une surface polynomiale à l'anomalie de Bouguer (Illustration 33). L'anomalie résiduelle est ensuite obtenue en soustrayant l'anomalie régionale à l'anomalie de Bouguer (Illustration 34), et fait ressortir les variations de l'anomalie de Bouguer à faible longueur d'onde, caractéristique des variations de densité dans la proche surface. Notons dès lors que l'anomalie résiduelle donne des informations plutôt qualitatives que quantitatives, du fait de l'incertitude sur l'anomalie régionale utilisée.



Illustration 33 : Anomalie régionale ajustée (mGal). Le polygone noir représente les limites du sousbassin de Marchésieux. Les points noirs sont les stations gravimétriques.

L'anomalie résiduelle (Illustration 34) met en exergue les anomalies observées sur l'anomalie de Bouguer :

- une zone fortement positive au sud-ouest du bassin de Marchésieux-Sainteny, correspondant aux affleurements de roches métamorphiques d'âges Briovérien
- une discontinuité de direction N150° séparant cette anomalie positive au Sud d'anomalies négatives au Nord



Illustration 34 : anomalie résiduelle (mGal). Le polygone noir représente les limites du sous-bassin de Marchésieux. Les points noirs sont les stations gravimétriques.

De plus, des anomalies négatives peu visibles sur l'anomalie de Bouguer sont révélées par l'anomalie résiduelle, notamment au sein du sous-bassin de Marchésieux. L'anomalie la plus négative au sein du sous-bassin de Marchésieux est située à son extrémité ouest, et atteint -3 mGals. Au nord de Sainteny, deux anomalies négatives d'élongation nord-sud sont mises en évidence.

Nous faisons l'hypothèse que ces anomalies négatives sont générées par les sédiments tertiaires peu denses du bassin de Marchésieux-Sainteny, objet de cette étude. Une forte

anomalie négative est présente au sud-ouest de la carte, cette anomalie n'est pas associée aux sédiments tertiaires, elle ne fera donc pas l'objet d'une analyse.

#### 3.2.2. Schéma structural

Pour faire ressortir et localiser les discontinuités dans la carte d'anomalie de Bouguer, plusieurs traitements du signal ont été effectués, et analysés :

- Le module du gradient horizontal est la somme quadratique des gradients horizontaux selon les directions E-W et N-S de l'anomalie de Bouguer, il s'apparente à la pente de l'anomalie de Bouguer. Ce module est maximal au droit de discontinuités mettant latéralement en contact des formations de densités différentes. La localisation des crêtes de ce module permet de cartographier les discontinuités majeures.
- Le gradient vertical de l'anomalie de Bouguer permet de focaliser les anomalies en amplifiant les courtes longueurs d'ondes présentes dans l'anomalie de Bouguer. Les anomalies positives et négatives sont ainsi mises en évidence. Au droit de discontinuités mettant latéralement en contact des formations de densités différentes, le gradient vertical est proche de zéro. Cette propriété permet la cartographie des discontinuités majeures.

A partir de l'étude conjointe des deux traitements précédents, une interprétation cartographique structurale a été effectuée (Illustration 35).

Trois familles de discontinuités ont été identifiées :

- une famille de direction N150°, qui marque la limite Sud du sous-bassin de Marchésieux et est visible sur la carte d'anomalie de Bouguer (Illustration 32)
- une famille de direction N040°, marquant une direction quasi-conjuguée à la famille de direction N150°
- une famille de direction N105° à N120°, marquant notamment un axe gravimétrique positif immédiatement au Sud de la ville de Sainteny

Ces discontinuités peuvent marquer la présence de failles de type normale ou inverse ayant des rejets important. En outre, il n'est pas possible à partir de la gravimétrie seule de déterminer si ces failles affectent uniquement le socle, ou si les dépôts tertiaires et quaternaires sont aussi affectés.

A partir de la sismique et de l'électrique, une structure de type graben est observée au sud su bassin de Marchésieux avec des rejets importants, et correspond aux discontinuités de direction N150° vu par la gravimétrie.



Illustration 35 : Anomalie résiduelle surimposée avec les linéaments gravimétriques (traits noirs) décelés

## 3.2.3. Corrélation entre anomalie résiduelle et épaisseur de sédiments

Pour estimer l'épaisseur de sédiments, une première approche consiste à analyser la corrélation entre l'anomalie résiduelle (Illustration 34), et l'épaisseur de sédiments donnée par la sismique et les forages de la banque de données du sous-sol. L'ensemble des informations existantes sur la profondeur du socle est représenté à l'Illustration 36.



Illustration 36 : informations sur la profondeur du socle utilisées : losanges rouges : forages recoupant le socle (epaisseur de sédiments indiquée au dessus), traits bleus : profils sismiques de 2013, traits violets : profils sismiques de 2014, fond géologique tiré de la carte géologique harmonisée

Nous représentons l'épaisseur de sédiments en fonction de l'anomalie résiduelle sur l'Illustration 37. Une corrélation est observée : plus l'anomalie résiduelle est faible, plus l'épaisseur de sédiment est importante, et inversement. Le coefficient de corrélation est de - 0.54 entre ces deux variables, ce qui dénote que les deux variables ne sont pas parfaitement corrélées.



Illustration 37 : relation entre épaisseur de sédiment donné par sismique et forages et l'anomalie résiduelle. La droite rouge est ajustée aux données (points noirs) par moindres-carrés.

Pour interpréter cette corrélation, nous faisons l'hypothèse de travail que l'épaisseur de sédiments h est reliée linéairement à l'anomalie résiduelle AR par la relation d'une plaque infinie :

$$h = \frac{AR}{2\pi G\Delta\rho} + c$$
 (3)

avec G la constante universelle de gravitation,  $\Delta \rho$  le contraste de densité entre sédiments et socle, et c une constante qui rend compte du fait que l'anomalie résiduelle n'est pas nulle lorsque l'épaisseur de sédiments est nulle.

La droite passant au mieux par les points de l'Illustration 37 est déterminée par moindrescarrés. L'erreur quadratique moyenne des résidus entre cette droite et les données est de 28.7 m. La pente de cette droite permet d'appréhender le contraste de densité entre sédiments et socle  $\Delta \rho$ : ce contraste est estimé à -1.1 g.cm<sup>-3</sup>. Cette valeur est à pendre avec quelques précautions du fait de la corrélation moyenne (0.54) entre épaisseur de sédiments et anomalie résiduelle, due à la dispersion des valeurs d'épaisseur de sédiments en fonction de l'anomalie résiduelle (Illustration 37). Néanmoins, la densité des sédiments tertiaire et quaternaire, de par leur lithologie constituée de faluns, de sables et d'argiles peu compactés, est plausiblement comprise dans la gamme 1.7 – 2. Les pélites permiennes ont une densité comprise entre 2.4 et 2.8 (Sheldon, 2005). Ainsi, un contraste de densité de l'ordre de 1 est plausible, et le contraste estimé par la méthode de corrélation n'est pas aberrant.

L'utilisation de la relation (3) permet d'estimer l'épaisseur de sédiments sur l'ensemble du bassin de Marchésieux-Sainteny, à partir de l'anomalie résiduelle. Cette épaisseur convertie en profondeur est représentée sur l'Illustration 38. L'épaisseur de sédiments étant reliée linéairement à l'anomalie résiduelle, on retrouve les éléments marquants de la carte d'anomalie résiduelle.

Ces éléments sont les suivants :

- une profondeur maximale de -145 m au sud-ouest du sous bassin de Marchésieux, au sein d'une large cuvette de profondeur supérieur à -110 m
- un approfondissement du bassin au nord de Marchésieux
- deux sous bassins au nord et au nord-ouest de Sainteny, d'élongation nord-sud



Illustration 38 : altitude du fond du bassin à partir de la relation entre épaisseur de sédiment donnée par sismique et forages (points rouges) et l'anomalie résiduelle.

Cette première analyse permet de mettre en évidence la structuration générale des sousbassins présents dans la zone. De plus, elle permet de donner un ordre de grandeur sur le contraste de densité entre sédiments et socle. Les limites de cette analyse sont les suivantes :

- la relation entre épaisseur de sédiments et anomalie résiduelle n'est pas satisfaite pour toutes les données : il existe de forts écarts, supérieurs à 25 m, entre la relation liant épaisseur et anomalie résiduelle (droite rouge sur l'Illustration 37) et les points de contraintes des forages et de la sismique (points noirs sur l'Illustration 37)
- l'anomalie résiduelle et donc l'épaisseur de sédiment obtenue dépend directement de la forme de l'anomalie régionale utilisée (Illustration 33). Celle-ci étant obtenue par ajustement d'une surface polynomiale, elle ne saurait rendre compte exactement de l'effet gravifique du socle.

Ces limites justifient une estimation plus robuste de l'épaisseur de sédiments.

### 3.2.4. Méthode itérative de calcul de l'épaisseur de sédiments

Une méthode itérative de calcul de l'épaisseur de sédiments a été développée, basée sur les méthodes de Jachens & Moring (1990) et de Bott (1960).

La méthode repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes, admises pour la suite de l'analyse :

- L'anomalie de Bouguer est constituée de deux termes
  - un terme régional, provenant des formations du socle anté-triasique (pélites permiennes, roches métamorphiques briovériennes ...)
  - un terme résiduel, caractérisant le bassin de Marchésieux-Sainteny (sédiments tertiaires et quaternaires).
- Les sédiments tertiaires et quaternaires sont représentés par une densité unique, ainsi que le socle anté-triasique. On ne tient pas compte des différentes lithologies et variations de faciès au sein des sédiments tertiaires et quaternaires, ainsi qu'au sein du socle.

L'estimation de la profondeur du bassin passe par un processus itératif, basée sur la séparation de l'anomalie régionale et de l'anomalie résiduelle à partir de l'anomalie de Bouguer, selon les étapes suivantes (Illustration 39):

- 1. Le contraste de densité entre sédiment et socle est d'abord fixé
- 2. L'effet gravifique des sédiments est calculé aux points où leur épaisseur est connue : forages et profils sismiques (Illustration 36) - ces points sont appelés points de calage. Plutôt que d'utiliser la formule d'une plaque infinie pour calculer cet effet, un modèle géométrique du bassin créé par interpolation entre points de calage et limites du bassin est utilisé
- 3. L'anomalie régionale est déterminée par interpolation entre les points gravimétriques localisés sur le socle et les points de calage : aux points de calage, l'effet des sédiments calculé à l'étape précédente est retranché de l'anomalie de Bouguer. Les points gravimétriques au sein du bassin sont exclus pour ce calcul de régional. Cette étape permet de corriger l'anomalie de Bouguer de l'effet des sédiments aux points de calage, et ainsi d'obtenir l'anomalie régionale liée au socle aux points de calage
- 4. L'anomalie résiduelle est obtenue en soustrayant l'anomalie régionale précédemment calculée à l'anomalie de Bouguer
- 5. L'épaisseur du bassin est alors obtenue en considérant une relation de plaque infinie entre épaisseur et anomalie résiduelle (voir eq. 3). L'effet gravifique du bassin ainsi

estimé est comparé à l'anomalie résiduelle : l'écart quadratique moyen (eqm) est typiquement supérieur à 0.15 mGal pour la première itération, ce qui n'est pas satisfaisant à la lumière de l'erreur de mesure de 0.065 mGal (voir section 3.1.5). Ce fort eqm est lié à l'utilisation de la relation d'une plaque infinie, relation qui n'est pas vérifiée en réalité : le bassin n'est pas infini.

- 6. A partir de l'écart entre l'anomalie résiduelle et l'effet gravifique du modèle d'épaisseur du bassin, une correction à l'épaisseur du bassin est effectuée basée sur une relation de plaque infinie. Ce processus est appliqué itérativement plusieurs fois jusqu'à ce que l'eqm entre l'effet gravifique du bassin et l'anomalie résiduelle soit inférieure à l'erreur estimée sur l'anomalie de Bouguer.
- 7. L'effet gravifique du modèle de bassin est ensuite calculé au niveau des stations localisées sur le socle : l'anomalie régionale est finalement mise à jour en intégrant cette correction.

Les étapes 3 à 7 sont répétées de manière itérative jusqu'à ce que la correction appliquée à l'anomalie régionale à l'étape 7 soit négligeable.



Illustration 39 : schéma du processus itératif d'estimation de la profondeur du bassin

Le contraste de densité entre les sédiments tertiaires et le socle n'est pas connu ; les roches du socle - pélites permiennes et roches métamorphiques - sont plus denses que les sédiments tertiaires et quaternaires, de par leur lithologie et leur degré de compaction. Les résultats de la méthode itérative sont ainsi illustrés pour les contrastes de densité de -0.9, -0.7 et -0.5 g.cm<sup>-3</sup> aux figures suivantes.

Les anomalies régionales et résiduelles, l'altitude du fond du bassin, les écarts entre l'anomalie résiduelle et l'effet du modèle, et les écarts de profondeur du bassin entre les points de calage et le modèles sont figurés à l'Illustration 40, à l'Illustration 41, et à l'Illustration 42 pour les contrastes de densité -0.9, -0.7 et -0.5 g.cm<sup>-3</sup>, respectivement.



Illustration 40 : résultats pour un contraste de densité de -0.9 g.cm<sup>-3</sup> entre socle et sédiments. a): anomalie régionale estimée, b) anomalie résiduelle obtenue à partir de l'anomalie régionale, c) altitude inversée du fond du bassin, d) écart entre l'anomalie résiduelle et l'effet du model (mGal), e) écart en altitude entre forages, sismiques et l'altitude du modèle (m).



Illustration 41 : idem que pour Illustration 40, mais pour un contraste de -0.7 g.cm<sup>-3</sup> entre socle et sédiments.



Illustration 42 : idem que pour Illustration 40, mais pour un contraste de -0.5 g.cm<sup>-3</sup> entre socle et sédiments.

La structuration générale en sous-bassins révélée par la méthode itérative est similaire à celle révélée par la méthode de corrélation (comparez l'Illustration 40c et l'Illustration 38). Les altitudes inversées diffèrent, du fait d'anomalies résiduelles et régionales différentes selon les deux méthodes (comparez l'Illustration 33 et l'Illustration 34 avec l'Illustration 40a et b).

La valeur ajoutée de la méthode itérative est une estimation plus juste de l'anomalie régionale provenant du socle par rapport à celle déterminée par ajustement d'une fonction mathématique aux données. De plus, toutes les données disponibles sur la profondeur du socle y sont intégrées.

L'altitude du fond du bassin inversée est d'autant plus rugueuse et localement profonde que le contraste de densité entre sédiment et socle est faible, comme l'atteste la comparaison de l'Illustration 40c et Illustration 42c. Ceci est surtout valable le long de l'accident gravimétrique de direction N150° au sud du sous-bassin de Sainteny, ou l'altitude inversée y est localement supérieure à -200 m pour un contraste de densité de -0.5 g.cm<sup>-3</sup> (Illustration 42c), ainsi que pour le sous-bassin décelé le plus au nord-ouest de la carte. Ce dernier n'est contraint par aucune données indépendantes : sismique ou forages, et sa couverture gravimétrique est lâche (Illustration 34). Les résultats au niveau de ce sous-bassin sont donc à prendre avec précaution.

Les écarts entre anomalies régionales et l'effet gravifique des modèles de bassin sont inférieurs à 0.1 mGal en valeur absolue, à l'exception des zones à forte profondeur pour le cas du contraste de densité -0.5 g.cm<sup>-3</sup> (Illustration 42d). Ceci s'explique par le fait que le processus d'inversion est basé sur une hypothèse de plaque infinie – cette hypothèse n'étant pas valide lors d'approfondissements locaux du fond du bassin, de type cuvette.

Les écarts entre les profondeurs du bassin aux points de calage et les profondeurs estimées par le modèle ont une moyenne inférieure à 3 m en valeur absolue pour les trois cas de contraste de densité. On observe cependant des écarts importants, supérieurs à 20 m en valeur absolue, localisés au niveau de zones à forts gradients de profondeur du bassin, tel qu'au niveau de l'accident gravimétrique de direction N150°. Ceci s'explique par le fait que notre processus d'inversion est basé sur une hypothèse de plaque infinie – cette hypothèse étant invalide lors d'approfondissements locaux du fond du bassin, de type cuvette. De plus, des forts écarts sont observés à certains forages isolés, il est plausible que ceux-ci soient dus aux imprécisions d'interprétation de ces forages. Des imprécisions dans l'interprétation sismique sont aussi possibles.

Un contraste de densité de -0.5 à -0.9 g cm<sup>-3</sup> entre les formations tertiaires et le socle primaire est compatible avec les densités usuelles pour des sédiments de type falun que constituent les formations tertiaires, et les densités du socle : pélites et roches métamorphiques. Le contraste de densité entre sédiment et socle est par ailleurs évalué à -1.1 par l'analyse de la section 3.2.3. A la lumière de la rugosité excessive de l'altitude du fond du bassin obtenue pour un contraste de -0.5 g cm<sup>-3</sup>, il nous paraît peu plausible que ce contraste soit applicable sur le bassin de Marchésieux-Sainteny. Ainsi, nous recommandons l'utilisation de la carte d'altitude du fond du bassin obtenue avec un contraste de densité -0.9.

# 3.3. CONCLUSION DES MESURES GRAVIMETRIQUES

Les mesures gravimétriques mettent en évidence des anomalies négatives liées au remplissage sédimentaire peu dense du système de sous-bassins de Sainteny-Marchésieux. A la lumière de la géologie complexe du socle hercynien et du signal gravimétrique associé, une méthodologie spécifique a été mise en œuvre pour extraire le signal gravimétrique relatif aux sous bassins, basée sur l'intégration de forages de calages et des résultats de la sismique. Un processus itératif a permis d'établir la profondeur de l'interface entre les sédiments de remplissage des bassins et le socle antétriasique, en fonction du contraste de densité entre ces deux formations.

L'analyse de la corrélation entre anomalie résiduelle et profondeur du bassin permet d'obtenir un ordre de grandeur sur le contraste de densité entre sédiments et socle, celui-ci est de l'ordre de -1 g cm<sup>-3</sup>. Nous préconisons l'utilisation de la carte de l'altitude du toit du socle pour un contraste de -0.9 g cm<sup>-3</sup> (Illustration 40c) pour toute application hydrogéologique.

Il convient de rappeler que les anomalies résiduelles et donc les altitudes de l'interface entre sédiments tertiaires et socle obtenues sont fonction des anomalies régionales déterminées par notre méthodologie, fondée sur plusieurs hypothèses de travail ; les résultats obtenus sont ainsi fonction de celles-ci. En effet, il serait forcément réducteur d'associer au socle une densité unique, les pélites permiennes et les metavolcanites briovériennes ayant plausiblement des densités différentes.

De plus, la répartition spatiale des forages et de la sismique n'est pas homogène. Il existe de larges zones dénuées d'informations de calage, où l'anomalie régionale est obtenue par interpolation. L'anomalie résiduelle et par conséquent l'épaisseur de sédiments afférentes y sont possiblement entachées d'erreurs.

Il reste néanmoins que la gravimétrie apporte une définition générale et nouvelle du sousbassin de Marchésieux en montrant des complexités insoupçonnées jusqu'alors et évaluant sa profondeur au socle avec une quantification des incertitudes associées.

La zone principale et la plus profonde (dépassant 150 m) du bassin est définie au N et N-O de Marchésieux. Un sous-bassin étroit et profond (dépassant également 150 m) se développe selon une direction N150°E au SO de Marchésieux. Deux sous-bassins d'allongement NNO-SSE sont définis au N et au NO de Sainteny. Ce dernier demande à être confirmé (par méthode sismique, électrique ou forage) car il ne bénéficie d'aucun forage permettant de caler ses profondeurs. Une zone de seuil de direction N120°E limite la partie principale du bassin d'une partie N moins profonde. Enfin, les principales directions structurant le sous-bassin de Marchésieux définies grâce aux mesures gravimétriques sont N120 - N150°E et N40°E.

# 4. Investigations électriques

Les investigations sismiques ont permis de mettre en évidence la morphologie du contact entre le socle permien et les formations de remplissage sédimentaire plio-quaternaire ainsi que les grands ensembles constituant ce remplissage. Les investigations gravimétriques, grâce aux calages avec les données de forages et les mesures sismiques, ont permis d'établir une carte du substratum du bassin de Sainteny - Marchésieux.

Les investigations électriques réalisées sur le sous-bassin de Marchésieux ont pour objectif d'améliorer la connaissance de l'extension et de la nature des formations de remplissage. Celles-ci variant entre faluns, sables coquilliers, marnes et argiles, les différences de résistivité devraient permettre de différencier les niveaux plus sableux des niveaux plus argileux (et éventuellement les variations latérales de faciès), ces derniers ayant en principe une plus faible résistivité.

Comme pour les précédentes méthodes, deux campagnes ont été réalisées. Une première en décembre 2012 avec la réalisation de deux profils électriques : un premier de 950 m (MAR1) au droit du forage carotté de Marchésieux, afin de caler les différents horizons, et un second de 940 m (SAY1) afin de caler les données de résistivité sur les faluns de Bléhou et rechercher la faille supposée séparant ces faluns des formations de remplissage plio-quaternaire du sous-bassin de Marchésieux.

Six profils électriques ont été réalisés lors de la seconde campagne, afin d'une part de caractériser les formations de remplissage plio-quaternaire du sous-bassin de Marchésieux et d'autre part d'améliorer la connaissance de la structure des marais et tourbières et des formations sous-jacentes.

# 4.1. ACQUISITIONS ET TRAITEMENTS

# 4.1.1. Équipement

La première campagne de mesures s'est déroulée du 10 au 13/12/2012 et la seconde du 9 au 14/02/2015.

L'acquisition des panneaux électriques a été réalisée à l'aide d'un résistivimètre Syscal-Pro (Iris Instruments, France) connecté à 12 flûtes de 8 électrodes (ou 6 flûtes de 16 traces) avec un inter-trace de 10 m (ou 5 m), soit 96 électrodes métalliques régulièrement espacées de 10 mètres sur 950 m (ou 5 mètres sur 475 m). L'énergie provenait d'une batterie externe.



Illustration 43 – Localisation des panneaux électriques (en rouge) sur fond topographique IGN au 1/25000.
L'espacement inter-électrodes de 10 m a été choisi afin d'assurer à la fois une résolution acceptable des terrains de surface, et l'obtention d'une profondeur d'investigation maximale d'environ 150 m. Les profils électriques réalisés dans les tourbières (MAR6 et MAR7) ont un espacement inter-électrodes de 5 m pour une résolution optimisée des terrains superficiels. Le matériel utilisé comprend notamment:

- 1 Syscal Pro;
- 12 flûtes de 8 traces avec un inter-trace de 10 m, 6 flûtes de 16 traces avec un intertrace de 5 m et 10 connecteurs de flûtes ;
- 96 électrodes et cordons ;
- 1 transporteur à chenilles ;
- 2 batteries de 110 Ah ;
- 1 GPS différentiel Trimble, 1 micro-ordinateur portable et 2 véhicules.

## 4.1.2. Travaux réalisés

Les mesures électriques ont été acquises en suivant les recommandations du Code de Bonne Pratique édité par l'AGAP Qualité.

Six panneaux électriques d'une longueur unitaire de 950 m (inter-électrode de 10 m) et 2 panneaux d'une longueur unitaire de 475 m (inter-électrode de 5 m) ont été réalisés. Les caractéristiques des différents panneaux électriques sont données dans le Tableau 1.

Profil	Nombre de	Date	Longueur	Inter-	Configuration	Nombre de mesures				
	panneaux électriques	d'acquisition	(m)	electrodes (m)	d'acquisition	Brutes	Exploitable s	%		
MAR1	1	11/12/2012	950	10	Dipôle-dipôle	2393	1975	83		
				10	Wenner-Schlumberger	1812	1724	95		
MAR2	1	13/02/2015	950	10	Dipôle-dipôle	2393	2333	97		
				10	Wenner-Schlumberger	1404	1397	99		
MAR3	1	10/02/2015	950	10	Dipôle-dipôle	2393	1982	83		
				10	Wenner-Schlumberger	1404	1385	98		
MAR4	1	11/02/2015	950	10	Dipôle-dipôle	2393	1529	64		
				10	Wenner-Schlumberger	1404	1245	89		
MAR5	1	12/02/2015	950	10	Dipôle-dipôle	2393	1335	56		
				10	Wenner-Schlumberger	1404	1291	92		
MAR6	1	09/02/2015	475	5	Dipôle-dipôle	2633	2312	88		
				5	Wenner-Schlumberger	1788	1774	99		
MAR7	1 + 2 roll	13,14/02/20	705	5	Dipôle-dipôle	4599	4507	98		
	along	15	195		Wenner-Schlumberger	3556	3520	99		
SAY1	1	12/12/2012	940	10	Dipôle-dipôle	2336	2161	92		
				10	Wenner-Schlumberger	1779	1779	100		

Tableau 1: Caractéristiques des panneaux électriques.

# 4.1.3. Principe de la méthode du panneau électrique

Le principe de la méthode du panneau électrique est donné en Annexe 3.

# 4.1.4. Configuration d'acquisition des panneaux électriques

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant et de potentiel en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant des avantages et des inconvénients, notamment en ce qui concerne l'amplitude du signal, la profondeur d'investigation et la résolution. Les niveaux d'espacement (*spacings, levels*) ont été choisis afin de conserver un rapport signal sur bruit suffisant, c'est-à-dire un potentiel mesuré de l'ordre de 1 mV.

Le dispositif dipôle-dipôle donne une très bonne résolution des terrains de sub-surface et pour les discontinuités verticales. Il est moins sensible aux effets latéraux que le dispositif Wenner-Schlumberger. Par contre, le rapport signal/bruit décroit rapidement et la profondeur d'investigation peut être un peu moins importante que celle atteinte par le dispositif Wenner-Schlumberger.

Le dispositif Wenner-Schlumberger est beaucoup plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux. La résolution au niveau des horizons de sub-surface est moins bonne et celle des structures plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation qui est généralement plus importante que celle du dipôle-dipôle grâce à un meilleur rapport signal/bruit.

## 4.1.5. Paramètres d'acquisition

Sur les panneaux électriques et pour l'ensemble des configurations, les paramètres d'acquisition ont été les suivants :

- durée des créneaux d'injection : 0,5 s ;
- nombre de cycle de mesures : 3 à 6 (3 si Q < 0,5 %, 6 si Q > 0,5 %) ;
- déviation standard : Q < 0,5 % ;
- voltage d'injection : 400 V.

# 4.1.6. Positionnement des mesures

Les panneaux électriques ont été positionnés (coordonnées X, Y dans le système Lambert 93) avec un GPS Trimble GeoXH 6000 associé à une antenne externe de type Tornado. Ce récepteur permet de capter les satellites GPS ainsi que les satellites GLONASS (en moyenne entre 14 et 20 satellites). Les valeurs obtenues sont corrigées en post-traitement, à l'aide des éphémérides de l'IGN. Ce post-traitement permet d'aboutir à une précision en X, Y de l'ordre de 10 cm (dans les conditions optimales d'utilisation).

La précision sur les levés altimétriques (Z) est fonction de la couverture végétale et du relief. Les valeurs de Z qui sont affectées d'une précision anormalement élevées et qui paraissent aberrantes (par rapport à la carte IGN au 1/25 000 et par rapport aux observations de terrain) ont été rejetées et ne sont donc pas prises en compte dans la construction du profil topographique. La précision finale sur Z est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres en absolu.

#### 4.1.7. Traitement des données

#### Filtrage des mesures avec le logiciel PROSYS

Les données brutes de mesures électriques ont été filtrées avec le protocole suivant :

- pour le dipôle-dipôle :
  - V> 0,2 mV,
  - Q < 5 %.
- pour le Wenner-Schlumberger (dont le signal est plus puissant) :
  - V > 1 à 2 mV,
  - Q < 3 %.

Ce type de filtrage est cohérent avec les caractéristiques instrumentales fournies par le constructeur, et sont conformes aux recommandations de l'AGAP. Remarquons que le niveau de courant électrique injecté sur les sites de Marchésieux est très fort (I > 1 A en général), ce qui permet une bonne qualité du dipôle-dipôle dont le potentiel est souvent faible en raison d'un facteur géométrique élevé (k > 10000).

#### Traitement des mesures avec le logiciel X2IPI

Le logiciel X2IPI (Bobachev Alexey, Moscow University) permet d'atténuer les artéfacts dus aux à-coups de prise. Toutes les pseudo-coupes de résistivité apparente ont été traitées avec ce logiciel suivant une procédure bien établie.

#### 4.1.8. Inversion des données avec le logiciel RES2DINV

Après filtrage des données avec le logiciel PROSYS et traitement de ces données filtrées avec le logiciel X2IPI, toutes les pseudo-coupes de résistivité apparente ont été inversées avec le logiciel Res2DInv (Loke & Barker 1996).

Les sections de résistivité « vraie » résultats de l'inversion, sont ensuite utilisées pour l'interprétation en termes de géologie et de structurale. Elles fournissent des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie et profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur (les profils de topographie sont inclus lors des inversions de chaque pseudo-coupe de résistivité apparente) et cela pour les différentes configurations d'acquisition choisies.

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (résistivité étalonnée, profondeur des interfaces géoélectriques) les résultats fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant au même jeu de données). Cette indétermination ne peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (résistivités, épaisseurs, profondeurs) obtenus par d'autres moyens (autre méthode géophysique, diagraphies, forages, observations des affleurements ...).

Pour chaque dispositif, des paramètres d'inversion ont été testés de manière à obtenir une bonne convergence de la solution et une erreur minimale d'ajustement du modèle aux mesures.

Les résultats de ces tests ont permis de sélectionner deux ensembles de paramètres (Annexe 4) qui sont :

- standard : minimisation de l'erreur quadratique, inversion lissée. Associée à un facteur d'anisotropie (*filter ratio*) de 0,3, cette inversion permet de privilégier les structures horizontales ;
- robuste : minimisation de l'erreur en valeur absolue, limites plus franches entre les différents horizons, adaptée aux milieux contrastés. Associée à un facteur d'anisotropie (*filter ratio*) de 0,3, cette inversion permet de privilégier les structures horizontales.

Ces tests ont également montré que le dispositif dipôle-dipôle, qui offre une meilleure résolution que le dispositif Wenner-Schlumberger, permettait sur certains profils d'atteindre une profondeur d'investigation suffisante pour caractériser le toit du substratum. Dans ce cas, c'est ce dispositif qui a été retenu pour l'interprétation ; sinon c'est la concaténation des dispositifs dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger qui a été utilisée.

# 4.2. **RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

#### 4.2.1. Coupe de résistivité MAR 1 (Illustration 44 et Illustration 45)

Le panneau électrique MAR1, réalisé en décembre 2012, avait pour objectif le calage des signatures géoélectriques sur le forage carotté de Marchésieux réalisé en 1990 par le BRGM (N° BSS : 01176X0045).

Cet étalonnage a permis d'appréhender le schéma géoélectrique type dans le sous bassin de Marchésieux. Ce schéma géoélectrique serait de bas en haut le suivant :

- Le substratum du bassin, représenté par les argiles rouges du permien, serait caractérisé par un horizon conducteur dont la résistivité est inférieure à 50 ohm.m. L'inversion 2D du dispositif dipôle-dipôle ne permet pas la détermination de la résistivité de ce substratum (profondeur d'investigation insuffisante). L'estimation de la résistivité du Permien (5 ohm.m) provient de l'inversion 2D de la concaténation des dispositifs dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger qui atteint une profondeur de 190 m.
- L'horizon géoélectrique sus-jacent au socle possède une résistivité qui est très variable. Celle-ci passe de moins de 6 ohm.m dans le compartiment SSW à environ 50 ohm.m dans le compartiment NNE. D'après le sondage 01176X0045, cet horizon géoélectrique dont l'épaisseur est d'environ 70 m correspondrait aux grès de Marchésieux (GM). D'après la notice de la carte géologique (Baize et al., 1997) cette formation, également appelée sables coquilliers de Marchésieux, est constituée de sables gris à coquilles, plus ou moins argileux, et d'argiles plastiques à la base. Les importantes variations latérales de résistivité au sein de cette formation pourraient s'expliquer par une variation des teneurs en argiles.
- Les marnes du Bosq d'Aubigny (MBA) sont caractérisées par un horizon résistant (75 à 150 ohm.m) dont l'épaisseur serait comprise entre 40 et 50 m (40 m dans le forage).
- Au-dessus de ces MBA, un horizon conducteur dont la résistivité est comprise entre 10 et 50 ohm.m a été mis en évidence sur l'ensemble de la coupe. Son épaisseur est relativement constante et s'établit aux environs de 15 à 20 m. Cet horizon appartiendrait à la formation des MBA mais dans la bibliographie, il n'est fait mention nulle part de la présence de cette couche conductrice (donc beaucoup plus argileuse) au sommet de

ces formations. Néanmoins, l'analyse des différents logs de forages disponibles et validés ainsi que les diagraphies gamma ray réalisées dans certains de ces forages confirme bien la présence systématique de cet horizon argileux (noté ASBA = argiles supérieures du Bosq d'Aubigny) au sommet des MBA.

- Les faluns de Bohon (FB) sont représentés par un horizon résistant (résistivité 75 à 150 ohm.m) dont l'épaisseur est relativement constante et s'établit aux environs d'une vingtaine de mètres. Les forages 01176X0035 et 01176X0045 confortent cette interprétation.
- L'horizon conducteur en position subaffleurement entre les abscisses 0 et 720 m, puis sous recouvrement entre 720 et 950 m, pourrait correspondre à des dépôts holocène estuarien argileux (argiles vertes observées en surface entre 1.1 à 7.5 m) déposés sur des altérites de faluns de Bohon. La résistivité de cet horizon est comprise entre 25 et 50 ohm.m et son épaisseur varie entre 5 m et un maximum de 15 m.
- La couche résistante (résistivité 75 à 150 ohm.m) de faible épaisseur (- de 10 m) présente à l'extrémité NNE de la coupe pourrait caractériser les sables de Saint-Vigor (SSV).



Illustration 44 : localisation du profil électrique MAR1 sur la commune de Marchésieux, lieu-dit Champeau. Les courbes isovaleur bleues correspondent au toit du substratum défini par gravimétrie calée sur les résultats sismiques et de forage. Le trait rose correspond aux profils sismiques.



Illustration 45 : profil électrique MAR1.

Deux discontinuités géo-électriques D1 et D2 ont été mises en évidence sur ce profil électrique mais leur origine est difficile à déterminer. Cette zone (située entre les abscisses 550 et 550 m) est également caractérisée sur le profil sismique par une zone d'atténuation du signal.

L'Illustration 46, superposant le profil électrique et le profil sismique (volontairement sans interprétation), montre que les discontinuités électriques n'affectent pas le socle et pourraient donc marquer des variations latérales de faciès. Cette illustration permet également de montrer une très bonne corrélation entre les mesures des deux méthodes, notamment concernant l'horizon argileux dénommé ASBA sur l'Illustration 45.



Illustration 46 : Superposition des profils sismiques et électriques au droit du forage carotté de Marchésieux (la légende des résistivités est indiquée sur l'Illustration 45).

#### 4.2.2. Coupe de résistivité SAY 1

L'interprétation du panneau électrique SAY1 ne peut s'appuyer que sur deux forages (01172X0075 et 01172X0058) qui sont situés respectivement à 400 m au SW et à 300 m au NE du profil. La construction du schéma géo-électrique s'appuie également sur les coupes géologiques issues de différentes études réalisées sur le bassin de Marchésieux.

Ce schéma géo-électrique serait de bas en haut le suivant :

- Le substratum du sous-bassin de Sainteny, représenté également par les argilites du Permien, est caractérisé par un horizon conducteur. La résistivité de cet horizon serait inférieure à 20 ohm.m. Ce substratum conducteur n'est mis en évidence que sur la partie NW du profil électrique où sa profondeur serait de l'ordre de 120 m. Au SE de l'abscisse 300m, la profondeur d'investigation du panneau électrique n'est pas suffisante pour caractériser sans ambiguïté le toit du substratum (notamment au regard du toit du substratum indiqué d'après les mesures gravimétriques).
- Les faluns de Blehou, recoupés par les deux forages, correspondraient à l'horizon résistant FBL (résistivité supérieure à 100 ohm.m) et son épaisseur est de l'ordre de 50 à 60 m.
- Les Faluns de Bohon représentés également par un horizon résistant FB (résistivité supérieure à 100 ohm.m) ne serait présent qu'au NW de la discontinuité D2. Dans ce dernier compartiment, la présence des Faluns de Bohon est confirmée par les forages 01172X0075 et 01172X0058. L'épaisseur de cette formation serait de l'ordre de 10 à 20 m.
- Les Marnes de St Nicolas de Pierrepont (MNP) sont présentent sur l'ensemble de la coupe. La résistivité de cette formation est inférieure à 20 ohm.m et son épaisseur varie de 10 à 25 m.
- L'horizon de sub-surface (5 à 10m d'épaisseur) caractérisé par une résistivité de 30 à 50 ohm.m pourrait correspondre soit aux Sables de St-Vigor bien que la résistivité soit un peu faible, soit à des argiles quaternaires indifférenciées. A noter que des variations latérales de faciès sont possibles au sein des sables de Saint-Vigor, ceux-ci pouvant donc aussi être argileux.

Deux principales discontinuités ont été mises en évidence au niveau de ce panneau électrique :

- D1 : cette discontinuité est assez mal caractérisée car située à l'extrémité NW du profil. Elle montre cependant un possible décrochement de certains horizons (Marnes de St Nicolas de Pierrepont et Faluns de Bohon). Le compartiment SE serait affaissé (rejet vertical de l'ordre de 10 à 20 m).
- D2 : cette discontinuité marque essentiellement le socle permien, et n'affecte pas les faluns de Blehou situés au-dessus. Son origine reste indéterminée, l'hypothèse d'une faille est peu probable car le socle ne semble pas affecté sur les données gravimétriques. On observe néanmoins une flexure sur la section sismique.

L'Illustration 47 superposant le profil électrique et le profil sismique (volontairement sans interprétation), montre la cohérence des deux méthodes pour la définition de l'horizon principal correspondant aux faluns de Bléhou. On observe également en profondeur une corrélation significative entre la flexure du réflecteur sismique profond et la variation latérale du plus profond niveau de résistivité. Un changement de lithologie au sein de ce socle profond serait donc envisageable à ce niveau.



Illustration 47 : Superposition du profil sismique et du profil électrique SAY1 (échelle de couleur de résistivités sur l'Illustration 48).



Illustration 48 : profil électrique SAY1.

#### 4.2.3. Coupe de résistivité MAR 2

Ce profil électrique (Illustration 49Illustration 50) a été réalisé sur la commune de Saint-Andréde-Bohon, rue de la Cane, afin de mettre en évidence l'épaisseur et la structure des faluns de Bohon au sein desquels un forage de reconnaissance est envisagé.

Ce profil recoupe le forage 01173X0021 réalisé en 1996, dont la coupe géologique, d'après les données disponibles en BSS serait la suivante :

- De 0 à 14 m de profondeur des silts argileux homogènes (avec rythmicité 50 cm de faciès propres et argileux pouvant correspondre à des argiles de décantation indurées associées aux sables marins tidaux de Saint-Vigor.
- De 14 à 68 m de profondeur des sables grossiers bioclastiques plus ou moins hétérométriques (graviers,...) avec passées consolidées microconglomératiques, attribués aux faluns de Bohon.

Un second forage (01172X0121, réalisé en 1998) est également situé 500 m à l'ouest de ce profil, sur la commune de Saint-Georges-de-Bohon au lieu-dit la Corbinerie. Sa coupe géologique, d'après les données disponibles en BSS, serait la suivante :

- De 0 à 18 m des argiles sableuses bariolées jaune et grise (0-6 m) puis des argiles bariolées grises (6-14 m) jaune et rousse puis des argiles grises coquillières (14-18 m) attribuées aux sables de Saint-Vigor.
- De 18 à 89 m des faluns roux à faciès argileux attribués aux faluns de Bohon puis des faluns plus gris (84-89m) pouvant correspondre aux marnes du Bosq d'Aubigny.
- De 89 à 90 m des argiles rouges attribuées aux pélites rouges du permien.

Sur la base de ces descriptions lithostratigraphiques et des connaissances sur le contexte géologique du secteur, l'interprétation du profil électrique (Illustration 49) serait, de bas en haut, la suivante :

- Le substratum du sous-bassin de Marchésieux correspondrait, dans ce secteur, aux argilites/pélites du permien caractérisées par un horizon conducteur de résistivité inférieure à 20 ohm.m. Il serait situé à une altitude comprise entre -100 m et -130 m NGF d'après ce panneau électrique, tandis que les mesures sismiques l'envisagent plutôt à une altitude d'environ -80/-90 m NGF. Cette divergence d'interprétation laisse supposer la présence d'effets latéraux (faille, contact, variation latéral de faciès) impactant l'inversion 2D de ce panneau électrique. De plus, la résolution des panneaux électriques au-delà de 100 m de profondeur peut être de l'ordre d'une vingtaine de mètres. On retiendra donc que le socle est situé à environ -90 m NGF.
- Au-dessus de ce socle deux horizons électriques différents peuvent être observés :
  - Dans la partie SO du profil, les faluns de Bohon sont observés avec des résistivités comprises entre 60 et 150 ohm.m. Ils semblent se biseauter vers le NE du profil.
  - Dans la partie NE du profil, un horizon présentant des résistivités plus faibles (30 50 ohm.m) est observé. La nature et l'attribution de cet horizon n'est pas possible, compte-tenu du peu d'information disponible. Il pourrait s'agir soit d'une variation latérale vers un faciès plus argileux des faluns de Bohon, soit de la présence des marnes du Bosq d'Aubigny.

• En surface, un horizon conducteur de résistivité inférieur à 20 ohm.m, d'une vingtaine de mètres d'épaisseur au sud-ouest et se biseautant vers le nord-est pourrait correspondre aux argiles de décantation indurées associées aux sables marins tidaux de Saint-Vigor.

Plusieurs discontinuités électriques verticales sont indiquées sur le profil, Il pourrait s'agir de variations latérales de faciès, liée à l'hétérogénéité des faluns de bohon (± indurés, ± sableux, ± coquilliers), plutôt que de failles.

La présence d'une faille ou d'une discontinuité importante sub-parallèle au profil, est envisagée dans cette région proche des limites du bassin. Elle pourrait expliquer les complexités des réponses observées et les incohérences des profondeurs des substratums électriques et sismiques. Elle pourrait être étudiée par des profils d'investigations dédiés orientés du NO vers le SE.



Illustration 49 : profil électrique « MAR2 » réalisé rue de la Cane à Saint-André-de-Bohon.



Illustration 50 : localisation du profil électrique MAR2 (en rouge) sur la commune de Saint-André-de-Bohon. Les courbes isovaleur bleues correspondent au toit du substratum défini par gravimétrie calée sur les résultats sismiques et de forage. Le trait rose correspond aux profils sismiques

#### 4.2.4. Coupe de résistivité MAR 3

L'interprétation du profil électrique MAR 3 (Illustration 51Illustration 52) ne repose sur aucun calage par des forages existants, aucun forage avec une description suffisante n'étant disponible dans ce secteur.

L'interprétation de ce profil en termes de lithostratigraphie est donc basée sur les résultats du panneau MAR1 qui sont parfaitement calés sur le forage 01176X0045. De plus les deux profils électriques sont situés dans un contexte relativement similaire.

Le schéma géo-électrique serait donc de bas en haut le suivant :

- Un socle résistant dont la résistivité est supérieure à 150 ohm.m sur le flanc SW du profil et de l'ordre de 75 ohm.m sur le flanc NE. Au centre du profil, le socle n'aurait pas été atteint (profondeur d'investigation insuffisante) et serait donc à plus de 150 mètres de profondeur. D'après la carte géologique, le substratum dans ce secteur correspondrait à la diorite quartzique de Coutances. La morphologie du socle et des différentes discontinuités suggère la forme d'un graben, en cohérence avec les mesures sismiques du profil SHR01.
- Un horizon très conducteur (résistivité inférieure à 20 ohm.m) apparait notamment dans la partie centrale du graben supposé. Son épaisseur est la plus importante dans la partie centrale où elle dépasse certainement 75 mètres alors que vers le NE, elle semble être de l'ordre d'une cinquantaine de mètres. Cet horizon pourrait correspondre à un faciès argilo-marneux des marnes du Bosq d'Aubigny. A noter que le colluvionnage des argiles d'altération du socle a peut-être participé à la baisse de résistivité de cette formation.
- Au-dessus de cet horizon conducteur, se trouve un horizon résistant (résistivité 75 à 150 ohm.m) dont la puissance moyenne est d'environ 30 à 40 mètres. Celui-ci pourrait correspondre à un faciès sablo-coquillier des marnes du Bosq d'Aubigny.
- La partie supérieure des marnes du Bosq d'Aubigny (notée ASBA) qui est beaucoup plus argileuse (cf. interprétations MAR1) est caractérisée par un horizon conducteur (15 à 40 ohm.m) dont l'épaisseur est d'environ 15 à 20 mètres.
- Un horizon attribué, compte tenu de leur position stratigraphique et de leur résistivité, aux faluns de Bohon (ou d'un horizon plus sableux/coquillier non déterminé) est présent sur l'ensemble de la coupe sauf au SW de F1 (socle). Son épaisseur varie de 6 à 7 mètres au minimum à 20 mètres au maximum. Sa résistivité est comprise entre 60 et 100 ohm.m.
- Un horizon attribué à des dépôts fluviatiles quaternaires indéterminés caractérisés par un horizon conducteur (25 à 50 ohm.m) de faible épaisseur (inférieure à 10 mètres), se biseautant vers le SW au niveau de l'abscisse 300 mètres.
- Enfin, en surface, des formations quaternaires indéterminées sont présentes sur l'ensemble du profil, sauf au SW sur le socle. Sa résistivité est supérieure à 150 ohm.m et son épaisseur varie de 5 à 10 mètres.



Illustration 51 : profil électrique MAR3 réalisé le long de la RD339 de Feugères vers la Groudie.



Illustration 52 : localisation des profils MAR3 et MAR4 (en rouge). Les courbes isovaleur bleues correspondent au toit du substratum défini par gravimétrie calée sur les résultats sismiques et de forage. Le trait rose correspond aux profils sismiques

# 4.2.5. Coupe de résistivité MAR 4

Les différents forages situés à proximité du panneau électrique MAR4 (01176X0011, 0012 et 0067) n'ont pas été utilisés pour le calage de l'interprétation, soit parce qu'ils sont trop éloignés, soit parce que la coupe géologique n'est pas suffisamment précise. L'interprétation en termes de lithostratigraphie de ce panneau a donc été réalisée en se référant aux résultats des profils MAR1 et MAR3 (ces 3 panneaux étant situés dans des contextes relativement identiques).

Au niveau de ce panneau (Illustration 52Illustration 53), la gamme de résistivité est sur l'ensemble de la coupe inversée, plus faible que pour les profils MAR1 et MAR3. Cette différence pourrait être due soit à l'orientation du panneau par rapport au bassin d'effondrement (effets latéraux), soit à la présence des lignes haute tension (ligne enterrée longeant le profil et ligne aérienne à quelques centaines de mètres), soit au fait que les formations sont globalement plus argileuses dans ce secteur.

L'interprétation en termes de lithostratigraphie donne de bas en haut les résultats suivants :

- Le substratum géophysique est résistant (résistivité supérieure à 150 ohm.m) et correspondrait donc, comme au niveau du profil MAR3 à la diorite cadomienne de Coutances. La profondeur du toit de ce substratum serait maximale (de l'ordre de 120 m) entre les deux discontinuités centrales.
- L'horizon conducteur surmontant ce substratum possède une résistance comprise entre 4 et 15 ohm.m. Il est légèrement plus conducteur à l'Ouest qu'à l'Est. Son épaisseur moyenne est de l'ordre de 50 m. Il est à noter que ses dépôts se situent dans la continuité du graben observé sur le profil MAR3 et bien localisé sur la carte gravimétrique et que c'est au centre (entre les discontinuités), que la résistivité de cette formation est la plus faible. Cet horizon pourrait correspondre, comme pour le profil MAR3, à un faciès argilo-marneux des marnes du Bosq d'Aubigny ou aux grès de Marchésieux (faciès argileux) comme indiqué sur l'Illustration 53.
- Au-dessus de cet horizon conducteur, se trouve un horizon résistant (résistivité comprise entre 20 et 100 ohm.m) dont l'épaisseur varie entre 20 à 40 mètres. Celui-ci pourrait correspondre à un faciès sablo-coquillier des marnes du Bosq d'Aubigny.
- Enfin, au-dessus de cet horizon plutôt résistant, se trouve un horizon plus conducteur attribué aux argiles supérieures des marnes du Bosq d'Aubigny (ASBA), de résistivité variant entre 10 et 20 ohm.m et d'une épaisseur variant entre 30 à 40 m.

Quatre principales discontinuités ont été mises en évidence. Le compartiment central pourrait être affaissé et correspondrait à l'axe d'un graben. Les deux discontinuités à l'ESE affaisseraient successivement les compartiments de l'Est. Ces discontinuités affecteraient non seulement le socle mais également le remplissage sédimentaire. Une autre hypothèse serait d'associer ces discontinuités à des variations latérales de faciès, les données disponibles ne permettant pas de privilégier l'une ou l'autre de ces hypothèses.



Illustration 53 : Profil électrique MAR4, réalisé le long de la RD900 au droit du lieu dit « le relais ».

#### 4.2.6. Coupe de résistivité MAR 5

Le panneau électrique MAR5 (Illustration 54Illustration 55) est situé sur la commune de Raids sur la route à l'Ouest du Hameau La Hougue. L'interprétation en termes de lithostratigraphie sera donc basée sur les résultats des 2 précédents panneaux. Le forage 1175X0037 bien que peu profond (50 m) a permis de conforter (après réinterprétation du log géologique) l'interprétation de ce profil.

Le schéma géoélectrique au niveau de ce panneau électrique serait de bas en haut le suivant :

- Un 1<sup>er</sup> horizon très conducteur (résistivité inférieur à 10 ohm.m) et de forte puissance (plus de 80 m). Il correspondrait à un faciès argilo-marneux des marnes du Bosq d'Aubigny (ou faciès argileux des grès de Marchésieux, hypothèse à priori moins probable). Le toit du socle qui serait à plus de 120 m d'après l'interprétation gravimétrique n'a pas été atteint par le panneau électrique. Cette dernière hypothèse conférerait au faciès argilo-marneux des marnes du Bosq d'Aubigny (ou aux grès de Marchésieux) une puissance supérieure à 80 m.
- L'horizon sus-jacent correspondrait à un faciès plus sableux/coquilliers des marnes du Bosq d'Aubigny (MBA). Cet horizon résistant (résistivité entre 30 et 100 ohm.m) aurait une épaisseur moyenne de 40 à 50 m.
- Les argiles supérieures du Bosq d'Aubigny (ASBA) sont représentées par une couche conductrice (10 à 30 ohm.m) dont l'épaisseur varie entre un minimum de 10 m et un maximum de 30 m.
- Enfin, les sables de Saint Vigor (SSV) nappent l'ensemble de la zone investiguée. Ils sont caractérisés par une couche résistante (résistivité > 100 ohm.m et >200 ohm.m pour ceux situés dans les 10 premiers mètres, à priori non saturés) sur une épaisseur variant de 10 à 25-30 m d'épaisseur. Des lentilles de marnes de Saint Nicolas de Pierrepont (MNP) pourraient également être envisagée au sein de ces sables (ou des variations de faciès vers un faciès plus argileux au sein des sables de Saint Vigor).

Quatre discontinuités ont été mises en évidence. Elles semblent affecter toute la pile sédimentaire à l'exception des sables de Saint-Vigor. Comme pour le profil précédent, elles pourraient également souligner des variations latérales de faciès.



Illustration 54 : Profil électrique MAR5 sur la commune de Raids sur la route à l'Ouest du Hameau la Hougue.



Illustration 55 : localisation du profil MAR5 (en rouge). Les courbes isovaleur bleues correspondent au toit du substratum défini par gravimétrie calée sur les résultats sismiques et de forage. Le trait rose correspond aux profils sismiques

#### 4.2.7. Coupe de résistivité MAR 6

Ce profil (illustrations 47 et 48) a été réalisé dans les marais de la Grosnière situés à l'intersection entre les communes d'Auxais, de Saint-André-de-Bohon et de Saint-George-de-Bohon. L'objectif de ce profil électrique était la caractérisation des horizons sous-jacents des marais et tourbières. La profondeur d'investigation a été limitée à 80 m au profit d'une meilleure résolution des terrains de subsurface.

L'élaboration du schéma géoélectrique au niveau de ce panneau est basée sur la coupe géologique du forage 01176X0061, réalisé en 1997, situé pratiquement sur le profil (ce forage est équipé en piézomètre et fait partie du réseau de suivi patrimonial BRGM-ONEMA). La lithostratigraphie de ce forage a été réinterprétée grâce à l'expérience acquise au niveau de l'interprétation des autres panneaux électriques. Elle serait la suivante :

- De 0 à 7 m : Des argiles indifférenciées (dépôts quaternaires ?)
- De 7 à 18 m des argiles gris-noir sableuses à coquilles abondantes, pouvant éventuellement être attribuées aux Marnes de Saint-Nicolas-de-Pierrepont (au vue des profils électriques).
- De 18 à 36 m des argiles grises plastiques (de 18 à 27 m) puis sableuses à coquilles abondantes (de 27 à 36 m) attribuées aux marnes du Bosq d'Aubigny
- De 36 à 109 m des sables coquillers (36 57 m) dans une matrice sableuse (57 78 m) puis des argiles sableuses claire à coquilles (78 109 m), cet ensemble homogène pourrait être attribué aux faluns de Bohon.
- De 109 à 110 m les argiles rouges du Permien.

Avec ce calage, le schéma géoélectrique au niveau de ce profil serait de bas en haut le suivant :

- Au centre de la coupe, à la profondeur maximale d'investigation de 95 m, le substratum permien n'a pas été atteint. Au niveau du forage 1171X0061, ce substratum se situe à 109 m de profondeur.
- L'horizon résistant qui occupe la base de la coupe a une résistivité comprise entre 40 et plus de 150 ohm.m et son épaisseur serait supérieur à 60 m. Cet horizon homogène correspondrait à priori aux faluns de bohon. A noter que sa forte résistivité pourrait incliner à le rapprocher des faluns de Bléhou, néanmoins, la description lithologique disponible ne permet pas de statuer.
- Au-dessus de ces faluns serait présent un ensemble argileux attribué aux marnes du Bosq d'Aubigny ou à leur niveau argileux supérieur (ASBA). Cet horizon est caractérisé par des résistivités comprises entre 15 et 30 ohm.m et une épaisseur comprise entre 10 et 15 m.
- Enfin, les formations superficielles seraient attribuées à un faciès argilieux des sables de Saint Vigor (SSV) puis pour l'horizon de subsurface aux tourbes situées dans la zone de marais.

L'Illustration 56 (en bas) met en évidence l'alternance de niveaux plus argileux et plus sableux sous les tourbières. Comme cela avait été mis en évidence lors des pompages d'essais sur le forage de la Grosnière 01176X0061 (Laurent et al., 2014, Rapport BRGMRP-63136-FR), cette forte épaisseur d'argile peu perméable joue le rôle d'aquitard séparant l'aquifère sous-jacent au sein des faluns de Bohon de l'aquifère superficiel contenu dans les tourbes.

Cinq discontinuités ont été mises en évidence sur cette coupe géoélectrique, avec des rejets éventuels de faible amplitude. Comme pour le profil précédent, elles pourraient également souligner des variations latérales de faciès.





Illustration 56 : Profil électrique MAR6 (haut : inversion avec une profondeur de 80 m, bas : profondeur d'investigation réduite à 30 m pour une meilleure résolution des horizons de sub-surface).

Illustration 57 : localisation des profils électriques MAR 6 et MAR 7 (traits rouges). Les courbes isovaleur bleues correspondent au toit du substratum défini par gravimétrie calée sur les résultats sismiques et de forage. Le trait rose correspond aux profils sismiques

## 4.2.8. Coupe de résistivité MAR 7

Ce profil (Illustration 57Illustration 58) a été réalisé dans les marais des Rouges Pièces sur la commune de Marchésieux. Comme pour le profil MAR6, l'objectif de ce profil électrique était la caractérisation des horizons sous-jacents des marais et tourbières. La profondeur d'investigation a été limitée à 80 m au profit d'une meilleure résolution des terrains de subsurface.

L'élaboration du schéma géoélectrique au niveau de ce panneau est délicate car aucun forage de calage n'est situé à proximité. Les deux forages les plus proches avec une description suffisante sont le forage carotté de Marchésieux (01176X0045) situé 2 km au SO et le forage de la Grosnière (01176X0061) situé 1.3 km au NO.

Sur la base des observations géologiques disponibles dans ces forages, le schéma géoélectrique au niveau de ce profil serait de bas en haut le suivant :

- Le socle permien non atteint par ce panneau électrique, est à une altitude supposée, sur la base des mesures sismiques et gravimétrique, de -90 m NGF.
- Deux dômes conducteurs à l'attribution délicate, pouvant correspondre à des argiles ou des calcrêtes du trias ou à des variations latérales de faciès au sein des Marnes du Bosq d'Aubigny. Une autre hypothèse moins probable serait le rejeu de faille faisant remonter le socle sous-jacent.
- Un premier horizon résistant (résistivités comprises entre 50 et 150 ohm.m) de 30 à 50 m d'épaisseur avec une morphologie atypique en dôme. Cet horizon pourrait correspondre aux Marnes du Bosq d'Aubigny.
- Un horizon modérément conducteur (résistivités comprises entre 25 et 50 ohm.m) susjacent attribué, par similitude aux autres profils, aux argiles supérieures du Bosq d'Aubigny. Le pendage supposé de cet horizon vers le NNW suggère une transition vers les faluns de Bohon situés au-dessus.
- Un horizon résistant bien marqué dans le tiers NNW de la coupe, attribué aux Faluns de Bohon et qui s'épaissirait d'avantage en rejoignant le profil MAR6 situé au NNW.
- Ces faluns seraient recouverts, dans le tiers NNW du profil, par un horizon conducteur (résistivités comprises entre 10 et 30 ohm.m) attribué aux Marnes du Bosq d'Aubigny (ou Marnes de Saint-Nicolas de Pierrepont ?). Toujours dans ce tiers NNW du profil, des sables de Saint-Vigor (horizon résistant d'une dizaine de mètres d'épaisseur) pourraient recouvrir ces marnes.
- Enfin, dans le quart SSE du profil, un horizon modérément conducteur (résistivités comprises entre 20 et 30 ohm.m), s'épaississant vers le SSE à une quinzaine de mètres, en direction de la rivière du Lozon, correspondrait aux tourbes.



Illustration 58 : profil électrique MAR7. (haut : inversion avec une profondeur de 80 m, bas : profondeur d'investigation réduite à 30 m pour une meilleure résolution des horizons de sub-surface).

# 4.3. CONCLUSION DES TOMOGRAPHIES ELECTRIQUES

Les profils électriques réalisés apportent des informations significatives permettant de caractériser les faciès des différentes formations aquifères en présence. Des précisions sont aussi apportées localement sur la nature du socle quand il est atteint. Ses performances peuvent toutefois être prises en défaut quand des formations différentes présentent les mêmes gammes de résistivité. Dans ce cas les résultats de la sismique réflexion et de la RMP peuvent être utilisés pour mieux contraindre la caractérisation des faciès. Les performances de la méthode électrique peuvent être synthétisées telles que présentées ci-dessous :

- Points forts de la méthode :
  - Caractérisation géométrique des différentes formations aquifères : Marnes du Bosq d'Aubigny, Faluns de Bohon, Faluns du Bléhou. Ces trois formations sont représentées par des horizons géo-électriques résistants (résistivité de 60 à 200 ohm.m). La caractérisation géométrique des grès de Marchésieux est plus délicate car cette formation possède une résistivité a priori intermédiaire (30 à 40 ohm.m) entre celle du substratum (<20 ohm.m) et celle des Marnes du Bosq d'Aubigny (>60 ohm.m).
  - Bonne caractérisation (géométrie et résistivité) des Marnes de St Nicolas de Pierrepont et des argiles supérieures des Marnes du Bosq d'Aubigny qui peuvent constituer des écrans protecteurs pour les différentes formations aquifères.
  - Mise en évidence de discontinuités subverticales au sein du remplissage sédimentaire, pouvant correspondre soit à des failles, soit à des limites paléogéographique ou encore à des variations latérales de faciès (plus ou moins argileux ou sableux).
- Points faibles de la méthode :
  - Imprécision (jusqu'à quelques dizaines de mètres) sur la localisation du toit du substratum Permien. Plusieurs raisons à cette imprécision :
    - Faible résolution des inversions à des profondeurs supérieures à 100 m. Le toit du socle à 100-150 m de profondeur correspond à la base des tomographies électriques où la résolution est limitée (compte tenu du dispositif déployé).
    - Mauvaise caractérisation du substrat du fait de l'absence ou de faible contraste de résistivité entre les Grès de Marchésieux (30 à 40 ohm.m) et les argilites du Permien (<20 ohm.m). Dans le sous-bassin de Sainteny où le Falun du Bléhou (résistivité supérieure à 100 ohm.m) repose directement sur les argilites du Permien, la précision sur la localisation du substratum devrait être meilleure.
    - Manque de calage sur les forages ayant atteint le substratum. Sur le profil MAR1, la profondeur d'investigation du panneau électrique n'est pas suffisante pour atteindre le substratum au droit du forage 1176X0045 et sur le profil SAY1, les forages qui auraient pu servir de calage sont très excentrés (à l'extrémité du profil et à plus de 300m de part et d'autre de ce profil).
    - Les principales formations aquifères (Faluns du Bléhou, Marnes du Bosq d'Aubigny et Falun de Bohon) sont caractérisées par des gammes de résistivité identiques (60 à 200 ohm.m). Il est donc prudent d'avoir un forage renseigné dans la zone d'investigation géophysique afin de pouvoir recaler la coupe géoélectrique dans le contexte géologique adéquate.

# 5. Sondages RMP

# 5.1. ACQUISITION DES MESURES

Les sondages par Résonance Magnétique des Protons (RMP) ont été réalisés en deux fois : du 9 au 14 mars 2015 puis du 20 au 22 juillet 2015. 10 sondages RMP (MARCH1 à MARCH10) ont été mesurés sur différents sites choisis en fonction des objectifs d'implantation des forages d'exploration hydrogéologiques du projet et pour investiguer des milieux aquifères de caractéristiques hydrodynamiques contrastées. Ce deuxième critère visant à fournir des données pour l'étalonnage des résultats des sondages RMP.

Les implantations des sondages RMP sont figurées sur l'Illustration 59 et le principe de la méthode des sondages RMP est présenté en Annexe 5.

Les caractéristiques des sondages RMP sont rassemblées dans le Tableau 2. Trois types de boucles électromagnétiques ont été utilisés suivant la profondeur d'investigation souhaitée et les conditions de rapport signal sur bruit rencontrées. Dans la plupart des cas une boucle carrée de 75 m de côté a été utilisée pour une profondeur d'investigation de l'ordre de 100 m. Sur le site MARCH4, une boucle carrée de 110 m de côté a été utilisée pour investiguer des aquifères plus profonds. Dans les cas de rapport signal/bruit défavorable une boucle en huit composée de deux carrés a été utilisée (MARCH6 et MARCH8). Ce dispositif permet de réduire le bruit EM se propageant de manière uniforme selon une direction orthogonale au grand axe du huit. Dans ce cas la profondeur d'investigation est réduite à environ 70 m. Le sondage MARCH8 a subi un problème instrumental pendant la nuit et n'a pas pu être repris. Son résultat est donc incomplet et limité aux 30-40 premiers metres d'investigation. Il ne permet pas d'investiguer complètement les faluns de Bléhou visés.

Les niveaux de bruits électromagnétiques rencontrés sur chaque site sont présentés dans le Tableau 2. Les mesures avec le testeur de bruits Iris Instrument sont comparées aux mesures NUMIS sur l'Illustration 60. Les niveaux sont réduits en mars pour les sondages MARCH1 à MARCH5 avec des valeurs inférieures à 200 nV. MARCH6 est un exemple d'efficacité du dispositif de boucle en 8 (et potentiellement du filtrage numérique) avec un bruit NUMIS nettement réduit par rapport au bruit testeur. MARCH7 n'est pas complètement significatif car la mesure du bruit testeur n'a pas été reportée et c'est la valeur du bruit mesuré pour MARCH2, sondage voisin mais bénéficiant d'un environnement plus favorable, qui est utilisée. Contrairement à MARCH6, le niveau élevé sur MARCH8 pourrait indiquer une orientation peu efficace du dispositif en 8 (une nouvelle orientation est recommandée pour une future investigation de ce site). Les niveaux de bruit de MARCH7 et MARCH8 sont significativement plus élevés que les valeurs précédentes avec des niveaux entre 400 et 700 nV. Les niveaux mesurés en avril et juillet sont proches et supérieurs aux plus fortes valeurs mesurées en mars. Le rapport plus élevés qu'en mars (car ceux-ci sont mal évalués par la mesure testeur).

Ces observations des niveaux de bruits nous invitent à recommander de réaliser les mesures RMP pendant l'hiver et avant la fin mars quand les clôtures électriques sont encore peu actives.



Illustration 59 : Localisation des investigations RMP (carré bleu) sur fond topographique de l'IGN au 1/25000, des sondages MARCH1 à MARCH10. Les croix noires correspondent aux mesures de bruit EM (avec valeur associée en µV)

Les données sont globalement de bonne qualité voire de très bonne qualité avec des rapports signal/bruit, S/N supérieurs à 10 pour la majorité des sondages (deux valeurs entre 5 et 10) et des rapports bruit ambiant sur bruit instrumental (EN/IN) inférieurs à 2 pour les six premiers sondages de mars et entre 4 et 7 pour les autres.



Illustration 60 : – Comparaison des bruits ambiants rencontrés sur les différents sites au mois de mars 2015 (rond noir), au mois d'avril 2015 (carré noir) et au mois de juillet 2015 (triangle noir) tels que mesuré avec le testeur de bruit Iris Instrument et évalués comme le produit du bruit NUMIS, après filtrage par la racine du nombre de stack.

Résultats des investigations géophysiques sur le sous-bassin de Marchésieux

Sondage	Boucle TX-RX	Rx1- Rx2	Nb stack	Bruit ambiant testeur (février en μV)	Incer- titude (µV)	Bruit ambiant Numis (Prodi- viner, nV)	Incer- titude (nV)	Bruit ambiant testeur (avril en μV)	Incer- titude (µV)	Bruit ambiant testeur (juillet en μV)	Incer- titude (µV)	pics de bruit (µV)	Bruit ambiant Numis (Prodi- viner, nV)	Incer- titude (nV)	Rapport signal/ bruit	Qualité du sondage EN/IN	Prof. d'inves- tigation (m)
MARCH1	carré 75 m	carré 10 m, 7 tours	400	0.07		90	30								7.40	0.86	100.00
MARCH2	carré 75 m	carré 10 m, 7 tours	400 puis 300	0.14		202	65								41.79	2.04	100.00
MARCH3	carré 75 m	carré 10 m, 7 tours	300 puis 350	0.10		180	72								26.00	1.92	100.00
MARCH4	carré 112 m	carré 10 m, 7 tours	350	0.10		187	56								82.90	1.96	>100
MARCH5	carré 75 m	carré 10 m, 7 tours	200	0.06	0.01	141	64								41.14	1.84	100.00
MARCH6	8- carré 53 m	carré 10 m, 7 tours	200	0.85		106	35								26.65	1.22	70.00
MARCH7	carré 75 m	carré 10 m, 7 tours	200	0.14		389	106								15.98	5.50	100.00
MARCH8	8- carré 53 m	carré 10 m, 7 tours	400	0.70		650	250								7.71	6.65	40.00
MARCH9	carré 75 m	carré 10 m, 7 tours	300					0.06	0.02	0.13	0.08	8.00	520	346	13.50	6.01	100.00
MARCH10	8- carré 56 m	carré 10 m, 7 tours	300					0.85	0.15	0.85	0.15	5.00	1212	606	3.20	17.80	70.00

Tableau 2 – Caractéristiques des sondages RMP.

# 5.2. TRAITEMENT DES DONNEES

Différents procédés de traitement ont été testés (Illustration 61). Le traitement multicanal a postériori avec utilisation des enregistrements de bruit apparait le plus efficace car il permet de descendre le niveau de bruit à un niveau comparable au notch mais sans apparemment affecter le niveau de signal. C'est ce traitement qui a été appliqué sur l'ensemble des sondages. Le filtrage notch (filtre en encoche) n'est pas efficace dans les conditions de Marchésieux car la fréquence de Larmor est trop proche de 2000 Hz (harmonique du 50 Hz) : le filtrage notch réduit le niveau de signal.



Illustration 61 - De gauche à droite et de haut en bas, effet de différents traitements sur le sondage MARCH7 : stack simple, notch 50Hz (Prodiviner) + stack, despiking + traitement multicanal + stack, despiking + soustraction avec otpim filter sur voie 2 + stack.

# 5.3. RESULTATS DES SONDAGES RMP

Les courbes de mesures et les résultats d'inversion des sondages RMP sont présentés en Annexe 7. L'implantation détaillée des sondages RMP ainsi que la comparaison des résultats RMP avec les résultats des tomographies électriques et les sections sismiques réflexion sont présentés sur les Illustration 62 à 74. Une synthèse des résultats RMP est présentée sur l'*Illustration 75*.

# 5.3.1. Sondages MARCH1, MARCH2, MARCH7

Ces trois sondages ont été réalisés à proximité du panneau électrique MAR2 et du profil sismique P2.

Les sondages sont d'excellente qualité avec un rapport EN/IN inférieur à 2 et un rapport signal/bruit de 7 à 42.

La différence de réponse entre MARCH2 et MARCH7 qui sont contigus est peu sensible. Toutefois, pour MARCH2 la réponse la plus favorable (teneur en eau = 22 % et T2\* = 380 ms) est observée à plus de 40 m de profondeur (44-78 m) et correspond aux résistivités supérieures à 50 Ohm.m attribuées aux faluns de Bohon. Pour MARCH7, la réponse la plus favorable est observée entre 30 et 60 m de profondeur (teneur en eau =22 % et T2\*=300 ms) et correspondrait à des résistivités inférieures à 30 Ohm.m. Dans les deux cas la couche superficielle de 15 m d'épaisseur caractérisée par des résistivités inférieures à 15 Ohm.m se révèle non productive (temps de décroissance inférieur à 150 ms teneur en eau comprise entre 0 et 10%). La couche intercalée entre 15 et 20-30 m avec une teneur en eau intermédiaire n'a pas de bonne caractéristique hydrodynamique avec des temps décroissance T1 < 200 ms.

Au niveau de MARCH1, l'épaisseur de la couche aquifère et la teneur en eau RMP (< 4%) sont nettement réduites par rapport aux sondages précédents mais les temps de décroissance restent élevés (T1=430 ms, T2\*=260 ms). Il pourrait donc s'agir d'un milieu peu poreux mais avec des pores larges permettant une transmissivité significative. A partir de ces observations, on peut faire l'hypothèse qu'il s'agit d'un socle fracturé en accord avec le forage le plus proche (01173x0013) qui décrit des pélites rouges jusqu'à 15 m de profondeur. Cet aquifère présenterait sa réponse optimale entre 20 et 30 m de profondeur.

Bien que les réponses RMP ne soient pas calées dans l'environnement du bassin de Marchésieux, cette réponse est nettement moins favorable que les réponses de MARCH2 et 7. Toutefois un effet magnétique qui diminuerait le temps de décroissance T2\* et la teneur en eau RMP apparente de MARCH1 par rapport aux observations de MARCH2 et 7 peut être suspecté ; nous ne disposons pas de mesures de susceptibilité magnétique pour tenter de valider cette hypothèse. Dans tous les cas un changement important de lithologie est suspecté entre MARCH2-7 et MARCH1. Considérant un aquifère de socle, le toit de la couche aquifère vers 15 m à la base des altérites reconnues comme des pélites dans le forage précité n'est pas cohérent avec le toit du substrat défini par sismique et gravimétrie à 25-30 m. Ce pourrait être expliqué par le décalage d'une faille figurée sur la carte géologique à l'O de MARCH1 (Illustration 62 et Illustration 63).

En l'état des connaissances, les sites MARCH2 et 7 peuvent être considérés comme équivalents et également favorables pour l'implantation d'un forage de reconnaissance hydrogéologique.



Illustration 62 : Carte d'implantation des sondages RMP1-2-7.Les boucles RMP sont représentées en rouge, le profil sismique correspond au trait rose et le profil électrique au trait rouge. Les traits bleus correspondent à l'altitude du substratum déterminée par la gravimétrie.



Illustration 63 : Résultats des sondages RMP MARCH1, MARCH2 et MARCH7, présentés sur les coupes de panneau électrique et de sismique SHR01.

.
#### 5.3.2. Sondage MARCH6

Le sondage MARCH6 a été réalisé entre le panneau électrique MAR3 et le profil sismique SHR01 au centre du bassin étroit mis en évidence par gravimétrie au sud de la zone d'étude (Illustration 64).

Des couches d'eau RMP de caractéristiques moins favorables (teneur en eau moyenne = 11% et T2\* =135 ms) sont observées, par comparaison aux sondages MARCH2 et 7. Le maximum de teneur en eau pourrait correspondre aux argiles du Bosq telles que définies par le panneau électrique et aux argilites grises telles que définies par le profil sismique. Mais comme nous ne sommes pas exactement localisés au même endroit, il n'est pas impossible que cette couche corresponde au Marnes du Bosq d'Aubigny telles que définies par le panneau électrique, remontant en bordure de bassin. Ce niveau est encadré par des niveaux de moindre teneur en eau. La base de la couche aquifère correspondrait à un faciès argileux des marnes du Bosq tel qu'interprété sur le panneau électrique et à un niveau indéterminé en sismique mais cela correspond aussi à la limite d'investigation du sondage ce qui limite la valeur de ce dernier résultat.

La caractérisation RMP indique que ce site est peu favorable pour un forage de reconnaissance hydrogéologique dans les 100 premiers m de profondeur.

#### 5.3.3. Sondage MARCH4

La principale couche aquifère se développe entre 20 et 60 m avec une teneur en eau moyenne de 30 % et des temps de décroissance de 300 ms pour T1 et 280 ms pour T2\*. Cette couche représente une bonne cible aquifère. D'après le forage 01176X0041, la principale couche aquifère RMP correspondrait aux marnes du Boscq, faciès sableux. Audessus, les faluns de Bohon cimentés présentent des caractéristiques nettement moins favorables. Au-delà de 60 m de profondeur se développe une couche à forte teneur en eau mais de faible transmissivité : il s'agit probablement d'un faciès à teneur en argile élevée dont les caractéristiques ne sont pas favorables.

Bien que le sondage RMP soit situé à au moins 500 m au sud des profils électriques et sismiques (Illustration 66), nous avons tenté une comparaison des résultats RMP avec ces derniers. Les correspondances de faciès ne sont pas cohérentes avec le forage 01176x0041 et n'ont donc pas été retenues.

#### 5.3.4. Sondage MARCH3

Le sondage MARCH3 montre une importante couche d'eau RMP qui se développe entre 30 et au moins 80 m de profondeur. Elle est caractérisée par des teneurs en eau de près de 25 % et des temps de décroissance élevés (T1=305 et T2\*= 353 ms). Par comparaison avec les résultats de l'électrique et de la sismique (bien que ces dernières soient situées à plusieurs centaines de m, Illustration 67 et Illustration 68), elle correspondrait aux Marnes du Bosq d'Aubigny en accord avec le forage 01176X0046. Cette couche représente une bonne cible aquifère.

Les niveaux au-dessus de 30 m de profondeur ne présentent pas de réponse RMP : il s'agit soit d'argiles, soit d'un milieu non poreux. Ils correspondent selon les résultats de l'électrique et de la sismique aux Marnes de St-Nicolas de Pierrepont dont la résistivité est inférieure à 25 Ohm.m. Ces marnes seraient donc non aquifères et pourraient constituer un niveau imperméable.



Illustration 64 : Carte d'implantation du sondage RMP MARCH6.



Illustration 65 : Résultats du sondage RMP MARCH6 présentés sur les coupes de panneau électrique et de sismique SHR01.



Illustration 66 : Carte d'implantation du sondage RMP MARCH4.



Illustration 67 : Carte de localisation des sondages RMP MARCH3 et 5.



Illustration 68 : Résultats du sondage RMP MARCH3 présentés sur les coupes de panneau électrique SAY1 et de sismique SHR04 et SAY1.

#### 5.3.5. Sondage MARCH5

Le sondage MARCH5 (Illustration 67 et Illustration 69) montre une importante couche d'eau RMP qui se développe entre 40 et au moins 80 m de profondeur. Elle est caractérisée par des teneurs en eau moyenne de 22 % et des temps de décroissance élevés (T1=275 et T2\*= 330 ms). Cette couche représente une bonne cible aquifère. Par comparaison avec les résultats de l'électrique et de la sismique, elle correspondrait aux faluns de Bohon.

Les niveaux au-dessus de 30 m de profondeur ne présentent pas ou peu de réponse RMP. Il s'agit soit d'argiles, soit d'un milieu non poreux. Ils correspondraient selon les résultats de l'électrique et de la sismique corrélés aux forages aux Argiles et Marnes du Bosq d'Aubigny. Ces niveaux ont une résistivité inférieure à 25 Ohm.m sauf un niveau intercalé de résistivité comprise entre 25 et 80 Ohm.m.

#### 5.3.6. Sondage MARCH8

Le sondage RMP MARCH8 (Illustration 70 et Illustration 72) n'a pas été conduit à son terme et n'a pu être refait. Sa profondeur d'investigation est limitée à 40 m.

Les résultats du sondage RMP montrent une couche d'eau avec une teneur en eau importante (24 %) mais un temps de relaxation T1 faible (100 ms) qui se développe à partir de 13 m de profondeur et atteint 40 m. Toutefois les valeurs élevées de T2\* (280 ms) en début de sondage indiquent la possibilité d'une couche de meilleures caractéristiques pour les terrains superficiels. La couche à 24% de teneur en eau qui se développe entre 12 et 40 m de profondeur correspondrait aux faluns de Bléhou.

Ce sondage n'étant pas complet, il n'est pas utilisé pour la suite des analyses.

#### 5.3.7. Sondage RMP MARCH 9

Le sondage MARCH9 (Illustration 71 et Illustration 73) présente, entre 0 et 15 m de profondeur, une couche de caractéristiques RMP médiocre (W<10%, T1<100 ms) correspondant à des résistivités inférieures à 30 Ohm.m sur la tomographie électrique MAR7. Ces résultats RMP confirment l'interprétation du panneau électrique qui propose ici une formation argileuse.

En dessous se développe la couche aquifère principale attribuée aux marnes du Bosq en accord avec le forage 1176X0091. Avec des temps de décroissance élevés (T1= 251 ms et T2\*=285 ms) pour une teneur en eau RMP moyenne de 24%, il s'agit d'une cible aquifère, favorable.



Illustration 69 : Résultats du sondage RMP MARCH5 présentés sur les coupes de panneau électrique MAR6 et de sismique SHR03



Illustration 70 - Résultats du sondage RMP MARCH8 présentés sur la coupe sismique SAY2.



Illustration 71 – Carte de localisation du sondage RMP MARCH9.



Illustration 72 - Carte de localisation du sondage RMP MARCH8.



Illustration 73 - Résultats du sondage RMP MARCH9 présentés sur les coupes de panneau électrique MAR7.

#### 5.3.8. Sondage RMP March 10

Pour ce sondage RMP (Illustration 74), le bruit très élevé provient à la fois du 50 Hz et des clôtures électriques (bien que la plus proche ait été coupée pendant la nuit d'acquisition). Après stacking et traitement par les fonctions despicking et remote, le rapport signal sur bruit de 5.5 reste acceptable.

La couche d'eau principale RMP se développe entre 5 et 33 m de profondeur avec une teneur moyenne de 15 %. Le temps de décroissance T1 est peu élevé (160 ms) et qualifie un aquifère médiocre.

Au-delà de 33 m de profondeur les temps de décroissance sont encore moins élevés et indiquent un milieu sans intérêt aquifère qui se développerait selon la lithologie du forage 1175X0026 dans les grès permiens.



Illustration 74 - Carte de localisation du sondage RMP MARCH10.

#### 5.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES

Les résultats des sondages RMP et les caractéristiques hydrodynamiques des forages proches sont présentés dans le tableau de l'Annexe 6. Les caractéristiques hydrodynamiques des sondages RMP sont synthétisées dans les graphes de l'Illustration 75 et l'Illustration 76. Les transmissivités sont calculées selon la formule couramment utilisée T =  $\Sigma$  C W<sub>i</sub><sup>a</sup> T<sub>ni</sub><sup>b</sup>  $\Delta z_i$ . avec W<sub>i</sub> et T<sub>ni</sub>, respectivement la teneur en eau RMP et une constante de relaxation RMP caractérisant les différentes couches aquifères RMP obtenues en résultat de l'inversion. Nous utilisons en première approche les formules les plus robustes soit avec a,b = 1,2 et le temps de relaxation T<sub>n</sub> (n=1) (Legchenko et al. 2002, 2004) mais sans mésestimer l'intérêt d'utiliser T2\* dans ces environnements a priori peu magnétiques (Vouillamoz et al. 2014, Plata et Rubio 2008).

Les graphes à gauche de l'Illustration 76 montrent une corrélation significative entre la teneur en eau et les constantes de relaxation T1 et T2\* pour les sondages MARCH2 à MARCH10. On distingue aisément les aquifères de bonne caractéristique (MARCH2, MARCH3, partie profonde de MARCH4 et MARCH5, MARCH7, MARCH9) par leur teneur en eau, W et constantes de relaxation, T élevées (W> 22 % et T>0.005 m<sup>2</sup>/s). Ils correspondent d'une part aux faluns de Bohon et d'autre part aux marnes du Bosq d'Aubigny, faciès sableux qui, bien que leurs caractéristiques soient proches, semblent constituer deux groupes distincts.

Les faluns cimentés de la partie superficielle de MARCH4, les marnes du Bosq d'Aubigny, faciès argileux de MARCH6 et MARCH10 montrent des caractéristiques significativement moins favorables. Les caractéristiques encore nettement plus faibles de la partie superficielle de MARCH5 indiquent un faciès également plus argileux.

Le sondage MARCH1 se démarque nettement des autres observations avec des paramètres contrastés : une teneur en eau faible pour des constantes de décroissance et une transmissivité relativement élevée. Ils traduisent un milieu géologique différent et conforte l'hypothèse d'un aquifère de socle. La faible teneur en eau relative est imputable soit à une porosité de fissure (discontinue) soit à des effets magnétiques au niveau des pores.

#### 5.5. EVALUATION DES TRANSMISSIVITES RMP

Les transmissivités évaluées à partir des résultats RMP sont comparées aux transmissivités hydrogéologiques pour les six sondages bénéficiant d'essais par pompage sur l'Illustration 77 (en haut à gauche). On retrouve dans les deux groupes de bonnes caractéristiques correspondant aux marnes du Bosq d'Aubigny, faciès sableux et aux faluns de Bohon ainsi que MARCH10 qui présente des caractéristiques nettement moins favorables. MARCH3, MARCH4 et MARCH10 sont proches de la corrélation utilisée dans le logiciel d'inversion Samovar (C= 7. 10<sup>-9</sup> m.ms<sup>2</sup>, figurée par un trait discontinu) mais MARCH2, MARCH5 et MARCH7 en sont significativement éloignés. Les combinaisons des paramètres RMP en utilisant T1 ou T2\* apparaissent globalement équivalentes (Illustration 77, graphe en bas à gauche) et la comparaison de ces combinaisons utilisant soit la constante de relaxation T1, soit T2\* avec les transmissivités des essais par pompages ne montre pas de différence notable (Illustration 77, graphes de droite)



Illustration 75 – Synthèse des résultats RMP

Si l'on compare les transmissivités obtenues à Marchésieux avec les transmissivités obtenues dans d'autres contextes hydrogéologiques (Illustration 78), les sondages MARCH3, MARCH4 et MARCH10 se rapprochent des caractéristiques d'aquifères gréseux alors que les sondages MARCH2, MARCH7 et MARCH5 se rapprochent des caractéristiques d'aquifères de type craie.



Illustration 76 – Caractéristiques hydrodynamiques des sondages RMP issues de l'inversion des sondages RMP. La transmissivité RMP (en haut à gauche) est évaluée en utilisant la constante de transfert C=7 .  $10^9$  m.ms<sup>2</sup> et la constante de relaxation T<sub>1</sub>).

Si on peut envisager favorablement la similitude de caractéristiques des aquifères du faciès sableux des marnes du Bosq avec des grès, l'analogie des faluns de Bohon avec la craie est moins évidente. L'étude de la granulométrie et de la porosité des faluns de Bohon devrait permettre d'éclairer cette question qui dépasse le cadre du présent projet.

En l'état des connaissances, il reste que la transmissivité RMP des marnes du Bosq d'Aubigny est évaluée de façon réaliste, aux incertitudes près, en utilisant la valeur utilisée par défaut dans le logiciel d'inversion Samovar (C=7.10<sup>-9</sup> m.ms<sup>2</sup>). Pour les faluns de Bohon, il convient de multiplier la transmissivité ainsi obtenue par dix pour rester dans une incertitude raisonnable. Ces premières investigations RMP des sédiments plio-quaternaires du sous-bassin de Marchésieux nous ont permis d'esquisser les fonctions de transfert entre paramètres RMP et paramètres hydrodynamiques issus des essais par pompage. Il conviendra de préciser ces relations par des investigations supplémentaires visant des caractéristiques contrastées tels

que des sondages au sein des faluns de Bléhou. Des sites avec des caractéristiques intermédiaires, entre les plus favorables et MARCH10 sont également recommandés.

En l'état des connaissances, il apparait que les meilleures caractéristiques RMP sont observées dans les parties N et E du sous-bassin alors que des caractéristiques plus défavorables sont observées sur MARCH10 et MARCH6 aux confins occidentaux et méridionaux du bassin (Illustration 75). Une reconnaissance plus large du bassin par RMP contribuerait à préciser les limites géographiques des aquifères de caractéristique contrastée. Ces informations seront utiles tant pour la modélisation hydrogéologique fine du bassin que pour orienter de futurs forages d'exploration hydrogéologique.



Illustration 77 – Comparaison des caractéristiques RMP avec les transmissivités des pompages d'essais.La tranmissivité RMP présentée sur le graphe en haut à gauche est calculée avec la constante  $C=7 \cdot 10^9 \text{ m.ms}^2$  et la constante de relaxation  $T_1$ .



Illustration 78 – Relation entre les caratéristiques hydrodynamiques RMP et les transmissivités hydriodynamiques des pompages d'essai associé de la région de Marchésieux en regard des relations définies pour d'autre environnement hydrogéologique (adapté de Boucher 2007).

#### 5.6. CONCLUSION DES SONDAGES RMP

Les investigations RMP réalisées dans le sous-bassin de Marchésieux ont rencontré des conditions favorables de rapport signal sur bruit qui ont permis la réalisation de sondages de bonne qualité. Il apparait toutefois que les conditions sont plus favorables en hiver (mesures réalisées début mars) quand les clôtures électriques des parcs à vaches ont une activité réduite car les pics de bruit causés par ces dispositifs interfèrent très défavorablement avec les signaux RMP.

Les sondages RMP réalisés dans différentes conditions aquifères montrent une bonne corrélation avec les résultats des panneaux électriques ainsi que des profils sismiques et permettent de préciser les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères. Des caractéristiques RMP contrastées de teneur en eau, constante de relaxation et transmissivité permettent de discriminer les différents faciès aquifères du bassin de Marchésieux (faluns de Bohon, faciès sableux des marnes du Bosq d'Aubigny) parmi des faciès moins favorables, plus argileux ou cimentés. Une analyse conjointe plus poussée des caractéristiques RMP et des résistivités qui n'a pu être conduite dans le cadre de ce projet pourrait permettre une caractérisation encore plus pertinente des faciès aquifères du bassin.

La comparaison entre paramètres RMP et résultats des essais par pompage conduit à une première évaluation des fonctions de transfert entre résultats RMP et données hydrogéologiques caractérisant les principaux aquifères du sous-bassin de Marchésieux.

## 6. Conclusion

L'exploration géophysique du bassin de Marchésieux a été réalisée grâce à quatre cent points gravimétriques, dix-huit kilomètres de sismique réflexion haute résolution, 6.6 kilomètres de tomographie électrique et dix sondages par Résonance Magnétique des Protons (RMP).

La stratégie d'exploration multi-méthode appliquée sur le bassin de Marchésieux conduit à une caractérisation ciblée répondant avec efficacité et discernement aux besoins du projet :

- une caractérisation géométrique d'ensemble du bassin est produite par la gravimétrie, elle révèle des complexités et des traits structuraux inconnus jusqu'alors ;
- la caractérisation géométrique (profondeurs et épaisseurs) des différents faciès aquifères et du substrat du bassin est quantifiée avec précision à partir des profils sismiques réflexion qui servent aussi avec les forages profonds à l'étalonnage du modèle gravimétrique;
- les tomographies électriques permettent de préciser l'interprétation des différents faciès aquifères et du substratum ;
- les faciès aquifères sont encore précisés par les paramètres RMP qui conduisent à une évaluation de caractéristiques hydrodynamiques étalonnées à partir des résultats des pompages d'essai.

Les cartes gravimétriques mettent en évidence des anomalies négatives liées au remplissage sédimentaire peu dense du système de sous-bassins de Sainteny-Marchésieux par rapport au socle permien. Etant donné la géologie complexe du socle hercynien et du signal gravimétrique associé, une méthodologie spécifique a été mise en œuvre pour extraire le signal gravimétrique relatif aux sous bassins, basée sur l'intégration de forages de calages et des résultats de la sismique. Un processus itératif a permis d'établir la profondeur de l'interface entre les sédiments de remplissage des bassins et le socle antétriasique, en fonction du contraste de densité entre ces deux formations. L'incertitude sur la détermination de ces profondeurs est estimée par l'écart avec les profondeurs sismiques et en forage. La zone principale et la plus profonde (dépassant 150 m) du bassin est définie au N et N-O de Marchésieux. Un sous-bassin étroit et profond (dépassant également 150 m) se développe selon une direction N150°E au SO de Marchésieux. Deux sous-bassins d'allongement NNO-SSE sont définis au N et au NO de Sainteny. Ce dernier demande à être confirmer (par méthode sismique, électrique ou forage) car il ne bénéficie d'aucun forage permettant de caler ses profondeurs. Une zone de seuil de direction N120°E limite la partie principale du bassin d'une partie nord moins profonde. Les principales directions structurant le sous-bassin de Marchésieux sont N120 - N150°E et N40°E.

Le toit du socle permien est bien déterminé sur l'ensemble des profils sismiques dont le principal recoupe le bassin sur toute son emprise du SO au NE. Cette détermination précise de la base du bassin, en accord avec les résultats des forages et avec l'allure générale des cartes gravimétriques, permet d'étalonner le modèle gravimétrique. L'approfondissement localisé au SO de Marchésieux est bien confirmé avec une structure indiquant un effondrement. Une unité anté-grès de Marchésieux est mise en évidence au-delà de 100 m de profondeur dans ce sous-bassin. Elle pourrait correspondre à des sédiments du Trias, reconnus localement autour du bassin ou à des dépôts équivalents aux Faluns de Bléhou. Les tomographies indiquent un faciès conducteur correspondant soit à une formation argileuse, soit à une eau de formation saumâtre.

La qualité des images sismiques obtenues lors des deux campagnes d'acquisitions, et les corrélations aux sondages disponibles ont permis de réaliser (i) une distinction de plusieurs unités sismiques et (ii) leur attribution stratigraphique aux formations connues dans le sousbassin. L'interprétation préliminaire est cohérente et l'imagerie sismique offre ainsi une vision géométrique plus fine de l'agencement des différentes formations géologiques au sein du bassin de Sainteny-Marchésieux. Certaines attributions ou transitions restent supposées du fait (i) d'un manque de calage au puits ou (ii) de géométries trop fines ou complexes pour être correctement imagées sur les données sismiques.

Concernant le remplissage plio-pléistocène du bassin de Sainteny-Marchésieux, les observations principales sont :

- Le Falun de Bléhou est présent uniquement au nord du bassin. Il semble tronqué au sommet par une surface d'érosion qui correspond localement à la base des Marnes du Bosq d'Aubigny.
- La série plio-pléistocène est globalement retrouvée et les observations et interprétations tendent à confirmer les résultats des études antérieures établies sur la base des forages.

Sur l'ensemble des profils sismiques obtenus, la déformation apparaît sous la forme (i) de failles sub-verticales ou pendage fort, à jeu décamétrique à pluri-décamétrique apparent normal, ou (ii) de flexures de faible amplitude. Les failles sont vues principalement dans le petit bassin type graben au SO de Marchésieux dont une bordure pourrait correspondre à un segment de la faille bordière du bassin de Carentan.

Les tomographies électriques de résistivité contribuent à identifier et déterminer la géométrie des différentes formations aquifères (Marnes du Bosq d'Aubigny, Faluns de Bohon, Faluns du Bléhou) qui sont toutes trois représentées par des faciès géo-électriques résistants. Elles ne peuvent donc en revanche être distinguées.

Les Marnes de St Nicolas de Pierrepont et des argiles supérieures des Marnes du Bosq d'Aubigny sont également bien caractérisées comme des couches conductrices qui peuvent constituer des écrans protecteurs pour les différentes formations aquifères. Les discontinuités subverticales mises en évidence au sein du remplissage sédimentaire correspondraient vraisemblablement à des variations latérales de faciès.

Les sondages RMP réalisés dans différentes conditions aquifères montrent une bonne corrélation avec les résultats des panneaux électriques ainsi que de la sismique et permettent de préciser les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères. Des caractéristiques RMP contrastées de teneur en eau, constante de relaxation et transmissivité permettent de discriminer les différents faciès aquifères du bassin de Sainteny-Marchésieux (faluns de Bohon, Marnes du Bosq faciès sableux) parmi des faciès moins favorables, plus argileux ou cimentés.

La comparaison entre paramètres RMP et résultats des essais par pompage conduit à une première évaluation des fonctions de transfert entre résultats RMP et données hydrogéologiques caractérisant les principaux aquifères du bassin de Sainteny-Marchésieux.

## 7. Bibliographie

Baize, S., (1998) - Tectonique, eustatisme et climat dans un système géomorphologique côtier. Le Nord-Ouest de la France au Plio-Pléistocène : exemple du Cotentin (Normandie). Thèse de Doctorat, Université de Caen, 333 p, *Document du BRGM*, 289, 366 p.

Baize, S., Aubry, J., Coutard, J.-P., Laignel, B., Lautridou, J.-P., Ozouf, J.-C., Pareyn, C., Zwingelberg, F., (1997a) – Carte géologique de la France à 1/50 000, Feuille Carentan (117), BRGM Orléans.

Baize, S., Camuzard, J.-P., Freslon, M., Langevin, C., Laignel, B., (1997b) - Notice explicative Carte géol. France à 1/50 000, feuille Carentan (117), BRGM Orléans, 83 p.

Bott, M. H. P., (1960) - The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins. *Geophysical Journal International*, *3*(1), 63-67.

Boucher 2007, Estimation des propriétés hydrodynamique des aquifères par RMP, Thèse de l'Université d'Orléans.

Dugué, O., Poupinet, N., Baize, S., Auffret, J.-P., Coutard J.-P., Ozouf, J.-C., Clet-Pellerin, M., (2000) – Stratigraphie du Plio-Pléistocène inférieur de Normandie : les séries marines et fluviatiles des bassins du Seuil du Cotentin. *Géologie de la France*, 3 : 99-125.

Dugué, O., (2003) – The Pliocene to Early Pleistocene marine to fluviatile succession of the Seuil du Cotentin basins (Armorican Massif, Normandy, France). *Journal of Quaternary Science*, 18(3-4) : 215-226.

Dugué, O., Lautridou, J.-P., Quesnel, F., Clet, M., Poupinet, N., Bourdillon, C., (2009) – Evolution sédimentaire cénozoïque (Paléocène à Pléistocène inférieur) de la Normandie. *Quaternaire* 20(3) : 275-303.

Graindor, M.-J., Roblot, M.-M., Robardet M., Doré, M. F., Poncet, M. J., Lorenz, M. C., Hommeril, M. P., (1976) Carte géologique de la France à 1/50 000, Feuille Bricquebec (92-93), BRGM Orléans.

Guerrot, C., Peucat, J.-J., Dupret, L., (1989) – Des nouvelles sur l'âge du système Briovérien (Protérozoïque supérieur) dans le Nord du Massif Armoricain. *Comptes-Rendus Acad. Sci. Paris*, 308 (III) : 89-92.

Jachens, R.C., Moring, B.C., (1990) - Maps of the thickness of Cenozoic deposits and the isostatic residual gravity over basement for Nevada: U.S. Geological Survey Open-File Report 90-404, 15 p., 2 plates.

Legchenko, A., Baltassat, J.M., Beauce, A., Bernard, J., 2002. Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists. J. Appl. Geophys. 50, 21–46.

Legchenko, A., Baltassat, J.-M., Bobachev, A., Martin, C., Robain, H., Vouillamoz, J.-M., 2004. Magnetic resonance sounding applied to aquifer characterization. Ground Water 42, 363–373.

Longman, I. M., (1959) - Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun. Journal of Geophysical Research, 64(12), 2351-2355.

Mitchum, J. R., Vail, P. R., Sangree, J. B., (1977) - Seismic Stratigraphy and Global Changes of 221 Sea Level, Part 6: Stratigraphic Interpretation of Seismic Reflection Patterns. In Depositional Sequences. In Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration, Payton E (Ed). *American Association of Petroleum Geologist Memoir*, 26: 117-133.

Plata, J., Rubio, F., 2008. The use of MRS in the determination of hydraulic transmissivity: the case of alluvial aquifers. J. Appl. Geophys. 66, 128–139.

Sheldon, N. D., (2005) - Do red beds indicate paleoclimatic conditions?: a Permian case study. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 228(3), 305-319.

Thomas, E., (1999) - Évolution cénozoïque d'un domaine de socle : le Massif armoricain. Apport de la cartographie des formations superficielles. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, 148 p.

Trautmann, F., Paris, F., Carn, A., (2000) – Notice explicative de la Carte Géologique de la France à 1/50 000, Feuille Rennes (317), BRGM Orléans, 86 p.

Vouillamoz, J.M., Lawson, F.M.A., Yalo, N., Descloitres, M., 2014b. The use of magnetic resonance sounding for quantifying specific yield and transmissivity in hard rock aquifers: the example of Benin. J. Appl. Geophys. 107, 16–24.

## Annexe 1

# Rapport de l'acquisition gravimétrique effectuée en 2013

## 1. Acquisition gravimétrique

Le levé de terrain a été effectué les 9 et 10 janvier 2013.

**55 nouvelles stations gravimétriques ont été mesurées**, complétant la couverture existante. Les stations anciennes et nouvelles sont localisées en *Illustration 79*. Les stations ont été positionnées selon un linéaire : le profil AA' passe au mieux par les points de mesures de cette étude.



Illustration 79 : Carte de localisation en Lambert 93 des stations gravimétriques. Les croix grises représentent les stations historiques, les croix bleues les nouvelles stations. En fond, l'anomalie de Bouguer en mgal (densité de réduction 2.3, réseau RGF83) à partir des données historiques. Le polygone noir marque les limites du bassin de Sainteny-Marchésieux ; le profil AA', passant au mieux par les nouvelles stations, est représenté.

#### 1.1 Matériel et mesures

Les mesures gravimétriques ont été réalisées à l'aide du gravimètre relatif Scintrex n° 539 du BRGM. Les mesures ont été réalisées sur trépied bas et la hauteur de mesure a été notée et prise en compte lors de la réduction des données. L'ensemble des valeurs de g de la campagne sont ainsi rapportées au niveau du sol. A chaque occupation de station, trois mesures de 60 s ont été effectuées.

Le coefficient de calibration du gravimètre est de 1.000696, coefficient établi sur la ligne de calibration ligne Montpellier – Aigoual, et a été pris en compte lors de la réduction des données.

Le positionnement de l'ensemble des stations gravimétriques a été réalisé à l'aide d'un GPS Trimble Geo XH6000 (utilisant les constellations GPS et Glonass). Les données enregistrées ont été post-traitées à l'aide du logiciel PathFinder Office, en différentiel de la base permanente de Saint-Lô, intégrée au Réseau GNSS Permanent de l'IGN (pour une longueur de base comprise entre 25 et 35 km environ).

Pour chaque station gravimétrique, 3 sessions de mesures GPS ont été réalisées, d'au minimum 60 secondes chacune.

La redondance des déterminations ainsi que les paramètres de précision fournis par le logiciel de post-traitement en un point permettent d'évaluer la qualité de la position GPS de chaque station.

Les erreurs sur la détermination du Z pour chaque mesure de 60 s, fournies par le logiciel, sont représentées sous forme d'histogramme en Illustration 80a. Ces erreurs sont comprises entre 10 cm (valeur seuil logicielle) et 85 cm, et plus de 85% des mesures ont une erreur inférieure à 20 cm.

Les écarts maximum entre les 3 déterminations de Z à chaque station sont représentés en Illustration 80b. Ces écarts sont inférieurs à 50 cm pour plus de 80 % des stations, et inférieurs à 20 cm pour 68 % des stations. On retiendra cette valeur comme l'erreur moyenne de positionnement de l'étude.

Sept stations témoignent d'un écart maximal compris entre 1 m et 3.5 m. Ces forts écarts sont associés aux mesures dont l'erreur est importante.



Illustration 80 : a : histogramme de la valeur de l'erreur pour mesure GPS, et pourcentage cumulé en rouge, b : histogramme des écarts maximum des mesures à chaque station gravimétriques, et pourcentage cumulé

Au final, la valeur de Z retenue pour chaque station est obtenue en effectuant la moyenne pondérée des trois déterminations de Z par les inverses des erreurs aux carrés. Ainsi, les mesures peu fiables ne sont que faiblement pondérées, et ne dégradent que peu le résultat.

#### 1.2 Références gravimétriques

La base gravimétrique de référence pour l'acquisition est la base de MILLIERES III, base du réseau géodésique Français de l'IGN. La valeur de g a été déterminée à cette base avec un gravimètre absolu A10 de Microg-Lacoste en 2011, est de:

g = 980996.771 +- 0.020 mGal

Une base opérationnelle a été établie sur le perron de l'église de Sainteny et elle a été raccordée à la base de MILLERES III par deux allers et retours gravimétriques.

L'ensemble des stations gravimétriques historiques est rattaché aux réseaux gravimétriques du BRGM, tel le CGF65 ou plus récemment le RGF83. Les bases de ces réseaux se sont avérées modifiées en proximité immédiate de la zone d'étude, les rendant inadéquates pour un rattachement précis de cette étude. La formule de passage entre le réseau de l'IGN et ceux du BRGM n'étant pas établie, les données acquises lors cette étude ne seront pas intégrées avec les données historiques. Cette intégration pourra être faite dans une étude ultérieure.

#### 1.3 Réduction des données vers l'anomalie de Bouguer

La réduction des données gravimétriques vise à corriger tous les effets (variations temporelles, différences d'altitudes, effets topographiques, etc.) qui influent sur les données acquises brutes et qui ne présentent pas d'intérêt pour l'interprétation géologique des données.

Les réductions de données suivantes ont été réalisées:

- o correction de la marée terrestre gravimétrique (algorithme de Longman)
- correction de la dérive du gravimètre, déterminée par la première et dernière occupation de la station de base au sein d'un programme de mesure,
- retrait du g théorique (formule GRS80) ce qui permet de passer d'une valeur de g à une anomalie,
- correction d'air libre compensation des effets des variations d'altitude entre les stations,
- corrections de relief (correction de plateau + corrections de terrain) pour compenser l'effet des reliefs à proximité des points mesures.

Ainsi, l'anomalie de Bouguer A<sub>B</sub> s'exprime ainsi:

$$A_{B} = g_{mes} - g_{th} + 0,3086.h - 2\pi G \rho_{B} h + \rho_{B} T(1)$$

où  $\rho_B$  est la densité de réduction de Bouguer, *h* l'altitude du point considéré (en mètres), *G* la constante de gravitation universelle et *T* est la correction de terrain pour un terrain de densité 1.

La densité  $\rho_B$  de réduction a été choisie à 2.67, valeur classiquement utilisée, car étant la densité moyenne de la croûte terrestre. La densité de l'eau de mer est égale à 1.03.

Les corrections de terrain (CT) ont été réalisées pour chaque station entre 0 et 167 km, sous Matlab, avec des routines intégrant les effets terre-mer, basées sur le calcul par prismes suivant le protocole suivant :

- Sur le terrain, estimation des CT entre 0 et 53 m (zones B et C des corrections de Hammer),
- Sur terre, les CT sont calculées sur un carré de 15 km de côté autour de chaque station avec un MNT IGN à maille de 25 m (la zone 0 -53 m y est exclue), au-delà et jusqu'à 167 km, les CT sont calculées avec un MNT IGN de maille 250m.
- En mer, les CT sont calculées à partir de la bathymétrie ETOPO2 (<u>http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/01mgg04.html</u>), interpolée à la maille de 1 km x 1 km

On raisonne selon le profil AA' (*Illustration 79*) dans tout ce qui suit. Les stations n'étant pas exactement positionnées selon ce profil, on procède à une interpolation par kriegage de la surface représentant les valeurs de l'anomalie de Bouguer aux points de mesures. L'intersection du profil AA' et de cette surface constitue l'anomalie de Bouguer retenue (Illustration 81).

Pour information, les points de mesures projetés selon le profil AA' et l'anomalie de Bouguer interpolée sont représentés (cercles noirs Illustration 81).



Illustration 81 : Anomalie de Bouguer aux points de mesures, projetés sur le profil AA' (cercles noirs), et valeurs de l'anomalie de Bouguer interpolée selon le profil (ligne de bleue)

Un écart important est observé entre les valeurs projetées en certains points et l'anomalie de Bouguer interpolée : ces points se trouvent à une distance importante du profil AA', et l'anomalie de Bouguer est marquée par un gradient important dans ces zones.

#### 1.4. Précision des anomalies gravimétriques

L'erreur totale sur l'anomalie de Bouguer est évaluée classiquement comme la somme quadratique des erreurs élémentaires sur les variables entrant dans son calcul, soit :

$$\varepsilon_{AB} = \sqrt{\varepsilon_g^2 + \varepsilon_{gth}^2 + \varepsilon_z^2 + \varepsilon_{CT}^2} \quad (2)$$

Le détail de ces erreurs est détaillé ci-après.

#### • Erreur sur g (ε<sub>g</sub>)

Cette erreur est estimée à partir de l'histogramme des écarts sur les stations occupées plusieurs fois au cours des programmes successifs. Ces écarts donnent une bonne indication de sa précision de l'étude. Ici, 4 reprises (soit 7% des stations) ont été effectuées, dont la valeur maximale est de 0.004 mgal. Une statistique précise ne peut être établie avec un nombre si faible de reprises.

On considère l'erreur moyenne sur g égale à 0,010 mGal, en restant prudent.

#### · Erreur sur l'altitude (ε<sub>z</sub>)

L'erreur sur la détermination des altitudes des stations gravimétriques a été détaillée en section 0. Si une erreur moyenne de 0,2 m est considérée, cela correspond à une erreur sur l'anomalie de Bouguer équivalente à **0,04 mGal** pour une densité de 2,67.

#### • Erreur sur g<sub>th</sub> (ε<sub>gth</sub>)

En référence aux erreurs de positionnement en altitude détaillées précédemment, les erreurs sur la latitude sont évaluées à 0,1 m en moyenne sur l'ensemble de l'étude, soit une erreur sur  $g_0$  de **0,0005 mGal**, négligeable.

#### - Erreur sur les corrections topographiques (ε<sub>CT</sub>)

L'écart d'altitude entre les stations et le MNT 25m est un paramètre important affectant la justesse des CT dans la zone 53 m-7.5 km. Cet écart en chaque station a été calculé ; il est statistiquement de -0,63 ± 1.11 m. Rappelons qu'un MNT n'est pas une référence d'altitude exacte en tout point. Par analogie avec les calculs réalisés à l'échelle de la France métropolitaine, avec la même méthodologie et des MNT de qualité comparable (Martelet et Debéglia, 2001), l'erreur sur les CT est corrélée à la rugosité de la topographie.

Dans le contexte relativement plat du bassin de Marchésieux, l'erreur sur les CT est considérée en moyenne égale à 20% de la valeur maximale de la CT, soit **0,04 mGal.** 

#### - Erreur totale sur l'anomalie de Bouguer ( $\epsilon_{AB}$ )

L'erreur moyenne totale est donc  $\varepsilon_{AB} = 0,06$  mGal.

## 2. Interprétation

L'anomalie de Bouguer est fonction de l'ensemble des variations de densité sous la surface topographique : ces variations peuvent être localisées superficiellement ou en profondeur. Pour isoler les anomalies venant de sources superficielles, une surface dite 'régionale', rendant compte des sources profondes, est soustraite à l'anomalie de Bouguer. La détermination de cette surface régionale n'est pas triviale. Si la géométrie et la densité des terrains en profondeur sont déterminées, cette surface peut être modélisée précisément. En pratique, la géologie des terrains en profondeur et leur densité ne sont que rarement connus, et la détermination du régional nécessite des hypothèses fortes.

Dans cette étude, l'anomalie de Bouguer selon le profil AA' (Illustration 81) est marquée par une forte composante régionale : elle croit de ~16 mgal du nord-ouest au sud-est, et re-décroit au sud-est de quelques mgals. Ces variations à grandes longueurs d'ondes sont bien visibles sur l'illustration 79, et elles sont dues aux terrains métamorphiques Hercynien denses, constituant le socle de la région.

Dans la partie croissante de l'anomalie de Bouguer, de 0 à 15 km (Illustration 81), deux 'creux' localisés aux abscisses 0 à 9 km, et de 9 à 15 km sont observés, séparés par un 'haut' vers le km 9. L'amplitude de ces 'creux' est d'un ordre de grandeur inférieur à l'amplitude totale du signal de l'AB. Les remplissages des bassins sédimentaires tertiaires et quaternaires sont moins denses que le socle primaire, de par leur lithologie et leur degré de compaction. Ainsi, ces bassins doivent être marqués par une anomalie gravimétrique négative.

## Nous faisons l'hypothèse de travail que ces anomalies négatives marquent la signature des bassins de Sainteny au Nord, et de Marchésieux, au Sud.

Il va s'agir d'extraire le signal gravimétrique caractérisant les bassins de Marchésieux-Sainteny, en utilisant les données des forages recoupant les sédiments tertiaires et les pélites permiennes sur lesquels ils reposent.

#### 2.1 Méthodologie

L'anomalie de Bouguer est la somme d'un terme régional, provenant de la géologie profonde, et d'un terme résiduel, caractérisant le bassin de Marchésieux-Sainteny.

Les hypothèses suivantes sont admises pour la suite de l'analyse :

- L'anomalie résiduelle caractérisant le bassin de Marchésieux-Sainteny provient du contraste de densité entre les sédiments tertiaires et quaternaires et les pélites permiennes constituant le socle du bassin. L'anomalie régionale intègre tous les effets des formations géologiques constituant le socle.
- Les sédiments tertiaires et quaternaires sont représentés par une densité unique, ainsi que les pélites permiennes. On ne tient pas compte des différentes lithologies et variations de faciès au sein des sédiments tertiaires et quaternaires, ainsi qu'au sein des pélites.

L'extraction de l'anomalie résiduelle de l'anomalie de Bouguer passe par quatre étapes :

- L'anomalie résiduelle est calculée en certains points du profil où la profondeur du bassin est connue : ces points sont dits de 'calage'. Les points du profil proches de

forages ayant recoupés le socle du bassin de Marchésieux-Sainteny constituent ces points de calage. Les forages utilisés comme points de calages sont définis dans le Tableau 3, extraits de la banque de donnée du sous-sol (BSS, <u>http://infoterre.brgm.fr/</u>). L'altitude du toit des pélites permiennes est interpolée linéairement entre ces forages, et l'intersection de cette surface avec le profil AA' est représentée en Illustration 82. La forme du bassin ainsi interpolée permet de calculer l'attraction gravifique du bassin par calcul 2D, pour un contraste de densité donné. Les zones interpolées entre forages sont nécessairement incertaines, mais, au niveau des points de calage, l'attraction gravifique ainsi calculée est plus réaliste que celle issue d'une plaque infinie dont la hauteur est la profondeur du toit des pelites en chaque point de calage, méthode classiquement utilisée.

- L'anomalie résiduelle obtenue aux points de calage est retranchée à l'anomalie de Bouguer pour obtenir l'anomalie régionale aux points de calage (étoiles Illustration 83a).
- L'anomalie régionale entre les points de calage est interpolée par un interpolateur à minimum de courbure (courbe rouge Illustration 83a). Sont rajoutés aux points de calages issus des forages, des points de calage où les pélites permiennes sont affleurantes, au sud-est du profil (Illustration 83a). La valeur de l'anomalie de Bouguer n'est pas modifiée en ces points
- L'anomalie régionale interpolée est soustraite à l'anomalie de Bouguer pour obtenir l'anomalie résiduelle selon le profil AA' (Illustration 83b).

Numéro BSS	X L93 (m)	Y L93 (m)	Distance linéaire (m)	Altitude (m)	Altitude du permien (m)
01172x0013_14	384496	6918956	1630	8.6	-20.0
01172X0104	384936	6917476	3173	10.0	-103.5
01172x0075_58	386296	6912611	8224	20.5	-87.0
01176X0045	387461	6908417	12578	9.9	-149.4
01176x0033_36	387812	6907310	13738	5.5	-89.3
01176X0032	388342	6905290	15826	6.0	-5.5

Tableau 3 : caractéristiques des forages de calage. Les caractéristiques des forages 01172x0013\_14, 01172x0075\_58 et 01176x0033\_36 sont issues d'une interpolation des caractéristiques des forages 01172x0013 et 01172x0014, 01172x0075 et 01172x0058, et 01176x0033 et 01176x0036, respectivement.

L'anomalie résiduelle ainsi obtenue permet de déterminer la forme du bassin sédimentaire tertiaire par modélisation gravimétrique directe 2D. On impose que la profondeur du toit du permien soit fixée au niveau des forages de calage (Tableau 3).

Le contraste de densité entre les sédiments tertiaires et les pélites permiennes n'est pas connu ; il est vraisemblable que les pélites permiennes soient plus denses que les sédiments tertiaires et quaternaires, de par leur lithologie et leur degré de compaction. On fait varier ce contraste de -0.1 g cm<sup>-3</sup> à -0.7 g cm<sup>-3</sup> par pas de 0.1 g cm<sup>-3</sup>. Cette gamme de contrastes couvre l'ensemble des contrastes de densités plausibles entre terrains sédimentaires détritiques non métamorphisés, dont les densités sont généralement comprises entre 2 et 2.7 g cm<sup>-3</sup>.



Illustration 82 : topographie (ligne noire) et profondeur interpolée du toit du permien (ligne bleue en pointillée) selon le profil AA'. Les forages et leurs noms BSS sont représentés.



Illustration 83 a : Anomalie de Bouguer, anomalie régionale aux points de calage, et anomalie régionale interpolée pour un contraste de densité de -0.4 g cm<sup>-3</sup> entre sédiments tertiaires et pélites. b : anomalie résiduelle obtenue

#### 2.2 Résultats

Les anomalies résiduelles obtenues pour les différents contrastes de densités entre sédiments tertiaires et quaternaires et pélites permiennes sont représentées en Illustration 84a. L'amplitude des anomalies est d'autant plus importante que le contraste de densité est d'amplitude élevée. Les signatures négatives des sous bassins de Sainteny au Nord, et de Marchésieux au Sud, sont bien délimitées par un rebond au km 9. L'anomalie correspondant au sous bassin de Marchésieux est systématiquement de plus forte amplitude que celle du bassin de Sainteny.

Les interfaces entre sédiments tertiaires et pélites permiennes déterminées par modélisation directes 2D sont représentées en Illustration 84b, pour les différents contrastes de densités. La rugosité de cette interface est d'autant plus importante que le contraste de densité est faible. Ainsi, pour un contraste de -0.1 g cm<sup>-3</sup>, des variations d'altitude de l'interface peu plausibles de plus de 150 m existent sur de courtes distances (Illustration 84b, courbe verte). Pour des contrastes de densités de -0.3 à -0.7 g cm<sup>-3</sup>, les interfaces déterminées sont proches l'une de l'autre, et les sous bassins de Sainteny et de Marchésieux y sont bien individualisés. Le bassin de Marchésieux est plus profond que le bassin de Sainteny, atteignant l'altitude de -160 m.

Les aspérités à courte longueur d'onde à l'interface entre sédiments et socle (Illustration 84b) peuvent traduire des variations locales de densité dans les sédiments de remplissage ou dans le socle, variations non modélisées du fait de nos hypothèses de travail.

Un contraste de densité de -0.3 à -0.7 g cm<sup>-3</sup> entre les formations tertiaires et permiennes est compatible avec les densités usuelles pour des sédiments de type falun que constituent les formations tertiaires, et de type pélites.



Illustration 84 a : Anomalies résiduelles modélisées (lignes) et mesurées (points noirs), obtenues pour différents contraste de densités  $\Delta \rho$  entre sédiments tertiaires et les pélites permiennes, b : interfaces sédiments tertiaires – pélites permiennes déterminées par modélisation directe 2D en fonction du contraste de densité  $\Delta \rho$ 

## 3. Conclusions et recommandations

Les mesures gravimétriques en profil mettent en évidence des anomalies possiblement liées aux sous bassins de Marchésieux et de Sainteny. A la lumière de la géologie complexe du socle hercynien et du signal gravimétrique associé, une méthodologie spécifique a été mise en œuvre pour extraire le signal gravimétrique relatif aux sous bassins, basée sur des forages de calages.

Une modélisation directe 2D a permis d'établir la profondeur de l'interface entre les sédiments de remplissage des bassins et les pélites permiennes, en fonction du contraste de densité entre ces deux formations. Un schéma interprétatif de la géométrie des bassins sédimentaires de Marchésieux et de Sainteny est donné à l'Illustration 85, basé sur les résultats illustrés en Illustration 84b. Les aspérités de l'interface y sont lissées, et des failles marquant les limites nord-ouest des bassins de Marchésieux et de Sainteny et la limite sud-est du bassin de Marchésieux sont proposées.



Illustration 85 : schéma interprétatif de l'épaisseur des bassins de Marchésieux et de Sainteny à partir de la Illustration 84b. Le remplissage jaune représente le remplissage sédimentaire, les traits noirs en tirets représentent les failles pressenties.

Il convient de rappeler que les anomalies résiduelles et donc les interfaces entre sédiments tertiaires et socle obtenues sont fonction des anomalies régionales déterminées par notre méthodologie, fondée sur des hypothèses de travail. Les résultats obtenus sont ainsi fonction des hypothèses de travail.

La validation de ces résultats passe nécessairement par une confrontation de l'interface déterminée avec celle déterminée par d'autres méthodes.
# Annexe 2

# Données gravimétriques

station	X L93	Y L93	Z	g compensé (mgal)	Correction de Terrain, rho=2.67 (mgal)	Anomalie de Bouguer, rho=2.67 (mgal)
3	384057.859	6919787.439	5.427	981012.309	0.024	5.663
4	384597.877	6919375.614	4.56	981012.355	0.025	5.845
5	384637.349	6918817.727	8.237	981011.415	0.051	6.102
6	384721.46	6918683.18	10.388	981011.041	0.021	6.226
7	384114.102	6917623.012	4.938	981011.945	0.045	6.96
8	384740.042	6918221.146	12.938	981009.397	0.028	5.46
9	385103.038	6917863.852	4.915	981011.321	0.046	6.095
10	385134.324	6917516.672	6.395	981010.794	0.037	6.129
11	385854.912	6917177.077	18.634	981009.528	0.057	7.531
12	385453.695	6916895.126	4.215	981012.005	0.043	7.402
13	386203.175	6916141.546	6.801	981011.595	0.035	8.065
14	385566.635	6915324.842	8.506	981011.076	0.032	8.564
15	384992.586	6916224.34	7.866	981010.794	0.025	7.45
16	384822.606	6915759.11	10.524	981010.52	0.048	8.105
17	385637.93	6914852.397	6.123	981011.888	0.034	9.286
18	385842.811	6914300.979	13.079	981010.772	0.052	9.99
19	386147.909	6913426.444	15.419	981010.883	0.034	11.234
20	386245.806	6913065.936	20.834	981009.839	0.022	11.529
21	386362.576	6912651.838	21.278	981010.156	0.027	12.266
22	386515.703	6911872.845	7.605	981013.406	0.04	13.459
23	386548.859	6911077.192	16.363	981010.959	0.024	13.357
24	386894.656	6910535.167	15.787	981010.809	0.028	13.518
25	386947.119	6910100.071	16.999	981010.288	0.032	13.588
26	387481.301	6909193.938	5.464	981013.021	0.035	14.759
27	387460.822	6908390.29	9.121	981012.225	0.036	15.331
28	387854.208	6907343.096	4.408	981014.716	0.042	17.727
29	387881.216	6906860.124	3.233	981016.007	0.044	19.176
30	386174.804	6914183.707	14.07	981010.956	0.023	10.42
31	386579.466	6913916.782	19.755	981010.023	0.021	10.8
32	386283.98	6912167.2	11.458	981012.255	0.04	12.838
33	386119.575	6911492.166	17.886	981011.213	0.026	13.598
34	386599.977	6910795.392	16.962	981010.506	0.024	13.246
35	387997.051	6909399.693	4.435	981013.815	0.031	15.159

36	387242.568	6907596.893	5.819	981014.096	0.045	17.209
37	387835.143	6907610.739	4.467	981014.336	0.04	17.14
38	388768.31	6906112.853	6.379	981015.913	0.056	20.275
39	388425.329	6906531.136	6.587	981015.822	0.09	19.937
40	388348.421	6905291.537	5.57	981016.562	0.05	21.437
41	388301.218	6904875.315	8.204	981015.896	0.058	21.635
42	388495.327	6904685.694	9.809	981015.552	0.058	21.75
43	388455.503	6904248.057	17.605	981013.856	0.057	21.94
44	388467.264	6903854.562	22.734	981012.553	0.059	21.966
45	388912.176	6903364.379	35.488	981009.769	0.065	22.071
46	389009.536	6902944.119	47.41	981006.541	0.091	21.548
47	389097.549	6902423.061	33.71	981007.864	0.14	20.641
48	389271.742	6901817.422	26.906	981007.904	0.138	19.82
49	389787.628	6901361.618	47.843	981001.824	0.084	18.15
50	389538.063	6900770.6	58.77	980998.145	0.212	17.233
51	389613.731	6900162.188	86.461	980991.662	0.115	16.588
52	389158.756	6900750.356	55.318	980998.934	0.232	17.397
53	388896.102	6901310.148	24.734	981007.109	0.163	19.047
54	387404.194	6905676.96	6.676	981016.298	0.045	21.117
55	387803.638	6905848.387	4.29	981016.878	0.048	21.076
56	387388.365	6906388.125	7.285	981015.925	0.043	20.291
57	388551.83	6910089.664	2.436	981015.475	0.035	15.85
58	377350.183	6902570.809	48.701	981002.615	0.051	18.653
59	377604.62	6903637.604	28.605	981007.322	0.048	18.535
60	377267.09	6904588.719	36.631	981005.499	0.028	17.52
61	376462.303	6905483.015	34.047	981004.441	0.03	15.273
62	377305.448	6905477.267	37.042	981004.889	0.026	16.273
63	377348.45	6906380.809	29.769	981004.339	0.026	13.563
64	375003.763	6907666.327	47.648	980996.769	0.051	8.607
65	377423.743	6907873.659	32.551	981005.399	0.024	13.964
66	378092.56	6906373.704	32.381	981005.005	0.025	14.714
67	378576.897	6907450.882	27.359	981007.432	0.025	15.264
68	379356.145	6907684.09	26.117	981008.794	0.024	16.158
69	379447.733	6901299.251	59.43	981003.461	0.093	22.581
70	380325.098	6901627.695	75.676	981001.521	0.085	23.525
71	380634.552	6902215.546	70.385	981003.885	0.416	24.693
72	379650.528	6902600.725	45.993	981008.199	0.094	23.62
73	379700.233	6903647.453	41.018	981007.709	0.071	21.284
74	380311.705	6903283.525	61.726	981005.579	0.092	23.513
75	380120.683	6905222.814	29.572	981009.774	0.041	19.781
76	380309.628	6905770.149	32.375	981009.429	0.041	19.539
77	380781.558	6905141.501	34.296	981009.512	0.044	20.486
78	380766.286	6906001.503	29.503	981010.697	0.038	20.032

79	379560.142	6905592.375	29.272	981010.152	0.049	19.836
80	379145.221	6906670.626	29.565	981009.475	0.026	18.345
81	381562.597	6901337.966	81.91	981000.784	0.084	24.192
82	383279.629	6900916.3	76.587	981001.383	0.184	24.106
83	383380.508	6902465.188	36.622	981012.276	0.165	25.867
84	382750.646	6902798.817	64.087	981008.001	0.13	26.72
85	382520.978	6903286.624	86.061	981004.144	0.121	26.794
86	383593.667	6903624.798	78.295	981007.052	0.241	27.975
87	383941.326	6904524.858	37.172	981012.169	0.07	24.092
88	382866.189	6905408.865	33.206	981013.662	0.057	24.127
89	382238.576	6906038.474	32.353	981011.654	0.042	21.458
90	382170.47	6905175.907	32.93	981012.445	0.054	23.072
91	381416.571	6905503.245	22.139	981012.839	0.07	21.129
92	380130.78	6906734.442	14.975	981013.351	0.072	19.301
93	380493.91	6906496.523	14.82	981013.603	0.063	19.689
94	384632.564	6905271.181	22.902	981010.228	0.048	18.69
95	385356.96	6904365.941	11.389	981012.462	0.07	19.378
96	385065.432	6904141.742	18.47	981011.986	0.083	20.501
97	385731.646	6903572.312	10.042	981012.74	0.078	20.022
98	385415.646	6903404.461	12.559	981012.602	0.088	20.537
99	384489.311	6903228.499	28.219	981014.674	0.149	25.933
100	386006.944	6902330.578	13.402	981012.462	0.201	21.514
101	385194.799	6903127.102	12.369	981015.462	0.128	23.633
102	385201.084	6901592.405	39.226	981009.198	0.229	23.988
103	384787.083	6901816.464	57.617	981006.076	0.125	24.217
104	384057.057	6900693.895	53.059	981005.142	0.191	23.389
105	387767.247	6903587.034	10.735	981014.544	0.079	21.861
106	387193.147	6904325.825	7.062	981014.45	0.06	20.456
107	385232.43	6900408.417	55.485	981002.043	0.146	20.899
108	386524.03	6901279.632	37.294	981006.492	0.103	20.969
109	387025.612	6903582.393	7.889	981014.122	0.071	20.907
110	387141.944	6902891.152	13.544	981013.236	0.081	21.694
111	387765.405	6903115.813	16.882	981012.976	0.073	21.875
112	388204.851	6902553.901	33.663	981009.249	0.088	21.898
113	388268.255	6903267.292	27.303	981011.285	0.066	22.084
114	387828.91	6904480.676	9.994	981014.964	0.067	21.402
115	387666.403	6905125.48	3.922	981016.815	0.053	21.533
116	386830.982	6905929.347	7.126	981015.861	0.05	20.595
117	386554.79	6905403.604	4.364	981015.656	0.051	20.284
118	385870.291	6905090.253	5.961	981014.435	0.061	19.669
119	386195.849	6904180.511	9.951	981013.435	0.061	20.172
120	385966.402	6903809.849	9.33	981012.932	0.069	19.862
121	389720.644	6903436.794	22.783	981011.447	0.062	21.153

122	390102.458	6902554.042	19.358	981009.697	0.083	19.444
123	390343.175	6901467.905	50.692	981000.655	0.127	17.474
124	391536.172	6900988.636	55.445	980998.208	0.078	16.247
125	391496.231	6902344.354	41.673	981002.175	0.071	16.408
126	392330.467	6901676.111	51.027	980999.792	0.079	16.376
127	392486.464	6902376.522	37.914	981002.179	0.096	15.629
128	393761.493	6902614.74	54.337	981000.144	0.098	16.58
129	393935.905	6903427.109	49.262	981002.003	0.103	16.786
130	393779.298	6904429.494	26.18	981008.111	0.055	17.504
131	392553.801	6905313.231	9.895	981012.586	0.069	18.131
132	392585.392	6903892.768	19.101	981009.609	0.077	18.115
133	391958.427	6905247.09	15.964	981011.456	0.05	18.255
134	391468.046	6904505.653	12.092	981011.662	0.054	18.321
135	391015.377	6903486.158	22.669	981008.917	0.054	18.497
136	389465.25	6904508.455	22.455	981012.913	0.073	21.715
137	389388.548	6904734.298	15.409	981014.159	0.059	21.382
138	389918.75	6904637.501	26.722	981011.171	0.062	20.678
139	390635.514	6904569.318	14.431	981012.459	0.052	19.561
140	390996.313	6905377.45	6.781	981014.355	0.052	19.287
141	390235.386	6905374.882	9.039	981014.833	0.056	20.247
142	389623.347	6905577.663	17.283	981013.501	0.048	20.393
143	389723.923	6906192.326	15.247	981013.884	0.039	19.867
144	390177.054	6906249.277	5.009	981016.003	0.054	19.922
145	389825.001	6906903.449	8.868	981015.265	0.036	19.415
146	389752.479	6907133.471	11.026	981014.849	0.036	19.241
147	388960.38	6906534.581	14.748	981014.097	0.038	19.739
148	388466.436	6906942.072	8.87	981014.858	0.043	19.043
149	388462.022	6908215.76	3.01	981014.749	0.038	16.752
150	388927.906	6907401.952	8.915	981014.569	0.037	18.367
151	388435.61	6907447.102	9.064	981013.918	0.038	17.731
152	391620.998	6906504.659	27.897	981010.259	0.059	18.418
153	388719.988	6905482.99	4.647	981016.675	0.051	21.2
154	390640.486	6906169.897	6.231	981015.279	0.052	19.48
155	392768.027	6906336.187	9.344	981014.3	0.057	18.893
156	392521.096	6907701.073	4.795	981017.251	0.059	19.864
157	390691.7	6907428.207	4.634	981017.08	0.058	19.958
158	391542.152	6908197.698	19.099	981014.311	0.04	19.361
159	392627.594	6908733.725	26.423	981013.504	0.073	19.551
160	393325.1	6908417.592	35.974	981011.715	0.067	19.858
161	394655.942	6907607.122	6.485	981016.937	0.058	19.866
162	395225.151	6906447.573	9.782	981013.524	0.051	18.003
163	396728.141	6907625.868	11.067	981016.564	0.107	20.34
164	396659.97	6909423.681	42.307	981010.129	0.047	18.548

165	395649,938	6909465,195	34.54	981012.233	0.047	19,132
166	385969.341	6905882.899	16.528	981012.457	0.042	19.109
167	386677.95	6906476.66	16.246	981013.401	0.036	19.482
168	387646.784	6905972.992	8.519	981015.897	0.043	20.829
169	385960.877	6906241.523	15.352	981013.093	0.041	19.224
170	384947.567	6906108.838	20.932	981011.437	0.039	18.815
171	384298.245	6906472.046	18.849	981010.435	0.036	17.138
172	383881.894	6906681.666	17.339	981010.605	0.035	16.859
173	383214.362	6906404.548	25.033	981012.985	0.037	21.007
174	382947.03	6906502.817	24.907	981011.866	0.035	19.794
175	383173.903	6906984.383	20.067	981010.582	0.038	17.163
176	383764.865	6907168.803	14.596	981010.721	0.036	16.049
177	383615.28	6907882.571	9.074	981011.1	0.038	14.777
178	383124.931	6907398.024	15.158	981010.804	0.054	16.104
179	382525.727	6907368.06	17.127	981011.195	0.031	16.911
180	381890.488	6906909.138	15.455	981012.258	0.042	18.053
181	392470.436	6909023.716	7.757	981017.595	0.095	19.764
182	391759.34	6909080.559	11.812	981016.556	0.049	19.463
183	391341.714	6909287.231	10.76	981017.285	0.041	19.828
184	391031.281	6909260.391	8.065	981017.291	0.037	19.335
185	390733.553	6908860.894	16.627	981015.335	0.035	19.396
186	390863.536	6908182.906	23.525	981013.557	0.044	19.524
187	390524.242	6907840.367	7.397	981016.933	0.073	20.045
188	389936.873	6908535.981	6.022	981017.446	0.061	19.742
189	389333.42	6908772.135	5.211	981016.103	0.034	18.049
190	388676.452	6908839.241	4.996	981014.669	0.033	16.546
191	389237.551	6909106.894	4.181	981016.064	0.031	17.539
192	389822.535	6909275.138	4.415	981017.146	0.034	18.509
193	390429.152	6909223.28	8.045	981017.612	0.054	19.726
194	390538.55	6909846.418	5.1	981017.905	0.032	18.911
195	390454.815	6910068.102	3.03	981017.997	0.034	18.424
196	390191.99	6911213.742	1.918	981016.605	0.036	15.905
197	389285.966	6911403.149	18.361	981012.348	0.034	14.767
198	389490.751	6911003.949	5.965	981015.407	0.037	15.703
199	388841.637	6910810.595	6.191	981014.765	0.048	15.3
200	389047.955	6909775.795	2.01	981015.57	0.029	16.087
201	388659.09	6909494.834	2.112	981014.972	0.03	15.753
202	388164.821	6909598.995	4.188	981014.293	0.03	15.419
203	387375.452	6908825.855	15.334	981010.749	0.035	14.73
204	387051.202	6908479.908	14.396	981010.882	0.045	14.981
205	386414.812	6908683.302	6.474	981012.75	0.044	15.154
206	386556.155	6907869.372	15.694	981011.519	0.034	16.375
207	386365.377	6907474.331	11.594	981013.143	0.038	17.523

208	386902.865	6907374.668	12.542	981013.074	0.037	17.696
209	385026.743	6906821.869	19.974	981011.267	0.032	17.873
210	384365.828	6907032.362	13.404	981011.661	0.043	16.845
211	382535.488	6907961.029	13.514	981011.36	0.05	15.907
212	381208.073	6907031.948	16.508	981012.641	0.049	18.582
213	384468.227	6908021.028	10.406	981011.662	0.055	15.469
214	385234.006	6908395.46	8.472	981012.637	0.044	15.717
215	385966.436	6908392.184	5.636	981013.445	0.042	15.935
216	385826.793	6907755.025	7.42	981014	0.055	17.373
217	385605.856	6907439.877	17.301	981011.885	0.038	17.448
218	384736.193	6907468.171	18.786	981010.648	0.031	16.512
219	385270.792	6907606.72	16.233	981011.674	0.032	16.901
220	380080.597	6907360.354	23.325	981010.156	0.029	17.205
221	380545.875	6907331.136	18.978	981011.421	0.053	17.64
222	381356.612	6907522.26	12.221	981012.919	0.078	17.644
223	381286.23	6908791.944	19.354	981009.977	0.024	15.034
224	381145.058	6908401.867	20.033	981010.753	0.024	16.264
225	382023.125	6908719.241	18.174	981009.697	0.024	14.547
226	381749.501	6908157.199	16.218	981011.449	0.031	16.386
227	380017.161	6908169.09	22.722	981009.912	0.024	16.19
228	380810.642	6908870.537	18.832	981010.446	0.032	15.367
229	382548.841	6908706.217	14.316	981009.968	0.043	14.066
230	383523.024	6908480.896	11.365	981009.969	0.045	13.626
231	383775.123	6908926.227	15.91	981008.799	0.029	12.964
232	384127.801	6909194.082	15.928	981009.358	0.024	13.292
233	383772.14	6909781.784	14.963	981009.573	0.022	12.857
234	383640.855	6910403.191	12.885	981010.339	0.025	12.723
235	383004.52	6909364.762	17.207	981007.808	0.022	11.904
236	382601.875	6909522.711	17.378	981008.411	0.023	12.433
237	382398.254	6909865.433	14.793	981009.774	0.031	13.028
238	383193.885	6910413.822	14.371	981010.031	0.023	12.717
239	384497.655	6910261.031	14.832	981009.809	0.021	12.649
240	384174.788	6910457.916	11.375	981010.721	0.024	12.74
241	384854.319	6909722.758	14.038	981010.12	0.027	13.227
242	384576.614	6908839.354	13.255	981010.65	0.035	14.334
243	387391.924	6912046.953	10.516	981012.671	0.036	13.114
244	388774.006	6911115.068	16.12	981012.48	0.038	14.716
245	388175.568	6911119.244	4.686	981014.691	0.049	14.711
246	387316.895	6910583.622	11.715	981012.131	0.031	13.985
247	387748.566	6910269.47	4.692	981014.021	0.034	14.73
248	387189.099	6910289.909	15.215	981011.083	0.035	13.871
249	386900.491	6910902.504	15.723	981011.195	0.031	13.599
250	386737.788	6911500.91	8.457	981013.29	0.038	13.798

251	385688.425	6911084.252	17.254	981010.115	0.02	12.716
252	385909.194	6910771.744	16.336	981010.03	0.024	12.696
253	386257.137	6910397.768	17.3	981009.899	0.022	13.039
254	385524.262	6910049.506	15.567	981009.828	0.022	12.939
255	386035.323	6909621.915	16.894	981009.971	0.028	13.67
256	386716.213	6909636.634	4.244	981013.059	0.071	14.271
257	386513.648	6909317.423	5.332	981012.725	0.044	14.389
258	384852.007	6911193.77	15.165	981010.218	0.028	12.365
259	384946.956	6910503.952	15.942	981009.721	0.024	12.568
260	385848.215	6908994.034	3.585	981013.104	0.053	14.723
261	385554.987	6909198.66	12.775	981010.855	0.044	14.122
262	390153.081	6911254.438	2.101	981016.613	0.036	15.918
263	387831.649	6909108.875	7.774	981012.728	0.031	14.97
264	386922.601	6908168.861	12.148	981011.774	0.031	15.672
265	386305.287	6906987.153	14.649	981013.207	0.038	18.583
266	385599.325	6905850.772	15.58	981012.269	0.047	18.781
267	384909.531	6905402.284	20.211	981010.588	0.048	18.404
268	384188.03	6905111.508	27.066	981012.788	0.052	22.222
500	396921.665	6920868.204	11.221	981014.8	0.054	7.896
501	395948.021	6921983.642	16.629	981013.144	0.049	6.444
502	395972.401	6921039.854	4.879	981015.8	0.045	7.542
503	394917.961	6920721.405	13.062	981013.63	0.053	7.291
504	393661.772	6920657.875	11.67	981013.133	0.036	6.609
505	394357.163	6919345.305	22.926	981011.663	0.049	8.39
506	396103.805	6918979.961	30.446	981011.427	0.038	9.842
507	397534.571	6918421.053	29.816	981013.036	0.062	11.739
508	396575.13	6915705.232	30.39	981013.576	0.047	14.601
509	396630.056	6914585.142	4.185	981019.31	0.061	16.093
510	395307.495	6915352.483	25.081	981014.456	0.106	14.834
511	393075.36	6916559.848	1.867	981018.293	0.028	13.151
512	393718.681	6916159.361	21.157	981014.897	0.112	13.928
513	394350.436	6916152.598	32.146	981012.499	0.094	13.652
514	393174.343	6914400.845	2.724	981019.136	0.032	15.898
515	393899.817	6914523.11	3.587	981019.011	0.033	15.814
516	394206.658	6914490.545	6.877	981018.373	0.034	15.838
517	394668.28	6914112.535	3.477	981019.292	0.037	16.375
518	394492.814	6912803.344	3.103	981019.413	0.042	17.488
519	396293.793	6913093.692	2.611	981019.333	0.041	17
520	394070.426	6913647.02	13.895	981016.882	0.082	16.46
521	393632.753	6913226.566	2.895	981019.125	0.081	16.895
522	394047.282	6912260.735	7.745	981017.867	0.042	17.311
523	393425.014	6912197.124	3.694	981018.756	0.044	17.483
524	393048.135	6911678.518	3.026	981018.69	0.047	17.721

525	393636.201	6911602.45	18.054	981015.433	0.079	17.488
526	394017.701	6911119.167	14.653	981015.947	0.053	17.68
527	393132.817	6910960.448	3.977	981018.255	0.041	18.041
528	392643.353	6911438.483	2.935	981018.529	0.034	17.74
529	392520.274	6911073.914	4.941	981018.036	0.051	17.957
530	396394.177	6911341.85	34.536	981012.013	0.079	17.403
531	395331.995	6909568.756	25.557	981014.323	0.051	19.389
532	396660.738	6909425.191	42.646	981010.129	0.047	18.612
533	395073.494	6911610.715	27.092	981013.772	0.057	17.516
534	393230.382	6910244.071	14.724	981016.165	0.069	18.666
535	391982.72	6910654.655	2.891	981018.224	0.039	18.09
536	391753.684	6910184.299	5.047	981017.956	0.036	18.631
537	390862.279	6910308.844	3.243	981017.996	0.046	18.264
538	391462.889	6910550.68	3.397	981017.844	0.038	17.915
539	390731.184	6910680.872	3.027	981017.284	0.078	17.248
540	390364.795	6911346.039	2.133	981016.639	0.037	15.868
541	390232.337	6912139.739	17.69	981013.302	0.036	14.957
542	390986.987	6912433.341	7.692	981017.156	0.029	16.569
543	390594.539	6912667.004	3.284	981017.147	0.039	15.531
544	389829.241	6912635.49	17.421	981013.267	0.031	14.484
545	390738.949	6913182.498	6.569	981016.763	0.039	15.374
546	391973.09	6913166.979	2.058	981018.978	0.026	16.647
547	391273.721	6913378.038	5.581	981017.665	0.037	15.898
548	392144.072	6913831.471	2.318	981018.897	0.025	16.075
549	392201.972	6914304.747	1.786	981018.873	0.025	15.563
550	391813.074	6914108.828	1.948	981018.443	0.027	15.341
551	391631.939	6913690.307	4.7	981018.183	0.027	15.967
552	390794.796	6913998.978	5.028	981017.408	0.036	15.054
553	390204.585	6913596.77	4.854	981016.821	0.039	14.784
554	389462.767	6913803.272	5.762	981015.962	0.036	13.967
555	390410.317	6914745.586	2.825	981016.873	0.038	13.502
556	390205.53	6914180.749	6.879	981016.2	0.031	14.083
557	389916.05	6914567.14	11.294	981014.736	0.034	13.194
558	389201.31	6914154.208	15.129	981013.54	0.182	13.262
559	389413.456	6914526.08	11.564	981014.627	0.035	13.193
560	388805.355	6914930.677	6.988	981014.887	0.038	12.257
561	388849.812	6915492.015	5.37	981015.014	0.041	11.615
562	389369.421	6915571.691	4.252	981015.779	0.036	12.068
563	389673.149	6915830.384	3.866	981016.034	0.031	12.022
564	390410.623	6916324.135	3.35	981016.435	0.043	11.904
565	389497.315	6916372.34	8.152	981014.653	0.032	11.057
566	389324.888	6916951.31	17.616	981012.136	0.069	9.98
567	389995.662	6917097.546	3.874	981015.271	0.08	10.277

568	388757.426	6916718.2	21.705	981010.923	0.04	9.755
569	389429.927	6917446.403	27.454	981009.581	0.039	8.929
570	391381.83	6917790.382	1.857	981015.958	0.026	9.896
571	390689.149	6918060.094	5.046	981014.581	0.097	9.03
572	391136.449	6918551.848	22.591	981010.775	0.087	8.251
573	391666.916	6918465.461	2.515	981015.083	0.037	8.607
574	391735.17	6918992.423	2.367	981014.82	0.046	7.897
575	390446.146	6919675.714	17.403	981011.198	0.054	6.747
576	389063.098	6919483.927	24.29	981009.124	0.076	6.264
577	387660.224	6918778.604	16.808	981010.433	0.04	6.693
578	387295.957	6919324.027	5.707	981012.536	0.064	6.214
579	385831.938	6919658.461	12.842	981010.728	0.028	5.569
580	387114.976	6921052.199	2.085	981013.019	0.029	4.569
581	384572.98	6921449.342	6.493	981011.533	0.037	3.75
582	381318.406	6921493.546	15.197	981011.887	0.044	5.933
583	380849.769	6920667.83	8.768	981014.52	0.041	7.982
584	380269.175	6921828.956	17.246	981012.804	0.038	7.023
585	379742.642	6920890.583	27.526	981011.154	0.052	8.189
586	379100.818	6919794.986	26.999	981012.146	0.057	9.991
587	381394.189	6919655.133	4.72	981014.997	0.035	8.447
588	380285.465	6919259.177	7.93	981014.657	0.072	9.143
589	379458.047	6918562.225	4.667	981015.059	0.054	9.482
590	376722.22	6919490.832	40.337	981009.784	0.046	10.594
591	375805.043	6917287.332	46.428	981005.504	0.1	9.379
592	377407.852	6917556.883	14.841	981012.45	0.174	9.896
592.1	389474.053	6918694.045	25.218	981009.588	0.026	7.479
593	388549.286	6917616.766	28.53	981008.948	0.024	8.393
594	387781.9	6917710.125	24.734	981009.501	0.022	8.155
595	388578.859	6918359.105	25.727	981008.899	0.028	7.199
596	386522.653	6918589.419	19.941	981009.274	0.026	6.339
597	383995.636	6918480.848	6.603	981012.639	0.025	7.277
598	384059.325	6919131.224	3.978	981012.616	0.023	6.211
599	384495.511	6918345.323	13.534	981009.954	0.021	6.039
600	384542.674	6918047.242	11.752	981009.908	0.024	5.883
601	385035.104	6918634.885	11.208	981011.005	0.029	6.383
602	385632.672	6918554.68	21	981008.742	0.031	6.087
603	385755.057	6918057.15	20.758	981008.844	0.032	6.537
604	386538.217	6916886.191	13.96	981010.296	0.065	7.592
605	386941.695	6917435.391	17.913	981010.436	0.047	8.032
606	387043.091	6916921.954	14.456	981011.063	0.044	8.385
607	386734.386	6916452.031	9.564	981011.423	0.034	8.164
608	386592.201	6915753.685	12.477	981010.993	0.024	8.865
609	387230.851	6915565.519	13.222	981011.453	0.021	9.591

610	387569.965	6916583.073	12.452	981011.779	0.037	8.948
611	387934.922	6916385.169	11.006	981012.38	0.03	9.401
612	388349.297	6916376.674	14.872	981011.311	0.027	9.078
613	388340.193	6915987.374	14.817	981011.907	0.023	9.972
614	388047.396	6915677.536	16.166	981011.61	0.032	10.212
615	387752.083	6915106.802	23.007	981010.086	0.027	10.501
616	387471.439	6914680.76	21.945	981010.367	0.043	10.944
617	387715.7	6914226.956	22.957	981010.746	0.023	11.855
618	388224.787	6914635.6	21.158	981011.417	0.045	11.844
619	388775.274	6914269.25	6.819	981015.365	0.064	13.261
620	388366.546	6913551.448	23.129	981011.117	0.034	12.786
621	387946.751	6913327.07	23.412	981010.771	0.023	12.684
622	387303.322	6913154.923	23.531	981010.283	0.024	12.387
623	387029.037	6912398.04	21.2	981010.186	0.029	12.457
624	387455.774	6912622.063	21.48	981010.45	0.033	12.582
625	388226.114	6912167.411	20.832	981011.062	0.032	13.396
626	388141.765	6911823.012	19.82	981011.085	0.037	13.506
627	388929.262	6912131.741	19.315	981011.947	0.024	13.973
628	389510.551	6912127.159	19.834	981012.192	0.026	14.301
629	389159.472	6912613.757	15.95	981013.166	0.026	14.135
630	388916.509	6913225.709	16.855	981013.015	0.026	13.68
631	388421.321	6912719.343	21.244	981011.417	0.025	13.373
632	387285.568	6913988.389	23.097	981010.272	0.02	11.617
633	387283.38	6914550.212	22.387	981010.415	0.05	11.199
634	387068.039	6915215.215	14.486	981011.309	0.02	9.983
635	386276.356	6914726.395	14.13	981010.68	0.021	9.713
636	385336.389	6914232.095	11.206	981010.611	0.024	9.51
637	386194.612	6915538.155	14.495	981010.12	0.03	8.585
638	384884.899	6915039.246	13.101	981009.83	0.047	8.496
639	384280.95	6915700.987	8.614	981011.658	0.039	8.928
640	384582.954	6915223.222	9.535	981011.187	0.039	9.009
641	384537.386	6914519.068	7.779	981011.651	0.023	9.679
642	383841.838	6913550.84	12.592	981012.091	0.025	11.879
643	384524.536	6913754.094	5.704	981013.409	0.046	11.668
644	384783.263	6913946.892	5.681	981012.837	0.03	10.91
645	385304.827	6913342.168	15.925	981010.123	0.029	10.673
646	384814.183	6912873.436	5.699	981013.279	0.038	12.225
647	384064.401	6912951.736	7.093	981013.213	0.028	12.394
648	383484.792	6912669.548	9.402	981012.204	0.052	12.115
649	383941.961	6912274.627	8.224	981012.511	0.044	12.479
650	384370.879	6911774.059	9.616	981011.895	0.04	12.517
651	385159.593	6912285.655	17.056	981011.04	0.068	12.707
652	385622.715	6912610.401	17.679	981010.646	0.066	12.153

653	385288.333	6911997.852	18.108	981010.705	0.022	12.759
654	386034.436	6912301.132	18.119	981010.855	0.028	12.641
655	383270.917	6915022.511	4.617	981014.707	0.028	11.771
656	383510.821	6914343.975	9.995	981012.62	0.022	11.27
657	382379.979	6913539.455	5.234	981012.6	0.026	11.015
658	382900.958	6914174.123	8.049	981012.826	0.021	11.256
659	381932.508	6912671.12	6.224	981014.654	0.027	13.983
660	381241.987	6912520.729	5.776	981014.626	0.045	14.036
661	381491.762	6913503.414	5.401	981012.525	0.031	11.046
662	381432.271	6915370.043	16.337	981010.487	0.055	9.685
663	381498.845	6916252.008	8.16	981013.318	0.033	10.174
664	380355.989	6916964.526	1.428	981013.395	0.029	8.4
665	381992.581	6916965.471	0.852	981015.227	0.023	10.038
666	379489.01	6916874.351	2.723	981011.584	0.036	6.962
667	379485.424	6917655.18	3.22	981013.738	0.042	8.593
668	377151.29	6916409.868	33.934	981008.332	0.064	10.358
669	376981.366	6915037.86	26.763	981009.603	0.232	11.496
670	376745.184	6914097.259	27.684	981009.019	0.044	11.673
671	376804.518	6912689.004	29.822	981008.125	0.033	12.317
672	378163.912	6912702.736	20.558	981009.576	0.029	11.87
673	375787.042	6910646.806	29.705	981007.034	0.036	12.895
674	376772.64	6910500.683	26.979	981008.851	0.044	14.257
675	377000.912	6909640.368	22.311	981009.377	0.058	14.559
676	377531.524	6909389.019	25.489	981009.097	0.032	15.057
677	377313.82	6908916.862	21.84	981008.904	0.06	14.565
678	377747.838	6908390.734	22.457	981007.928	0.045	14.097
679	378698.041	6908252.039	20.7	981009.056	0.066	14.97
680	378752.127	6908675.9	16.054	981010.533	0.036	15.159
681	378327.731	6909368.047	19.63	981010.434	0.029	15.22
682	378380.654	6909915.914	22.732	981010.648	0.033	15.606
683	378806.979	6909230.133	17.787	981011.728	0.029	16.241
684	379137.793	6909069.285	14.729	981011.562	0.031	15.589
685	379407.08	6908339.14	21.57	981010.032	0.035	15.984
686	379696.816	6908845.105	19.577	981010.568	0.025	15.698
687	379959.057	6909291.358	13.12	981011.905	0.033	15.402
688	380895.443	6909802.546	15.964	981010.504	0.029	14.104
689	378865.598	6911226.646	16.636	981012.41	0.059	15.118
690	380230.751	6912356.816	25.59	981010.531	0.039	14.01
691	379590.65	6912838.108	17.67	981011.607	0.032	13.164
692	379439.515	6913525.742	21.776	981009.645	0.038	11.469
693	380468.025	6913691.155	10.697	981012.212	0.068	11.707
694	379793.244	6914462.052	17.843	981008.255	0.025	8.523
695	378603.277	6914265.008	11.691	981011.074	0.037	10.355

696	379880.757	6910279.647	9.561	981012.43	0.03	14.433
697	381714.068	6911841.431	6.381	981014.432	0.026	14.468
698	381740.122	6911305.995	15.519	981012.753	0.037	15.026
699	381164.716	6911554.05	7.2	981014.668	0.03	15.124
700	382879.527	6911799.47	4.961	981012.643	0.028	12.383
701	382815.731	6911318.817	6.103	981012.698	0.03	13.054
702	382356.77	6911159.759	6.784	981013.574	0.027	14.209
703	381390.3	6910779.943	7.786	981013.659	0.03	14.842
704	380734.628	6910291.337	9.929	981012.279	0.052	14.329
705	381073.058	6910191.077	13.211	981011.37	0.032	14.11
706	381773.676	6910237.773	14.031	981011.039	0.057	13.897
707	381242.852	6909321.12	12.843	981010.863	0.036	14.227
708	380772.535	6909308.828	12.416	981011.277	0.028	14.581
709	383622.796	6911907.77	12.143	981010.866	0.022	11.893
710	384752.608	6912288.116	15.453	981011.075	0.024	12.399
711	389635.455	6913350.352	14.395	981014.185	0.025	14.233
712	389859.498	6912081.084	20.17	981012.401	0.031	14.603

## Annexe 3

# Principe de la méthode de tomographie électrique de résistivité

Résultats des investigations géophysiques sur le sous-bassin de Marchésieux

#### A.1. PRINCIPE DE LA METHODE

La tomographie de résistivité électrique (ERT pour Electrical Resistivity Tomography en anglais) est une méthode géophysique permettant d'obtenir la distribution de la résistivité électrique des matériaux (roches ou structures) en profondeur (2D et 3D selon le dispositif d'acquisition mis en place et les procédés d'inversion/modélisation appliqués) à partir de mesures de potentiel électrique en surface. Les termes «panneau électrique» ou «tomographie électrique» sont utilisés pour qualifier une prospection électrique (initialement basée sur quatre électrodes) automatisée le long d'un profil multi-électrodes (2D) ou sur une surface (3D). Ce type d'acquisition présente l'avantage de fournir des résultats fiables en 2D ou 3D, et d'être rapidement mis en œuvre.

Le principe de base de la prospection électrique est d'injecter dans le sol un courant électrique d'intensité I entre deux électrodes A et B et de mesurer la différence de potentiel  $\Delta V$  induite entre une autre paire d'électrodes M et N (Illustration 86).



Illustration 86 : Principe de la mesure en courant électrique continu

A partir de la valeur du courant injecté *I*, de la mesure de la différence de potentiel  $\Delta V$  et de l'écartement entre les différentes électrodes, on peut déterminer la **résistivité électrique apparente** du sous-sol sur base de la loi d'Ohm :

$$\rho_{app} = K \times \frac{\Delta V}{I}$$

où K est un facteur dépendant de la géométrie du dispositif de mesure (Illustration 87) :

$$K = 2\pi \times \left[\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}}\right]^{-1}$$

Résultats des investigations géophysiques sur le sous-bassin de Marchésieux



Illustration 87 : Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant, M et N, les électrodes de potentiel ( $0 < \theta, \phi < \pi$ )

La résistivité apparente d'un terrain hétérogène correspond à la résistivité d'un terrain homogène qui, pour une configuration identique des électrodes et un même courant injecté, donnerait la même mesure  $\Delta V$ . Elle est fonction de la résistivité, de la géométrie des diverses couches et de la disposition des électrodes. Il existe plusieurs dispositifs d'électrodes utilisés en pratique : Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle, pôle-pôle , etc.

#### A.2. DISPOSITIFS D'ELECTRODES / CONFIGURATIONS D'ACQUISITION

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant (AB) et de potentiel (MN) (soit les quadripôles ABMN) en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant avantages et inconvénients. Les différences majeures entre ces configurations sont la distribution des lignes de courant électrique dans le sol et donc la forme des équipotentielles en surface ainsi que la valeur du coefficient géométrique K qui conditionnera les valeurs du courant minimal I à injecter pour mesurer un potentiel électrique minimal U fiable. Selon les équipements utilisés, certains dispositifs sont également plus rapides (dipôle-dipôle) à acquérir que d'autres (Schlumberger) grâce à des acquisitions multivoies (plusieurs mesures de  $\Delta V$  pour une injection de courant).

Pour la configuration Wenner, par exemple, la profondeur d'investigation est estimée égale à la moitié du plus grand écartement utilisé entre deux électrodes successives mais elle peut varier suivant la nature des terrains et leur résistivité. L'écartement entre électrodes détermine donc la profondeur d'investigation ainsi que les résolutions horizontale et verticale. Par rapport aux autres configurations, le dispositif Wenner rend les structures plus facilement reconnaissables sur la pseudo-section.

D'une manière générale, la mise en œuvre d'au moins deux configurations d'électrodes permet dans la plupart des contextes de mieux appréhender la géométrie des différents corps en présence. Ci-dessous sont présentées trois configurations souvent mises en œuvre avec les équipements automatisés actuels.

Le dispositif dipôle-dipôle donne une très bonne résolution des terrains de subsurface et pour les discontinuités verticales. Dans cette configuration, le rapport signal/bruit décroit rapidement et la profondeur d'investigation se réduit également (Illustration 88).



Illustration 88 : Configuration dipôle-dipôle

Le dispositif Schlumberger est plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux par rapport au profil de mesure. La résolution au niveau des horizons de sub-surface est moins bonne et celle des structures plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation atteinte (de l'ordre de 80m pour un dispositif de 500 m de long) grâce à un meilleur rapport signal/bruit (Illustration 89).



Illustration 89 : Configuration de Schlumberger

Le dispositif pôle-dipôle (Illustration 90) allie une bonne résolution avec une bonne profondeur d'investigation. Il nécessite néanmoins de mettre en place et maintenir une électrode lointaine (au moins 5 à 10 fois le plus grand écartement).



Illustration 90 : Configuration dipôle-dipôle

Le dispositif Wenner est un dispositif présentant la particularité d'avoir trois espacements identiques entre les quatre électrodes. Avec ce dispositif, les résistivités apparentes sont moins affectées par les variations latérales superficielles (Illustration 91).



Illustration 91 : Configuration Wenner

#### A.3. CONSTRUCTION D'UNE PSEUDO-SECTION DE RESISTIVITE APPARENTE

Après filtrage des données brutes de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critère de qualité, de courant émis ou de potentiel mesuré (logiciels Iris Instruments et X2ipi), celles-ci sont agencées de manière à obtenir une coupe (pseudo-section) de résistivité apparente du sous-sol. Cette dernière est construite (automatiquement) en reportant la valeur de la résistivité apparente mesurée au centre du dispositif et à une pseudo-profondeur dépendant de l'écartement entre les électrodes. Cette représentation conduit à une image pour laquelle les valeurs de résistivité (puisqu'apparentes) et celles de profondeur ne sont pas correctes (Illustration 92).



Illustration 92 : Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner

### A1.4. TRAITEMENT ET INVERSION DES DONNEES

Afin d'obtenir une image quantitative représentant les variations de résistivité réelle (et non apparente) en fonction de la vraie profondeur, il est nécessaire d'inverser la pseudo-section (Illustration 93). Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel Res2DInv (Loke & Barker). Cette inversion des données est réalisée suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre la pseudo-section de résistivités apparentes mesurées et une pseudo-section recalculée à partir d'un modèle de résistivité électrique. Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible. Afin de prendre en compte les morphologies rencontrées, la topographie de chaque profil est incluse lors de l'inversion (Illustration 94).



Illustration 93 : Résultats complets (en images) d'une inversion. En haut la pseudo-section de résistivité apparente mesurées. En bas, le modèle de résistivité issu de l'inversion. Au centre, la pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité. L'erreur (RMS) constitue la différence entre les deux premières pseudo-sections (ici 4.4%).

La pseudosection de résistivité « vraie » (illustration au bas de l'Illustration 93), résultat de l'inversion, sera ensuite utilisée pour l'interprétation. Elle fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie des horizons, profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe (section) semblable à celle de résistivité apparente présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur. Cela pour les différentes configurations d'acquisition choisies.



Illustration 94 - Résultat de l'inversion de la Illustration 93 avec la topographie.

Pour chaque cas, des paramètres d'inversion sont choisis de manière à optimiser la réponse du modèle en incluant une information « à priori ».

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (résistivité étalonnée, profondeur des interfaces géoélectriques) les paramètres fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant au même jeu de données) et sont soumis à des principes d'équivalence. Cette indétermination ne peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (résistivités, épaisseurs, profondeurs) obtenus par d'autres moyens (autre méthode géophysique, diagraphies, forages, observations de terrain).

### A1.5. APPLICATIONS

La tomographie électrique s'applique d'une manière générale à caractériser les milieux présentant un contraste de résistivité par rapport à leur environnement dans les limites de la résolution de la méthode. La résistivité du sous-sol dépend de sa teneur en fluide, de la résistivité de ce fluide et de sa minéralogie (en particulier de sa teneur en argile). Le paramètre résistivité est ainsi généralement un bon descripteur de la géologie et un bon indicateur des propriétés hydrogéologiques du sous-sol.

La tomographie électrique proche surface (< 100m) s'applique globalement à toutes les sciences environnementales dans des domaines divers et variés.

- Hydrogéologie (géométrie et qualité des aquifères), profondeur du substratum, identification d'invasions salines en milieu côtier
- Géologie : identification de contact géologique ou tectonique
- Environnement : suivi de panache de contamination dans le sol ou dans un aquifère
- Risques naturels : délimitation de la base de glissements de terrain
- Dans le domaine minier (souvent associée à des mesures de polarisation provoquée (PP)), pour mettre en évidence des corps minéralisés
- En archéologie pour l'identification de structures enterrées
- Risques naturels : recherche de cavité en proche surface
- Géotechnique : qualité de fondations
- Volcanologie : identification des zones de fortes altérations hydrothermales

### Annexe 4

# Paramètre d'inversion des tomographies électriques

#### Inversion "Robust" (Blocky) :ROBH

Inversion settings Initial damping factor (0.01 to 1.00) 0.0500 Minimum damping factor (0.001 to 0.75) 0.0100 Line search option (0=Never, 1=Sometimes, 2=Always) 2 Convergence limit for relative change in RMS error in percent (0.1 to 20) 1.0000 Minimum change in RMS error for line search in percent (0.5 to 100) 0.5000 Number of iterations (1 to 30) 10 Vertical to horizontal flatness filter ratio (0.25 to 4.0) 0.3000 Model for increase in thickness of layers (0=default 10, 1=default 25, 2=user defined) 2 Number of nodes between adjacent electrodes (2 or 4) 2 Flatness filter type, Include smoothing of model resistivity (0=model changes only, 1=directly on model) 1 Reduce number of topographical datum points? (0=No,1=Yes. Recommend leave at 0) Carry out topography modeling? (0=No,1=Yes) 1 Type of topography trend removal (0=Average,1=Least-squares,2=End to end) 1 Type of Jacobian matrix calculation (0=Quasi-Newton, 1=Gauss-Newton, 2=Mixed) 1 Increase of damping factor with depth (1.0 to 2.0) 1.1000 Type of topographical modeling (0=None, 1=No longer supported so do not use, 2=uniform distorted FEM, 3=underwater, 4=damped FEM, 5=FEM with inverse Swartz-Christoffel) 4 Robust data constrain? (0=No, 1=Yes) 1 Cutoff factor for data constrain (0.0001 to 0.1)) 0.0100 Robust model constrain? (0=No, 1=Yes) 1 Cutoff factor for model constrain (0.0001 to 1.0) 0.0010 Allow number of model parameters to exceed datum points? (0=No, 1=Yes) 1 Use extended model? (0=No, 1=Yes) 0 Reduce effect of side blocks? (0=No, 1=Slight, 2=Severe, 3=Very Severe) 3

Type of mesh (0=Normal, 1=Fine, 2=Finest) 2 Optimise damping factor? (0=No, 1=Yes) 1 Time-lapse inversion constrain (0=None,1=Least-squares,2=Smooth,3=Robust) Ω Type of time-lapse inversion method (0=Simultaneous, 1=Sequential) 0 Thickness of first layer (0.25 to 1.0) 0.8320 Factor to increase thickness layer with depth (1.0 to 1.25) 1.1000 USE FINITE ELEMENT METHOD (YES=1, NO=0) 1 WIDTH OF BLOCKS (1=NORMAL WIDTH, 2=DOUBLE, 3=TRIPLE, 4=QUADRAPLE, 5=OUINTIPLE) 1 MAKE SURE BLOCKS HAVE THE SAME WIDTH (YES=1, NO=0) 1 RMS CONVERGENCE LIMIT (IN PERCENT) 1.000 USE LOGARITHM OF APPARENT RESISTIVITY (0=USE LOG OF APPARENT RESISTIVITY, 1=USE RESISTANCE VALUES, 2=USE APPARENT RESISTIVITY) 0 TYPE OF IP INVERSION METHOD (0=CONCURRENT, 1=SEQUENTIAL) 1 PROCEED AUTOMATICALLY FOR SEQUENTIAL METHOD (1=YES, 0=NO) 1 IP DAMPING FACTOR (0.01 to 1.0) 0.150 USE AUTOMATIC IP DAMPING FACTOR (YES=1, NO=0) Ω CUTOFF FACTOR FOR BOREHOLE DATA (0.0005 to 0.02) 0.00100 TYPE OF CROSS-BOREHOLE MODEL (0=normal,1=halfsize) 0 LIMIT RESISTIVITY VALUES (0=No, 1=Yes) 0 Upper limit factor (10-50) 20.000 Lower limit factor (0.02 to 0.1) 0.050 Type of reference resistivity (0=average, 1=first iteration) Ω Model refinement (1.0=Normal, 0.5=Half-width cells) 1.00 Combined Combined Marquardt and Occam inversion (0=Not used, 1=used) 0 Type of optimisation method (0=Gauss-Newton, 2=Incomplete GN) 2 Convergence limit for Incomplete Gauss-Newton method (0.005 to 0.05) 0.010 Use data compression with Incomplete Gauss-Newton (0=No,1=Yes) 0 Use reference model in inversion (0=No,1=Yes)  $\cap$ 

Damping factor for reference model (0.0 to 0.3) 0.05000 Use fast method to calculate Jacobian matrix. (0=No,1=Yes) 1 Use higher damping for first layer? (0=No,1=Yes) 1 Extra damping factor for first layer (1.0 to 100.0) 2.50000 Type of finite-element method (0=Triangular, 1=Trapezoidal elements) 1 Factor to increase model depth range (1.0 to 5.0) 1.000 Reduce model variations near borehole (0=No, 1=Yes) 0 Factor to control the degree variations near the boreholes are reduced (2 to 100) 5.0 Factor to control variation of borehole damping factor with distance (0.5 to 5.0) 1.0 Floating electrodes survey inversion method (0=use fixed water layer, 1=Incorporate water layer into the model) Ω Resistivity variation within water layer (0=allow resistivity to vary freely,1=minimise variation) 1 Use sparse inversion method for very long survey lines (0=No, 1=Yes) 0 Optimize Jacobian matrix calculation (0=No, 1=Yes) 1 Automatically switch electrodes for negative geometric factor (0=No, 1=Yes) Force resistance value to be consistant with the geometric factor (0=No, 1=Yes) 0 Shift the electrodes to round up positions of electrodes (0=No, 1=Yes) 0 Use difference of measurements in time-lapse inversion (0=No,1=Yes) 0 Use active constraint balancing (0=No,1=Yes) 0 Type of active constraints (0=Normal, 1=Reverse) 0 Lower damping factor limit for active constraints 0.4000 Upper damping factor limit for active constraints 2.5000 Water resistivity variation damping factor 8.0000

#### Inversion standard ("smooth") : STDH

```
Inversion settings
Initial damping factor (0.01 to 1.00)
0.0500
Minimum damping factor (0.001 to 0.75)
0.0100
Line search option (0=Never, 1=Sometimes, 2=Always)
2
Convergence limit for relative change in RMS error in percent (0.1 to 20)
1.0000
Minimum change in RMS error for line search in percent (0.5 to 100)
0.5000
Number of iterations (1 to 30)
10
Vertical to horizontal flatness filter ratio (0.25 to 4.0)
0.3000
Model for increase in thickness of layers (0=default 10, 1=default 25,
2=user defined)
2
Number of nodes between adjacent electrodes (2 or 4)
2
Flatness filter type, Include smoothing of model resistivity (0=model
changes only, 1=directly on model)
1
Reduce number of topographical datum points? (0=No,1=Yes. Recommend leave
at 0)
\cap
Carry out topography modeling? (0=No,1=Yes)
Type of topography trend removal (0=Average,1=Least-squares,2=End to end)
1
Type of Jacobian matrix calculation (0=Quasi-Newton, 1=Gauss-Newton,
2=Mixed)
1
Increase of damping factor with depth (1.0 to 2.0)
1.1000
Type of topographical modeling (0=None, 1=No longer supported so do not
use, 2=uniform distorted FEM, 3=underwater, 4=damped FEM, 5=FEM with
inverse Swartz-Christoffel)
4
Robust data constrain? (0=No, 1=Yes)
0
Cutoff factor for data constrain (0.0001 to 0.1))
0.0100
Robust model constrain? (0=No, 1=Yes)
Cutoff factor for model constrain (0.0001 to 1.0)
0.0010
Allow number of model parameters to exceed datum points? (0=No, 1=Yes)
1
Use extended model? (0=No, 1=Yes)
\cap
Reduce effect of side blocks? (0=No, 1=Slight, 2=Severe, 3=Very Severe)
Type of mesh (0=Normal, 1=Fine, 2=Finest)
```

2 Optimise damping factor? (0=No, 1=Yes) 1 Time-lapse inversion constrain (0=None,1=Least-squares,2=Smooth,3=Robust)  $\cap$ Type of time-lapse inversion method (0=Simultaneous, 1=Sequential) 0 Thickness of first layer (0.25 to 1.0) 0.5547 Factor to increase thickness layer with depth (1.0 to 1.25) 1.1000 USE FINITE ELEMENT METHOD (YES=1, NO=0) 1 WIDTH OF BLOCKS (1=NORMAL WIDTH, 2=DOUBLE, 3=TRIPLE, 4=QUADRAPLE, 5=QUINTIPLE) 1 MAKE SURE BLOCKS HAVE THE SAME WIDTH (YES=1, NO=0) 1 RMS CONVERGENCE LIMIT (IN PERCENT) 1.000 USE LOGARITHM OF APPARENT RESISTIVITY (0=USE LOG OF APPARENT RESISTIVITY, 1=USE RESISTANCE VALUES, 2=USE APPARENT RESISTIVITY) Ω TYPE OF IP INVERSION METHOD (0=CONCURRENT, 1=SEQUENTIAL) 1 PROCEED AUTOMATICALLY FOR SEQUENTIAL METHOD (1=YES, 0=NO) 1 IP DAMPING FACTOR (0.01 to 1.0) 0.150 USE AUTOMATIC IP DAMPING FACTOR (YES=1, NO=0)  $\cap$ CUTOFF FACTOR FOR BOREHOLE DATA (0.0005 to 0.02) 0.00100 TYPE OF CROSS-BOREHOLE MODEL (0=normal, 1=halfsize)  $\cap$ LIMIT RESISTIVITY VALUES (0=No, 1=Yes) 0 Upper limit factor (10-50) 20.000 Lower limit factor (0.02 to 0.1)0.050 Type of reference resistivity (0=average, 1=first iteration)  $\cap$ Model refinement (1.0=Normal, 0.5=Half-width cells) 1.00 Combined Combined Marquardt and Occam inversion (0=Not used, 1=used)  $\cap$ Type of optimisation method (0=Gauss-Newton, 2=Incomplete GN) 2 Convergence limit for Incomplete Gauss-Newton method (0.005 to 0.05) 0.010 Use data compression with Incomplete Gauss-Newton (0=No,1=Yes) Ω Use reference model in inversion (0=No,1=Yes)  $\cap$ Damping factor for reference model (0.0 to 0.3)

0.05000 Use fast method to calculate Jacobian matrix. (0=No,1=Yes) 1 Use higher damping for first layer? (0=No,1=Yes) 1 Extra damping factor for first layer (1.0 to 100.0) 2.50000 Type of finite-element method (0=Triangular, 1=Trapezoidal elements) 1 Factor to increase model depth range (1.0 to 5.0) 1.000 Reduce model variations near borehole (0=No, 1=Yes)  $\cap$ Factor to control the degree variations near the boreholes are reduced (2 to 100) 5.0 Factor to control variation of borehole damping factor with distance (0.5 to 5.0) 1.0 Floating electrodes survey inversion method (0=use fixed water layer, 1=Incorporate water layer into the model) 0 Resistivity variation within water layer (0=allow resistivity to vary freely,1=minimise variation) 1 Use sparse inversion method for very long survey lines (0=No, 1=Yes) 0 Optimize Jacobian matrix calculation (0=No, 1=Yes) 1 Automatically switch electrodes for negative geometric factor (0=No, 1=Yes) 1 Force resistance value to be consistant with the geometric factor (0=No), 1=Yes) 0 Shift the electrodes to round up positions of electrodes (0=No, 1=Yes) 0 Use difference of measurements in time-lapse inversion (0=No,1=Yes) 0 Use active constraint balancing (0=No,1=Yes) 0 Type of active constraints (0=Normal, 1=Reverse)  $\cap$ Lower damping factor limit for active constraints 0.4000 Upper damping factor limit for active constraints 2.5000 Water resistivity variation damping factor 8.0000

# Annexe 5

### Principe de la méthode des sondages par Résonance Magnétique des Protons

Les méthodes géophysiques traditionnelles d'exploration se fondent sur l'analyse d'anomalies de structures ou de paramètres physiques dépendant de différents facteurs qui ne sont pas eux-mêmes nécessairement liés de façon unique à la présence ou à l'absence d'eau dans le milieu étudié. Ainsi, par exemple, la conductivité électrique (inverse de la résistivité) des roches est proportionnelle à la conductivité électrique du fluide contenu et à une certaine puissance de la porosité (Archie, 1942), mais elle dépend également largement de la composition minéralogique et en particulier de la teneur en argile.

À la différence de ces méthodes géophysiques, l'information déduite d'un sondage de résonance magnétique protonique (RMP) est directement liée à l'eau contenue dans le soussol.

Dans le cadre d'un accord de collaboration entre ICKC (Russie) et le BRGM, un équipement, nommé « NUMIS », fondé sur ce principe a été développé par IRIS Instruments et commercialisé début 1997.

### Principe de la méthode

Schématiquement, le principe physique de la RMP repose sur le fait que les protons qui constituent les noyaux d'hydrogène des molécules d'eau, placés dans un champ magnétique  $H_o$  (tel que celui de la terre ou artificiel), possèdent des moments magnétiques qui, à l'équilibre, sont alignés dans la direction de ce champ principal  $H_o$  (Illustration 95).

L'émission d'un champ magnétique perturbateur à une fréquence spécifique (dite fréquence de Larmor) modifie cet état d'équilibre naturel et provoque une précession de ces moments autour de la direction du champ magnétique naturel.

Après coupure du champ excitateur, et en retour à l'état d'équilibre initial, un champ magnétique de relaxation est émis par les protons et mesuré en surface, constituant ainsi la réponse RMP. L'amplitude de ce champ est d'autant plus intense que le nombre de protons entrés en résonance est grand, et donc que la teneur en eau est importante.

La fréquence spécifique à laquelle les protons sont excités est caractéristique de l'atome d'hydrogène et assure ainsi que la méthode est sélective. La très grande majorité des noyaux d'hydrogène présents dans le proche sous-sol sont ceux des molécules d'eau. Ceci implique que la méthode RMP renseigne spécifiquement et directement sur la présence ou l'absence d'eau dans le milieu étudié ainsi que sur les caractéristiques hydrodynamiques du milieu.

La constante de temps de relaxation longitudinale,  $T_I$ , caractérise la relation entre les protons et leur environnement (spin-lattice relaxation time). Sa valeur reflète comment l'énergie magnétique des protons est échangée avec son environnement. Des valeurs élevées de  $T_I$  correspondent à un faible couplage et un retour lent à l'équilibre. Des valeurs faibles de  $T_I$  indiquent un couplage fort et un rapide retour à l'équilibre.

La constante de temps de relaxation transversale,  $T_2$ , caractérise les échanges d'énergie entre les protons (spin-spin relaxation time) qui se manifestent dans un plan orthogonal à la direction du champ  $H_0$  alors que  $T_1$  correspond à la relaxation longitudinale, le long du champ  $H_0$ . Dans un champ magnétique non parfaitement homogène, les protons subissent un déphasage qui diminue le temps de relaxation transversale qui est alors défini par une constante  $T_2^*$ .



Illustration 95 - Principe de mesure RMP.

Ces phénomènes de relaxation sont liés à la taille moyenne des pores contenant les molécules d'eau. Dans différents environnements géologiques impliquant différentes conditions de susceptibilité magnétique et de champ magnétique rémanent, l'effet de l'inhomogénéité du champ magnétique est différent. Ainsi  $T_2^*$  est en outre lié aux conditions géophysiques du réservoir.

### L'équipement « NUMIS+ »

L'équipement NUMIS<sup>+</sup> se compose d'un générateur de courant alternatif, une unité réceptrice, un détecteur de signal RMP, une antenne et un microprocesseur (Illustration 96).



Illustration 96 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental.

Le microprocesseur pilote la commutation de l'antenne du mode émission au mode réception. Il contrôle également la génération de la fréquence de référence égale à la fréquence de Larmor. Une enveloppe du signal provenant du détecteur synchrone est enregistrée par le microprocesseur sous forme digitale sur une durée programmable de 2 s au maximum. Un PC portable est utilisé pour le stockage sur disque et le traitement des données. Le poids total de l'ensemble est d'environ 100 kg (Illustration 97).



Illustration 97 - Équipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS<sup>+</sup> » sur site.

### Le sondage RMP

Pour réaliser un sondage RMP, une antenne est déployée sur le sol, généralement selon un cercle ayant un diamètre compris entre 20 et 150 m selon la profondeur des couches aquifères que l'on désire investiguer (par commodité d'installation, une antenne carrée est souvent utilisée à la place du cercle). Différentes géométries d'antennes sont prévues dans le logiciel d'acquisition de NUMIS, en particulier, l'antenne peut être déployée sous la forme d'un chiffre « huit » (composé de deux boucles de polarité opposée) afin d'améliorer le rapport signal/bruit (Trushkin *et al.*, 1994). Une impulsion i(t) d'un courant alternatif est émise dans la boucle

$$I(t) = I_0 \cos(\omega_0 t), \ 0 < t \le \tau \tag{1}$$

 $I_o$  et  $\tau$  caractérisent respectivement l'amplitude et la durée de l'impulsion. La pulsation du courant émis  $\omega_0$  correspond à la fréquence de Larmor, caractéristique des protons placés dans le champ géomagnétique  $f_o = \gamma H_o/2\pi$  avec  $H_0$  l'amplitude du champ géomagnétique et  $\gamma$  le facteur gyromagnétique des protons (constante physique caractéristique). La valeur de cette fréquence est déduite de l'amplitude du champ géomagnétique du lieu considéré.

L'impulsion de courant entraîne une précession des protons autour du champ géomagnétique, qui crée à son tour un champ magnétique alternatif qui est détecté, après coupure de l'injection de courant, par la même antenne que celle qui est utilisée pour l'émission. En pratique, l'enregistrement de la réponse RMP n'est possible qu'après un délai instrumental (dit « temps mort ») de 40 ms dans le cas de la version actuelle de NUMIS. Le processus d'acquisition d'une mesure est schématisé dans l'Illustration 98.

En oscillant à la fréquence de Larmor, le signal RMP e(t,q) (appelé aussi free induction decay, FID) a une enveloppe de forme exponentielle décroissante qui dépend du paramètre d'excitation  $q = I_o \tau$ :

$$e(t,q) = e_0(q) \exp(-t/T_2^*) \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$
 (2)

avec  $e_o(q)$  l'amplitude initiale RMP,  $T_2^*$  le temps de relaxation spin-spin, et  $\varphi_o$  la phase du signal RMP.



Illustration 98 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception.

L'augmentation du paramètre q permet d'augmenter le volume investigué et un ensemble de mesures e(t,q) pour des q croissants constitue un sondage RMP en profondeur.

Pour la mesure de  $T_1$  une adaptation de la technique d'« inversion recovery » (Farrar *et al.*, 1971) a été développée. En injectant deux pulsations consécutives séparées par un délai ( $\Delta t < T_1$ ) et mesurant la réponse RMP après chaque pulsation, il est possible de déduire la constante de relaxation  $T_1$  à partir de la différence de réponse entre FID1 et FID2 (Illustration 99) tel que :

$$e_{0-FID2} / e_{0-FID1} = 1 - exp(-\Delta t / T_1)$$
(3)

Avec  $e_{0-FID1}$  et  $e_{0-FID2}$ , les amplitudes à l'origine des signaux FID1 et FID2 respectivement et  $\Delta t$  le délai séparant les deux pulses.

Les paramètres e(q),  $T_2^*(q)$ ,  $T_I(q)$  et  $\varphi_0(q)$  sont les paramètres significatifs qui renseignent sur l'eau contenue dans le sous-sol.

Les valeurs d'amplitude peuvent varier de quelques dizaines de nanovolts à quelques microvolts suivant la teneur en eau du milieu considéré ; le seuil de détectabilité de NUMIS se situant à environ 5 nV. Différents facteurs influencent l'amplitude des signaux RMP tels que par exemple, la magnitude et l'inclinaison du champ géomagnétique, la conductivité électrique des terrains, la taille et la géométrie de l'antenne utilisée (Legchenko *et al.*, 1997).

Le volume investigué lors d'un sondage est défini comme un cylindre vertical de diamètre égal à environ 1,5 fois le diamètre de la boucle, centré sur celle-ci et de hauteur égale à ce diamètre.

La profondeur d'investigation maximale est de l'ordre de 150 m dans les conditions les plus favorables. Elle est diminuée lorsque la conductivité des terrains augmente et de manière significative pour des résistivités inférieures à 10 Ohm.m.

La durée de réalisation d'un sondage RMP varie entre 2 h et 12 h selon les conditions de bruits électromagnétiques parasites d'origine naturelle ou anthropique.



Illustration 99 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception à deux pulses pour la mesure de  $T_1$ .

Lorsque le champ magnétique est hétérogène (cas de roche magnétique), une adaptation de la technique d'écho de spin a été récemment développée pour mesurer le temps de relaxation T<sub>2</sub> (Legchenko et al., 2010, Vouillamoz et al., 2011). Comme pour la mesure de  $T_1$ , une séquence à deux impulsions est utilisée mais avec une 2<sup>ème</sup> impulsion q<sub>2</sub> deux fois plus longue que la 1<sup>ère</sup> impulsion q<sub>1</sub> (dont la durée  $\tau_1$  est en général de 15 ou 30 ms). Après la 2<sup>nde</sup> impulsion et une durée  $\tau_e$  égale à la durée entre les 2 impulsions, un signal en forme de cloche nommé « écho » apparaît. L'amplitude du signal diminue exponentiellement lorsqu'on augmente le délai re entre les 2 impulsions. La constante de temps caractéristique de cette décroissance est le temps de relaxation  $T_2$ . La technique d'écho de spin a permis de lever la limitation de la méthode RMP dans des contextes magnétiques, mais la procédure de mesure en est plus compliquée et demande plus de temps que la procédure standard FID. De plus l'écho de spin ne fonctionne que dans le cas où  $T_2^*$  est court et  $T_1$  est long et ne peut donc pas être appliquée lorsque la roche n'est pas magnétique.

FID10 pulses P1 and P2 SE<sub>0</sub> FID20 Amplitude  $= 200 \, \text{ms}$ = 300 ms noise 400 ms lead time 200 300 400 500 6<u>0</u>0 700 8Ò0 9<u>0</u>0 1000 100 Time (ms)

Illustration 100 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception en écho de spin (SE) pour la mesure de T<sub>2</sub> (d'après Legchenko et al. 2010)

Dans le cas de mesures de l'écho de spin la composante transversale de l'aimantation de spin  $M_{\perp}$  devient:

$$M_{\perp} = -M_{0}\sin(\theta_{1}) \times \sin^{2}(0.5\theta_{2}) = -M_{0}\sin^{3}(\theta).$$
 (A1-5)

Pour la mise en œuvre 3D, des boucles Tx / Rx, sont disposées à la surface dans la zone à étudier (Illustration 101). L'imagerie RMP 3D consiste à mesurer le signal RMP indépendamment dans chaque boucle en variant le moment d'impulsion q. L'ensemble des sondages individuels constitue le jeu de données 3D pour l'inversion.



Illustration 101 - Exemple de dispositif de mesure de l'imagerie 3D RMP (9 boucles).

### Interprétation des données

#### a) Inversion des sondages RMP

Les algorithmes d'inversion des paramètres RMP sont décrits dans Legchenko *et al.* (1998). Ainsi, un signal RMP non nul est directement lié à la présence d'eau dans le sous-sol. De plus, des informations complémentaires peuvent être obtenues à partir des courbes brutes enregistrées :

- l'inversion des données **d'amplitude**  $e_o(q)$  fournit la profondeur, l'épaisseur et la teneur en eau de chaque couche saturée en eau.

Le sous-sol est subdivisé en N couches homogènes dont la réponse est pondérée par la teneur en eau RMP  $W_{RMP}$  qui varie de 0 à 100%. C'est une teneur en eau volumique, W=100% correspond à un lac (par ex. sondage RMP sur lac gelé en surface) et W=0% correspond à un niveau sec.

Mais cette définition ne tient pas compte de la relaxation pendant le temps mort instrumental et une partie de l'eau dont les constantes de temps de relaxation sont faibles n'est pas prise en compte dans la mesure RMP.

L'expérience d'application des sondages RMP (Schirov, *et al.*, 1991) a montré que dans bien des cas le temps de décroissance,  $T_2^*$  de l'eau liée est inférieur à 20-30 ms et que celui de l'eau libre est compris entre 30 et 1 000 ms. Comme les caractéristiques des équipements de mesures actuels ne permettent pas de mesurer des temps inférieurs à 30 ms, il est généralement admis que la teneur en eau RMP correspond à la teneur volumique en eau libre. Selon ces considérations, si l'eau dans les pores non connectés et dans les pores en cul de sac peut être négligée, la teneur en eau RMP serait une

estimation de la porosité cinématique. Si la capacité de rétention est négligeable, la teneur en eau RMP serait une bonne estimation de la teneur en eau gravitaire.

La constante  $T_2^*$  dépend du contexte géologique et dans certains milieux particulièrement peu magnétiques, tels que la craie ou les calcaires, les temps de décroissance  $T_2^*$  de l'eau capillaire peuvent être proches voire supérieurs à 40 ms. Dans la zone non saturée, la teneur en eau RMP correspondrait à l'eau gravitaire et à tout ou partie de l'eau capillaire. L'eau de la zone non saturée pourrait ainsi être observée par RMP.

Il faut aussi ajouter que dans des conditions de milieux, au contraire, très magnétiques, le temps de décroissance  $T_2^*$  de l'eau libre peut être réduit de telle manière qu'une partie seulement de l'eau libre est observée par RMP voire pas du tout. La méthode est alors mise en défaut.

les constantes de temps de relaxation (*T*<sub>1</sub> ou *T*<sub>2</sub> représentées ici par *T*) sont reliées à la distance moyenne entre une molécule d'eau et la phase solide (Shirov et al., 1991 ; Chang et al., 1997 ; Kenyon, 1997) et peuvent être décrites en fonction des caractéristiques des pores (en milieu saturé) tel que :

$$1/T = (1/T_a) + (\rho S / V)$$
 (4)

avec  $T_a$  la constante de temps décrivant la décroissance en milieu liquide, V et S le volume et la surface des pores et  $\rho$  la capacité de la surface à induire la relaxation des protons autrement appelée indice de relaxation.

Mais  $T_2^*$  dépend aussi des hétérogénéités du champ géomagnétique  $\Delta H_0$  tel que :

$$1/T_2^* = (1/T_{2a}) + (\rho S / V) + \gamma(\Delta H_0 / 2)$$
(5)

avec  $T_{2a}$  la constante de temps transversale en milieu liquide et  $\gamma$  le facteur gyromagnétique des protons.

Comme les hétérogénéités du champ géomagnétique dépendent des conditions géologiques, le temps de relaxation  $T_2^*$  est moins fiable que  $T_1$  pour caractériser la taille moyenne des pores dans différents milieux.  $T_1$  lui est généralement préféré pour l'estimation des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères.

 la *phase* φ<sub>o</sub>(q) renseigne sur la distribution des conductivités électriques du sous-sol. Pour une estimation précise des profondeurs des différents aquifères, cette information doit être prise en compte lors de l'étape d'inversion des données RMP, quand les résistivités sont inférieures à 10 ohm-m.

Le problème inverse des sondages RMP est mal conditionné. Il n'a pas de solution unique. La capacité de résolution de la méthode est discutée par Legchenko et Shushakov (1998). Un exemple d'inversion de données théoriques est présenté à l'Illustration 102.


Illustration 102 - Résultats d'inversion des données théoriques.

ndeur	Teneur en eau	$T_2^*$
à (m)	(%)	(ms)
15	20	50
25	10	100
35	10	150
45	20	250
	ndeur <u>à (m)</u> 15 25 35 45	A deurTeneur en eauà (m)(%)1520251035104520

Le signal théorique a été calculé à partir du modèle du Tableau 4 :

Tableau 4 - Paramètres du modèle.

### b) Caractérisation hydrodynamique des aquifères par RMP

En référence à l'expérience acquise en diagraphies de Résonance Magnétique Nucléaire (Chang *et al.,* 1997 ; Kenyon, 1997), la perméabilité peut être liée aux paramètres RMP en utilisant une relation empirique telle que :

$$K = C_k W^a T_l^b$$
 (6)

où *K* est la perméabilité, *W* est la teneur en eau RMP,  $T_1$  est la constante de temps de décroissance,  $C_k$  et *a*, *b* sont des constantes définies empiriquement. En diagraphies RMN, différentes valeurs *a*, *b* sont utilisées. Sur la base de mesures réalisées avec l'équipement NUMIS au droit de forages de caractéristiques hydrogéologiques connues réalisées dans différents milieux, les valeurs a = 1, b = 2 ont été retenues.

Pour des roches différentes, les constantes empiriques doivent être modifiées et des relations mieux adaptées peuvent être définies.

La définition des paramètres empiriques adaptés aux différents environnements est un travail de longue haleine mais déjà dans cette phase initiale de développement, NUMIS peut être utilisé efficacement pour définir les perméabilités des aquifères au moins en valeurs relatives.

Le résultat d'un sondage RMP mesuré avec l'équipement NUMIS est présenté généralement avec les informations suivantes :

- 1) distribution verticale de la teneur en eau ;
- 2) distribution verticale du temps de décroissance  $T_2^*$ ;
- 3) distribution verticale du temps de décroissance  $T_1$ ;
- 4) distribution verticale de la perméabilité K.

Le BRGM et ses partenaires ont développé dans le bassin parisien d'abord puis dans différents environnements hydrogéologiques une méthodologie empirique basée sur la comparaison des résultats RMP avec les pompages d'essais, visant à définir les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères sur la base des résultats RMP. Des fonctions de transferts sont ainsi établies entre la transmissivité obtenue en résultat des pompages d'essais et une transmissivité RMP calculée comme la combinaison des paramètres RMP teneur en eau, W et temps de décroissance Tn (Illustration 103Illustration 104). Les transmissivités RMP sont d'autant plus fiables que des étalonnages auront été établis localement avec des pompages d'essais réalisés dans le réservoir hydrogéologique d'intérêt. En l'absence de calage local, les fonctions transferts définies dans des formations hydrogéologiques similaires peuvent être utilisées avec une incertitude acceptable.



Illustration 103 - Exemple de Sondage RMP en milieu sédimentaire. a) courbes de sondage ; b) log vertical de teneur en eau, W et de temps de décroissance, T1 obtenu par inversion du sondage RMP; c) log de perméabilité RMP obtenue par combinaison des paramètres RMP W et T1.



Illustration 104 - Fonctions de transfert entre résultats RMP et transmissivité par pompage obtenues dans différents environnements géologiques (modifié d'après Boucher 2007, Estimation des propriétés hydrodynamique des aquifères par RMP, Thèse de l'Université d'Orléans).

### Conditions et limites d'application de la méthode RMP

Les sondages RMP sont souvent utilisés en complément des mesures électriques et électromagnétiques, pour estimer les propriétés hydrodynamiques sur les zones d'intérêt révélées par ces méthodes à plus grand rendement. Les sondages RMP permettent généralement de lever les ambiguïtés de l'interprétation des résistivités électriques : distinguer, par exemple, les anomalies conductrices causées par une teneur en argile élevée et généralement non aquifères de celles causées par une teneur eau de formation conductrice potentiellement aquifères.

La méthode RMP mesure de très faibles signaux (de l'ordre du nV) et est sensible à toutes les sources de bruits électromagnétiques. En conséquence, il convient de limiter les zones d'investigation aux zones rurales, à plus de 750 m des lignes électriques Haute Tension et plus de 300 m des lignes Moyenne Tension, à l'écart des clôtures électriques, des transformateurs et des pompes en fonctionnement.

Dans le contexte de nappes superposées, la réponse RMP de la nappe supérieure peut interférer avec les signaux de la nappe inférieure et augmenter

# Annexe 6

### Résultats des sondages RMP et caractéristiques hydrodynamiques des forages associés

01173x0013       T75       Image: Constraint of the c	Socle fissuré/fracturé de 7 à 30-40 m, aquifère d'après la RMP argile de 0 à 12m, transition de 12 à 18 m, <b>Falun de Bohon</b> de 12 à 78 001 m, argile rouge de 78 à 84 m 281 argile coquillère de 14 à 18m
01173x0031       F1       Rue de la Cane       13.0       84       faluns de Bohon       12       78       20       76       10       0.11       0.0002       captive       MARCH2       9.4E-03       9.4E-03       16.6       22.0       12       100       280       380       1340406       2793001       m,	argile de 0 à 12m, transition de 12 à 18 m, Falun de Bohon de 12 à 78 001 m, argile rouge de 78 à 84 m 281 argile coquillère de 14 à 18m
	281 argile coquillère de 14 à 18m
I Rue de la IIII I IIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIII	281
01173x0031       F1       Cane       13.0       84       faluns de Bohon       12       78       20       76       10       0.11       0.0002       captive       MARCH7       8.5E-03       8.4E-03       17.3       22.0       12       100       275       300       1204355       1604281	argile coquillère de 14 à 18m
Nue de la       Rue de la       Image: Cane       13.0       18       Image: Cane       13.0       18       Image: Cane       MARCH2, MARCH7       MARCH7       Image: Cane       I	argile coquillère de 14 à 18m
Number of the state       Number of the state<	argile coquillère de 14 à 18m
01172x0121     S15     La Corbinerie     80     faluns de Bohon     90     18     88     0.013     MARCH2,     Image: Control of the second	falun de Bohon de 18 à 89 m, argile rouge de 89 à 90 m
01176x0046 S1 Le Château 17.6 80 marnes du Bosg 48 80 38 78 3 0.038 captive MARCH3 1.1E-02 1.1E-02 17.3 25.0 29 100 305 353 1524217 3377152 d'u	2 nappes; 1ère nape de 10 à 15 m de prof., niveau à 3.3 m; 2ème nappe, Marnes du Bosq, faciès argilo-sableux de prof. du niveau 152 d'eau de la à 14.6 m
01176x0021 T47 17 argile 0 17 MARCH3 MARCH3	
(falun de Bohon	
Champeaux     et) sable       01176x0043     S9     N     76     coguiller     40     60     51     63     1     MARCH4     1     1     1	falun de Bohon de 5 à 14 m
01176x0041       S7       Champeaux       110       Bosq       Image: Constraint of the constraint	falun de Bohon cimenté de 6 à 16 272 m
Image: series of the series	; marne du Bosq, faciès sableux de 035 16 à 110 m, 5 portions de crépine
01176x0061 F La Grosnière 112 falun de bohon 112 fa	marne du Bosq, faciès argileux 0 à 116 36m
01176x0061       F       La Grosnière       112       falun de bohon       27       127       2.5       0.077       0.0006       captive       MARCH5       6.8E-03       6.8E-03       16.0       22.0       26       100       274       332       967449       2464428       fa	428 falun de Bohon de 27 à 109 m
Maison de Feugères         Maison de Feugères         Maison de Peugères         Maison	
Maison des Marais         Maison des         Marais	
Image: series of the series	marne du Bosq, faciès marno- argileux coquiller, un peu d'eau676entre 100 et 121 m
01176x0094       PF5       Bosqs       20.0       31       marne du Bosq       3       21       MARCH6       MARCH6       Image: Constraint of the second	faciès argileux
01176x0048 S3 faluns de Bléhou 0.7 MARCH8	
F2-       Les Rouges       1.5       23       marne du bosq       19       20         MARCH9       7.3E-03       7.3E-03       15.0       24.0       12       77       251       285       1035697       991635       sit	marne du Bosq, faciès sableux 635 situé sous le niveau argileux
Clos Clos Pongeade 21.0 50 11 30 10 27.5 9 0.003 semilibre MARCH10 1.8F-03 8.7F-04 4.2 15.4 5 33 160 280 123608 359801 05	801 Qs=9.7 m3/h/m:

# Annexe 7

# **Données RMP**

```
This data set has been processed using SAMOVAR-11.62 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2) = 333.3 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization
Site: MARCH1 RX=TX=75m RX2=10m RX3=10m C1C2=3-3
Loop: 2 - 75.0 x 1
                       Date: 3/10/2015
                                           Time: 12:00:00 AM
NUMIS data set:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\procdata\MARCH
1\MARCH1 f1\MARCH1.inp
linear filter:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\March_sq75.mrm
loop: square, side = 75.0 m
geomagnetic field:
inclination= 64N degr, magnitude= 48004.69 nT
filtering window = 199.5 ms
signal shape: exponential
time constant = 15.00 \text{ ms}
static phase shift = -100 degr.
average S/N = 7.40; EN/IN = 0.86
inversion RMSE : FID1 = 1.33 nV; FID2 = 6.44 nV;
smoothing factor: SF1 =
                         11.9 ( 0.4 - 32.6); SF2 = 5.4 ( 3.2 -
9.7)
permeability constant Cp = 7.00e-09
Inversion assumption: Et0 = 0.0 nV
```



BRGM/RP-65218-FR - Rapport final



```
This data set has been processed using SAMOVAR-11.62 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2) = 333.4 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization
Site: MARCH2 RX=TX=75m RX2=10m RX3=10m C1C2=3-3
Loop: 2 - 75.0 x 1 Date: 3/11/2015 Time: 12:00:00 AM
NUMIS data set:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\procdata\MARCH
2c fl\MARCH2c.inp
linear filter:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\March sq75.mrm
loop: square, side = 75.0 \text{ m}
geomagnetic field:
inclination= 64N degr, magnitude= 47985.92 nT
filtering window = 199.6 ms
signal shape: exponential
time constant = 15.00 \text{ ms}
static phase shift = 180 degr.
average S/N = 41.79; EN/IN = 2.04
inversion RMSE : FID1 = 8.49 nV; FID2 = 54.32 nV;
smoothing factor: SF1 = 7.5 ( 2.1 - 15.2); SF2 = 17.4 ( 15.2 -
20.6)
permeability constant Cp = 7.00e-09
Inversion assumption: Et0 =
                              0.0 nV
```



```
This data set has been processed using SAMOVAR-11.62 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2) = 333.3 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization
Site: MARCH3 RX=TX=75m RX2=10m RX3=10m C1C2=3-3
Loop: 2 - 75.0 x 1 Date: 3/11/2015 Time: 12:00:00 AM
NUMIS data set:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\procdata\MARCH
3\MARCH3 f1\MARCH3.inp
linear filter:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\March sq75.mrm
loop: square, side = 75.0 \text{ m}
geomagnetic field:
inclination= 64N degr, magnitude= 48000.00 nT
filtering window = 199.5 \text{ ms}
signal shape: exponential
time constant = 15.00 \text{ ms}
static phase shift = -90 degr.
average S/N = 26.05; EN/IN = 1.92
inversion RMSE : FID1 = 14.47 nV; FID2 = 34.88 nV;
smoothing factor: SF1 = 7.5 ( 1.0 - 15.2); SF2 = 29.4 ( 14.1 -
37.0)
permeability constant Cp = 7.00e-09
Inversion assumption: Et0 =
                              0.0 nV
```



```
This data set has been processed using SAMOVAR-11.62 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2) = 333.3 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization
Site: MARCH4 RX=TX=112m RX2=10m RX3=10m C1C2=3-3
Loop: 2 -112.0 x 1 Date: 3/12/2015 Time: 12:00:00 AM
NUMIS data set:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\procdata\MARCH
4\MARCH4 f1\MARCH4.inp
linear filter:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\March sq112.mr
m
loop: square, side = 112.0 m
geomagnetic field:
inclination= 64N degr, magnitude= 48000.00 nT
filtering window = 199.5 ms
signal shape: exponential
time constant = 15.00 \text{ ms}
static phase shift = -100 degr.
average S/N = 82.90; EN/IN = 1.96
inversion RMSE : FID1 = 12.40 nV; FID2 = 26.99 nV;
smoothing factor: SF1 = 0.4 ( 0.4 - 22.8); SF2 = 8.6 ( 6.5 - 22.8); S
13.0)
permeability constant Cp = 7.00e-09
Inversion assumption: Et0 =
                                                                                           0.0 nV
```



```
This data set has been processed using SAMOVAR-11.62 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2) = 333.3 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization
Site: MARCH5 RX=TX=75m RX2=10m RX3=10m C1C2=3-3
Loop: 2 - 75.0 x 1 Date: 3/12/2015 Time: 12:00:00 AM
NUMIS data set:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\procdata\MARCH
5\MARCH5 f1\MARCH5.inp
linear filter:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\March sq75.mrm
loop: square, side = 75.0 \text{ m}
geomagnetic field:
inclination= 64N degr, magnitude= 48004.69 nT
filtering window = 199.5 ms
signal shape: exponential
time constant = 15.00 \text{ ms}
static phase shift = -80 degr.
average S/N = 41.14; EN/IN = 1.84
inversion RMSE : FID1 = 8.08 nV; FID2 = 52.12 nV;
smoothing factor: SF1 = 0.4 ( 0.4 - 7.5); SF2 = 17.4 ( 15.2 -
20.6)
permeability constant Cp = 7.00e-09
Inversion assumption: Et0 =
                              0.0 nV
```



```
This data set has been processed using SAMOVAR-11.63 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2) = 333.8 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization
Site: MARCH6 RX=TX=EIGHTSQ=53m RX2=10m RX3=10m C1C2=3-3
                        Date: 3/13/2015
Loop: 4 - 56.0 x 1
                                            Time: 12:00:00 AM
NUMIS data set:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\procdata\MARCH
6 f1 - 8sq56\MARCH6.inp
linear filter:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\matrice\8sq56x
1t ns fid std.mrm
loop: eight square, side = 56.0 m
geomagnetic field:
inclination= 60N degr, magnitude= 47920.19 nT
temperature 20.0 °C
filtering window = 205.7 ms
signal shape: exponential
time constant = 15.00 \text{ ms}
static phase shift = -100 degr.
average S/N = 26.65; EN/IN = 1.22
inversion RMSE : FID1 = 19.19 nV; FID2 = 14.75 nV;
smoothing factor: SF1 = 23.9 ( 8.6 - 45.7); SF2 = 11.9 ( 8.6 -
16.3)
permeability constant Cp = 7.00e-09
Inversion assumption: Et0 =
                              0.0 nV
```



```
This data set has been processed using SAMOVAR-11.62 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2) = 333.4 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization
Site: MARCH7 RX=TX=SQ=75m RX2=10m RX3=10m C1C2=3-3
                        Date: 3/13/2015
Loop: 2 - 75.0 x 1
                                             Time: 12:00:00 AM
NUMIS data set:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\procdata\MARCH
7 f1\MARCH7.inp
linear filter:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\March sq75.mrm
loop: square, side = 75.0 \text{ m}
geomagnetic field:
inclination= 64N degr, magnitude= 47981.22 nT
filtering window = 199.6 ms
signal shape: exponential
time constant = 15.00 \text{ ms}
static phase shift = 180 degr.
average S/N = 15.98; EN/IN = 5.50
inversion RMSE : FID1 = 24.84 \text{ nV}; FID2 = 52.32 \text{ nV};
smoothing factor: SF1 =
                          5.4 ( 0.4 - 16.3); SF2 = 18.5 ( 15.2 -
21.7)
permeability constant Cp = 7.00e-09
Inversion assumption: Et0 =
                               0.0 nV
```



```
This data set has been processed using SAMOVAR-11.63 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2) = 333.4 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization
Site: MARCH8 RX=TX=8SQ=53m RX2=10m RX3=10m C1C2=3-3
                        Date: 3/13/2015
Loop: 4 - 56.0 x 1
                                            Time: 12:00:00 AM
NUMIS data set:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\procdata\MARCH
8 f1 - 8sq56\MARCH8.inp
linear filter:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\matrice\8sq56x
1t ns fid std.mrm
loop: eight square, side = 56.0 m
geomagnetic field:
inclination= 60N degr, magnitude= 47988.26 nT
temperature 20.0 °C
filtering window = 205.4 ms
signal shape: exponential
time constant = 15.00 \text{ ms}
static phase shift = -135 degr.
average S/N = 7.71; EN/IN = 6.65
inversion RMSE : FID1 = 19.66 nV; FID2 = 17.21 nV;
smoothing factor: SF1 =
                         8.6 ( 0.4 -
                                         20.6; SF2 = 18.5 ( 14.1 -
22.8)
permeability constant Cp = 7.00e-09
Inversion assumption: EtO =
                              0.0 nV
```



```
This data set has been processed using SAMOVAR-11.63 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2) = 333.2 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization
Site: Test MA9 RX1=TX=sq75x1t C1C2=3-3
                    Date: 23/07/2015
                                         Time: 00:00:00
Loop: 2 - 75.0
NUMIS data set:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\procdata\MARCH
9 f\NumisData.inp
linear filter:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\matrice\March
sq75.mrm
loop: square, side = 75.0 \text{ m}
geomagnetic field:
inclination= 64N degr, magnitude= 47981.22 nT
temperature 20.0 °C
filtering window = 205.5 ms
signal shape: exponential
time constant = 15.00 \text{ ms}
static phase shift =
                       0 degr.
average S/N = 13.49; EN/IN = 6.01
inversion RMSE : FID1 = 10.90 nV; FID2 = 98.59 nV;
                          0.4 ( 0.4 - 10.8); SF2 = 14.1 ( 10.8 -
smoothing factor: SF1 =
16.3)
permeability constant Cp = 7.00e-09
Inversion assumption: EtO =
                               0.0 nV
```



```
This data set has been processed using SAMOVAR-11.63 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2) = 333.2 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization
Site: MAR10 RX1=TX=s8 56x1t C1C2=2-2
Loop: 4 - 56.0
                    Date: 23/07/2015
                                        Time: 00:00:00
NUMIS data set:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\procdata\MARCH
10 f\NumisData.inp
linear filter:
D:\Documents\baltassat\Travail\Etudes2\Marchesieux\RMP\data\matrice\8sq56x
1t ns fid std.mrm
loop: eight square, side = 56.0 m
geomagnetic field:
inclination= 60N degr, magnitude= 47981.22 nT
temperature 20.0 °C
filtering window = 205.5 ms
signal shape: exponential
time constant = 15.00 \text{ ms}
static phase shift = -80 degr.
average S/N = 3.20; EN/IN = 17.84
inversion RMSE : FID1 = 118.42 nV; FID2 = 88.22 nV;
smoothing factor: SF1 = 44.6 ( 31.6 - 64.3); SF2 =
                                                          22.8 ( 16.3 -
35.9)
permeability constant Cp = 7.00e-09
Inversion assumption: Et0 = 0.0 nV
```



Résultats des investigations géophysiques sur le sous-bassin de Marchésieux



Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr Direction Régionale Normandie Direction Territoriale Basse-Normandie Citis Odyssée. Bat C. 2<sup>ème</sup> étage. 4 avenue de Cambridge 14200 – Hérouville-Saint-Clair – France Tél. : 02 31 06 66 40