



HAL
open science

Caractérisation de l'environnement karstique de la grotte de Lascaux par couplage de méthodes géophysique, statistique et géostatistique

Shan Xu

► **To cite this version:**

Shan Xu. Caractérisation de l'environnement karstique de la grotte de Lascaux par couplage de méthodes géophysique, statistique et géostatistique. Mécanique [physics.med-ph]. Université de Bordeaux, 2015. Français. NNT : 2015BORD0244 . tel-01263659

HAL Id: tel-01263659

<https://theses.hal.science/tel-01263659>

Submitted on 28 Jan 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

SPÉCIALITÉ : MECANIQUE

Par

Shan XU

**Caractérisation de l'environnement karstique de la grotte
de Lascaux par couplage de méthodes géophysique,
statistique et géostatistique**

Sous la direction de : Colette SIRIEIX

Soutenue le 24 Novembre 2015

Membres du jury :

M. GUERIN, Roger	Professeur, Université Paris 6	Rapporteur
M. PESSEL, Marc	Maître de conférences HDR, Université Paris Sud	Rapporteur
M. COSENZA, Philippe	Professeur, Université de Poitiers	Examineur
M. FERNANDEZ MARTINEZ, Juan Luis	Professeur, University of Oviedo, Spain	Examineur
M. MARACHE, Antoine	Maître de conférences, Université de Bordeaux	Examineur
Mme. RISS, Joëlle	Professeur Emérite, Université de Bordeaux	Examineur
Mme. SIRIEIX Colette	Professeur, Université de Bordeaux	Directeur
Mme. FERRIER, Catherine	Maître de conférences, Université de Bordeaux	Co-encadrante
M. RIEU, Alain	Conservateur Régional des monuments historiques	Invité
M. MALAURENT, Philippe	Ingénieur d'études, Université de Bordeaux	Invité

*A ma Famille,
à Chang
à Léa Qianchen*

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord Colette Sirieix, encadrante dévouée et patiente sans qui la réalisation de ce travail n'aurait pas été possible. Les discussions ont été une source d'enrichissement permanent. Elle m'a aidé dans le domaine de la recherche et aussi de la langue française. Les chemins se séparent aujourd'hui mais j'ai toujours envie de travailler avec elle comme collègue ou de collaborer sur des projets futurs. Catherine Ferrier, co-encadrante de ma thèse, m'a transmis ses connaissances géologiques et archéologiques du site. Elle a toujours été présente pour répondre à mes questions avec un accueil chaleureux.

J'adresse toute ma reconnaissance à l'ensemble de l'équipe du laboratoire I2M pour leur accueil. En particulier, je tiens à remercier tout spécialement Joëlle Riss sans qui le traitement statistique serait encore en cours de réalisation ; Antoine Marache pour ses conseils avisés à propos des études géostatistiques, Roland Lastennet pour ses conseils sur l'épikarst. Je tiens à remercier Philippe Malaurent, source d'informations précieuses autant sur la climatologie, que sur l'histoire de la grotte de Lascaux sans oublier ses bons plans gastronomiques de la région. J'espère le recroiser un jour lors de prochains voyages en France. Je n'oublierai pas de lui envoyer des timbres.

Je remercie Delphine Lacanette-Puyo, Fanny Genelle, Yannick Anguy et Cécile Gaborieau pour leur collaboration efficace et leur disponibilité.

Je voudrais, de plus, remercier les personnes de la DRAC qui ont autorisé l'accès au site pour effectuer les mesures géophysiques et ont soutenu le projet, notamment Monsieur Alain Rieu, Conservateur Régional des monuments historiques et Madame Muriel Mauriac, Conservateur de la grotte de Lascaux. Je tiens aussi à remercier les membres du conseil scientifique de Lascaux qui ont été à l'initiative de ce programme.

Je tiens à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'être présent le jour de la soutenance, et particulièrement les rapporteurs Roger Guérin et Marc Pessel pour avoir lu mon manuscrit avec attention, et pour les questions détaillées dans leurs rapports. Merci également aux examinateurs, Philippe Cosenza et Juan Luis Fernandez Martinez, pour leurs questions, remarques et conseils le jour de la soutenance.

Je ne peux pas oublier Jean-Christophe Portais, Sandrine Van Solinge, et Bruno Desplat, personnels permanents de Lascaux, qui m'ont ouvert les portes de ce formidable site archéologique et m'ont toujours bien accueilli et conseillé.

Je tiens aussi à remercier les nombreuses personnes qui m'ont aidé sur le terrain : Fabien Naessens, Marion Fernandes, Nicolas Houillon, et Damien Buquet, Thomas Hauquin, en espérant n'avoir oublié personne. Je remercie aussi Patrick Sin qui non seulement était présent sur le terrain mais aussi pour m'aider dans la réalisation des dessins de ma thèse.

Je remercie chaleureusement mes collègues docteurs et doctorants, tout d'abord, Nicolas Houillon avec qui je n'ai cessé de discuter de l'environnement du site de Lascaux et, aussi, Cécile Verdet, Elodie Rodney, Esra Tepeli, Damien Buquet, Jessica Villanueva, Mahamadou Souley Issiakou, Nicolas Piegay, Nicolas Peyraube, Olivier Guerrero, Thibault Guekie-Simo, Sébastien Minvielle, Yassine Verdret, etc. pour leur présence et leur soutien. Je remercie sincèrement Marie-Charlotte Lavenier pour son aide et sa patience.

Enfin, je tiens à remercier ma famille à qui je tiens énormément et à qui je n'ai pas consacré suffisamment de temps pendant ces trois ans. Et je ne pourrai jamais assez remercier Chang pour m'avoir supporté toutes ces années et m'avoir écouté lorsque j'en avais besoin.

Résumé

La grotte de Lascaux (inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO et l'une des plus connues au monde) nécessite, dans le cadre de sa conservation et suite aux aléas subis depuis sa découverte, une attention particulière tant pour elle-même que pour son environnement. L'utilisation d'une méthode géophysique, la Tomographie de Résistivité électrique (TRE) qui est une méthode non intrusive par excellence, est donc proposée pour la reconnaissance du milieu karstique l'environnant.

Un suivi temporel par TRE a été mise en œuvre pour caractériser l'amont hydraulique de la grotte et surveiller la variation temporelle de la résistivité des terrains. A l'aide d'analyses statistiques, et en couplant les données microclimatiques aux résultats d'un suivi temporel de vingt-deux mois, nous avons montré la capacité de ce type de mesures à caractériser l'environnement épikarstique de la grotte, particulièrement les zones d'alimentation et celles permettant l'infiltration des eaux pluviales. Une modélisation du débit d'un écoulement situé à l'entrée de la grotte est proposée à partir des données de résistivité dans la zone d'alimentation identifiée au cours du suivi. Ce modèle a la capacité de prédire les arrêts et les reprises des écoulements dans la grotte, éventuellement des évènements journaliers.

A partir des données de résistivité issues d'une prospection 3D du site, des modélisations géostatistiques par krigeage ordinaire et par indicatrice ont été effectuées permettant des représentations spatiales en fonction de la résistivité des terrains. Ces modèles se sont révélés extrêmement instructifs par l'imagerie de l'environnement karstique de la grotte de Lascaux qui en a résulté. Les limites des formations détritiques et des calcaires sont identifiées à l'est et l'ouest du site. A l'intérieur des calcaires, on retrouve, bien sûr, les anomalies conductrices déjà identifiées au cours du suivi temporel mais aussi leur extension spatiale. Ainsi, on a pu mettre en évidence la continuité spatiale de certaines anomalies.

Le suivi temporel par TRE a permis la compréhension de la structure et du fonctionnement de l'alimentation de l'épikarst. Les modèles géostatistiques 3D ont montré leur efficacité pour la caractérisation de l'environnement de la grotte. Les résultats aideraient à proposer des conseils pour la protection du milieu environnant la grotte et ainsi pour la préservation de cette dernière.

Mots-clés : grotte de Lascaux, suivi temporel, Tomographie de Résistivité Electrique, analyse statistique, modélisation du débit, condition microclimatique, modélisation géostatistique, préservation

Abstract

The Lascaux cave, one of the most important prehistoric caves in the world, located in Dordogne (24, France) needs particular attention both for itself and for the environment in terms of conservation and vulnerability since its discovery. Geophysical methods in particular Electrical Resistivity Tomography (ERT) enable us, in a non-invasive way, to monitor the karstic environment.

A Time-Lapse monitoring by ERT was carried out next to the cave. Together with analysis of the local effective rainfall (groundwater recharge) and the flow in the cave, the monitoring helped us to identify an area where upstream underground water is probably stored e.g. a recharge zone. There is a large electrical contrast between the surrounding limestone and the probable recharge zone. Then, a multivariate analysis through the resistivity values allowed us to characterize the model blocks, showing a specific behavior over time, especially the blocks with the lowest electrical resistivity. A prediction model of the flow in relation with the recharge zone succeeded to predict the beginning and the end of flow, even the daily event with extremely high value of flow.

In order to visualize the environment in 3D condition, a geostatistical modelling was then applied to the resistivity values. The geostatistical models can emphasize the limit between the limestone promontory and the clayey/sandy formations to the east/west part of the site. In the limestone promontory, the models also showed the possible connection between the anomalous conductive areas that may have a special consequence in this karstic environment.

The Time-Lapse monitoring by ERT allows us to understand the karstic structures and recharge phenomena. The 3D geostatistical modeling showed efficiency for the characterization of the cave environment. Those results can help to provide advices for the cave preservation.

Keywords: Lascaux cave, Time-Lapse monitoring, Electrical resistivity tomography, statistical analysis, modeling of flow, microclimate conditions, geostatistical modeling, preservation

Institut de Mécanique et d'Ingénierie – Bordeaux

I2M, CNRS UMR 5295,
Bâtiment B18, Allées Geoffroy St Hilaire CS 50023, 33615 Pessac CEDEX

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Historique des problèmes conservatoires et synthèse des travaux antérieurs.....	3
1.1. À propos de la grotte de Lascaux – de sa découverte à sa protection.....	3
1.2. Synthèse des travaux antérieurs.....	4
1.2.1. Système karstique.....	4
1.2.1.1. Définition.....	4
1.2.1.2. Organisation d'un système karstique.....	4
1.2.2. Contexte géographique et géologique.....	6
1.2.2.1. Etudes géologiques de H. Schoeller et J. Vouvé.....	6
1.2.2.2. Etude géologique récente.....	7
1.2.2.3. Relevé de fractures des terrains géologiques de Lascaux.....	9
1.2.2.4. Plan de la grotte.....	11
1.2.3. Des essais géotechniques/géologiques.....	12
1.2.3.1. Forages J. Vouvé (1966-1967).....	12
1.2.3.2. Pénétrromètre.....	14
1.3. Contribution des méthodes géophysiques.....	15
1.3.1. Les méthodes géophysiques utilisés.....	15
1.3.1.1. Slingram.....	15
1.3.1.2. La Tomographie de Résistivité Electrique (TRE).....	17
1.3.2. Contribution récente des prospections de TRE et de la stratégie du suivi temporel.....	18
1.3.2.1. Reconnaissance hydrogéologique des systèmes karstiques par TRE.....	18
1.3.2.2. Applications à l'infiltration de l'eau sur les sites archéologiques.....	19
1.3.2.3. La stratégie du suivi temporel de TRE.....	20
1.3.3. Prospections géophysiques antérieurs.....	22
1.3.3.1. Les résultats d'EM31.....	22
1.3.3.2. Les mesures de TRE.....	23
Chapitre 2 Méthodes des études pour le suivi microclimatique et géophysique du site.....	27
2.1. Présentation des données brutes.....	27
2.1.1. Mesure de TRE.....	27
2.1.1.1. Les mesures réalisées.....	27
2.1.1.2. Inversion des données de résistivité.....	30

2.1.1.3.	Normalisation des résistivités	32
2.1.2.	Condition thermique.....	35
2.1.2.1.	Modèle thermique du site de Lascaux	35
2.1.2.2.	Correction des résistivités en fonction de la température.....	37
2.1.3.	Contexte hydraulique et microclimatique	39
2.1.3.1.	Précipitation et pluie efficace	39
2.1.3.2.	Enregistrement du débit	43
2.2.	Méthodes appliquées pour l'étude de l'évolution des résistivités au cours du temps	49
2.2.1.	Time-lapse inversion : inversion de mesures faites à intervalle de temps irrégulier	49
2.2.1.1.	Théorie de la méthode dite « Time-lapse inversion »	49
2.2.1.2.	Paramétrage	50
2.2.2.	Approche statistique	51
2.2.2.1.	Analyse en composantes principales (ACP)	52
2.2.2.2.	Classification hiérarchique ascendante (CHA).....	54
2.2.3.	Arbre de décision.....	56
Chapitre 3 Analyses détaillées et interprétation du profil I-50		57
3.1.	Modèles de résistivité	57
3.1.1.	Description qualitative des modèles de résistivité	59
3.1.2.	Approche statistique concernant une zone probable de recharge.....	60
3.2.	Inversion par la méthode « Time-Lapse »	63
3.2.1.	Application au site de Lascaux.....	64
3.2.2.	Analyse numérique de la variation de résistivité	68
3.3.	Approche statistique.....	70
3.3.1.	ACP.....	70
3.3.2.	CHA des variables (des dates)	74
3.3.3.	CHA des blocs (des individus)	87
3.3.4.	Synthèse sur le suivi temporel du profil I-50.....	98
Chapitre 4 Profil I et II, analyse et modélisation		101
4.1.	Profil I-100.....	101
4.1.1.	Artéfact numérique lors de l'inversion	103
4.1.2.	Résultat des analyses statistiques	104
4.1.3.	Modélisation de la résistivité des blocs de la classe n°5	114
4.2.	Profil II-50.....	121

4.3. Profil II-100.....	127
4.4. Conclusion sur le suivi temporel de TRE	132
4.4.1. Synthèse du suivi temporel de TRE	133
4.4.2. Rôle des arbres	133
4.4.3. Proposition de modèle géologique et altération	135
Chapitre 5 Représentation tridimensionnelle du site de la grotte de Lascaux	139
5.1. Les données de résistivités	139
5.1.1. Mesures de TRE.....	139
5.1.2. Exemple de modèles de TRE 2D.....	141
5.1.2.1. Profils Ouest-Est	141
5.1.2.2. Profils Nord-Sud.....	143
5.2. Géostatistique	144
5.2.1. Principe des méthodes géostatistique.....	144
5.2.2. Variogramme expérimental.....	145
5.2.3. Ajustement d'un variogramme	146
5.2.4. Krigeage	147
5.2.4.1. Krigeage ordinaire	147
5.2.4.2. Krigeage d'indicatrice	147
5.3. Modélisation géostatistique	148
5.3.1. Interpolation par krigeage ordinaire	148
5.3.1.1. Construction du modèle de résistivité en 3D.....	149
5.3.1.2. Interprétation	151
5.3.2. Modélisation par krigeage d'indicatrice	159
5.3.2.1. Le modèle probabiliste	161
5.3.2.2. Interprétation	161
5.4. Validation des modèles construits	166
5.4.1. Le forage Sa	167
5.4.2. Le forage S6	168
5.4.3. Le forage SG	169
5.4.4. Le forage pénétrométrique P7	171
5.5. Conclusion sur la modélisation géostatistique en 3D.....	172
Conclusion générale.....	175
Bibliographie	181

Liste des figures

Figure 1. Représentation conceptuelle de l'aquifère karstique (d'après Mangin, 1975).....	5
Figure 2. Localisation de la grotte de Lascaux (Xu, et al., 2015).....	6
Figure 3. Carte géologique de la colline de Lascaux, d'après Schoeller, 1965 avec les nouveaux indices de la carte géologique (Guillot et al., 1979).	7
Figure 4. Carte des systèmes colluviaux autour de la grotte de Lascaux, indiquant les trois zones de natures différentes, d'après Bruxelles & Camus (2014).....	9
Figure 5. Schéma géologique et structural des abords immédiats de la grotte de Lascaux (Lopez, 2009).....	10
Figure 6. Plan de la grotte de Lascaux d'après Aujoulat (2004).....	11
Figure 7. Emplacement des forages (anciens et récents) et des pénétromètres, le diamètre des forages représente l'incertitude de leur positionnement.	13
Figure 8. Isobathes du toit du substratum calcaire sous recouvrement au pénétromètre dynamique (Lopez, 2009).....	14
Figure 9. Principe de la méthode Slingram (McNeill, 1980).	16
Figure 10. Disposition des électrodes et séquence des mesures utilisées pour une mesure TRE (Loke, 2004).	17
Figure 11. Modèle de résistivité par dispositif Wenner-Schlumberger avec 64 électrodes espacées de 2 m, et superposition avec l'image radar (Carrière et al., 2013.	19
Figure 12. Les modèles de résistivité des onze profils TRE (de l'ouest à l'est) sur le mur sud de l'Acropole ((Tsourlos & Tsokas, 2011).....	20
Figure 13. Emplacements des mesures géophysiques réalisées par B. Lopez (2009).	22
Figure 14. Carte de résistivité apparente en bobine verticale coplanaire (profondeur d'investigation $\approx 2,7$ m).....	23
Figure 15. Modèle de résistivité du Pan 2 du dispositif pôle-dipôle (en haute), l'interprétation géologique (en bas), d'après Lopez (2009).	24
Figure 16. Modèle de résistivité du Pan 1 du dispositif pôle-dipôle avec l'interprétation géologique en-dessous d'après Lopez (2009).	25
Figure 17. Emplacements des profils de TRE recoupant l'enceinte de la grotte avec la position du début de chaque profil (0 m).....	29
Figure 18. Comparaison de l'organisation des blocs – a) l'épaisseur augmente en fonction de la profondeur, b) l'épaisseur est constante : 0,175 m	33
Figure 19. Comparaison des modèles (mesure du 2 juillet 2013) après inversion en utilisant les différentes organisations de blocs – a) l'épaisseur augmente en fonction de la profondeur (a-1, affichage par contour, a-2, affichage par blocs), b) l'épaisseur est constante : 0,175 m (b-1, affichage par contour, b-2, affichage par blocs).....	34

Figure 20. Comparaison de la sensibilité du modèle après inversion en utilisant les différentes organisations de blocs – a) l'épaisseur augmente en fonction de la profondeur, b) épaisseur constante de 0,175 m.....	35
Figure 21. Modèle thermique pour la grotte de Lascaux (Lacanette et al., 2007). Les températures à 1 et 2 m sont estimées à partir de la température de surface. La courbe rouge représente 12,6 °C : la moyenne annuelle de la roche mesurée à 1 m de profondeur.....	36
Figure 22. Exemple de l'estimation de la température en fonction de la profondeur établie pour le 25 janvier 2013.....	37
Figure 23. Facteur de correction théorique en fonction de la température	38
Figure 24. Facteur de correction de la température en fonction de la profondeur dans deux cas extrêmes : minimum du 4 mars 2013, maximum du 16 juillet 2013.....	38
Figure 25. La corrélation des températures à Gourdon (24) et à Lascaux (1996 – 2011).	40
Figure 26. La pluie efficace calculée (bleu clair) et la pluie brute (jaune) avec l'identification des périodes sèches et humides.	41
Figure 27. Variogramme de la pluie brute (a et a-zoom) et de la pluie efficace (b et b-zoom) pour la période 1962-2014 (a), agrandissement sur 365 jours (b).	43
Figure 28. Représentation du débit dans le sas1 (axe principal) et de la pluie efficace estimée (axe secondaire). Les périodes indicatives humide/sec selon la pluie efficace sont indiqués par les traits noirs.	44
Figure 29. Le variogramme du débit de 1996-2014 (a) ; zoom sur 365 jours (b).....	45
Figure 30. Le variogramme du débit pendant la période du suivi (2012-2014) avec un agrandissement de 0 à 160 jours.	46
Figure 31. Présentation de la moyenne mobile du volume moyen pendant 60 jours (axe principale) et de la pluie efficace pendant 30 jours (axe secondaire).	48
Figure 32. Exemple d'une inversion « Time-Lapse » de données issues d'un dispositif pôle-dipôle sous Res2Dinv, le premier modèle est du 4 octobre 2012 et le deuxième est du 25 janvier 2013, alors que le troisième montre la variation de résistivité avec une échelle linéaire comprise entre -80% et 60 %.	51
Figure 33. Inertie des résistivités (DCR) en fonction du numéro de bloc, a) toutes les inerties (%) ; b) les valeurs d'inertie (%) en excluant du point qui a une valeur d'inertie très forte. ...	52
Figure 34. Cartographie de l'inertie de ρ_{DCR} , avec l'échelle de couleur de 0% à 4%	53
Figure 35. Valeurs propres en fonction du numéro de composante.....	53
Figure 36. Cercle des corrélations (axes factoriels F1-91% et F2-3%)	54
Figure 37. Individus regroupés par classes projetés sur le plan des axes F1 (91%)/F2 (3%) après ACP.....	55
Figure 38. Arbre de décision pour le traitement des données de TRE 2D.....	56

Figure 39. Modèles de résistivité inversés sous norme L1 avec les quatre zones de résistivité marquées manuellement. Les erreurs absolues après six itérations sont comprises entre 0,2% et 0,6%.....	58
Figure 40. Délimitation des quatre zones (profil I-50, figure du haut) avec leur emplacement sur le modèle du profil I-100 du 25 janvier 2013, montrant l'existence de la zone IV (figure du bas).....	59
Figure 41. Changement du débit dans le sas1 (axe principal) et médianes des résistivités de la zone III pour les quatre exemples (axe secondaire).....	61
Figure 42. Distributions des fréquences cumulées des résistivités dans la zone III des quatre exemples.....	62
Figure 43. Positions des blocs de la zone III ayant de très fortes valeurs de résistivité.....	62
Figure 44. Évolution des résistivités vraies de l'ensemble des blocs.	64
Figure 45. Modèles obtenus par « Time-Lapse » inversion, montrant les changements relatifs de résistivité exprimés en pourcentage par rapport aux résistivités du 4 octobre 2012. L'échelle varie de -80% (bleu foncé) à 40% (rouge foncé).....	65
Figure 46. Exemple de deux modèles (12/12/2012 et 25/01/2013) de « Time-Lapse », montrant l'évolution de front d'humidité.	66
Figure 47. Changements relatifs de résistivité (médiane) de trois parties du front humidité et la pluie efficace journalière.....	69
Figure 48. Comparaison des variations de résistivités obtenues par l'inversion indépendante (A et B) et par Time Lapse (A TL et B TL).	70
Figure 49. Inverties GMI^2 en fonction du numéro de bloc.....	71
Figure 50. Cercle des corrélations (axes factoriels F1-91% et F2-3%).	72
Figure 51. Evolution de la saturation de trois variables en fonction des composantes factorielles.....	73
Figure 52. Dendrogramme de CHA des variables.	74
Figure 53. Débits des jours de mesure représentés tenant compte des classes (a et b) reportés sur les débits journaliers (axe principal) et la pluie efficace journalière.....	76
Figure 54. Sous classes par pair de variable ayant les distances le plus proche.	77
Figure 55. Modèles de résistivité de la sous-classe a1 (du 25/01//2013 et du 16/12/2013)....	79
Figure 56. Modèles de résistivité de la sous-classe a2 (du 28/11/2013 et du 10/01/2014)....	80
Figure 57. Modèles de résistivité de la sous-classe a3 (du 04/03/2013 et du 16/05/2013)....	81
Figure 58. Modèles de résistivité de la sous-classe a4 (du 02/07/2013 et du 28/03/2013)....	82
Figure 59. Modèle de résistivité de la sous-classe b1 (du 04/10/2012 et du 05/09/2013).	84
Figure 60. Modèle de résistivité de la sous-classe b2 (du 24/10/2012 et du 29/11/2012).	85
Figure 61. Modèle de résistivité de la sous-classe b3 (du 12/12/2012 et du 23/10/2014).	86

Figure 62. Répartition des blocs tenant compte des résultats de CHA par individu du profil I-50 – 5 classes (a) et 7 classes (b).	88
Figure 63. Evolution des médianes des classes n°1 et n°2 de la CHA-a, n°1A, n°1B, n°2A et n°2B de la CHA-b.	89
Figure 64. Blocs de la classe n°2B entourés sur le modèle de résistivité du 19/06/2013.	89
Figure 65. Evolution temporelle des valeurs des médianes des résistivités pour chacune des cinq classes.....	92
Figure 66. Variations de résistivité des classes n°1 et n°2 (axe à droite), avec la pluie efficace et le débit (axe à gauche).	93
Figure 67. Comparaison entre l'évolution de résistivité des classe n°1 et n°2 et le changement relatif de résistivité obtenue par « Time-Lapse » inversion.	94
Figure 68. Evolution des médianes des résistivités et du rapport de saturation de chaque mesure par rapport à la mesure précédente.....	95
Figure 69. Evolution des médianes de résistivités de la classe 5.....	96
Figure 70. Zoom sur la période de crue, avec le débit sur l'axe à gauche, la pluie efficace sur l'axe à droite 1 et l'évolution de résistivité sur l'axe à droite 2.	97
Figure 71. Evolution de résistivité de la classe 3 (verte), puis un déphasage de 120 jours vers le futur (bleu en pointillé).	98
Figure 72. Modèles de résistivité du profil I-100.....	102
Figure 73. Les modèles de résistivité du 05/09/2013 et du 10/01/2014 montrant une anomalie conductrice située en bas à gauche et considérée comme un artefact de calcul.	103
Figure 74. L'anomalie apparait en deux endroits différents endroit sur les modèles du 10/01/2014 avec le dispositif pôle-dipôle (haut) et gradient (bas).	104
Figure 75. Répartition spatiale des blocs issus de la classification CHA pour le profil I-100, le dernier niveau est filtré.	105
Figure 76. Pluie efficace (axe principal) et évolution de la résistivité en fonction du temps (axe secondaire).	106
Figure 77. Evolution des médianes des résistivités de la classe n°3, en comparaison à celles de la classe n°3 du profil I-50.	107
Figure 78. Comparaison des médianes des classes n°5 des profils I-50 et I-100.	108
Figure 79. Evolution des médianes des résistivités des classes n°4, 6 et 7.	109
Figure 80. Evolution des médianes des résistivités des classes n°4 et 5 comparée à celle de la classe n°5 du profil I-50.	110
Figure 81. Séparation en deux sous-classes de la classe n°5.	110
Figure 82. Evolution des médianes des résistivités de la classe 5 (deux parties) comparées à celles de la classe n°5 du profil I-50.	111
Figure 83. Evolution de la médiane des résistivités des classes 4, 5-1 et 7.	112

Figure 84. Position des 263 blocs de la classe n°5 du profil I-50, couvrant 78 blocs du modèle du profil I-100.	112
Figure 85. Variation des médianes des résistivités des blocs de la classe n°5 du profil I-100, et de ceux de la classe n°5 du profil I-50 auxquels ils se superposent.....	113
Figure 86. Courbe de l'équation empirique entre la résistivité et la moyenne de volume. ...	116
Figure 87. Estimation de l'évolution de la médiane des résistivités en fonction du volume journalier.	117
Figure 88. Estimation de la moyenne du volume écoulé au cours des 7 jours après les mesures à partir des résistivités mesurées.	118
Figure 89. Comparaison du volume moyen prédit au volume réel.	119
Figure 90. Ajustement de la courbe de volume en fonction de résistivité, pendant les périodes sèches.....	119
Figure 91. Volume estimé en corrigeant les périodes sèches.	120
Figure 92. Schéma synthétique de la procédure de la modélisation.	121
Figure 93. Modèles de résistivité du profil II-50.	122
Figure 94. Répartition des blocs tenant compte des résultats de la CHA du profil II-50.	123
Figure 95. Evolution des médianes des résistivités des classes n°1, 2 et 3 (en pointillé) du profil II-50 et du profil I-50 (ligne continue), pour comparaison à la P_{eff}	124
Figure 96. Evolution des médianes des résistivités de la classe n°4, pour comparaison à celles de la classe n°3 du profil I-50.	125
Figure 97. Evolution des médianes des résistivités de la classe n°5 pour comparer à celles de la classe n°5 du profil I-50.	126
Figure 98. Anomalies conductrices sur le profil II-100, exemple du 06/06/2012.....	127
Figure 99. Modèles de résistivité du profil II-100.....	128
Figure 100. Répartition des blocs tenant compte des résultats de CHA par individu du profil II-100.	129
Figure 101. Evolution des médianes des résistivités des classes n°1 et 2 (en pointillé) du profil II-100 et du profil II-50 (trait plein), en fonction de la pluie efficace P_{eff}	130
Figure 102. Evolution des médianes des résistivités des classes n°3 et n°6 du profil II-100, pour comparaison à celle de la classe n°3 du profil I-50.	131
Figure 103. Evolution des médianes des résistivités des classes n°4 et n°5 du profil II-100, pour comparaison à celles de la classe n°5 du profil II-50.	132
Figure 104. Emplacements des arbres (des chênes) sur chacun des profils (I-100 et II-100).	134
Figure 105. Les modèles géologiques estimés à partir des valeurs et des variations de résistivité, a) profil I, b) profil II.....	135

Figure 106. Emplacements des profils TRE sur le site de la grotte de Lascaux.	140
Figure 107. Températures enregistrées (tous les 30 minutes) de la roche pendant la campagne de mesures du 21/03/2013 au 4/04/2013.	141
Figure 108. Modèles de résistivité des profils OE4 et OE5. Les cercles blancs correspondent à l'endroit où le profil coupe la grotte, avec une présentation schématique du diamètre de celle-ci.	142
Figure 109. Modèles de résistivité des profils NS2 et NS3. Les cercles blancs correspondent à l'endroit où le profil coupe la grotte, avec une présentation approximative de leur diamètre.	143
Figure 110. Exemple d'un variogramme stationnaire	145
Figure 111. Exemples de modèles de variogramme.	146
Figure 112. Fonction de distribution des résistivités de tous les profils.	149
Figure 113. Carte variographique du logarithme des résistivités dans le plan XY.	149
Figure 114. Variogrammes expérimentaux directionnels calculés à partir du logarithme des résistivités et modèles théoriques associés.	150
Figure 115. Validation croisée : résistivité vraie en fonction de la valeur estimée.	151
Figure 116. Vue depuis le sud du modèle géostatistique 3D avec indications des différentes structures identifiées	152
Figure 117. Vue du dessus du modèle 3D, montrant la zone superficielle. Le trait vert dessine la limite entre les différents arbres (pin/chêne/châtaignier), le trait noir dessine la limite de la fougère qui se trouve en dehors des deux traits noirs (d'après Perrin, 2013 dans le rapport de Bruxelles & Camus, 2014).	153
Figure 118. Histogramme des valeurs de résistivité (0-1000 $\Omega \cdot m$) sur l'ensemble des données.	154
Figure 119. Modèle de résistivité 3D pour les points dont la résistivité est supérieure à 275 $\Omega \cdot m$. Les points noirs dessinent la projection la grotte.	155
Figure 120. Vue de dessus du modèle pour les résistivités inférieures à 60 $\Omega \cdot m$, les limites des formations sablo-argileuses sont nettement identifiées.	156
Figure 121. Anomalies conductrices au droit du sas1 ; a) $\rho \leq 60 \Omega \cdot m$; b) $\rho \leq 90 \Omega \cdot m$	157
Figure 122. Anomalies conductrices au nord du modèle, a) $\rho \leq 90 \Omega \cdot m$; b) $\rho \leq 105 \Omega \cdot m$..	157
Figure 123. Anomalies conductrices au sud du modèle, a) $\rho \leq 60 \Omega \cdot m$; b) $\rho \leq 90 \Omega \cdot m$	158
Figure 124. Cartes variographiques dans le plan XY et variogrammes de la variable binaire pour chacun des trois seuils.	160
Figure 125. Modèle 3D du krigeage d'indicatrice, montrant la probabilité que la résistivité en un point soit supérieure à 60 $\Omega \cdot m$	161
Figure 126. Modèle probabiliste : ensemble des blocs dont la résistivité a une probabilité d'au moins 50% d'être inférieure à 60 $\Omega \cdot m$. Les fougères se trouvent en dehors des deux traits noirs.	162

Figure 127. Modèle probabiliste : ensemble des blocs dont la résistivité a une probabilité d’au moins 80% d’être supérieure à 275 $\Omega\cdot m$	163
Figure 128. Vue du nord du modèle probabiliste avec un seuil de 60 $\Omega\cdot m$, en gardant les blocs ayant une probabilité supérieure à 50% d’être inférieur au seuil. Les croix rouges représentent les profils des mesures de TRE et les points jaunes représentent la grotte.	164
Figure 129. Vue du nord du modèle probabiliste avec un seuil de 90 $\Omega\cdot m$, en gardant les blocs ayant une probabilité supérieure à 50% d’avoir une résistivité inférieure au seuil. Les croix rouges représentent les profils des mesures de TRE et les points jaunes représentent la grotte.	165
Figure 130. Vue du sud du modèle probabiliste avec un seuil de 90 $\Omega\cdot m$, en gardant les blocs ayant une probabilité supérieure à 50% d’avoir une résistivité inférieure au seuil. Les croix rouges représentent les profils des mesures de TRE et les points jaunes représentent la grotte.	165
Figure 131. Emplacements des forages et pénétromètres superposés au modèle de résistivité vu de dessus, le trait bleu correspond à l’enceinte de protection du site.....	166
Figure 132. Données extraites des modèles géostatistiques – krigeage ordinaire (gauche) et d’indicatrice (milieu) en comparaison avec la description du forage par Vouvé (1966) à droit.	167
Figure 133. Données extraites des modèles géostatistiques – krigeage ordinaire (gauche) et d’indicatrice (milieu) pour comparaison à la description du forage par Vouvé (1967).....	169
Figure 134. Données extraites des modèles géostatistiques – krigeage ordinaire (gauche) et d’indicatrice (milieu) en comparaison avec la description du forage réalisé en 2014 (SG). .	170
Figure 135. Données extraites des modèles géostatistiques (gauche) en comparaison avec les données du pénétromètre P7 (Lopez, 2009).	172

Liste des tableaux

Tableau 1. Type des mesures réalisées à l'occasion de chaque campagne de mesure TRE.	28
Tableau 2. List de des campagnes de TRE	32
Tableau 3. Les périodes d'absence de pluies efficaces et leur durée	42
Tableau 4. Les données relatives aux jours de mesure.	47
Tableau 5. Valeurs statistiques des résistivités de la zone III dans les quatre exemples	63
Tableau 6. Les données météorologiques aux dates de mesure, avec la classe d'appartenance issue de la classification CHA.	75
Tableau 7. Médiane de résistivité sur l'ensemble de blocs dans la classe a	78
Tableau 8. Médianes des résistivités calculées sur l'ensemble des blocs des modèles de la classe b	83
Tableau 9. Médianes des résistivités par classe pour chaque date de mesure	91
Tableau 10. Les médianes des résistivités par classe pour chaque date de mesure du profil I-100.	105
Tableau 11. Paramètres statistiques liés aux formations proposées sur chaque profil.	137
Tableau 12. Modèles de variogramme couramment utilisés (Jaksa, 1995)	147
Tableau 13. Paramètres des modèles de variogramme théorique (présentés à la figure 124) des variables binaires pour les trois seuils différents.	161
Tableau 14. Validation des modèles par un critère binaire (1 – validation positive ; 0 – validation négative ; ? – information manquant).	174

Introduction générale

Lascaux compte parmi les plus importantes grottes ornées au monde. Victime de sa renommée, suite à une fréquentation touristique élevée, des problèmes de conservation des peintures rupestres sont survenus. Malgré la fermeture de la cavité aux visiteurs, accompagnée par la mise en place d'une commission d'études scientifiques et de sauvegarde, en 1963, et l'installation d'un comité scientifique en 2002, certains problèmes demeurent (Geneste, 2009). Ces derniers sont, de manière directe ou indirecte, liés à la présence d'eau dans l'encaissant et à son écoulement dans la grotte. Ainsi, aucune politique de conservation ne peut être envisagée sans une bonne connaissance de la structure géologique de l'environnement souterrain de la grotte. Les essais destructifs étant généralement proscrits, les méthodes géophysiques s'avèrent pertinentes car elles permettent de reconstituer la géométrie de la structure et de l'environnement karstique de manière non-invasive et d'étudier les variations des paramètres des sols (la résistivité électrique) en fonction des différentes conditions, climatiques et hydrogéologiques.

La problématique de notre étude s'oriente précisément vers les questions suivantes :

- Peut-on reconstituer la géométrie du promontoire calcaire de Lascaux à l'aide des outils géophysiques et géostatistiques ? Avec quelle résolution ? Peut-on identifier dans ce secteur la limite entre les calcaires et les formations détritiques qui les recouvrent ?
- Un modèle géostatistique 3D de la répartition spatiale des résistivités électriques peut-il être validé par les données de forages/pénétrètres ?
- Y a-t-il des liens entre les variations de résistivité électrique du sol (mesure *in-situ*) et le changement du débit dans le sas 1 à l'entrée de la grotte ?
- Y a-t-il un lien entre les propriétés électriques des différentes structures identifiées et les précipitations ?
- Peut-on identifier des zones ayant des caractéristiques hydrodynamiques différentes. L'alimentation en eau dans la grotte provient-elle des formations détritiques ou d'infiltrations rapides ?
- Peut-on estimer le débit du sas 1 grâce au suivi temporel de tomographie de résistivité électrique (TRE) ? Si oui, avec quelle résolution temporelle ? Si non, quelles sont les difficultés rencontrées ?

Cette recherche est présentée en cinq chapitres. Le chapitre 1 donne un aperçu de l'histoire de la grotte de Lascaux et des travaux réalisés antérieurement. Les études géologiques anciennes et récentes sont ensuite présentées ainsi que des exemples d'applications de la méthode géophysique. Le chapitre 2 expose les méthodes qui ont été utilisées lors des analyses des données microclimatiques et géophysiques. Le chapitre 3 est consacré aux analyses s'appuyant sur les données du suivi temporel de tomographie de résistivité électrique d'un premier profil de 35,5 m de long. À l'aide des analyses statistiques, on essaye de démontrer les liens éventuels entre les variations de résistivité et les données microclimatiques, notamment avec le débit dans le sas 1 de la grotte et la pluie efficace sur le site de Lascaux. La méthodologie développée pour ce premier profil est ensuite appliquée à trois autres profils et les résultats sont présentés dans le chapitre 4. De plus, à partir de la mesure de TRE et du débit antérieur aux mesures, une première approche de prédiction du débit est proposée. Le chapitre 5, présente une modélisation 3D par des méthodes géostatistiques, plus précisément, le krigeage ordinaire et le krigeage d'indicatrice. Cette modélisation consiste à reconstituer la géométrie du promontoire de Lascaux, à localiser la limite entre les calcaires et les formations détritiques sablo-argileuses et à essayer de mettre en évidence d'éventuelles connexions entre des domaines conducteurs. Le dernier chapitre expose les conclusions générales issues de l'ensemble des résultats acquis.

Chapitre 1

Historique des problèmes conservatoires et synthèse des travaux antérieurs

Nous allons débiter ce chapitre par une description de l'histoire de la grotte de Lascaux et des problématiques rencontrées vis-à-vis de la conservation depuis sa découverte. Une synthèse des travaux antérieurs utiles à l'interprétation de nos données géophysiques et géostatistiques, sera ensuite présentée. Elle concerne des essais géologiques et géotechniques réalisés dans les années 1960, des études géologiques et géomorphologiques anciennes et récentes, et également des essais géotechniques et géophysiques réalisés depuis 2006 (notamment pendant la thèse de B. Lopez, 2009).

1.1. À propos de la grotte de Lascaux – de sa découverte à sa protection

Les activités de recherche qui sont présentées dans ce manuscrit concernent les environnements karstiques dans laquelle la grotte de Lascaux se développe. Il est toutefois nécessaire de présenter, d'abord un historique depuis les premiers travaux de recherches effectués dans les des années 50 et 60, jusqu'à son état actuel.

La grotte de Lascaux a été découverte le 12 septembre 1940 par Jacques Marsal, Georges Agniel, Simon Coëncas et Marcel Ravidat. L'authentification des œuvres par l'abbé Henri Breuil, dans la même année, conduit à sa classification au titre des monuments historiques (Breuil, 1941). Le bestiaire représenté dans la cavité se compose d'environ 600 représentations parmi lesquelles le cheval, le cerf, l'auroch et le bouquetin dominant. Les ours et les félins sont peu nombreux et se situent dans les espaces les plus reculés. La cavité compte également une célèbre représentation anthropomorphe, localisée dans le puits. La cavité se singularise également par l'utilisation, à côté du dessin et de la gravure, de la technique de la peinture (Aujoulat, 2004).

Les premières propositions chronologiques s'appuient sur des données stylistiques. Pour Breuil (1952) et Peyrony (1949), les œuvres devaient être rattachées au Périgordien tandis que pour A. Leroi-Gourhan elles devaient l'être au Solutréen (Leroi-Gourhan, 1965). L'étude du mobilier récolté par l'abbé Glory, pendant les travaux de mise en place du système de régénération de l'atmosphère dans le vestibule de la cavité en 1957-1958 ainsi qu'à l'occasion des fouilles qu'il effectua dans le Puits en 1961-1962, conduisit Leroi-Gourhan et J. Allain à rattacher la grotte de Lascaux au Magdalénien II (Leroi-Gourhan & Allain, 1979).

Les premières datations radiocarbones de charbons de bois provenant des fouilles de l'abbé Breuil et d'André Glory dans le Passage ($16\ 000 \pm 500$ BP) et le Puits ($17\ 190 \pm 140$ BP) confirmèrent l'attribution du mobilier à une période ancienne du Magdalénien (Leroi-Gourhan & Evin, 1979). Mais une nouvelle datation proposant une date plus ancienne – $18\ 600 \pm 190$ BP (GIF A 95582), réalisées plus récemment à partir de fragments de bois de renne, tendraient à

vieillir cette estimation et à rapporter le matériel à la charnière Solutrén-Magdalénien (Aujoulat *et al.*, 1998). Néanmoins, l'attribution chronologique des œuvres de Lascaux à cette période reste encore très discutée (Xu *et al.*, 2015).

D'un point de vue conservation, la grotte est ouverte au public en juillet 1948. L'afflux de visiteurs provoque une augmentation du gaz carbonique et de vapeur d'eau. Ceci nécessite de nouveaux travaux en 1958 : l'installation d'une machine à recycler l'air et pose de conduits dans le sol pour l'air pulsé traité et en partie pompé à l'extérieur. Le 20 avril 1963, la grotte est fermée et une première commission scientifique est créée afin de la préserver. Entre 1964 et 1970, des recherches fondamentales sont organisées dans l'objectif de recréer l'équilibre permettant la conservation des peintures. La mise en place de sas intermédiaires à l'entrée a eu lieu pendant cette période. À partir de 1970, les suivis journaliers des paramètres (température, humidité, teneur en CO₂, etc.) ont commencé à l'intérieur de la grotte. Une deuxième génération de machines, dédiées à conditionner l'air, est installée, de 1989 à 1992, pour remplacer la première. En 2002, le Ministère de la Culture a instauré un Comité scientifique international, consacré à orienter les travaux de recherches vers la conservation.

1.2. Synthèse des travaux antérieurs

Les travaux de recherche ont débuté en 1964. Ceux-ci sont notamment des études hydrogéologiques, géologiques et géomorphologiques. Il est utile d'en faire une synthèse pour mieux comprendre les données obtenues par les méthodes géophysiques et géostatistiques.

1.2.1. Système karstique

Le mot « karst » vient de la traduction allemande du terme « Kras », originaire de la région comprise entre le golfe de Trieste, la vallée de la Vipava, la vallée de la Raša et le secteur de la Rečka (Bignot, 1972).

1.2.1.1. Définition

Le terme karst est défini différemment selon les disciplines. Suivant l'approche fonctionnelle, le système karstique est défini comme « l'impluvium au niveau duquel les écoulements de type karstique s'organisent pour constituer une unité de drainage » (Mangin, 1975). Des modifications sont ensuite apportées par Bakalowicz (1999) : « le karst est l'ensemble de formes superficielles et souterraines résultant de la dissolution de roches carbonatées (calcaires, dolomies) par l'eau rendue acide par le dioxyde de carbone ; par extension, l'ensemble de formes comparables se développant dans les roches salines (gypse, anhydrite, halite) » (Bakalowicz, 1979; Bakalowicz, 1999). C'est cette définition que l'on retient dans cette étude.

1.2.1.2. Organisation d'un système karstique

En raison de leur fonctionnement et de leur structure, les systèmes karstiques présentent souvent une très grande complexité. Globalement, on peut distinguer trois zones principales dans un système karstique (Figure 1) : une zone d'alimentation (karstifiée ou non), une zone d'écoulement et une zone noyée (Mangin, 1975). Dans notre cas, on s'intéresse particulièrement à la zone d'écoulement du système karstique de Lascaux.

Dans un aquifère karstique, le fonctionnement hydrogéologique est étudié par une mise en relation de la variation du débit et de la pluie efficace (Mangin, 1975) ou encore par des conceptions de modèles hydrodynamiques (Quinn *et al.*, 2006 ; Charlier *et al.*, 2012 ; Rooij *et al.*, 2013).

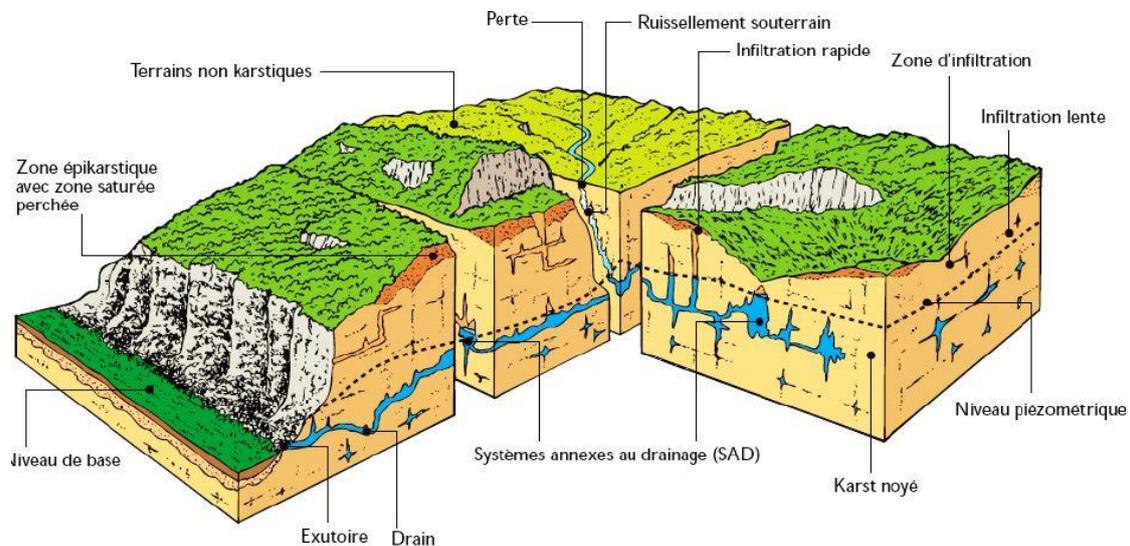


Figure 1. Représentation conceptuelle de l'aquifère karstique (d'après Mangin, 1975).

L'épikarst

L'épikarst correspond à la zone superficielle (Figure 1) très perméable du massif karstique (5 à 20 m maximum). En plus de la fracturation originelle, l'évolution de cette partie est principalement liée à l'érosion mécanique et météorique ainsi qu'à la décompression superficielle. En raison d'un fort contraste de porosité entre cette partie et la zone sous-jacente, l'épikarst peut présenter un niveau capacitif et constituer une réserve importante des eaux d'infiltration. Par conséquent, cette zone, qui permet aux eaux de pluies de s'infiltrer rapidement et de rester temporairement stockées, joue le rôle d'un aquifère temporaire : un réservoir épikarstique. Celui-ci joue un rôle tampon puisqu'il stocke les premières pluies après une saison sèche, ce qui conditionne l'organisation des écoulements dans le massif. Du fait de la proximité du sol, l'épikarst subit également les influences des processus biogéochimiques (Blavoux & Mudry, 1986; Lastennet, 1994; Lopez *et al.*, 2008).

La zone d'infiltration

C'est la zone sous-jacente au réservoir épikarstique. Elle est moins fracturée que la zone épikarstique. Les infiltrations lentes prennent place dans les fissures les plus étroites et les vides de petite taille avec de fortes pertes de charges, tandis que les infiltrations rapides s'effectuent dans les discontinuités verticales plus ou moins connectées à la zone saturée (Bakalowicz, 1999; Williams, 2008; Arbel *et al.*, 2010). Des recherches ont montré qu'il y a un transfert de pression entre la pluie et les eaux profondes ainsi un mélange entre eaux infiltrées et les eaux qui ont eu un certain temps de séjour dans le système d'aquifère karstique (Plagnes, 1997; Baker & Brunson, 2003).

La zone noyée

Cette zone est dénommée « système annexe au drainage » par Mangin (1975). Elle

constitue la principale réserve en eau de l'aquifère karstique et assure les transferts entre la zone d'infiltration et l'exutoire.

1.2.2. Contexte géographique et géologique

La grotte de Lascaux se situe dans la vallée de la Vézère (Figure 2), sur la commune de Montignac, en Dordogne (24), sur la rive gauche de la rivière. La colline de Lascaux se trouve dans une série de Crétacé supérieur sous recouvrement détritique. La grotte de Lascaux se développe dans les calcaires Coniaciens.

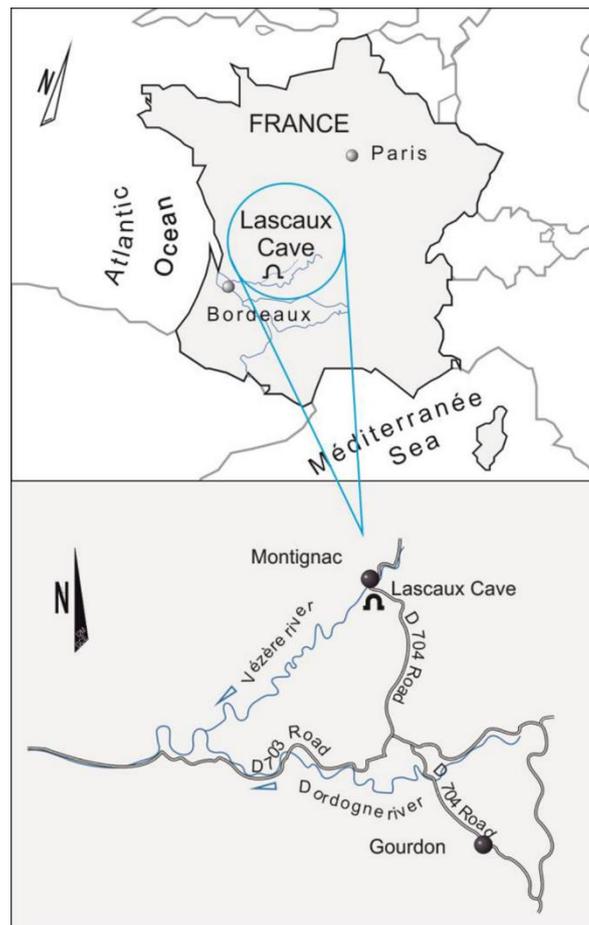


Figure 2. Localisation de la grotte de Lascaux (Xu, et al., 2015).

1.2.2.1. Etudes géologiques de H. Schoeller et J. Vouvé

Des études géologiques ont été réalisées par Schoeller (1965) et Vouvé (1968a et b). Les données se trouvent dans les anciens rapports (Schoeller, 1965; Schoeller, 1969) et la thèse de J. Vouvé (1975). Une synthèse est présentée dans la thèse de B. Lopez (2009).

H. Schoeller a interprété la série stratigraphique de la colline comme indiqué ci-dessous (Schoeller, 1965) et a établi une carte géologique du site (Figure 3). Certaines dénominations ont été changées sur la nouvelle carte géologique de Terrasson (Guillot *et al.*, 1979). Elles sont indiquées entre parenthèses et sont utilisées dans la carte géologique de la figure 3.

De plus ancien au plus récent, la succession est :

- C6c (C3c), grès ferrugineux et grès calcaires du Turonien supérieur.

- C7a (C4a), marnes et calcaires marneux glauconieux de la base du Coniacien, à Barroisiceras halberfellneri, etc. (10 m environ). Ils affleurent en haut de la falaise de Puy Robert, le long de la route de la grotte au-dessus de la Fageotte, au-dessus de la route du Regourdou à l'est de la Grande Béchade.
- C7b (C4b), calcaires jaunes du Coniacien formant l'ossature de la colline. Épaisseur 100 m.
- C7c (C5a), calcaires arénacés du Santonien, constituant le plateau du Régourdou.
- SP, sables du Périgord jaunes à grain fin, ayant souvent à la base, un niveau argileux. Ils recouvrent la hauteur dominant à l'est la grotte de Lascaux. Ils peuvent être attribués à des remplissages karstiques (Lopez, 2009) ou à des produits d'altérations (Bruxelles & Camus, 2014).
- a¹, alluvions anciennes situées entre la grotte de Lascaux et Puy Robert, et formant aussi la terrasse de la Grande Guionie.
- a², alluvions récentes de la Vézère.
- Aa, cônes de déjection à l'est de la Béchade, à l'est de la Fageotte.

La grotte se développe dans les calcaires du Coniacien supérieur et moyen. Les formations détritiques de nature sablo-argileuse (SP) se trouvent sur les côtés est et ouest du site de Lascaux.



Figure 3. Carte géologique de la colline de Lascaux, d'après Schoeller, 1965 avec les nouveaux indices de la carte géologique (Guillot et al., 1979).

1.2.2.2. Étude géologique récente

Une étude géologique des formes et des formations superficielles à l'échelle régionale et également à celle de la colline de Lascaux a été réalisée récemment (Bruxelles & Camus, 2014). Elle précise la nature et l'épaisseur de la couverture.

Le log stratigraphique s'établit de la manière suivante d'après Bruxelles & Camus (2014) :

- C3c, Turonien supérieur. Niveaux de grès et de sables jaunes de 10 à 20 m d'épaisseur. Ce niveau est riche en grains de quartz, de plus en plus grossiers vers le haut.
- C4a, Coniacien inférieur. Marnes grises à vertes bleues, riches en glauconie et en pyrite (3 – 4 m). Elles passent progressivement à des calcaires noduleux gris-jaune. Cette couche affleure à la base de la colline et notamment dans le talus de la route de Lascaux.
- C4b, Coniacien moyen et supérieur (C4b). Calcaires microcristallins bioclastiques jaunes à rosâtres à la base (une trentaine de mètres) puis calcaires jaunes bioclastiques et gréseux plus massifs (4 – 7 m). Au-dessus, 15 à 20 m de calcaires durs bioclastiques jaunes et rosâtres, organisés en grandes dalles.
- C5a, Santonien inférieur. Ce niveau s'étend jusqu'au plateau du Régourdou. Calcaires crayeux blancs en plaquettes (une quinzaine de mètres) et puis calcaires gréseux roux en petits bancs et à stratifications obliques (50 – 60 m).

À l'échelle du site, l'alternance d'affleurements calcaires et sablo-argileux interprétés comme le remplissage détritique dite SP d'après les interprétions de J. Vouvé et H. Schoeller (Schoeller, 1965) est présentée mais avec des formes plus précises. D'après Bruxelles et Camus (2014), l'appellation « remplissage » correspond plutôt à une partie des terrains meubles, les sables roux. Il s'agit d'une altérite autochtone conservée en place. Trois zones (Figure 4) peuvent être distinguées sur le secteur de Lascaux (Bruxelles & Camus, 2014) :

- Les altérites Est : grand couloir d'altération orienté NW-SE, avec des argiles à silex, et aussi des sables gris à rognons et sables roux,
- La dalle calcaire : secteur central appelé aussi « promontoire calcaire », recouverte localement de colluvions et des sables gris,
- Les altérites Ouest : sable roux remanié à l'extérieur de l'enceinte et la présence de l'argile à silex et sable argileux dans l'enceinte du site.

On note bien que les formations détritiques à l'est et à l'ouest du site sont attribuées à des « altérites », ce qui correspond plutôt à une altération locale issue de la fantômisation. De plus, la nature de ces formations n'est pas identique à l'est et à l'ouest.

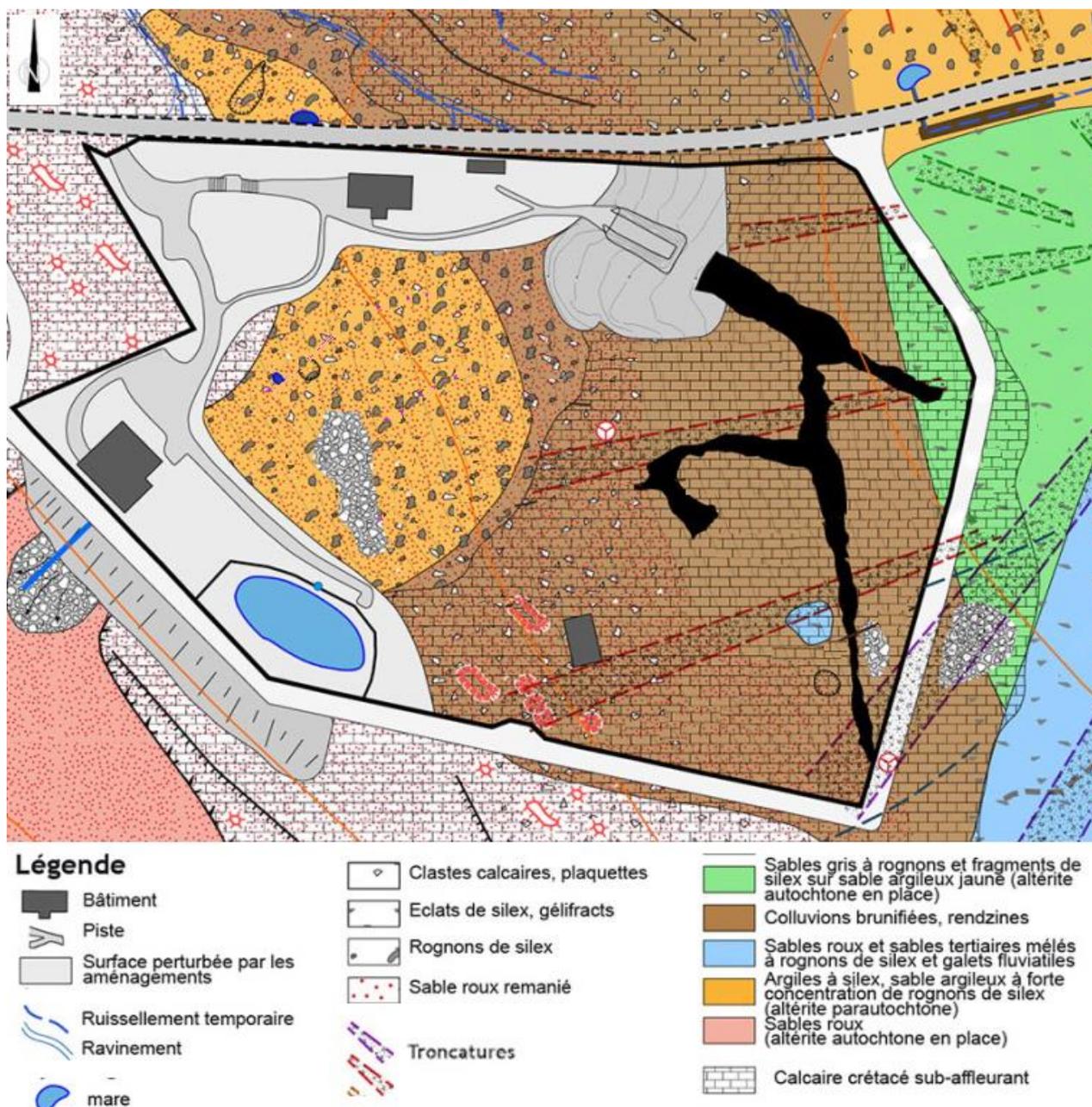


Figure 4. Carte des systèmes colluviaux autour de la grotte de Lascaux, indiquant les trois zones de natures différentes, d'après Bruxelles & Camus (2014).

1.2.2.3. Relevé de fractures des terrains géologiques de Lascaux

Lors de la thèse de Lopez (2009), une étude de la fracturation a été menée sur le site de Lascaux. Quatre familles ont été individualisées après un relevé méthodique des plans de fracturations *in situ* (Figure 5) :

- F1 de direction moyenne N178°, avec 19 relevés
- F2 de direction moyenne N119°, avec 18 relevés
- F3 de direction moyenne N93°, avec 5 relevés
- F4 de direction moyenne N145°, avec 10 relevés

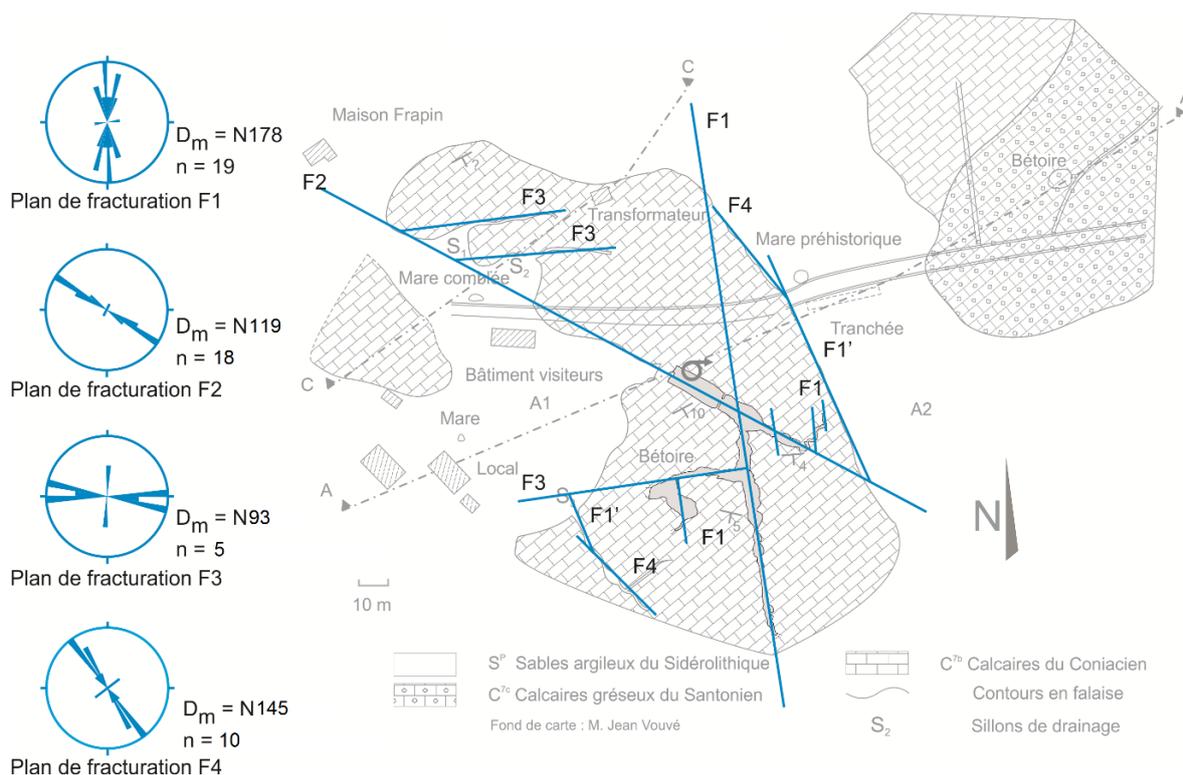


Figure 5. Schéma géologique et structural des abords immédiats de la grotte de Lascaux (Lopez, 2009).

Les familles F1 et F2 sont majoritairement présentes sur le terrain, elles forment deux systèmes de fracturation conjugués repérables également à l'échelle régionale (Carte géologique 1/50 000^e Terrason) (Guillot *et al.*, 1979). D'après Lopez (2009), les relevés des fractures permettent d'expliquer en partie la kartogénèse des conduits de la grotte de Lascaux. Le Diverticule de Droite et la Galerie du Mondmilch (Figure 6) se sont développés à la faveur de la fracturation F1 alors que l'axe fracturation F2 a guidé la formation de la Salle des Taureaux et du Diverticule Axial. Le Puits du Sorcier se situe à l'intersection des directions F1 et F3 (Lopez, 2009).

1.2.2.4. Plan de la grotte

La grotte de Lascaux est divisée en différentes zones dont le nom est généralement associé à la morphologie et à l'orientation du réseau (Aujoulat, 2004). Le plan de la grotte (Figure 6) aide à comprendre la structure de la grotte. C'est dans le sas 1 que les écoulements d'eau se produisent. Leur débit est analysé et étudié dans le chapitre suivant (cf. 2.1.3.2).



Figure 6. Plan de la grotte de Lascaux d'après Aujoulat (2004).

1.2.3. Des essais géotechniques/géologiques

Dans les années 60, des essais géotechniques notamment des forages, ont été effectués pour les reconnaissances géologiques, hydrogéologiques et morphologiques, dans le cadre de « l'aménagement d'un nouvel accès dans la grotte de Lascaux » (Vouvé, 1968a; Vouvé, 1968b). En mars 2014, nous avons extraits, analysés et interprétés 41 caisses issues de ces forages entreposées dans le bâtiment de la « Fouille Vouvé ». Elles contiennent des échantillons issus des forages de deux campagnes, effectuées en 1966 et 1967. Pendant la thèse de Lopez (2009), des pénétromètres dynamiques et des relevés géologiques ont été réalisés pour la connaissance de la géométrie du massif calcaire, et seront aussi utilisés pour valider les mesures géophysiques.

1.2.3.1. Forages J. Vouvé (1966-1967)

J. Vouvé a réalisé les forages sur le modèle de deux campagnes successives sur le site de Lascaux pendant les années 1966-1967. La première consiste à étudier les environnements immédiats de la grotte (Vouvé, 1965; Vouvé, 1966) alors que la seconde a pour objectif la connaissance du contexte géologique, hydrogéologique et morphologique de la zone sud-ouest du réseau supérieur de la grotte (Vouvé, 1967).

Dans le cadre de mon étude, les forages ont été repositionnés sur une seule carte (Figure 7). En raison de la précision de l'ancienne carte et de la perte de qualité lors de l'archivage des documents, il est évident que certains décalages peuvent apparaître lors du repositionnement. Les forages de la campagne 1966 sont généralement positionnés avec une incertitude de 5 m tandis que les forages de 1967 ont une précision d'environ 2 m. Ces décalages sont représentés par la taille du point utilisé sur la carte. De plus, les forages reportés sur la carte des emplacements des essais géotechniques/géologiques (Figure 7) sont ceux dont la description que nous avons réalisée est cohérente avec ce qui a été décrit dans les rapports de J. Vouvé. Ceux pour lesquels il n'y a pas une bonne cohérence ne sont pas présentés ici ni utilisés pour la suite de l'étude. Les descriptions des échantillons contenus dans les caisses de forages sont présentées dans l'annexe I.

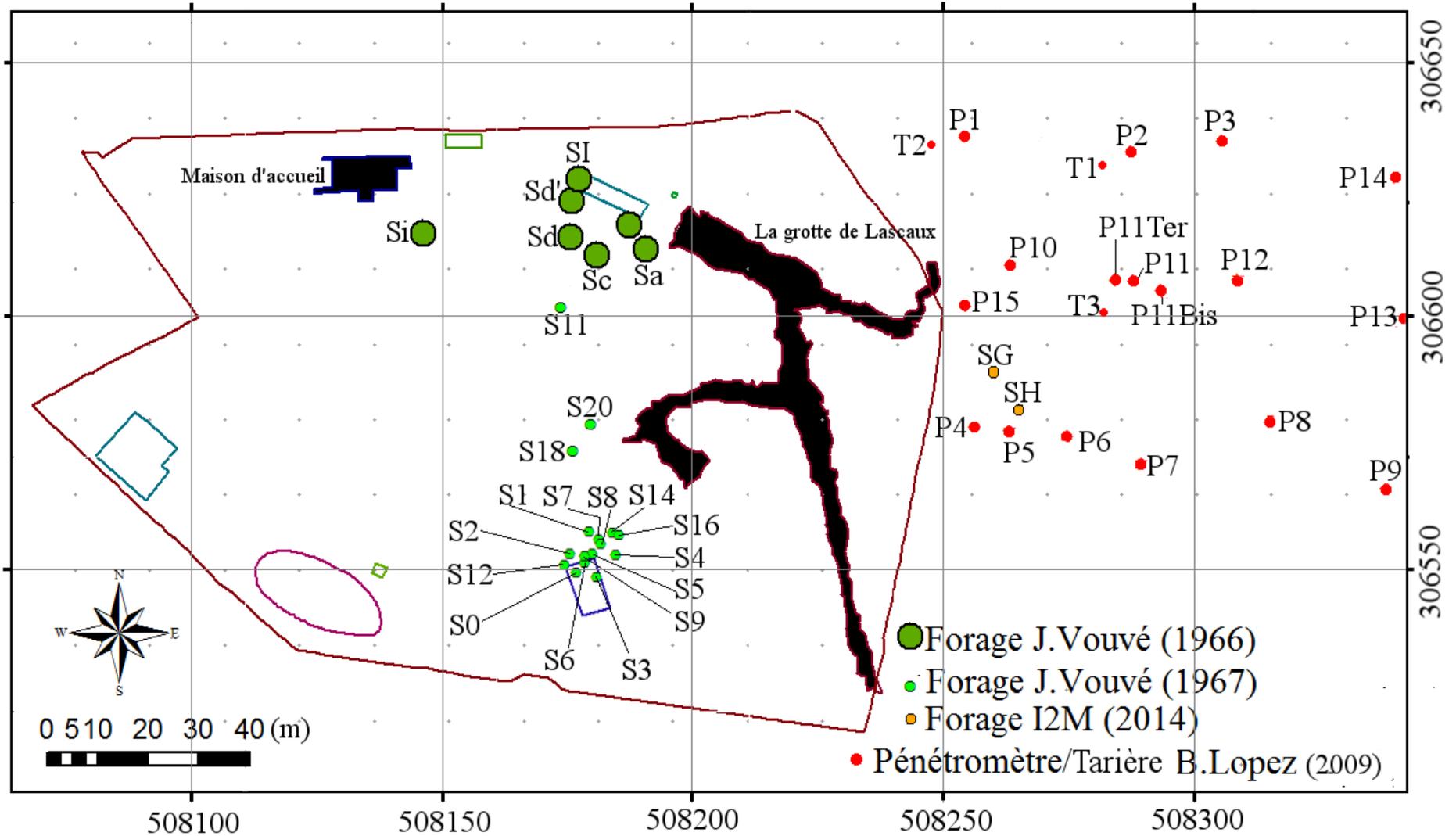


Figure 7. Emplacement des forages (anciens et récents) et des pénétrromètres, le diamètre des forages représente l'incertitude de leur positionnement.

1.2.3.2. Pénétrromètre

De nombreux essais au pénétrromètre ont été réalisés lors de la thèse de Lopez (2009) (Figure 7). Ceci permet de déduire l'évolution des propriétés mécaniques du sol au point de mesure en fonction de la profondeur. Les résultats des pénétrromètres sont présentés en Annexe VII (VII.B.23-30). De manière générale, les pénétrromètres P9, P10, P11 (Bis et Ter), P12, P13 et P14 montrent une résistance à l'enfoncement plus importante que les autres pénétrromètres. On appelle cette résistance le refus et elle peut correspondre à des formations de type calcaire ou aussi des passages de silex. Les profils traduisent également une très forte hétérogénéité lithologique. Pour affiner ces informations, trois tarières (T1, T2 et T3) ont été réalisées sur le site (Figure 7). À partir de ces données (51 points), une première approche de la forme du substratum calcaire (Figure 8) a été réalisée (Lopez, 2009).

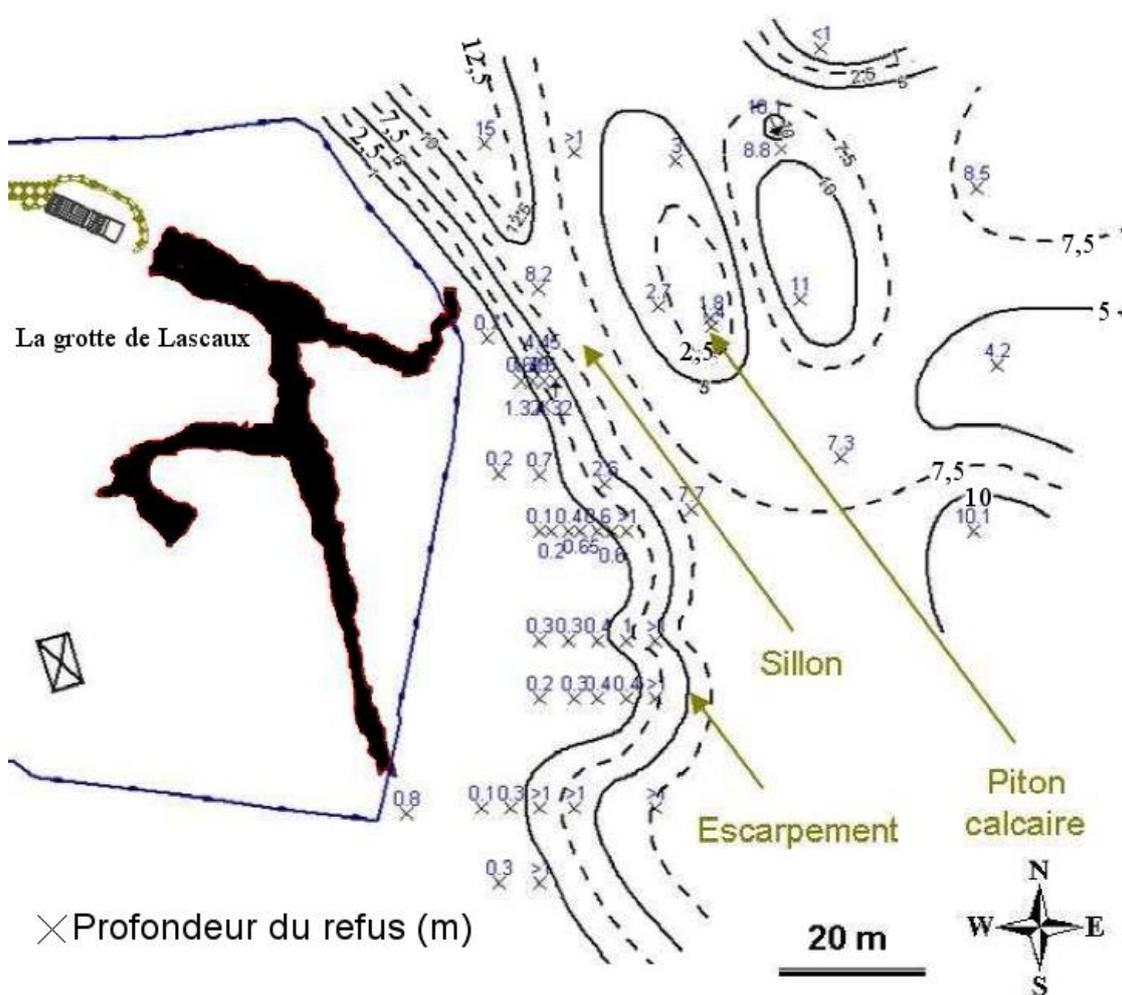


Figure 8. Isobathes du toit du substratum calcaire sous recouvrement au pénétrromètre dynamique (Lopez, 2009).

Tenant compte des contraintes de conservations, aucun essai est autorisé à l'intérieur de l'enceinte de protection (Figure 8). Les essais à proximité de l'enceinte montrent des refus à de faible profondeur, on peut penser que l'extension du substratum calcaire atteint une limite plus à l'est que l'enceinte actuelle, le toit du substratum devient plus profond à partir de cette limite. Cependant, pour la reconnaissance de la géométrie du promontoire de calcaire, les techniques de reconnaissance directe (notamment le pénétrromètre dynamique) ne donnent que des renseignements ponctuels. Ceci nous a conduit à mettre en œuvre des méthodes non

destructives. Dans le chapitre de la modélisation géostatistique, un modèle complet de géométrie du promontoire calcaire de Lascaux est proposé (cf. 5.3).

Conclusion

Les études géologiques anciennes et récentes ne montrent pas une véritable différence entre elles. Cependant il y a des modifications sur les études récentes de la compréhension des formations superficielles de la colline de Lascaux. Il est reconnu que la grotte se développe dans un contexte de calcaire Coniacien et à l'est et l'ouest du site de Lascaux se trouvent des altérites sablo-argileuses. Il est évident qu'une connaissance plus précise du contexte géologique à l'échelle du site aiderait à une meilleure interprétation des données géophysiques évoquées plus loin dans notre étude.

De plus, les relevés des fractures, nous aideront à comparer et identifier des structures, notamment celles obtenues avec les modèles 3D géostatistiques (cf. 5.3). Les familles de structures couvrent quasiment tous les développements des vides dans ce système karstique de Lascaux.

Les forages de J. Vouvé sont les seuls échantillons extraits en profondeur disponibles aujourd'hui, mais il faut prendre garde à la précision de leur emplacement. Les informations des forages et des pénétrromètres permettront de valider le modèle géostatistique du promontoire de Calcaire.

1.3. Contribution des méthodes géophysiques

Le contexte d'étude à Lascaux nous oblige à privilégier des méthodes non destructives. C'est la raison pour laquelle des méthodes géophysiques sont très favorables sur ce site. Dans la thèse de J. Vouvé, on retrouve une analyse de gravimétrie sur la colline de Lascaux et éventuellement aux alentours immédiats de la grotte (Vouvé, 1975) dont l'objectif était de mettre en évidence la galerie ou les salles développées au-delà de la partie connue du réseau utilisé par les hommes préhistoriques. Une détection à distance dans l'infrarouge a été également réalisée à l'intérieur de la grotte, notamment dans la salle des Taureaux. Ces deux études sont les premières investigations géophysiques sur le site de Lascaux. Ensuite, des prospections de Slingram et TRE ont été mise en œuvre par Lopez (2009). On va présenter d'abord les principales méthodes utilisées, ensuite les résultats généraux des mesures géophysiques de Lopez (2009) et finalement une synthèse sur les développements récents de TRE et éventuellement la stratégie du suivi temporel de TRE.

1.3.1. Les méthodes géophysiques utilisés

1.3.1.1. Slingram

Cette méthode a recours à un procédé électromagnétique basse fréquence en champ proche. Elle est basée sur les principes de conduction du courant électrique par les roches – la conductibilité liquide électrolytique et le phénomène électrochimique à la surface des minéraux argileux (McNeill, 1980; McNeill, 1990). Le principe de la méthode est illustré par la figure 9.

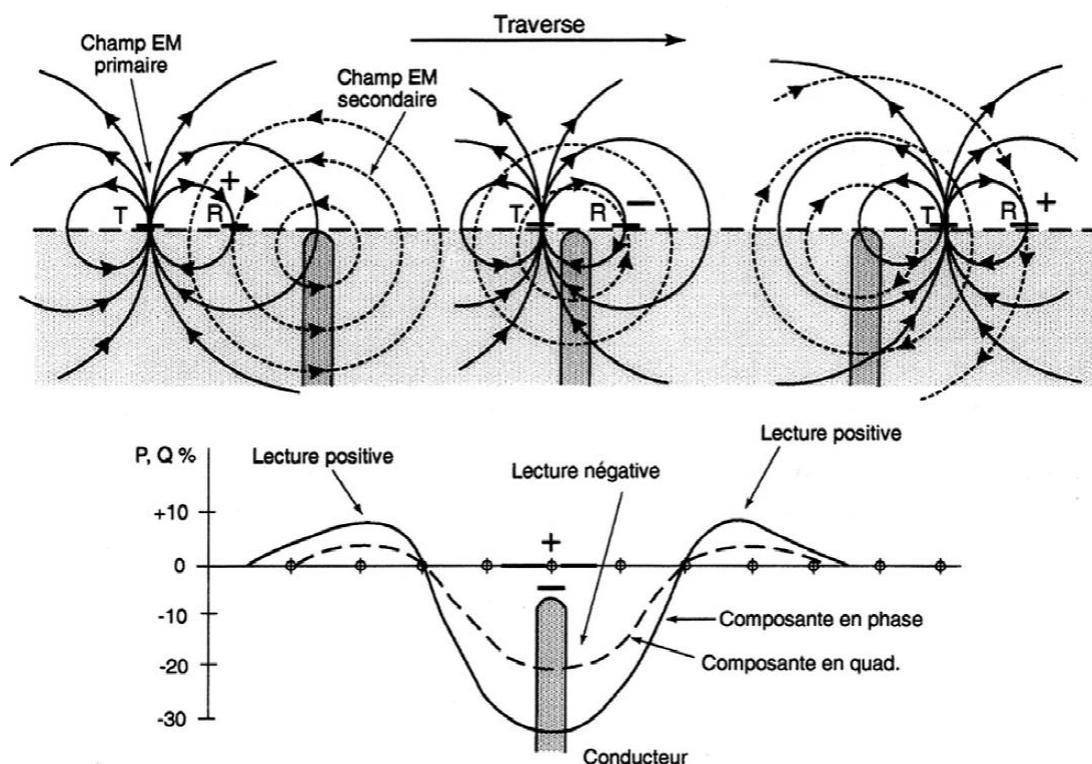


Figure 9. Principe de la méthode Slingram (McNeill, 1980).

La bobine «émettrice» génère d’abord un champ primaire H_p , sous l’action duquel, le sous-sol génère des courants de Foucault à l’origine d’un champ secondaire H_s selon la loi d’Ampère. La bobine «réceptrice» enregistre les deux champs H_p et H_s . Le rapport des champs magnétiques primaire et secondaire est directement proportionnel à la conductivité apparente du terrain, donnée par :

$$\sigma_a = \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \times \frac{2}{\pi f \mu_0 s^2} \quad (\text{Équation 1})$$

Où : H_p et H_s : champs magnétiques primaire et secondaire

f : fréquence de l’onde émise dans la boucle émettrice (9,8 kHz pour l’appareil EM31)

μ_0 : perméabilité magnétique du vide

s : espace entre électrodes (3,66 m)

La méthode Slingram a plusieurs avantages sur les sites préhistoriques, notamment pour les grottes ornées, vis-à-vis des politiques de conservation. L’absence de contact entre l’appareil de mesure et le sol évite les problèmes de mise en contact (majoritairement les fortes résistances du sol). Elle permet de réaliser une reconnaissance très rapide, et donne une information synthétique sur les premiers mètres. Cependant la profondeur d’investigation est faible. En outre, l’existence de barrières métalliques ceinturant le site empêche de réaliser des mesures à leur proximité, ce qui oblige à réaliser la mesure en deux parties : à l’intérieur et à l’extérieur de l’enceinte. Dans la pratique, l’appareil d’acquisition utilisé est le Slingram EM31 de chez Geonics^{l.t.d} (Photo 1). Il est porté à hauteur de hanche, à environ 1 m du sol.



Photo 1. L'appareil d'EM31 utilisé.

1.3.1.2. La Tomographie de Résistivité Electrique (TRE)

Cette méthode est basée sur l'injection d'un courant électrique dans le sol entre deux électrodes et la mesure de la différence de potentiel entre deux autres électrodes. Elle consiste à mettre en place une série d'électrodes espacées d'une distance « a » raccordées à un système d'acquisition automatique via une flûte. Les électrodes jouent successivement le rôle d'électrode d'injection (AB) et de mesure (MN) sur toute la longueur du dispositif (Figure 10). En écartant les espacements entre les électrodes, la profondeur d'investigation augmente. On obtient une image de la distribution des résistivités apparentes du sous-sol, dont chaque niveau de mesure correspond à une pseudo-profondeur (Edwards, 1977), cette image est donc appelée une pseudo-section (Figure 10).

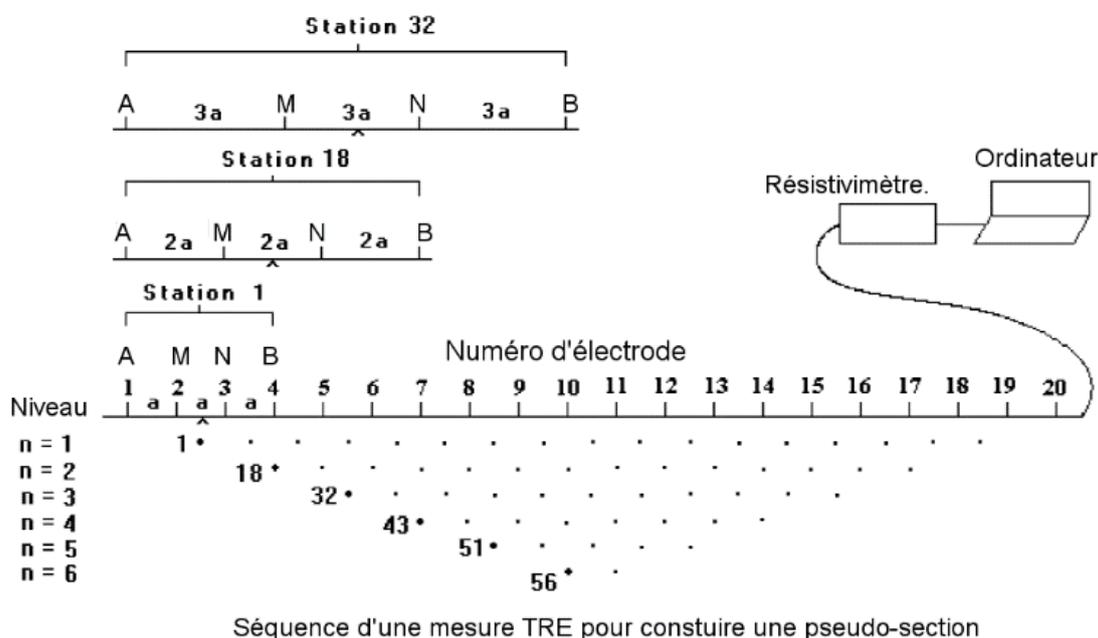


Figure 10. Disposition des électrodes et séquence des mesures utilisées pour une mesure TRE (Loke, 2004).

Les données obtenues ne sont pas des résistivités vraies mais des résistivités apparentes ρ_a correspondant à une intégration volumique des résistivités électriques sur un volume dépendant de la taille du quadripôle. Ainsi :

$$\rho_a = k \times \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}} \quad (\text{Équation 2})$$

Où :k : coefficient géométrique dépendant de la géométrie du dispositif

ΔV_{MN} : différence de potentiel mesuré entre les électrodes A et B

I_{AB} : courant injecté

1.3.2. Contribution récente des prospections de TRE et de la stratégie du suivi temporel

Cette partie constitue une synthèse de l'utilisation de la méthode TRE appliquée aux contextes karstiques ou aux sites préhistoriques. De nombreuses études faisant appel à la TRE ont été conduites pour la reconnaissance hydrogéologique, les études environnementales et les prospections archéologiques. Sur le site de Lascaux, la TRE a servi à la reconnaissance des structures géologiques du système karstique en 3D et à établir un suivi temporel sur le probable amont hydraulique du sas1 (cf. 2.1.1). Il est donc évident qu'il faut étudier et réviser les différentes approches classiques de la méthode.

1.3.2.1. Reconnaissance hydrogéologique des systèmes karstiques par TRE

La méthode de TRE est largement utilisée afin de résoudre les problématiques de l'échelle régionale (recherche des ressources en eau par exemple) à l'échelle très locale d'un site d'étude.

Zhou *et al.* (2000) ont réussi à déterminer l'épaisseur du sol surmontant un système karstique par la mise en œuvre de 49 profils de TRE, couvrant un terrain de 42 037 m². Par comparaison avec les données des forages existant, les modèles de TRE indiquent une épaisseur de sol avec des différences de précision qui sont en moyenne de 2,4 m (Zhou *et al.*, 2000). Sumanovac et Weisser ont déterminé la structure d'un système karstique (sur 200 × 60 m) au centre de Croatie en couplant la TRE avec la méthode sismique. Ils montrent que, sous certaines conditions, la méthode électrique seule permet de donner des résultats fiables, notamment pour une profondeur d'investigation inférieure à 100 m (Šumanovac & Weisser, 2001).

De plus, un système karstique a souvent des géométries structurales complexes (cf. 1.2.1). Carrière *et al.* (2013) ont utilisé un couplage de la TRE et du géo-radar (GPR) pour la caractérisation d'une zone non saturée dans le système karstique de la Fontaine du Vaucluse dans le sud de la France. Le modèle de résistivité a montré une bonne cohérence avec l'image de géo-radar (Figure 11). La partie profonde est marquée par de fortes résistivités alors que la partie superficielle est nettement plus conductrice, ce qui peut être probablement le signe de la présence de roches plus poreuses et remplies par de l'eau ou de l'argile (Carrière *et al.*, 2013). D'après Carrière *et al.* (2013), les dispositifs et les espacements utilisés ne sont pas adaptés pour identifier des fractures, tandis que le GPR a identifié de nombreuses fractures. Ces fractures jouent un rôle majeur pour les infiltrations des eaux dans ce système karstique, probablement les chemins préférentiels des infiltrations (Carrière *et al.*, 2013).

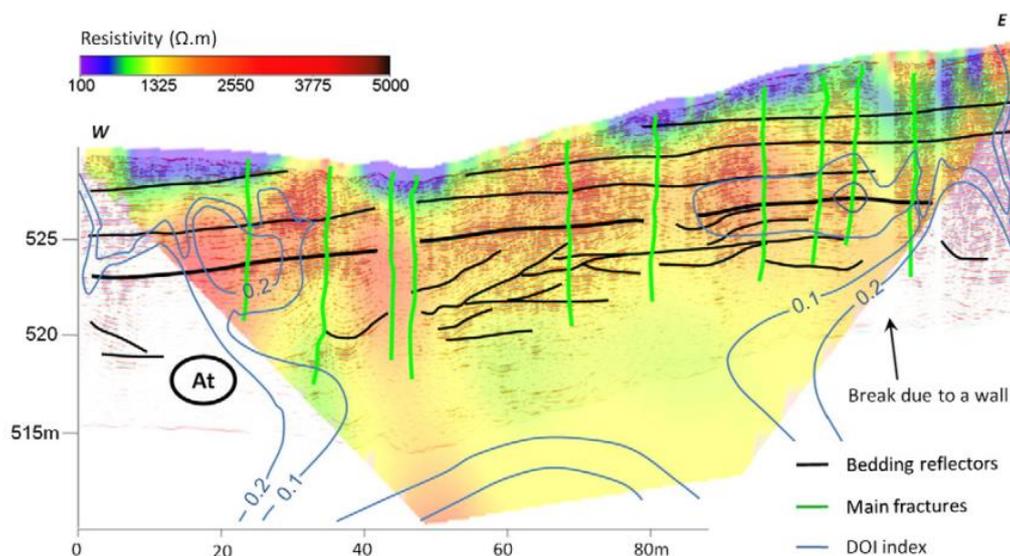


Figure 11. Modèle de résistivité par dispositif Wenner-Schlumberger avec 64 électrodes espacées de 2 m, et superposition avec l'image radar (Carrière et al., 2013).

Chalikakis a proposé une synthèse des méthodes géophysiques appliquées aux systèmes karstiques et il a constaté que la TRE est une méthode fiable pour la reconnaissance des zones de fracturation et des points d'infiltration préférentielle (Chalikakis, 2006 ; Chalikakis et al., 2011). C'est une méthode couramment utilisée pour la reconnaissance de la structure karstique (Al-fares et al., 2002; Cunningham et al., 2004; Zhou et al., 2002; Guérin et al., 2009; Carbonel et al., 2015) et également des contextes hydrogéologiques dans un système karstique (Sirieix et al., 2006; Toto et al., 2008; Xu et al., 2015).

La TRE est également employée pour identifier les caractéristiques des paléokarsts afin d'évaluer les risques éventuels. Dans ce domaine, son efficacité a été prouvée par une comparaison entre les modèles de résistivité et les résultats de pénétromètre dans la région de Tournaisis en Belgique (Kaufmann et al., 2012).

1.3.2.2. Applications à l'infiltration de l'eau sur les sites archéologiques

Dans les cas des études archéologiques, il existe souvent des contraintes liées à la conservation des sites, en particulier quand des zones d'humidité différentielle apparaissent. La TRE étant une méthode non-destructive, elle s'adapte bien à ces exigences et elle constitue une méthode pertinente sur les sites préhistoriques.

Prenons l'exemple du mur sud de l'Acropole (Grèce), qui a été déformé à cause de la pression provenant des matériaux de remplissages situés derrière. Des traces noires dues à une augmentation d'humidité ont été observées sur le mur. Des profils TRE ont été mis en œuvre sur et au sommet de ce dernier dans les directions horizontales et verticales (Tsourlos & Tsokas, 2011). D'après les modèles de résistivité (Figure 12), les sections K1 – K4 présentent des résistivités relativement faibles, indiquant un fort degré d'humidité. Les faibles résistivités observées sur K5 – K7 sont cohérentes avec les positions des taches noires.

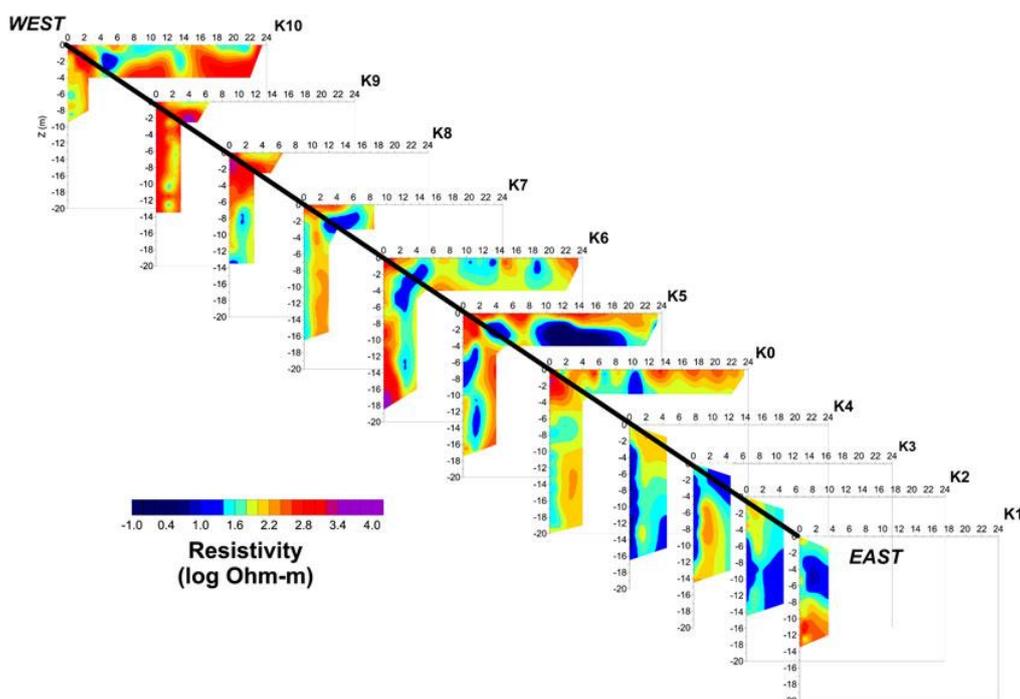


Figure 12. Les modèles de résistivité des onze profils TRE (de l'ouest à l'est) sur le mur sud de l'Acropole ((Tsourlos & Tsokas, 2011).

D'après Tsourlos & Tsokas (2011), l'augmentation de l'humidité du côté est provient d'un problème de drainage engendré par la présence du Musée de l'Acropole situé au sud-ouest et dont une grande partie est localisée derrière le mur étudié. La TRE a proposé des résultats fiables, permettant d'identifier les endroits porteurs d'une augmentation de l'humidité.

La méthode a également été appliquée, à titre expérimental, sur des murs anciens d'Oxford (construits au 18^{ème} siècle) pour comprendre la procédure d'humidification et de séchage sur les murs. Des eaux sont délivrées manuellement sur les murs afin de simuler la précipitation. Les propagations et les distributions des eaux délivrées dans les murs sont bien identifiées avec une calibration tenant compte de la porosité et de la salinité (Sass & Viles, 2010). La TRE se montre également performante pour la reconnaissance de l'endommagement de la roche sous l'effet naturel sur les sites préhistorique (Mol & Preston, 2010). Cette méthode est capable à tracer les déplacements et les évolutions des humidités dans les structures des monuments préhistoriques. La technique est appliquée sur les murs de « Hertford College » et les abris de la roche San/Néolithique de la Réserve Golden Gate, et elle permet d'identifier les passages d'humidité afin de proposer des conseils de conservations. Dans le domaine de l'archéologie, la TRE peut donc être un outil efficace et non-destructif permettant une meilleure connaissance sur les phénomènes d'endommagement des sites préhistoriques et des patrimoines.

1.3.2.3. La stratégie du suivi temporel de TRE

Dans le cadre d'une étude des changements de propriétés de la partie superficielle du sol ou des roches, le monitoring par la TRE est un outil performant. En effet, un suivi temporel de TRE, dit « Time-Lapse Monitoring », permet de surveiller la distribution des résistivités ainsi que les changements dynamiques liés à la variation hydraulique, notamment le changement de teneur en eau dans un contexte non-saturé. De nombreux travaux ont été conduits en ce

sens. Par conséquent, un changement de la quantité d'eau dans le sol sur un plan vertical pourrait correspondre à la différence entre la teneur en eau et le changement de la porosité au cours du temps sur ce plan (Michot *et al.*, 2003). De plus, la direction et la vitesse d'un écoulement souterrain peuvent être déterminées par une mesure de la résistivité d'une injection de l'écoulement artificielle dans les alluvions (Kim *et al.*, 2009). En outre, de nombreuses recherches montrent que les changements de résistivité sont affectés par l'infiltration de l'eau, l'évapotranspiration et la dilution des minéraux. La résistivité augmente dans un cas de forte évapotranspiration, de faible infiltration et d'une dilution des eaux (Kunetz, 1966; Clement *et al.*, 2009).

Les études récentes concernant la technique du suivi temporel par TRE ont abouti à une évolution des méthodes d'acquisition et d'interprétation ainsi qu'à la possibilité d'élargir les secteurs d'applications. Karaoulis *et al.* (2014) ont proposé de prendre en compte dans l'interprétation les contraintes temporelles et spatiales, ainsi que les bruits de mesure probablement aléatoires dans le temps en introduisant le paramètre actif de Lagrange (Karaoulis *et al.*, 2014). Mahmut *et al.* (2014) ont utilisé cette technique sur un site géothermique à Balçova (Turquie). Par quatre mesures de la TRE réparties sur un an (de mars 2010 à février 2011), ils constatent que le suivi temporel permet d'identifier les zones ayant des variations de résistivités liées aux changements de température et de salinité. Dahlin *et al.* (2014) ont mis en œuvre un système du suivi temporel pendant trois ans sur un champ arable adjacent à une grande décharge pour comprendre la circulation des eaux. Le secteur est divisé en quatre parties : une partie de référence et trois autres parties où les vitesses d'irrigation sont différentes. En comparant avec le secteur de référence, le biais lié à la teneur en argile peut être éliminé, permettant d'identifier les changements des propriétés du sol lié à l'écoulement. Les variations de résistivité observées pendant le suivi sont distinctement (Dahlin *et al.*, 2014) liées à la quantité d'eau utilisée pour l'irrigation et aux différences de végétation. L'invention du système d'acquisition automatique (ALERT – Automated time-lapse electrical resistivity tomography) permet de contrôler à distance les mesures, les inversions et les envois de données. Une fois que le système est installé, aucune intervention manuelle n'est nécessaire. Les mesures sont acquises avec des paramètres spécifiés et les données sont envoyées automatiquement selon les créneaux prédéfinis, paramètres et créneaux pouvant être tous les deux modifiés lorsque les conditions de mesures sont changées (Ogilvy *et al.*, 2009; Wilkinson *et al.*, 2010). En utilisant ALERT avec un pas d'une heure, Chambers *et al.* (2015) ont relevé des changements des quantités des eaux sur une carrière « Rock Common Quarry » en fonction du pompage avec des interruptions imprévues et prévues. De plus, un décalage significatif est observé entre le changement du niveau du piézomètre et la variation de résistivité au début et à la fin du pompage, ce qui a été identifié comme une phase d'humidification et de sécheresse dans un milieu non-saturé. De nombreuses recherches prouvent la capacité du suivi temporel de TRE à déterminer les propriétés du sol (Power *et al.*, 2014; Perrone *et al.*, 2014; Chrétien *et al.*, 2014), les effets de l'infiltration (Audebert *et al.*, 2014).

En raison de ces résultats, nous avons donc choisi d'utiliser la stratégie du suivi temporel sur le site de Lascaux, afin de reconnaître les différentes structures géologiques, d'identifier une zone probable d'alimentation en eau, et finalement d'établir une prédiction du débit dans la grotte (*cf.* 4.1.3).

1.3.3. Prospections géophysiques antérieures

Avant de présenter les mesures géophysiques dans le cadre de cette thèse, il n'est pas inutile de s'intéresser aux contributions des prospections géophysiques antérieures. Les premières mesures géophysiques ont été réalisées par J. Vouvé, qui a utilisé les méthodes de gravimétrie et d'infrarouge (Vouvé, 1975). Ces mesures ne vont pas être reprises pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les données initiales ne sont pas bien archivées, ceci rend difficile l'utilisation des interprétations. Ensuite, les cartes de iso-valeurs issues de gravimétrie ne sont pas numérisées (elles ont été réalisées en 1975). Il est impossible de retrouver les références géographiques qui aideraient à recalibrer ces cartes sur les cartes topographiques/géologiques actuelles. Finalement, les photos des mesures d'infrarouge sont en mode noir et blanc. Sans données brutes, les mesures d'infrarouge ne peuvent pas être reprises ni exploitées.

Par conséquent, seules les mesures géophysiques réalisées par Lopez (2009) au cours de sa thèse seront prises en compte.

Les emplacements de ces mesures sont présentés sur la figure 13. Seuls quelques points ont été relevés sur chaque profil puis des interpolations linéaires ont été faites. Dans le contexte très arborisé du site, une grande précision du positionnement est délicate à réaliser et fastidieuse à obtenir. Deux profils de tomographie de résistivité électrique et des profils d'EM31 couvrant une grande surface à l'intérieur et à l'extérieur du site de Lascaux ont été effectués.

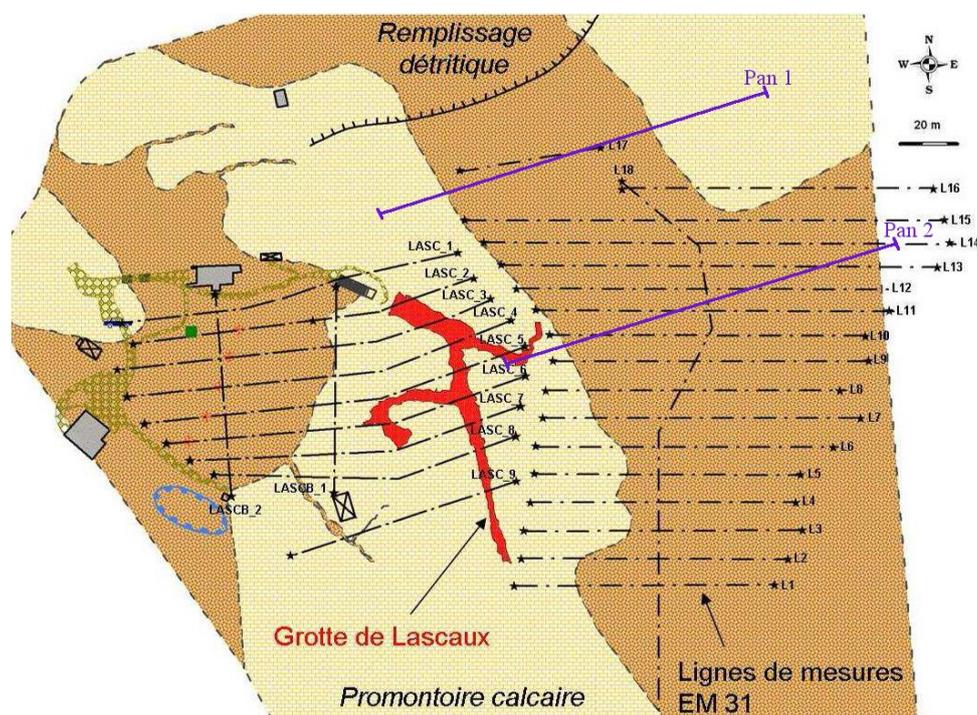


Figure 13. Emplacements des mesures géophysiques réalisées par B. Lopez (2009).

1.3.3.1. Les résultats d'EM31

Les cartes de résistivités apparentes sont obtenues en utilisant les méthodes

d'interpolation du logiciel ISATIS® (Figure 14). On regardera d'abord la carte de résistivité apparente obtenue en champ horizontal (Figure 14) d'après Lopez (2009). Il faut noter que les mesures à l'intérieur et à l'extérieur ont été faites pendant deux campagnes et qu'elles ne sont pas obtenues avec les mêmes appareils. On ne devrait pas joindre les deux parties pour établir une carte de résistivité mais les données ont été perdues après la thèse de B. Lopez, il n'est plus possible de reprendre ces données.

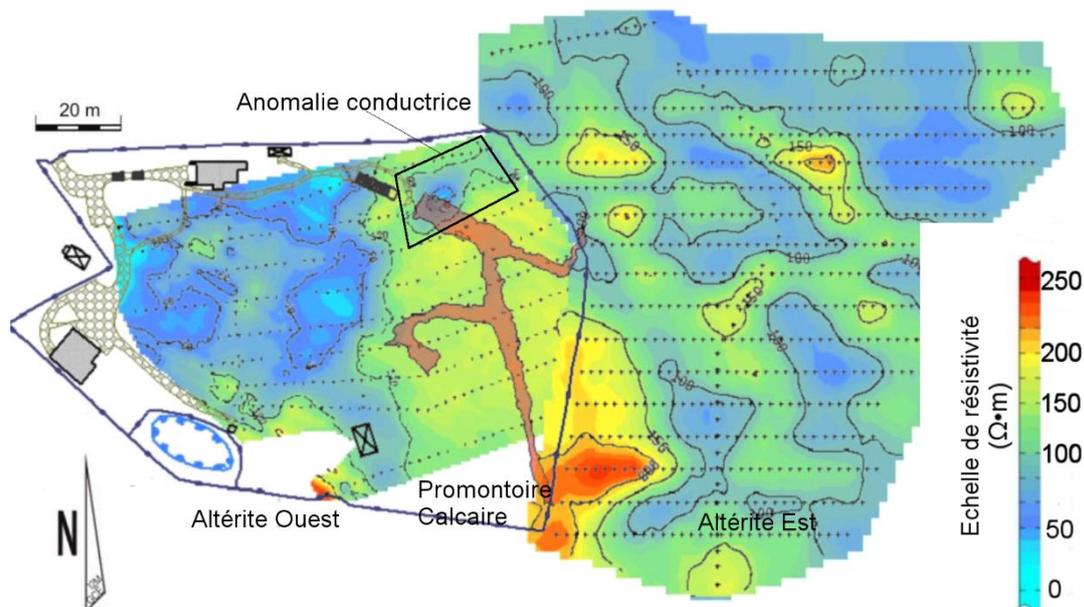


Figure 14. Carte de résistivité apparente en bobine verticale coplanaire (profondeur d'investigation $\approx 2,7$ m).

On constate une limite significative au niveau de l'enceinte métallique, liée à l'absence de mesure, ceci rend difficile l'interpolation entre les parties intérieure et extérieure. À l'intérieur de l'enceinte, la limite entre les altérites ouest et le promontoire calcaire de Lascaux peut être identifiée par cette méthode. Les matériaux sablo-argileux constituant les altérites ont des résistivités plus faibles que les calcaires Coniaciens. Le promontoire calcaire, quant à lui, a des résistivités qui sont comprise entre 150 et 170 $\Omega\cdot m$ (Lopez, 2009). Une anomalie conductrice est observée au nord du promontoire. A titre d'hypothèse, elle est attribuée au cheminement de l'eau qui alimente le point de décharge dans le sas1 (Figure 6). C'est la raison pour laquelle les profils de TRE du suivi temporel sont installés à cet endroit, à proximité de la grotte.

1.3.3.2. Les mesures de TRE

Deux profils de TRE ont été réalisés notamment dans la partie où se trouvent des altérites avec un espacement inter électrode de 3 m. Sur le Pan 2, le modèle de résistivité obtenue par un dispositif pôle-dipôle permettait d'identifier la limite entre les altérites sablo-argileuses et les calcaires du Coniacien (Figure 15).

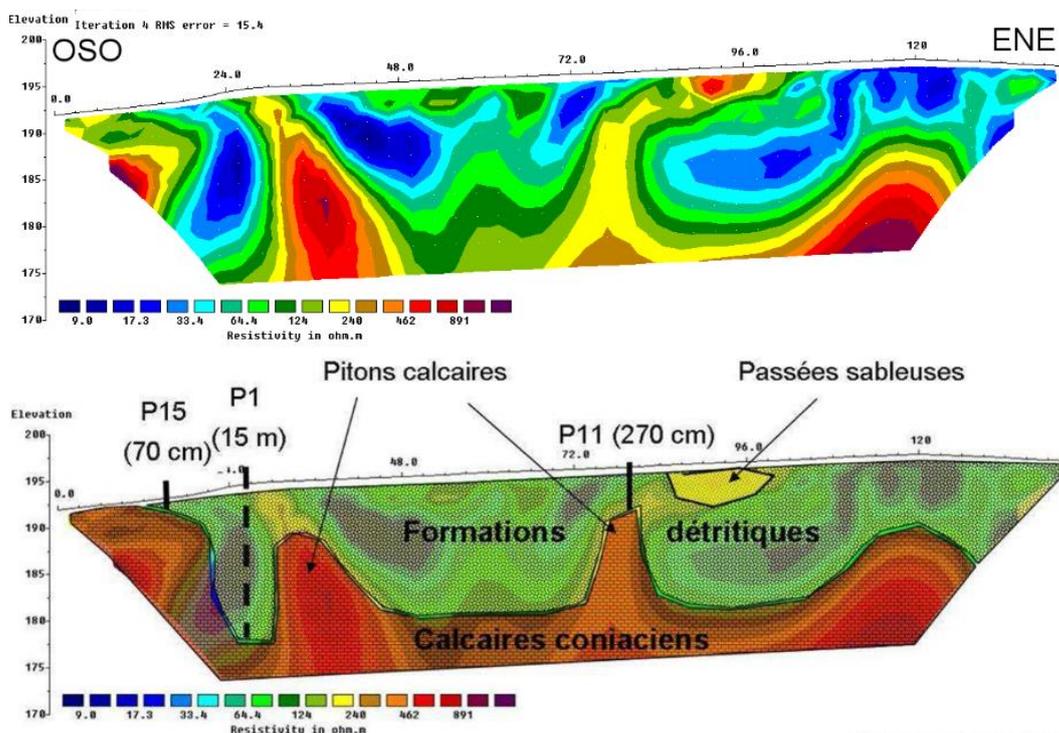


Figure 15. Modèle de résistivité du Pan 2 du dispositif pôle-dipôle (en haute), l'interprétation géologique (en bas), d'après Lopez (2009).

On constate que les calcaires coniaciens correspondent aux résistivités situées entre 400 et 1000 $\Omega \cdot m$ (Lopez, 2009). De plus, ce profil a recoupé un piton calcaire qui a également été reconnu par le pénétromètre P11. Un autre piton semble se trouver plus à l'est en P15. Les altérites (appelées « formations détritiques » antérieurement) sont plus conductrices que les calcaires. La large gamme de résistivité (de 1 à 150 $\Omega \cdot m$), au-dessus du calcaire, pourrait correspondre à une forte variabilité de la lithologie. Les fortes résistivités peuvent correspondre aux passées sableuses.

Le profil Pan 1 situé plus au nord (Figure 13), de l'autre côté de la route, montre un modèle de résistivité plus homogène (Figure 16). D'après B. Lopez, on peut clairement distinguer les calcaires, correspondant aux résistivités comprises entre 400 et 1000 $\Omega \cdot m$. La limite entre les calcaires et les altérites est très nette, presque parallèle à la topographie du sol. Entre 96 m et 126 m, une zone plus résistante est marquée dans les altérites. Elle correspond, dans le terrain, à un arbre déraciné dont la souche contient des plaquettes calcaires. Cette zone pourrait correspondre à des calcaires fortement altérés localement, interprété comme « fantôme de piton calcaire » (Lopez *et al.*, 2008).

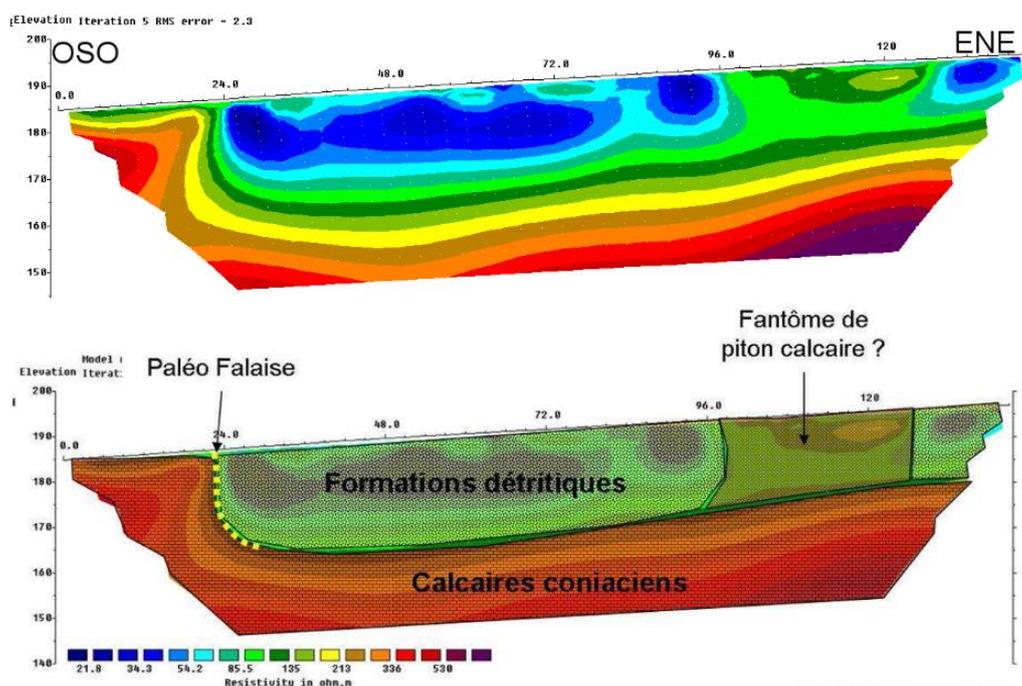


Figure 16. Modèle de résistivité du Pan 1 du dispositif pôle-dipôle avec l'interprétation géologique en-dessous d'après Lopez (2009).

Conclusion

Les données antérieures à ce travail sont reportées sur un système SIG permettant leur comparaison aux données récentes et leur validation. Les travaux de recherche montrent la capacité de la méthode TRE pour la caractérisation structurale d'un massif dans un environnement karstique. Les premières mesures réalisées le long de profils ayant montré l'adaptation des méthodes géophysiques à l'étude du site de la grotte de Lascaux, nous avons choisi d'utiliser cette méthode pour faire un suivi temporel et une prospection aboutissant à une reconstitution 3D du site.

L'implantation des profils TRE est basée sur les relevés de fractures et des mesures électromagnétiques obtenues avec un EM31 antérieurement par B. Lopez. On a choisi leur emplacement en tenant compte de l'anomalie conductrice qui avait été alors observée. En effet nous avons fait l'hypothèse que cette anomalie correspondait à l'amont hydraulique de l'écoulement dans le sas1. Par ailleurs, l'orientation des profils pour le suivi temporel a été choisie pour qu'ils soient perpendiculaires aux structures géologiques connues de la grotte. Selon le même critère, les orientations des profils de la prospection 3D ont été choisies tout en ne tenant pas compte de l'unique fracture de petite taille de la famille F3.

Chapitre 2

Méthodes des études pour le suivi microclimatique et géophysique du site

Ce chapitre décrit les mesures de TRE effectuées sur le site de la grotte de Lascaux ainsi que les traitements qui leur sont appliqués. Ces mesures s'étant déroulées au cours d'une période de plus de deux ans, les conditions climatiques, microclimatiques et thermiques du site de Lascaux y sont également présentées. L'objectif est de mettre en évidence une évolution temporelle de la résistivité électrique des terrains étudiés et de la mettre en relation avec les débits et les pluies enregistrés sur le site étudié.

2.1. Présentation des données brutes

Après que les campagnes de mesures géophysiques et les modalités d'inversion qui ont été appliquées auront été décrites, ce chapitre est consacré à la présentation des données concernant les conditions thermiques, microclimatiques ainsi que les données de débit dans la grotte de Lascaux.

2.1.1. Mesure de TRE

Vingt-deux mesures de TRE ont été réalisées, dans le cadre de cette thèse, au cours de la période s'étalant du 6 juin 2012 au 28 mars 2014. Ces profils ont été effectués à un pas de temps, le plus régulier possible compte tenu des conditions météorologiques, d'environ vingt jours à l'exception des périodes estivales.

2.1.1.1. Les mesures réalisées

Deux profils ont été positionnés sur le site de Lascaux (Figure 17) de façon à couvrir l'amont hydraulique potentiel de la grotte. L'emplacement précis a été déterminé à partir des résultats de Lopez utilisant la méthode de Slingram (cf. 1.3.3.1). Pour chaque profil, deux dispositifs ont été utilisés tous les deux avec soixante-douze électrodes et une même origine mais avec deux espacements inter-électrode : 0,5 m et 1 m. Des mesures pôle-dipôle et gradient sont alors effectuées pour chaque profil et chaque espacement. On a donc réalisé douze mesures par campagne de mesure (Tableau 1).

Théoriquement, le dispositif pôle-dipôle, connu pour sa bonne couverture horizontale, permet une acquisition rapide des données. L'effet asymétrique de ce dispositif est contré en opérant de manière directe (*forward*) et inverse (*reverse*) (Clément *et al.*, 2009; Dahlin & Zhou, 2004). Le dispositif gradient est, quant à lui, plus sensible à la variation verticale de résistivité et montre une très grande résolution spatiale (Dahlin & Zhou, 2006; Loke *et al.*, 2013). On espère donc obtenir une bonne résolution horizontale et verticale en couplant ces deux dispositifs.

Tableau 1. Type des mesures réalisées à l'occasion de chaque campagne de mesure TRE.

Nom du profil	Espacement	Longueur totale	Dispositif
Profil I-50	50 cm	35,5 m	Pôle-dipôle direct
			Pôle-dipôle inverse
			Gradient
Profil I-100	100 cm	71 m	Pôle-dipôle direct
			Pôle-dipôle inverse
			Gradient
Profil II-50	50 cm	35,5 m	Pôle-dipôle direct
			Pôle-dipôle inverse
			Gradient
Profil II-100	100 cm	71 m	Pôle-dipôle direct
			Pôle-dipôle inverse
			Gradient

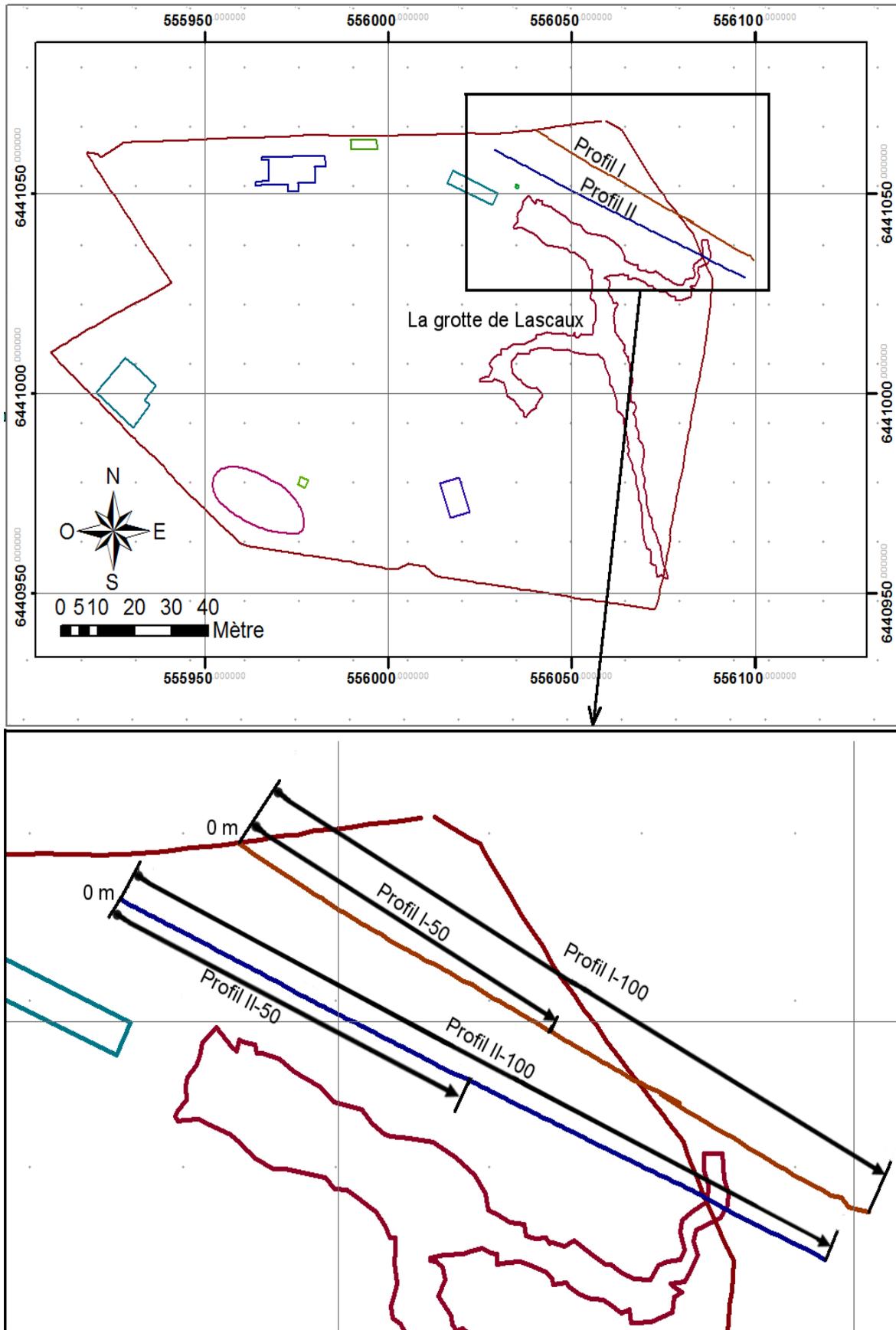


Figure 17. Emplacements des profils de TRE recoupant l'enceinte de la grotte avec la position du début de chaque profil (0 m).

Le nivellement des électrodes réalisées par nos soins au cours des campagnes de mesure permet d'obtenir les coordonnées de chacune d'entre elles selon le référentiel Lambert 93 (Figure 17). Les profils I-50 et II-50 (espacement 0,5 m) se trouvent dans l'enceinte de protection de la grotte (Figure 17). Les profils I-100 et II-100 sont deux fois plus long du fait d'un espacement plus grand (1 m). Le profil II-100 est prolongé de 6 m en-dehors de l'enceinte alors que le profil I-100 est prolongé de 24 m, couvrant ainsi une partie de la formation détritique sablo-argileuse (cf. 1.2.2). Les mesures TRE, pour chaque profil, permettent d'obtenir les résistivités apparentes (ρ_a) du sous-sol.

2.1.1.2. Inversion des données de résistivité

a) *Choix d'une norme*

Les données de résistivités apparentes sont inversées afin d'obtenir un modèle des résistivités que nous appellerons dans ce texte « résistivités interprétées vraies (ρ_{vraie}) » à l'aide du logiciel Res2Dinv v.3.59.119 (Loke & Barker, 1996).

Les inversions peuvent être faites sous deux normes (L1 ou L2), qui utilisent la méthode des moindres carrés avec une régularisation de Tikhonov d'ordre 1 (régularité des gradients) ou 2 (régularité de la matrice Hessienne) (Wolke & Schwetlick, 1988). Théoriquement, avec la norme L1 les données de résistivité apparente sont inversées en minimisant la somme des valeurs absolues des différences des résistivités apparentes et des résistivités calculées. Elle tend à reproduire un modèle continu par partie (Ellis & Oldenburg, 1994), plus adapté dans un environnement hétérogène avec des variations discontinues de résistivité.

La norme L2 est une méthode qui a tendance à reproduire un modèle avec des variations graduelles des résistivités, en minimisant la somme des carrés des différences des résistivités apparentes et calculées également au moyen de la méthode des moindres carrés. Cette approche est adaptée quand la résistivité du sous-sol varie d'une manière continue.

Le choix de l'une ou de l'autre des deux normes repose sur notre connaissance *a priori* (cf. 1.2.2) de la structure, au moins localement discontinue, des formations géologiques locales (environnement karstique non saturé, discontinuités et variabilité spatiale du terrain sont loin d'être négligeables). En tenant compte de ces informations, la norme L1 est choisie pour surveiller une zone de faible résistivité, variable dans le temps (zone qui sera, on le verra plus loin dans le texte, l'objet principal de l'étude). En effet, cette norme devrait permettre de mieux reproduire la structure de cet environnement complexe. Cette norme donne une inversion aux contours raides, et un contraste plus fort entre les résistivités (Genelle, 2012) or, à l'instar de ce qui est écrit plus haut, la grotte de Lascaux se trouve dans un environnement tel que la transition entre la roche saine et les zones d'altération peut être brutale (Photo 2).



Photo 2. Transition brutale au sein des calcaires coniaciens

Le 23 janvier 2013, des profils ont été réalisés dans le but de tester les différents dispositifs, les espacements inter électrodes ainsi que la méthode d'inversion. En comparant la structure des différents modèles en résultant aux profondeurs des terrains obtenus au moyen d'un pénétromètre par B. Lopez (cf. 1.2.3.2), l'inversion sous L1 avec la concaténation des dispositifs pôle-dipôle (direct et inverse) et gradient donne une profondeur de calcaire plus adéquate que les autres couplages (Sirieix & Xu, 2014).

b) Paramètres du maillage des modèles de résistivité

Les paramètres des maillages utilisés sont les suivants :

- L'épaisseur des blocs augmente de 5% à chaque changement de couche ;
- La largeur de bloc est dite affinée : elle est de 0,25 m pour le profil I-50/II-50, et de 0,5 m pour le profil I-100/II-100 ;
- Une réduction de l'effet de bloc aux bordures est appliquée de telle sorte que son influence soit faible (Loke & Barker, 1996).

De plus, on définit un facteur d'amortissement initial de 0,1 et minimum de 0,01. Celui-ci est relativement faible par rapport à la valeur par défaut proposée sous Res2Dinv car les mesures ne sont pas apparues bruitées. La méthode d'optimisation utilisée est la méthode de « Gauss-Newton complète » utilisant le logarithme décimal des résistivités ($\log_{10} \rho_a$).

Pendant une période de vingt-deux mois, vingt-deux campagnes de mesure TRE à l'intervalle plus ou moins régulier ont été réalisées. Cependant quelques données sont manquantes en raison de pannes inopinées de l'appareil de mesure. Le détail des mesures manquantes est donné dans la liste intégrale des campagnes géophysiques (Tableau 2).

Tableau 2. List de des campagnes de TRE

Date	Profil			
	I-50	I-100	II-50	II-100
06/06/2012	x			
07/06/2012			x	x
04/10/2012	x		x	
24/10/2012	x	x	x	x
29/11/2012	x	x	x	x
12/12/2012	x	x	x	x
25/01/2013	x	x	x	x
06/02/2013		x	x	x
22/02/2013	x	x	x	x
04/03/2013	x	x	x	x
03/04/2013	x	x	x	x
16/05/2013	x	x	x	x
19/06/2013	x	x	x	x
02/07/2013	x	x	x	x
16/07/2013	x	x	x	x
05/09/2013	x	x	x	x
27/09/2013	x	x	x	x
23/10/2013	x	x	x	x
13/11/2013	x	x	x	x
28/11/2013	x	x	x	x
16/12/2013	x	x	x	x
10/01/2014	x	x	x	x
28/03/2014	x	x	x	x

2.1.1.3. Normalisation des résistivités

Chaque modèle de résistivité contient 2 080 blocs de résistivités répartis sur 18 couches. L'épaisseur des couches augmente en fonction de la profondeur pour un largeur de bloc identique (cf. 2.1.1.2). La différence d'épaisseur des blocs est donc à l'origine d'une contribution inhomogène des valeurs de résistivité lors des calculs statistiques ce qui fait qu'une même valeur de résistivité attribuée à un bloc superficiel ou profond représenterait un « volume de terrain » différent alors qu'elle aurait le même poids lors des calculs statistiques. Afin d'éliminer cet effet de poids, les valeurs des résistivités sont pondérées par l'inverse de l'aire de la surface du bloc hébergeur (Équation 3). Ces valeurs de résistivités sont alors dites normalisées par unité de surface (ρ_{us}).

$$\rho_{us_i} = \frac{\rho_{vrai_i}}{S_{bloc_i}} \quad (\text{Équation 3})$$

Cette variable (ou son logarithme décimal) pourra, le cas échéant, être transformée en la centrant et la réduisant ρ_{DCR} (Équation 4), pour les besoins des analyses multidimensionnelles (cf. 3.3) :

$$\rho_{DCRi} = \frac{\rho_{usi} - \mu(\rho_{us})}{\sigma(\rho_{us})} \quad (\text{Équation 4})$$

avec μ la moyenne et σ l'écart-type de ρ_{us} .

Une alternative à cette normalisation des données aurait pu être de réaliser des inversions en imposant une épaisseur constante aux différentes couches des modèles et donc, à chaque bloc (0,175 m – valeur arrondie qui est égale à l'épaisseur de la première couche du modèle obtenue par la première méthode) ce qui conférerait le même poids à chaque bloc (Figure 18). Cependant, d'après l'organisation des blocs, il est clair que la première méthode (Figure 18.a) permet d'avoir au moins un point de mesure par bloc du modèle, alors que beaucoup de blocs en sont exempts dans le cas de la deuxième méthode (Figure 18.b). De plus, la deuxième organisation contient trente-neuf couches dans le modèle final au lieu de dix-huit, ce qui aurait pour conséquence d'augmenter significativement les temps d'inversion.

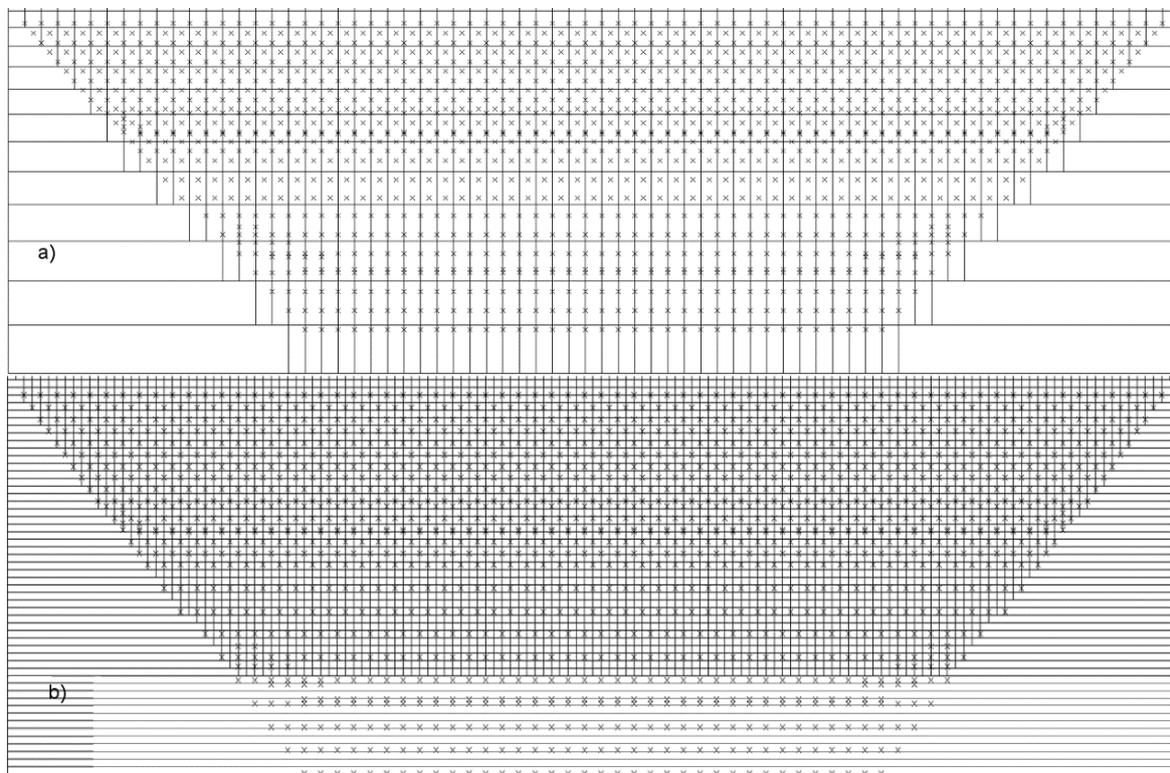


Figure 18. Comparaison de l'organisation des blocs – a) l'épaisseur augmente en fonction de la profondeur, b) l'épaisseur est constante : 0,175 m

Graphiquement, les modèles (Figure 19) issus des mesures du 2 juillet 2013 ayant tous deux été inversés avec la norme L1, sont assez semblables (les erreurs absolues sont respectivement égales à 0,62 et 0,72) ; toutefois le deuxième modèle montre une allure plus lisse en profondeur. Cependant, celui-ci présente une résistivité localement plus importante avec par exemple, 5% et 23% d'augmentation à 4,8 m et 6,2 m de profondeur. L'autre inconvénient du choix d'un maillage uniforme est une profondeur maximale plus faible du modèle de résistivité (b-1 et b-2 dans la figure 19 et également dans la figure 20). Elle peut atteindre une valeur de 7,9 m dans le cas où l'épaisseur augmente en fonction de la profondeur alors que la profondeur maximale est à 5 m seulement dans le cas contraire. Les maillages, dans les deux cas, atteignent la même profondeur, alors que la différence de profondeur

n'apparaît qu'à la fin de l'inversion sous Res2DInv (version. 3.59.119). La présence des blocs ayant une forte résistivité est donc moins évidente dans le cas de maillage uniforme ce qui serait dommageable pour l'interprétation du site comme on le montrera plus loin (cf. 3.1).

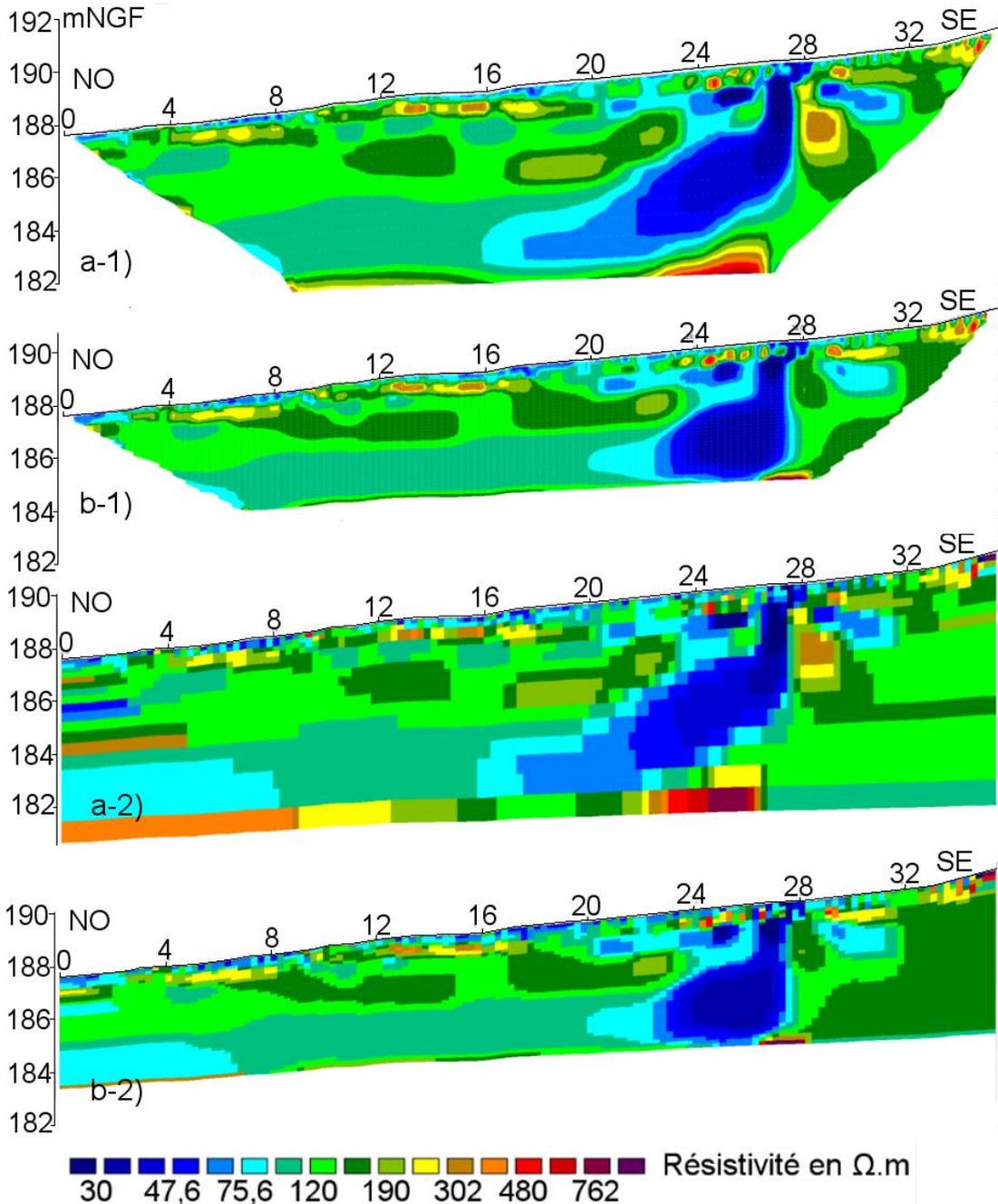


Figure 19. Comparaison des modèles (mesure du 2 juillet 2013) après inversion en utilisant les différentes organisations de blocs – a) l'épaisseur augmente en fonction de la profondeur (a-1, affichage par contour, a-2, affichage par blocs), b) l'épaisseur est constante : 0,175 m (b-1, affichage par contour, b-2, affichage par blocs).

L'autre critère à prendre en compte pour juger de la validité du choix est la matrice de sensibilité (Figure 20). Une forte valeur de sensibilité suggère une plus grande fiabilité du modèle. Dans notre cas, les valeurs de la sensibilité sont, d'un modèle à l'autre, du même ordre de grandeur quand la profondeur est inférieure à 2 m, mais elles diminuent significativement en profondeur pour le modèle comportant des blocs de taille identique,

montrant ainsi que la sensibilité est moins bonne avec la deuxième méthode.

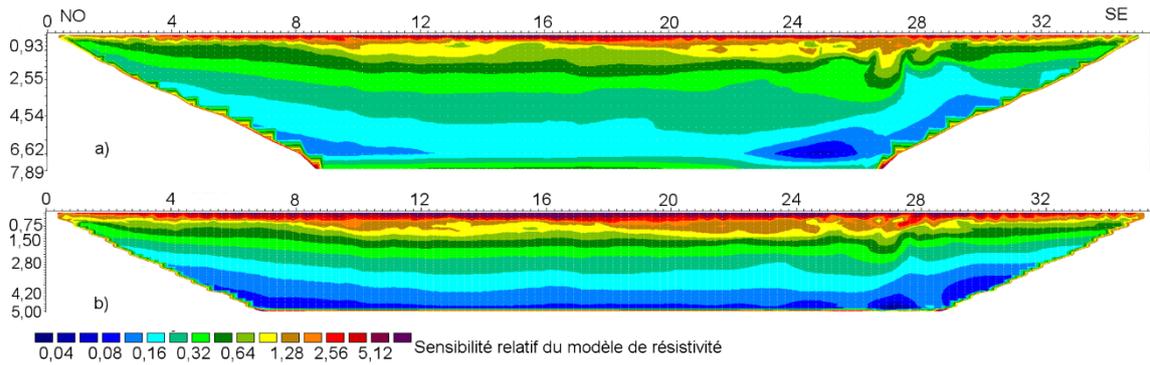


Figure 20. Comparaison de la sensibilité du modèle après inversion en utilisant les différentes organisations de blocs – a) l'épaisseur augmente en fonction de la profondeur, b) épaisseur constante de 0,175 m.

En conclusion, nous décidons de conserver une maille irrégulière afin d'avoir de meilleurs résultats d'inversion et les données de résistivité pourront être ensuite normalisées pour les traitements statistiques.

2.1.2. Condition thermique

En parallèle aux mesures géophysiques, les différents paramètres (thermique, hydraulique, climatique, etc.) qui pourraient avoir une influence sur la conservation de la cavité sont enregistrés en continu. On s'intéresse particulièrement aux données de température, pluie et débit. Le premier de ces paramètres est utilisé pour corriger les mesures de résistivité afin de s'affranchir des variations de température du sol au cours de l'année. En effet, il est connu que les valeurs mesurées de résistivité sont influencées par la température du terrain. La pluie et le débit sont, quant à eux, deux paramètres qui pourraient permettre d'interpréter les évolutions possibles de la résistivité électrique.

2.1.2.1. Modèle thermique du site de Lascaux

Actuellement, la température de l'air ainsi que celle de la roche à 0,5 et 1,0 m de profondeur sont enregistrées en permanence sur le site. Ces mesures complètent les estimations issues du modèle que Malaurent *et al.* (2006) avaient créé à partir des températures mesurées de l'air, et d'un modèle simple de conduction dans la roche ; le choix du coefficient de diffusivité avait été calé grâce aux mesures réalisées plus en profondeur dans la cavité. Lacanette *et al.* (2007) a ensuite apporté des améliorations à ce modèle, et c'est le sien qui est utilisé ici (Figure 21).

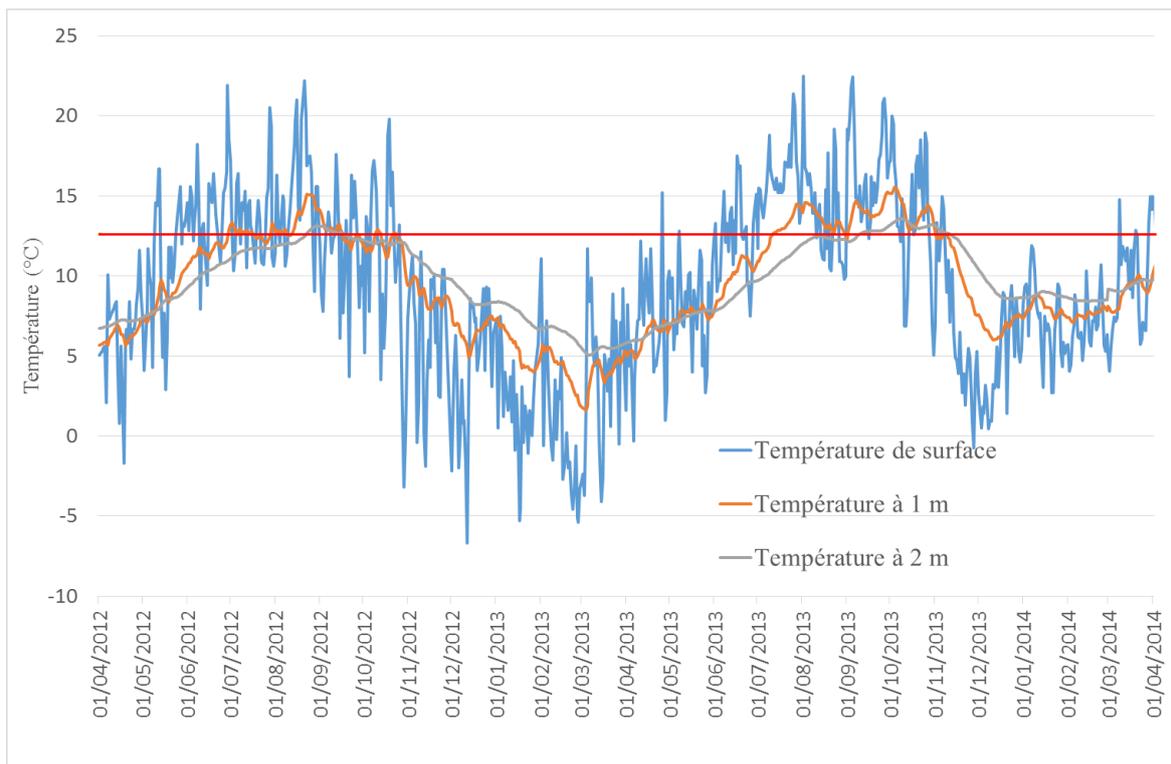


Figure 21. Modèle thermique pour la grotte de Lascaux (Lacanette et al., 2007). Les températures à 1 et 2 m sont estimées à partir de la température de surface. La courbe rouge représente 12,6 °C : la moyenne annuelle de la roche mesurée à 1 m de profondeur.

Le modèle donne une estimation des températures quotidiennes (moyenne de la journée) de la surface (0 m) du sol jusqu'à 20 m de profondeur avec un pas de 1 m ; on peut donc calculer la température moyenne annuelle du site de Lascaux (12,6 °C ligne rouge sur la figure 21).

Grâce au modèle thermique de la grotte et aux mesures à 0,5 m et 1 m de profondeur (avec un pas de 1 minute et une moyenne sur 15 minutes) effectuées sur site, on peut estimer la température en fonction de la profondeur pour chaque campagne de mesures géophysiques (Figure 22) ; le modèle thermique y est présenté en bleu. Comme il prend en compte la température moyenne journalière du 25 janvier 2013 du modèle et la température mesurée moyennée sur 15 minutes au moment des mesures, on ajuste arbitrairement une partie de la courbe en utilisant les mesures effectuées ce même jour *in situ* au moment des mesures (données de capteurs de température ; points de couleur marron). La courbe ajustée (en vert) correspond aux variations de température avec la profondeur au moment des mesures. Pour chaque jour de mesure, un modèle d'évolution de la température en fonction de la profondeur est établi de cette manière. Elle nous permet d'établir les corrections des résistivités en fonction des températures (Figure 22).

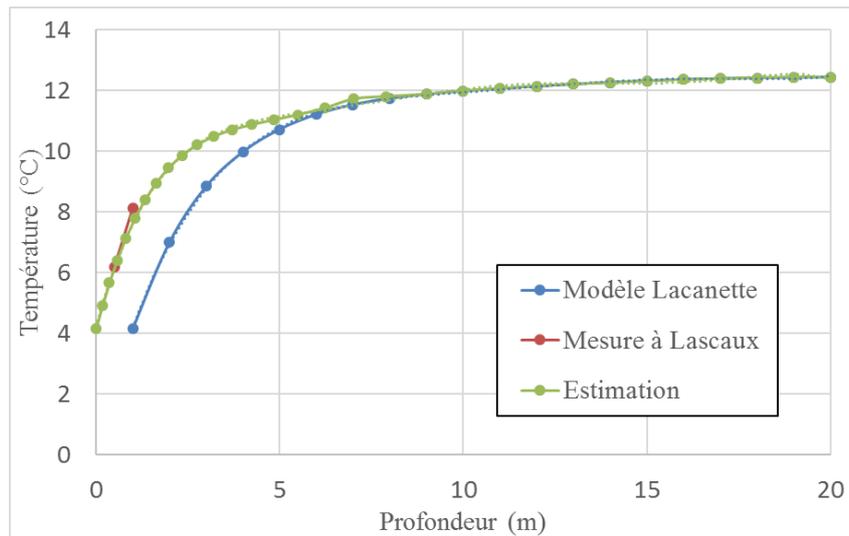


Figure 22. Exemple de l'estimation de la température en fonction de la profondeur établie pour le 25 janvier 2013.

2.1.2.2. Correction des résistivités en fonction de la température

La correction des résistivités due à la température peut être appliquée aux modèles de résistivités interprétées en utilisant les températures estimées ci-dessus.

Il y a plusieurs modèles pour réaliser une correction des températures : le modèle ratio (Campbell *et al.*, 1948), le modèle exponentiel (Corwin & Lesch, 2005), ou le modèle puissance (Besson *et al.*, 2008). On opte pour le modèle ratio (Équation 5) qui est couramment utilisé (Ma *et al.*, 2011; Genelle *et al.*, 2012) pour ce type de correction car il est réputé fiable entre -5 et 47 °C (Staff U.S. Salinity Laboratory, 1954)..

$$\rho_{T_{ref}} = \rho_T \times [1 + \delta(T - T_{ref})] \quad (\text{Équation 5})$$

Avec $\rho_{T_{ref}}$ la résistivité à la température de référence T_{ref} ;

ρ_T la résistivité vraie à une température donnée T ;

δ le coefficient de compensation de la courbe de température (en °C⁻¹) ; les géophysiciens utilisent couramment 0,025 pour ce coefficient (Hayashi, 2004; Besson *et al.*, 2008; Keller & Frischknecht, 1966). Ce modèle est valable entre -5 et 47 °C

Cette correction permet de rapporter les résistivités obtenues aux températures du jour de mesure, à la température de référence choisie (ici, 12,6 °C : la moyenne annuelle déduite des mesures en continue dans le sol à 1 m de profondeur à proximité de l'entrée de la grotte). Cette correction a été appliquée à tous les modèles après inversion ; ceci n'aura pas été le cas pour les inversions de type Time-lapse pour lesquelles seules les résistivités apparentes sont utilisées).

D'après l'enregistrement de la température à 0,5 m de profondeur, la température varie de 4,5 à 21,7 °C au cours de la période de suivi. Dans cette gamme de température, le facteur de correction $(1 + \delta(T - T_{ref}))$ varie de 0,8 à 1,2 (Figure 23). Le changement relatif des résistivités avant et après la correction est alors compris entre 0,80 (diminution de résistivité après la correction) et 1,22 (augmentation de résistivité après la correction).

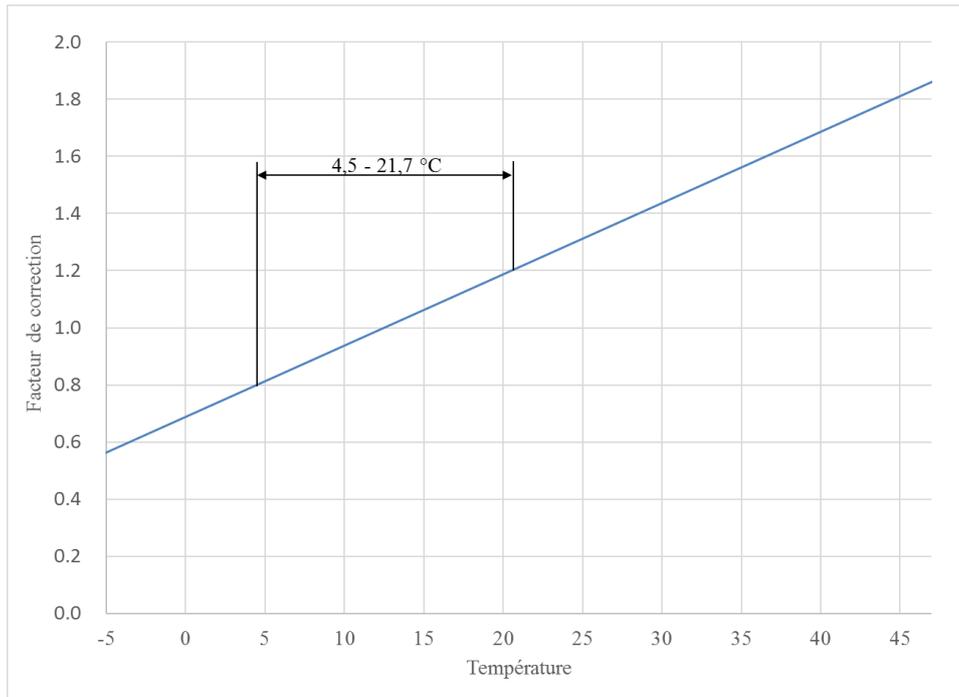


Figure 23. Facteur de correction théorique en fonction de la température

La température variant avec la profondeur, il est nécessaire de déterminer à partir de quelle profondeur la correction devient négligeable. Les cas extrêmes parmi les mesures réalisées, sont ceux du 4 mars 2013 (température minimale de 4,5 °C) et du 16 juillet 2013 (température maximale de 21,7 °C). Dans ces cas, le facteur de correction varie à 1 m entre 0,87 et 1,1 puis, au-delà de 1 m, il varie autour de 0,95 vers 3 m et tend vers 1 ensuite (Figure 24).

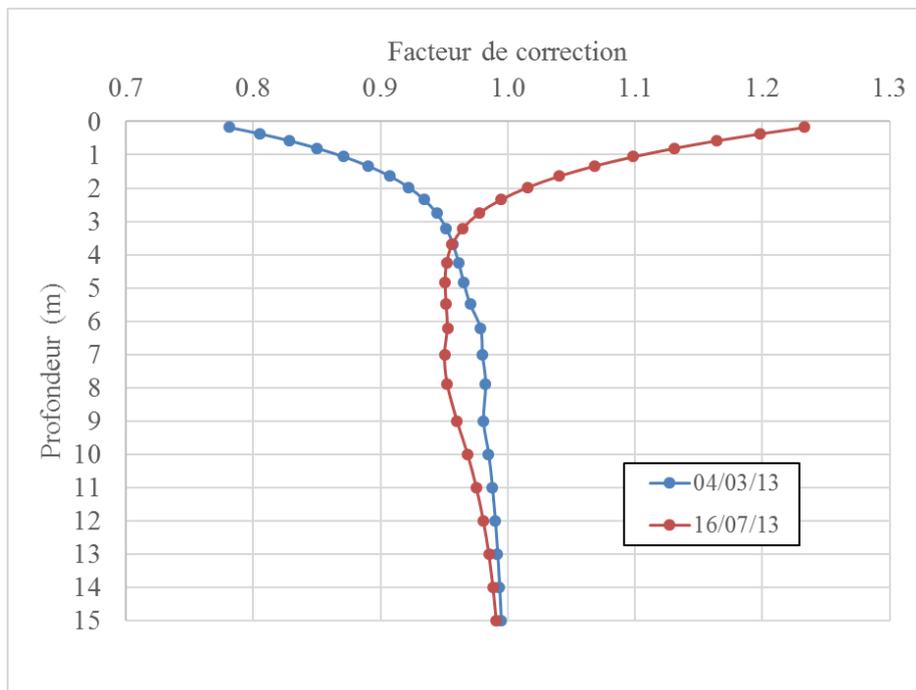


Figure 24. Facteur de correction de la température en fonction de la profondeur dans deux cas extrêmes : minimum du 4 mars 2013, maximum du 16 juillet 2013.

2.1.3. Contexte hydraulique et microclimatique

2.1.3.1. Précipitation et pluie efficace

La pluie brute de la ville de Montignac (24) est accessible sur le site de Météo France (N° de station 24291001 : XYZ - 5079 ; 20078 ; 70 ; en Lambert II étendu). Cependant, cette valeur correspond à la quantité totale de pluie tombée et non à la quantité totale d'eau infiltrée pouvant recharger l'aquifère.

Pour obtenir cette valeur de « pluie efficace » (P_{eff} , Équation 6), il faut soustraire l'évapotranspiration potentielle (ETP) à la valeur de la pluie brute relevée :

$$P_{eff} = \max(0, P_{brute} - ETP) \quad (\text{Équation 6})$$

Cette valeur, assez aisée à déterminer, est souvent utilisée pour estimer la recharge d'un aquifère.

Malheureusement, les données d'ETP ne sont fournies ni sur le site de Lascaux ni sur la commune de Montignac.

Depuis 1950, plusieurs formules ont été développées pour estimer l'évapotranspiration : Thornthwaite (1948), Turc (1961), et Penman-Monteith-FAO (1998). (Équation 7 et Équation 8). La formule de Thornthwaite est utilisée lorsqu'on ne dispose que de la température comme seule donnée climatique.

$$ETP = 1.6 \times L_d \times \left(\frac{10T}{I}\right)^a \quad (\text{Thornthwaite, 1948}) \quad (\text{Équation 7})$$

avec L_d la durée de la journée, du lever au coucher du soleil en multiples de 12 heures, T la température moyenne mensuelle de l'air (°C),

$$a = 6.75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7.71 \times 10^{-5} \times I^2 + 0.01791 \times I + 0.49239$$

et, I l'indice de chaleur annuelle.

$$ETP = 0.013 \times \left(\frac{T}{T+15}\right) \times (R_s + 50) \quad (\text{Turc, 1961}) \quad (\text{Équation 8})$$

Avec T la température moyenne journalière de l'air (°C),

R_s le rayonnement solaire journalier (en ly/jour, ou 100/4.1868 MJ/m²/jour). La température reste tout de même le facteur prédominant pour le calcul d'ETP (Lu, et al., 2005; Turc, 1961).

Ne disposant pas de valeurs d'ETP sur le site, mais ces valeurs étant connues à Gourdon (N° 46127001, XYZ -5255 ; 19722 ; 259 ; en Lambert II étendu), on compare les températures de Montignac (24) et Gourdon (24) afin de déterminer s'il est légitime d'utiliser les données d'ETP disponibles à Gourdon pour calculer la pluie efficace sur le site de Lascaux.

On observe, figure 25, que les valeurs de température à Lascaux et à Gourdon se distribuent autour de la droite de pente 1 ($y=x$), le test de l'indépendance (test de Fisher-Snedecor) (Équation 9) des valeurs de température à Gourdon et à Lascaux est rejeté de façon très hautement significative avec un coefficient de corrélation égal à 0,990, la variable $F = 9360$ et une taille d'échantillon égale à 185 ($F_{théorique}$ pour le niveau de signification 0,001 est égal à 11,2 valeur nettement inférieure à la valeur $F_{observée}$). La concordance des

températures à Gourdon et à Lascaux de 1996 à 2011 est donc acceptée. Puisque la température est le facteur dominant pour le calcul de l'ETP, on considérera donc que l'ETP mesurée à Gourdon permet d'estimer la pluie efficace sur le site de Lascaux (Équation 6).

$$\frac{r^2(N-2)}{1-r^2} \leq F_{1-\alpha}(1, N - 2) \quad (\text{Équation 9})$$

avec r le coefficient de corrélation, N la taille de l'échantillon, F la variable de Fisher-Snedecor et α le niveau de signification du test.

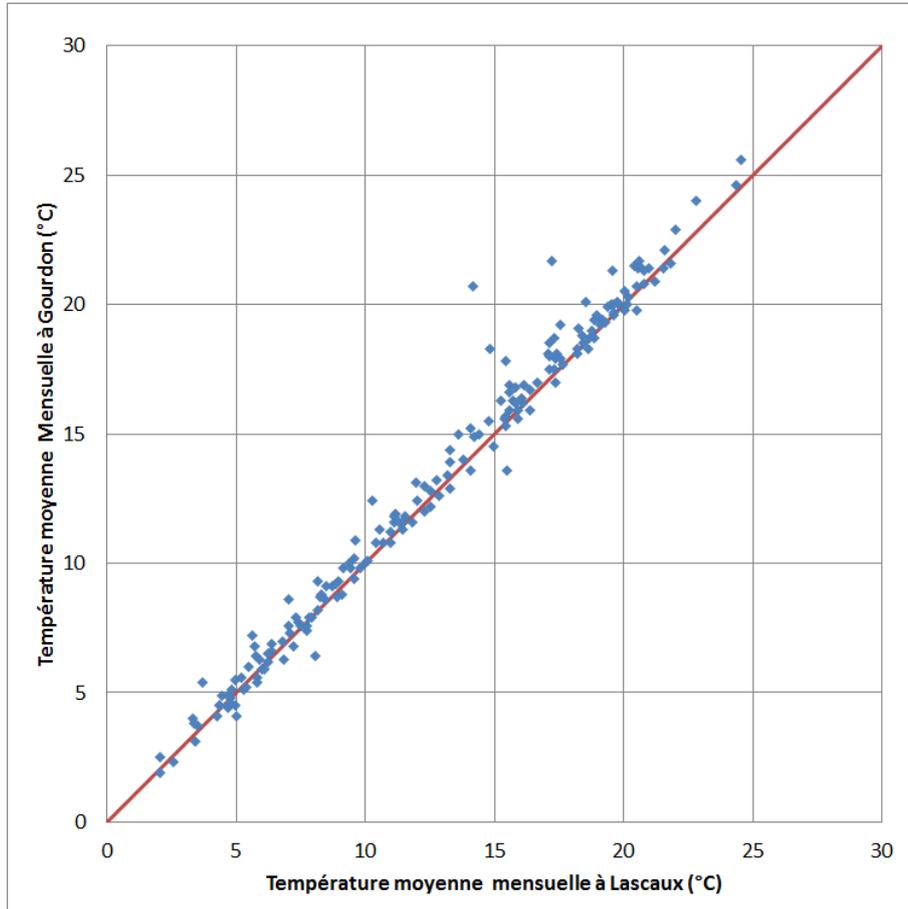


Figure 25. La corrélation des températures à Gourdon (24) et à Lascaux (1996 – 2011).

Les histogrammes de pluies brutes et de pluies efficaces journalières sont présentés en figure 26. La mise côte à côte des deux séries de données nous permet de mettre en évidence par différence l'effet de l'ETP. Il est plus fort du mois de juin au mois d'octobre 2012, du mois de mars au mois d'avril 2013, et enfin du mois de juin au mois d'août 2013. Pendant ces trois périodes les pluies efficaces sont significativement inférieures aux pluies brutes.

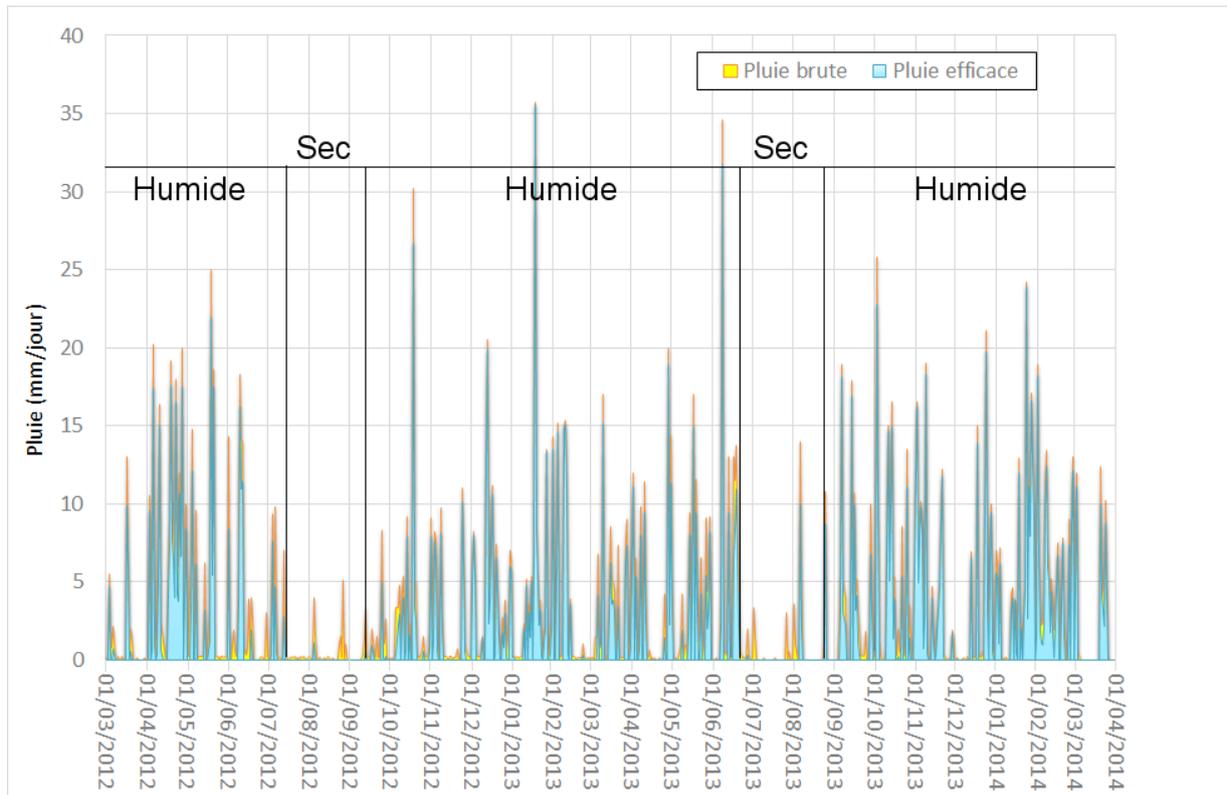


Figure 26. La pluie efficace calculée (bleu clair) et la pluie brute (jaune) avec l'identification des périodes sèches et humides.

La pluie efficace, depuis la première campagne de mesure le 6 juin 2012 jusqu'au 4 juillet 2012, est inexistante (sauf le 19 juin). Il y a reprise des précipitations jusqu'au 13 juillet 2012, puis il y a une période sans pluie de deux mois jusqu'au 25 septembre 2012. Après cette période, c'est une saison de pluie marquée, avec des périodes courtes sans pluie (souvent une semaine). On observe tout de même une absence de pluie durant trois semaines, du 15 février 2013 au 6 mars 2013. Puis la pluie reprend jusqu'au 21 juin 2013. La deuxième saison sèche commence alors et s'étend jusqu'au 6 septembre 2013 avec deux jours de pluies exceptionnelles les 6 et 25 août 2013 (orages estivaux). Ensuite la deuxième saison de pluie s'étend du 6 septembre 2013 jusqu'au 1^{er} avril 2014 (la dernière campagne de mesures géophysiques date du 28 mars 2014). Les périodes sans pluie sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3. Les périodes d'absence de pluies efficaces et leur durée

Absence de la pluie efficace			
Nombre	début	fin	Durée en jours
1	13/06/2012	03/07/2012	20
2	14/07/2012	24/09/2012	72
3	29/09/2012	05/10/2012	6
4	22/10/2012	30/10/2012	8
5	11/11/2012	24/11/2012	13
6	04/01/2013	11/01/2013	7
7	15/02/2013	06/03/2013	19
8	13/04/2013	25/04/2013	12
9	03/05/2013	13/05/2013	10
10	31/05/2013	07/06/2013	7
11	22/06/2013	05/09/2013	75
12	21/09/2013	27/09/2013	6
13	05/10/2013	11/10/2013	6
14	23/11/2013	12/12/2013	19
15	19/12/2013	23/12/2013	4
16	04/01/2013	09/01/2013	5
17	04/03/2014	01/04/2014	28

Puisque on dispose des données de la pluie brute et d'ETP depuis 42 ans (1962-2014) ; on peut en effectuer une analyse variographique (Figure 27-a) afin d'étudier le comportement temporel de la pluie cumulée sur une journée. Le variogramme montre une augmentation brutale au début de la courbe puis une forme périodique de 365 jours ; la variance est égale à 25,1 mm². L'ajustement d'un variogramme théorique au variogramme expérimental se fait par la somme d'un effet de pépite de 23 mm² et d'un modèle exponentiel (Équation 10) avec une portée de 30 jours et une variance de 2,1 mm². Le variogramme de la pluie brute met en évidence une périodicité annuelle ce qui n'est pas surprenant et une corrélation temporelle d'une trentaine de jours.

$$\gamma (h) = a \times \left(1 - e^{-\frac{h}{b}}\right) \quad \text{(Équation 10)}$$

Où $\gamma(h)$ est en mm² et h en jour, avec a= 2,1 mm² et b = 30 jours.

La variogramme de la pluie efficace pour la même période (1962-2014) est également calculé (Figure 27-b). La courbe montre une forme similaire à celle de la pluie brute mais la

partie périodique est plus nette et la variance est légèrement inférieure ($21,1 \text{ mm}^2$) en raison du rôle joué par la température dans l'évapotranspiration. Le modèle théorique ajusté est la somme d'un effet de pépité de 19 mm^2 et une structure exponentielle (Équation 10) ayant une portée de 30 jours et une variance $2,1 \text{ mm}^2$.

Le fait que le modèle exponentiel présente dans les deux cas la même portée et la même variance ($2,1 \text{ mm}^2$) montre que la pluie efficace se comporte comme la pluie brute mais avec une variabilité légèrement inférieure qui se traduit par un effet de pépité moins marqué.

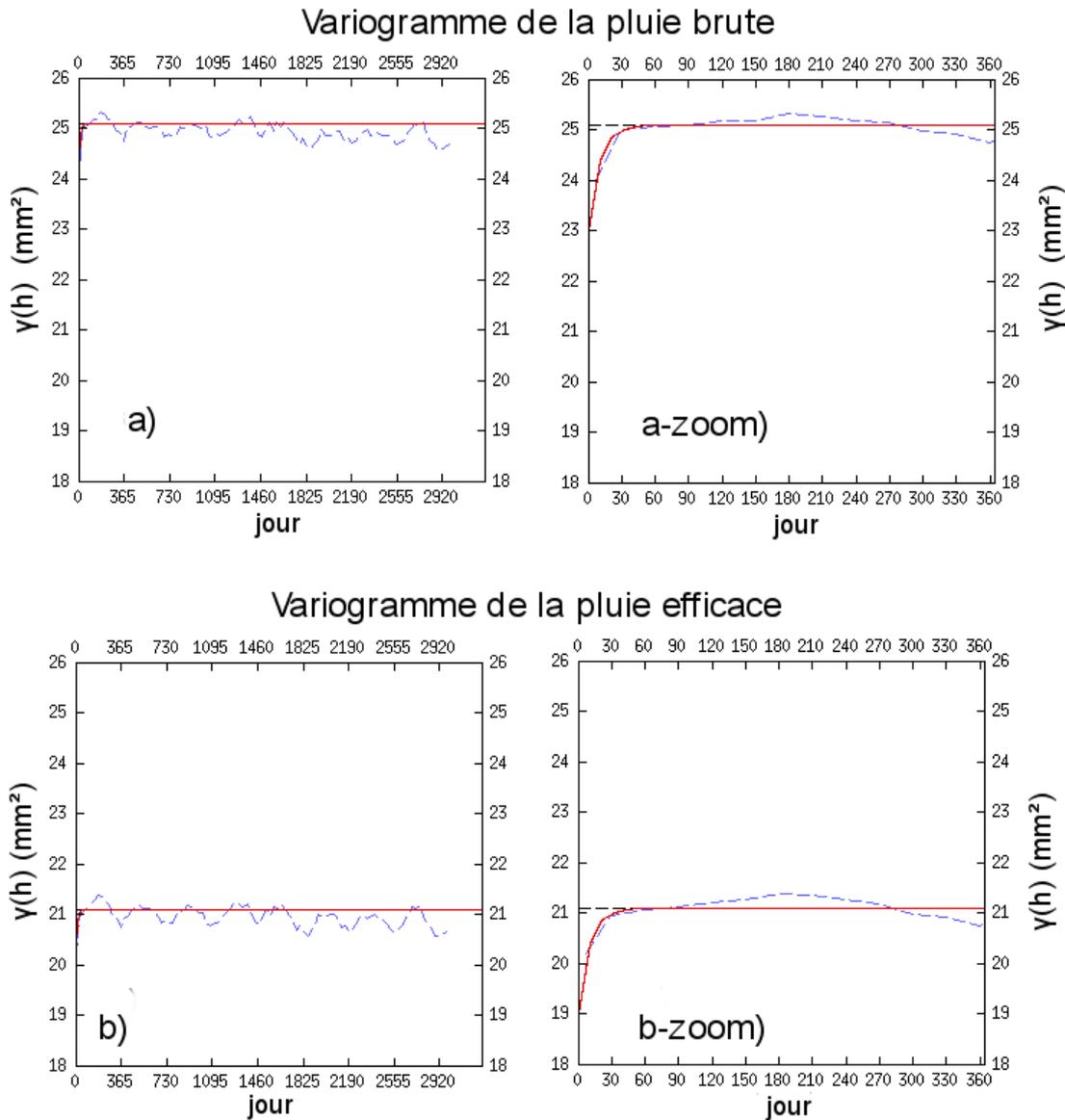


Figure 27. Variogramme de la pluie brute (a et a-zoom) et de la pluie efficace (b et b-zoom) pour la période 1962-2014 (a), agrandissement sur 365 jours (b).

2.1.3.2. Enregistrement du débit

À l'entrée de la grotte, dans le compartiment 3 du sas1 (Figure 6), on observe un écoulement d'eau au toit du calcaire. Le débit de cet écoulement est mesuré et enregistré. (Figure 28).

On remarque que la courbe des débits (en m^3 par jour) est moins bruitée avant le 1 octobre

2012. En effet, à partir de cette date, le capteur mesurant la hauteur d'eau dans la cuve de récupération des eaux d'infiltration a été remplacé afin d'avoir une meilleure sensibilité de mesure. De plus, le pas entre deux enregistrements a été modifié, passant de dix minutes à une minute. Les données de débit sont alors plus sensibles. On note aussi une absence de données pour les deux périodes des 24-26 avril 2013 et 28-30 juin 2013 en raison de pannes d'électricité sur le site.

Les deux séries de données (débit et pluie efficace, Figure 28) sont de forme périodique, mais elles n'ont pas forcément une période semblable. Les mesures géophysiques ont commencé le 6 juin 2012 à la fin d'une période d'écoulement. Le débit est resté faible (quasiment nul) jusqu'au 18 janvier 2013. La reprise des écoulements a alors été effective jusqu'au 3 juillet 2013. On a ensuite une période sans débit ou avec un faible débit jusqu'au 31 octobre 2013. A cette date, les écoulements recommencent et vont ensuite diminuer le 14 mars 2014, et être négligeables du 14 mars au 1^{er} août 2014.

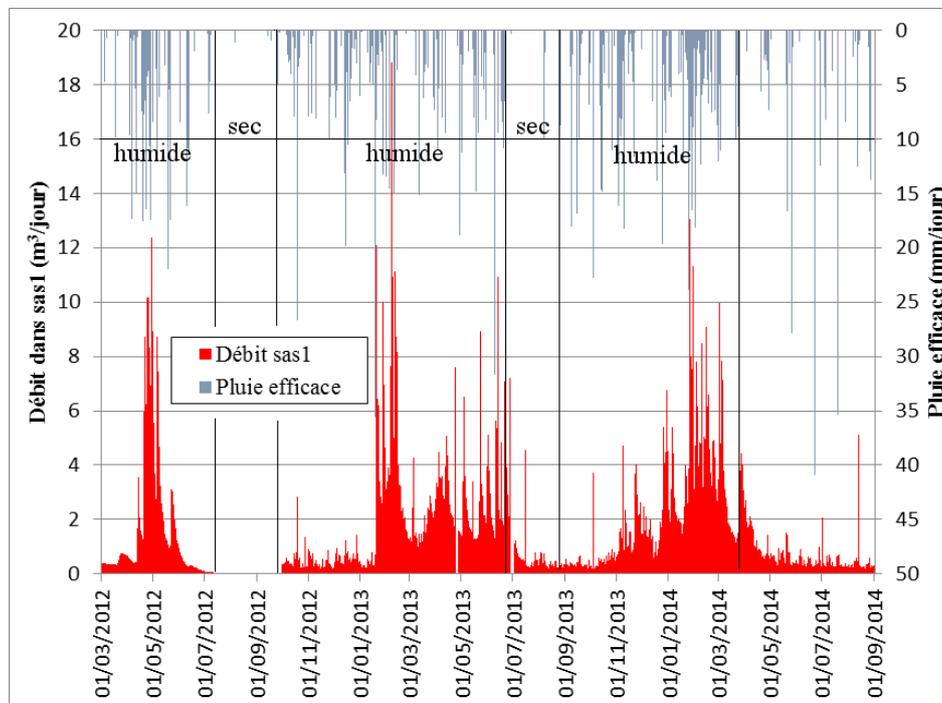


Figure 28. Représentation du débit dans le sas1 (axe principal) et de la pluie efficace estimée (axe secondaire). Les périodes indicatives humide/sec selon la pluie efficace sont indiqués par les traits noirs.

A l'instar de ce qui a été fait pour la pluie, on calcule le variogramme du débit journalier pour les années 1996-2014 (Figure 29). Cette courbe peut être séparée en deux parties : le début présente une rapide croissance et rejoint ensuite la variance globale $2,2 (m^3/j)^2$, le reste de la courbe a une forme périodique d'amplitude variable. La période pour la deuxième partie est de 365 jours et désigne donc la période annuelle de la variation du débit. La somme d'un effet de pépité de $0,8 (m^3/j)^2$ et un modèle théorique exponentiel de portée 60 jours et de variance $1,4 (m^3/j)^2$ s'ajuste bien au variogramme expérimental). On peut donc considérer que le débit est auto-corrélé pendant 60 jours.

$$\gamma(h) = a \times (1 - e^{-\frac{h}{b}}) \quad (\text{Équation 11})$$

Où $\gamma(h)$ est en $(\text{m}^3/\text{j})^2$ et h en jour, avec $a = 1,4 (\text{m}^3/\text{j})^2$ et $b = 60$ jours

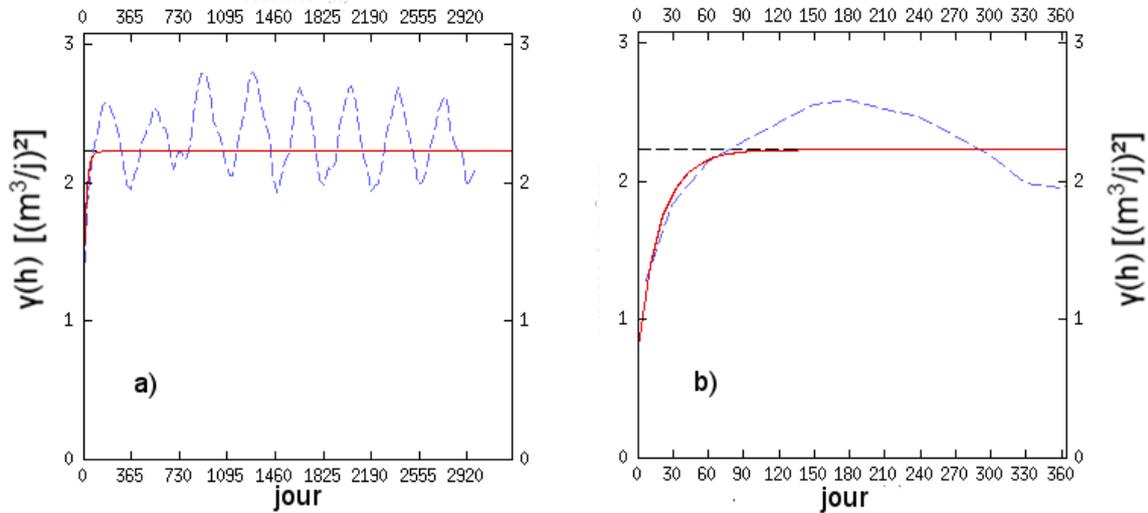


Figure 29. Le variogramme du débit de 1996-2014 (a) ; zoom sur 365 jours (b)

Néanmoins, pendant la période du suivi temporel de TRE, le variogramme du débit est différent (Figure 30). Tout d'abord, la variance est plus élevée, elle est de $4,6 (\text{m}^3/\text{j})^2$ au lieu de $2,2 (\text{m}^3/\text{j})^2$ dans le cas précédent. Cette augmentation importante est imputable à la méthode de calcul du débit à partir des données brutes du capteur – avant le changement de capteur (1^{er} octobre 2012), les pics brutaux du débit journalier ont été filtrés alors que les mesures après cette date ne sont pas filtrées. Cela a pour conséquence de lisser les valeurs du débit avant le 1^{er} octobre 2012, donc la variance tenant compte de cette mesure du débit est plus faible. Cependant, le calcul de la variance est aussi liée au nombre de points, la différence entre les deux calculs de variogramme est aussi influencée par la taille de l'échantillon. Dans le cas du calcul pendant 8 ans (1996-2014), la variance diminue avec un échantillon beaucoup plus grand. On remarque ensuite, sur le zoom du variogramme (Figure 30), que l'on peut identifier un palier à 60 jours mais également un palier secondaire à 18 jours avant d'atteindre la variance totale puis un palier à 7 jours.

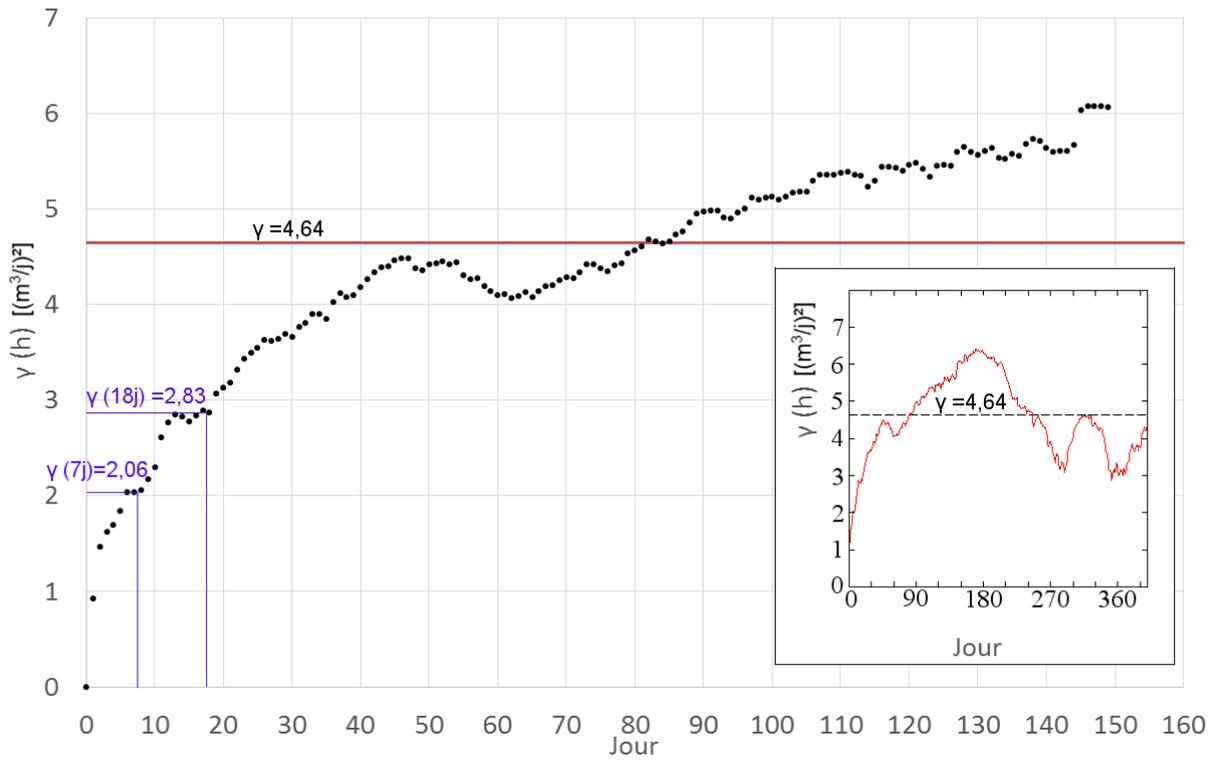


Figure 30. Le variogramme du débit pendant la période du suivi (2012-2014) avec un agrandissement de 0 à 160 jours.

En conclusion, les portées des deux phénomènes (pluie et débit) étant respectivement de trente et soixante jours, on présente dans le tableau 4 les pluies efficaces, les débits cumulés au cours de périodes de 60 jours précédant les jours des mesures et les volumes moyens respectivement pendant les 18 jours avant une mesure et les 7 jours succédant une mesure. La première campagne de mesure a été effectuée pendant 2 jours (le 06/06/2012 et le 07/06/2012), avec le profil I réalisé pendant le premier jour et le profil II le jour suivant.

Tableau 4. Les données relatives aux jours de mesure.

Date du suivi	Q_j^1 (m ³ /j)	$V (-60j)^2$ (m ³)	$\bar{V} (-18j)^3$ (m ³)	$\bar{V} (+7j)^4$ (m ³)	P_{eff}^5 (mm)	$P_{eff} (-30j)^6$ (mm)	$P_{brut} (-30j)^7$ (mm)
06/06/2012	0,5	199,4	1,4	0,3	0,0	63,8	90,2
07/06/2012	0,4	199,4	1,3	0,3	0,0	63,8	89,8
04/10/2012	0,4	1,8	0,1	0,4	0,0	6,7	26,0
24/10/2012	0,2	14,3	0,7	0,6	0,0	60,1	92,5
29/11/2012	0,2	30,5	0,3	0,5	0,0	50,9	67,2
12/12/2012	0,3	32,4	0,4	0,8	0,0	36,5	44,4
25/01/2013	2,8	63,5	2,3	4,7	1,1	90,7	104,9
06/02/2013	7,6	113,3	5,0	9,4	0,0	124,7	136,5
22/02/2013	1,7	198,3	5,9	1,5	0,0	100,9	111,9
04/03/2013	2,4	207,2	2,1	1,7	0,0	79,1	86,9
03/04/2013	3,2	195,4	2,3	3,4	0,0	64,8	94,2
16/05/2013	1,3	157,6	2,4	2,6	0,0	48,5	71,7
19/06/2013	1,8	165,4	3,3	4,0	10,9	104,6	147,6
02/07/2013	1,1	178,7	3,5	0,8	0,0	78,0	111,1
16/07/2013	0,3	153,3	0,9	0,3	0,0	34,7	59,4
05/09/2013	0,3	29,2	0,3	0,3	0,0	20,7	33,6
27/09/2013	0,2	23,0	0,4	0,9	0,0	62,3	81,9
23/10/2013	0,5	26,7	0,4	0,7	0,0	93,7	120,4
13/11/2013	1,0	44,6	1,3	1,2	0,0	124,5	148,5
28/11/2013	2,6	68,1	1,8	1,7	0,0	115,3	127,8
16/12/2013	1,2	84,4	1,5	1,3	0,0	36,7	42,1
10/01/2014	2,1	133,3	3,5	1,8	0,0	77,4	90,1
28/03/2014	3,8	274,2	1,9	2,6	0,0	73,2	87,2

¹ Q_j : débit journalier ;

² $V (-60j)$: volumes cumulés pendant 60 jours avant une mesure ;

³ $\bar{V} (-18j)$: moyenne du volume écoulé pendant les 18 jours avant une mesure ;

⁴ $\bar{V} (+7j)$: moyenne du volume écoulé pendant les 7 jours succédant une mesure ;

⁵ P_{eff} : pluie efficace ;

⁶ $P_{eff} (-30j)$: pluies efficaces cumulées pendant 30 jours avant une mesure ;

⁷ $P_{brut} (-30j)$: pluies brutes cumulées pendant 30 jours.

Sur la figure 31, la moyenne mobile de la pluie et des volumes d'eau écoulé en tenant compte des portées déduites de l'analyse variographique (cumul des données au cours des trente, respectivement soixante jours précédents). Les courbes des moyennes mobiles sont naturellement plus lisses mais plus lisibles, en particulier pour la pluie efficace. Les pics du débit journalier sont écrêtés par le calcul de la moyenne. Le déphasage entre la reprise de la pluie efficace et du débit est remarquable, alors que la fin d'une période pluviale et de celle du débit qui s'en suit sont proches. En indiquant les limites des grandes périodes humides ou sèches en termes de pluie efficace (Figure 31), on observe nettement un déphasage supérieur à deux mois entre la reprise de la pluie efficace et le débit.

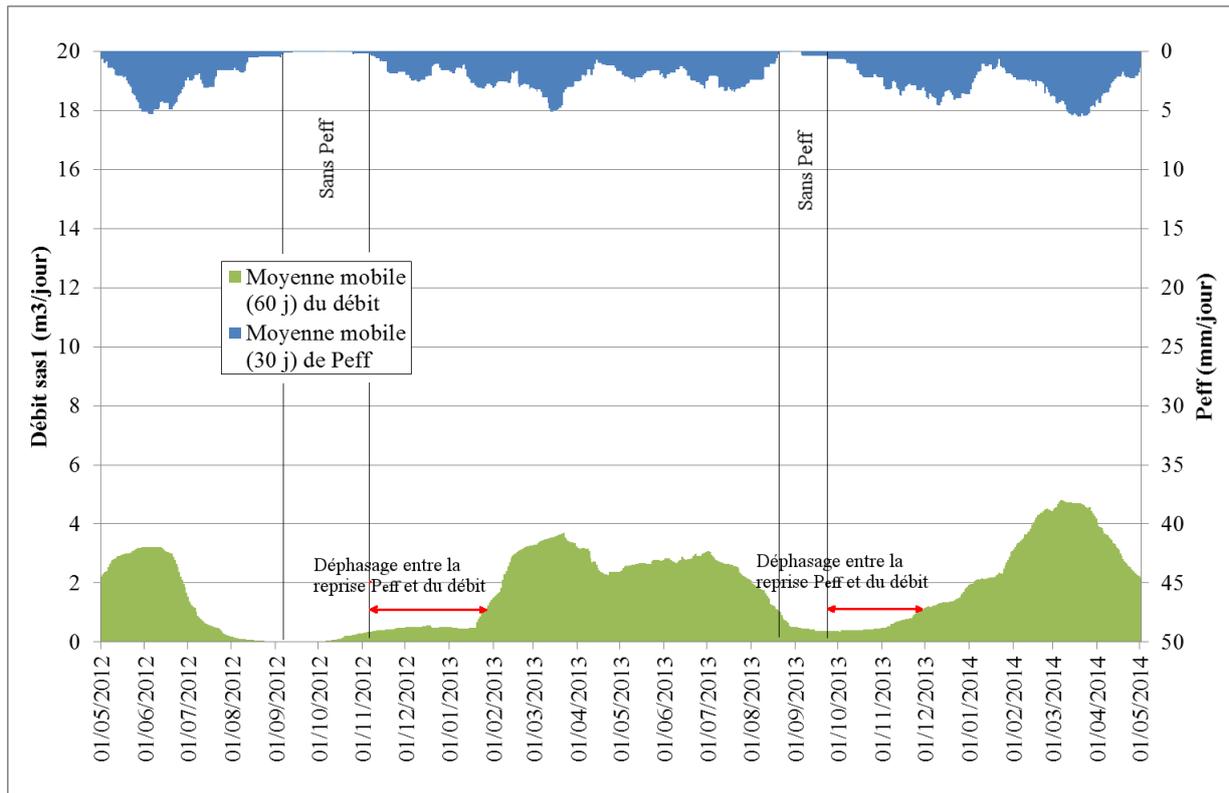


Figure 31. Présentation de la moyenne mobile du volume moyen pendant 60 jours (axe principale) et de la pluie efficace pendant 30 jours (axe secondaire).

2.2. Méthodes appliquées pour l'étude de l'évolution des résistivités au cours du temps

Après que les mesures et les données disponibles sur le site aient été exposées dans la partie précédente, ce chapitre consiste à introduire les méthodes utilisées pour analyser l'évolution de résistivité. En plus de l'inversion traditionnelle « time-lapse » sous Res2Dinv, on propose également une stratégie de traitement statistique.

2.2.1. Time-lapse inversion : inversion de mesures faites à intervalle de temps irrégulier

Tout d'abord, il est important de préciser qu'il est impossible de laisser les électrodes en place en permanence pour des raisons de préservation et de sécurité du site. Aussi, des jalons ont été mis en place pour nous permettre de bien repérer les différents profils d'une fois sur l'autre. L'activité humaine étant réduite sur le site, seules de légères différences de position inférieure à un centimètre ont pu apparaître d'une campagne à l'autre.

2.2.1.1. Théorie de la méthode dite « Time-lapse inversion »

Dans le cadre d'une étude d'un suivi temporel, la méthode de traitement couramment utilisée est l'inversion dite type « Time-Lapse » développée sous Res2Dinv (Figure 32).

Ce mode d'inversion consiste à calculer les changements de résistivité en tenant compte de mesures obtenues à des intervalles de temps connus. Le suivi temporel consiste donc à étudier la variation de la résistivité du sol en fonction du temps en comparant les modèles de résistivité obtenus à un modèle de référence. La méthode la plus fréquemment utilisée est la méthode des moindres carrés avec une régularisation de Tikhonov d'ordre 1 (régularité des gradients) ou 2 (régularité de la matrice hessienne) (Loke *et al.*, 2003). La technique d'inversion proposée par Kim *et al.* (2009) est intégrée dans la version Res2dinv utilisée (3.59.119). D'après la comparaison des résultats de modélisation et des données réelles, cette technique a permis, par exemple, de reproduire les changements temporels (pendant 75 heures) relevés suite à l'infiltration de précipitations sur un site de décharge (Loke *et al.*, 2014).

L'écriture formelle de la méthode d'inversion est donnée (Équation 12) :

$$[J_i^T R_d J_i + (\lambda_i W^T R_m W + \alpha_i M^T R_t M)] \Delta r_i = J_i^T R_d g_i - (\lambda_i W^T R_m W + \alpha_i M^T R_t M) r_{i-1} \quad (\text{Équation 12})$$

où :

α_i le facteur d'amortissement temporel ;

J la matrice jacobienne ;

λ_i le vecteur du facteur d'amortissement ;

g_i le vecteur des erreurs des données ;

r_{i-1} le vecteur des paramètres du modèle lors de l'itération précédente (en logarithme des valeurs du modèle des résistivités) ;

Δr_i la variation des paramètres du modèle, $r_i = r_{i-1} + \Delta r_i$;

W les filtres de rugosité dans les directions (x, y et z) ;

R_d , R_m et R_t les matrices de pondération des données (d), modèles (m) et du temps (t) ;

M la matrice des différences appliquées aux modèles temporels.

La différence majeure entre l'inversion d'un suivi temporel et l'inversion dite indépendante (*i.e.* inversion de chaque panneau indépendamment des autres) est l'introduction du facteur temps R_t et de la matrice des différences M. Ces paramètres sont utilisés pour prendre en compte la variabilité temporelle des résistivités apparentes.

Des exemples d'application assez voisins des nôtres peuvent être cités. Une application a montré la détermination de la géométrie d'une doline d'un plateau du Quercy (Valois, 2011) et a prouvé l'efficacité du suivi temporel pour y détecter des remplissages non consolidés et conducteurs. La variation de résistivité déduite par trois mesures de TRE séparés de plusieurs mois (juillet 2009, avril 2010 et mars 2011) a permis de mettre en évidence les états hydriques de la proche-surface entre les périodes de mesures. Un autre exemple de détection de processus hydrologiques dans les zones humides à riparienne pendant une année a montré la possibilité d'identifier l'épaisseur et la structure interne dans les remplissages ainsi que les variations temporelles de résistivité dues au cycle biogéochimique causé par l'activité microbienne (Chambers *et al.*, 2014).

2.2.1.2. Paramétrage

Les paramètres et le maillage utilisés pour les inversions dites indépendantes (*cf.* 2.1.1.2) sont conservés, cependant, il est nécessaire de préciser les paramètres spécifiques (facteur d'amortissement temporel, contrainte temporelle, etc.) lors d'une inversion d'un suivi temporel.

On conserve tout d'abord la norme L1 pour pouvoir comparer les modèles de résistivités inversés de façon « indépendante » et par suivi temporel. Ensuite, on fait une inversion simultanée en prenant la différence des données par rapport à une mesure de référence : on a choisi celle du 4 octobre 2012 car les résistivités à ce moment-là sont très élevées comme on le verra au paragraphe 3.1, mais aussi, à partir de cette date, les intervalles de temps entre les mesures sont plus réguliers – environ deux semaines entre deux mesures, alors qu'il s'était écoulé trois mois entre la première mesure du 6 juin 2012 et celle du 4 octobre 2012. Finalement, on fixe le poids de la contrainte temporelle à 0,1 (Loke *et al.*, 2014).

Un exemple de traitement réalisé avec des données obtenues avec le dispositif pôle-dipôle est présenté sur la figure 32. Le modèle de référence est celui du 4 octobre 2012, ce qui tient compte de la contrainte temporelle. C'est la raison pour laquelle ce modèle de référence n'est pas tout à fait identique que le modèle de résistivité à celui du 4 octobre 2012 obtenu par l'inversion indépendante. A partir de cet exemple, les variations des résistivités au cours du temps (4 mois) sont mises en évidence ; ainsi, dans l'exemple présenté (Figure 32), on constate une variation importante dans le sens de la baisse des résistivités dans la partie peu profonde (0 à 2,98 m maximum) et dans le sens d'une augmentation en profondeur. Ces deux domaines sont séparés par une zone de plus faible variation de résistivité (comprises entre -20 et +20%). Ces observations partielles seront reprises et complétées dans le

paragraphe 3.1.

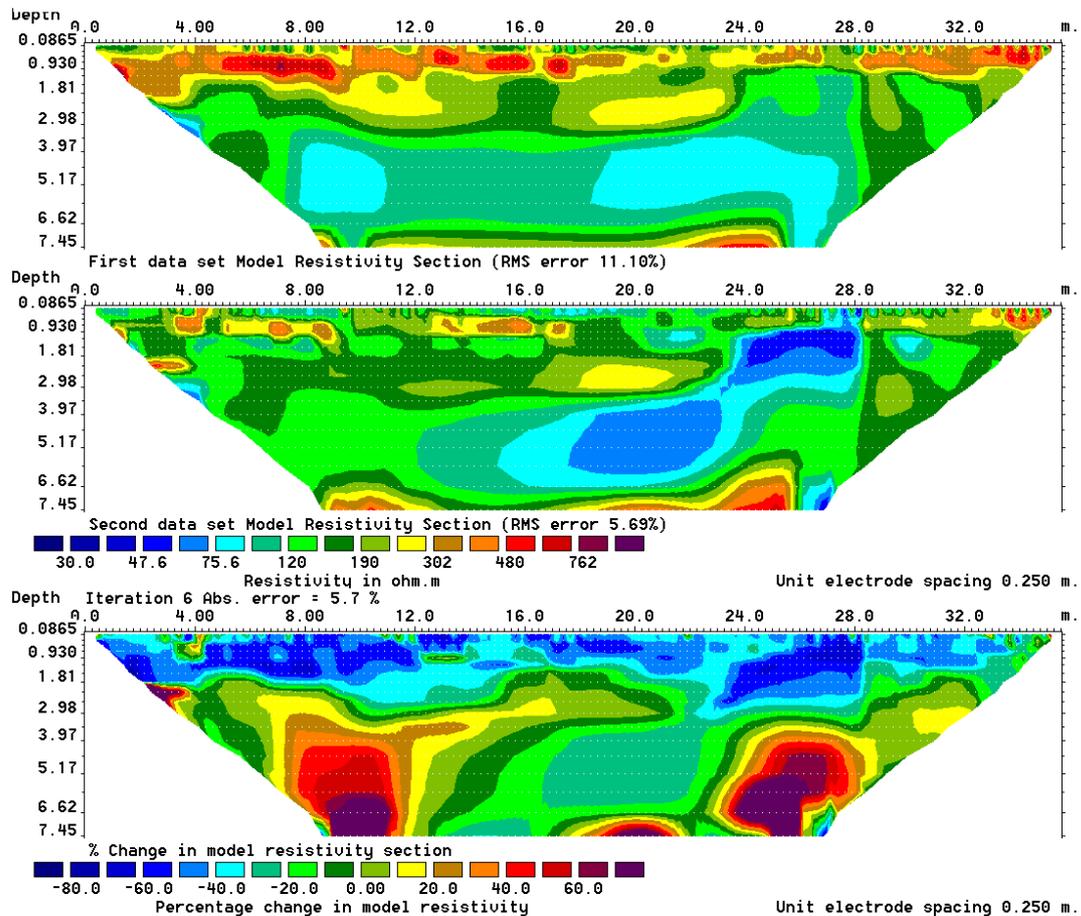


Figure 32. Exemple d'une inversion « Time-Lapse » de données issues d'un dispositif pôle-dipôle sous Res2Dinv, le premier modèle est du 4 octobre 2012 et le deuxième est du 25 janvier 2013, alors que le troisième montre la variation de résistivité avec une échelle linéaire comprise entre -80% et 60 %.

Le résultat d'une inversion de type « Time-lapse » se présente sous forme de différence de pourcentage de résistivité entre les différentes campagnes de mesure. Les mesures étant réparties durant différentes saisons de l'année, les influences de la température ne sont pas négligeables. Cependant, on ne peut pas appliquer de correction de température (cf. 2.1.2.2) car elles s'appliquent théoriquement aux résistivités vraies et pas aux résistivités apparentes.

2.2.2. Approche statistique

La méthode proposée par Loke *et al.* (2014) est, dans la plupart des études, appliquée à des mesures répétées au cours de périodes plus courtes que la nôtre et, de plus, avec des pas de temps plus réguliers (Clément *et al.*, 2009; Loke *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2014). On se propose donc d'utiliser une autre solution consistant à réaliser une classification hiérarchique sur l'ensemble des résistivités inversées et une analyse en composantes principales (Xu *et al.*, 2014), en considérant chaque date de mesure comme « variable » et les résistivités dans chaque bloc du modèle comme « individu ». Cette méthode avait déjà été mise en œuvre pour les études de couverture de déchets (Genelle *et al.*, 2012; Genelle, 2012).

2.2.2.1. Analyse en composantes principales (ACP)

C'est une méthode statistique multi-variable qui consiste à transformer une série de variables corrélées entre elles, en nouvelles variables indépendantes les unes des autres. Ces nouvelles variables sont des « composantes principales ». Cette méthode sert à diminuer le nombre de variables, pour trouver de nouveaux axes indépendants qui expliquent au mieux la variabilité des données. Dans notre cas, elle permet d'abord de réduire le nombre de variables à analyser.

On présente, par souci de simplicité, le principe à partir des résistivités normalisées (2.1.1.3) (ρ_{DCR}) bien que dans la partie 3.3, les analyses statistiques seront conduites sur les log10 des résistivités normalisées.

On considère que les données sont sous forme d'une matrice $N \times p$, dans notre cas, c'est 2080×21 correspondant aux 21 mesures de TRE, chaque mesure comportant 2080 individus (ρ_{DCR}).

$$M = \begin{bmatrix} \rho_{DCR_{1,1}} & \dots & \rho_{DCR_{1,p}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{DCR_{N,1}} & \dots & \rho_{DCR_{N,p}} \end{bmatrix}$$

a) Inertie d'un échantillon

Puisque les données sont centrées, le centre de gravité est donc le point de coordonnées (0) dans un espace à p dimensions (p variables). On peut donc calculer l'inertie de chaque individu (M_i) GM_i^2 (Figure 33):

$$GM_i^2 = \sum_{j=1}^p \rho_{DCR_{i,j}}^2$$

Cette valeur nous permet, une fois rapportée à l'inertie totale, de réduire p colonnes en une colonne afin de faire un premier filtre sur ρ_{DCR} . Les fortes valeurs de ρ_{DCR} sont facilement identifiées grâce à ce calcul. Ces valeurs fortes ont des poids importants pour les analyses suivantes. Ils influencent fortement les résultats s'ils sont conservés tels quels.

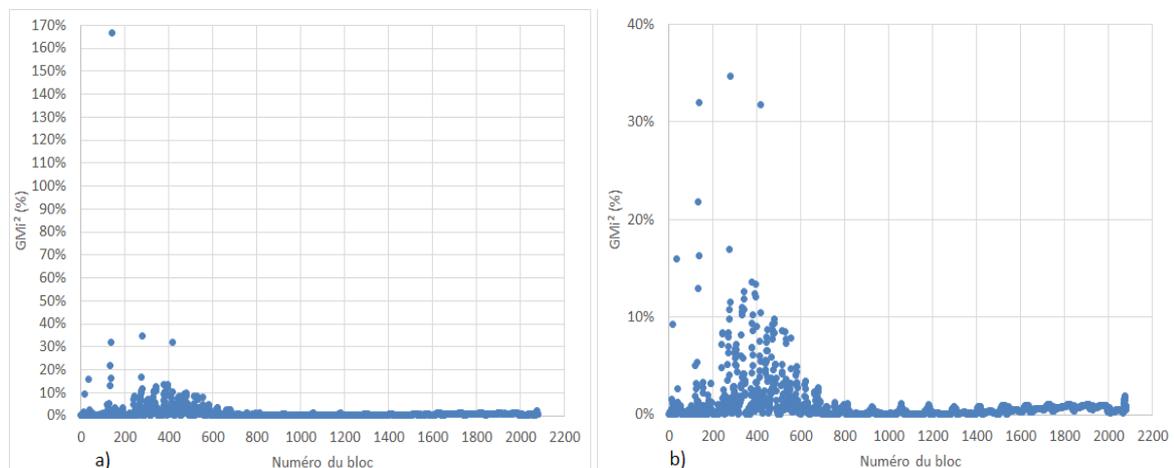


Figure 33. Inertie des résistivités (DCR) en fonction du numéro de bloc, a) toutes les inerties (%) ; b) les valeurs d'inertie (%) en excluant du point qui a une valeur d'inertie très forte.

Dans notre cas, on décidera de filtrer les individus (les blocs) dont l'inertie rapportée à l'inertie totale est supérieure à 2% (190 points sur 2080 dans le cas présenté sur la figure 33 correspondant à l'étude des résistivités vraies normalisées). Une cartographie peut être réalisée afin de voir leur position (Figure 34).

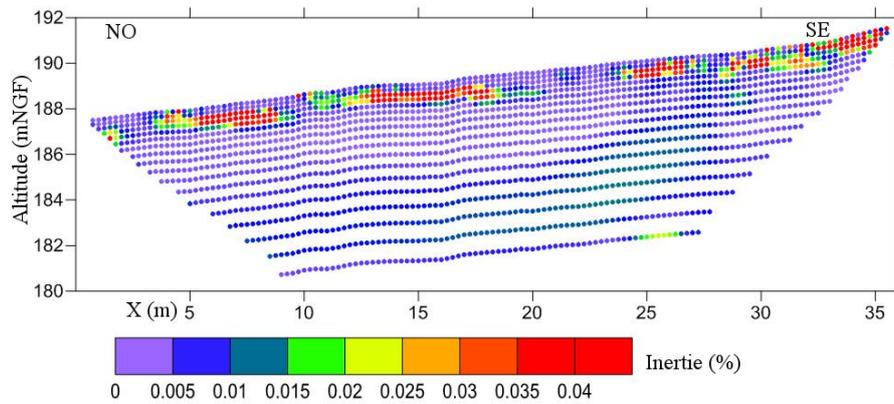


Figure 34. Cartographie de l'inertie de ρ_{DCR} , avec l'échelle de couleur de 0% à 4%

En comparant avec les modèles de résistivités (cf. 3.1), on se rend compte que deux types de blocs sont présents : ceux qui correspondent à des résistivités très fortes (vers l'extrémité du profil, en surface entre 32 et 35 m au sud-est) et ceux qui sont situés de façon discontinue aux environs de 1 m de profondeur.

Quand les données qui ont une forte inertie sont filtrées, la moyenne $\bar{\rho}_{us}$ et l'écart-type σ de l'ensemble des données sont modifiés. On doit donc calculer à nouveau ρ_{DCR} (cf. 2.1.1.3).

b) Résultats d'ACP sur les données centrées réduites filtrées

Une fois que l'on a filtré les données centrées réduites ρ_{DCR} selon le critère de l'inertie inférieure à 2% (GM_i^2 rapporté à l'inertie totale <2%), on peut donc réaliser l'ACP sur les valeurs de ρ_{DCR} filtrées. Pour cela on calcule successivement la matrice des corrélations des variables, on la diagonalise et obtient les valeurs propres. On calcule ensuite les coordonnées des variables initiales sur les axes factoriels (Annexe II.A) permettant de tracer les cercles des corrélations (Figure 36) et les coordonnées des individus sur les axes des composantes principales (Figure 37).

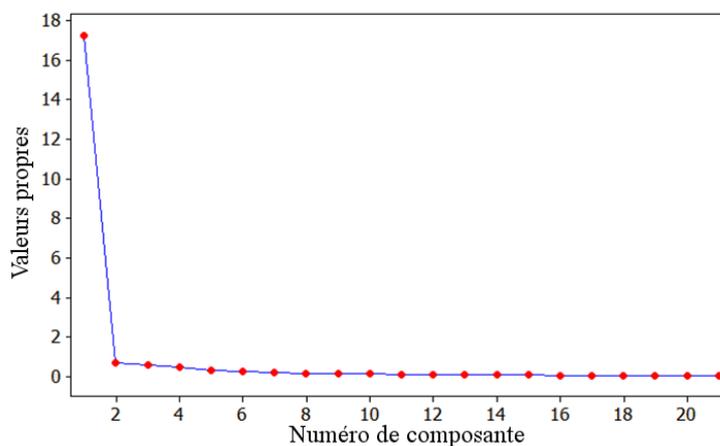


Figure 35. Valeurs propres en fonction du numéro de composante

L'objectif initial est de réduire le nombre de variables si les valeurs propres obtenues par la diagonalisation de la matrice des corrélations le permettent. Pour cela, on a besoin de fixer le nombre d'axes à retenir dans le nouveau système de projection en se fondant sur la décroissance des valeurs propres issues de la diagonalisation (Figure 35). D'après le critère du coude, on choisit, dans l'exemple présenté ici, de ne retenir dans cette présentation que deux axes, car au-delà de ces deux premières valeurs propres (Figure 35) absorbant 91+3% de la variance totale égale à 21, on n'observe que de très faibles valeurs des valeurs propres. On va donc projeter les anciennes variables (les dates) sur les nouveaux axes F1 et F2.

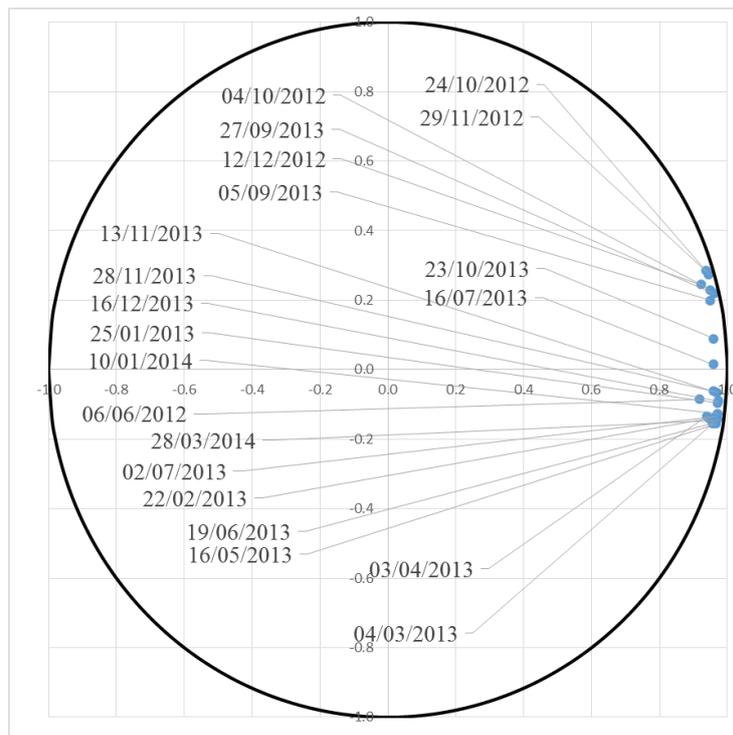


Figure 36. Cercle des corrélations (axes factoriels F1-91% et F2-3%)

Les variables sont toutes positivement corrélées à l'axe F1 mais avec des coefficients de corrélation relativement faibles (environ 0,2). Différemment, les variables sont dispersées sur l'axe F2. L'axe F2 oppose donc les variables négativement corrélées aux variables positivement corrélées à cet axe. Ce cercle des corrélations sert à interpréter le graphe représentant les individus présentés après l'introduction de la classification hiérarchique ascendante (CHA) (Figure 37). Ces deux dernières figures sont présentées à titre d'exemple sans être interprétées, elles le seront après avoir été obtenues avec les logarithmes de base 10 des résistivités normalisées dans la partie 3.3.

2.2.2.2. Classification hiérarchique ascendante (CHA)

C'est une méthode statistique multi-variable qui permet, à partir d'un ensemble d'individus (ρ_{us}), de réunir les individus dans un certain nombre de classes selon leur degré de ressemblance ou de proximité au titre d'un critère de mesure de distance (ici la distance choisie sera la distance euclidienne) et d'une méthode d'agrégation (ici la méthode de Ward). Dans notre cas, on rappelle que les individus à réunir sont les blocs des modèles et que les variables sont les dates des mesures : on effectue donc cette analyse afin de regrouper les blocs qui ont tendance à se comporter du point de vue de leur résistivité électrique de la même

façon au cours du temps.

Dans un système euclidien, on calcule d'abord les distances entre deux points afin d'obtenir une matrice de distance (D), puis on rassemble les points dont la distance est proche entre eux. En pratique, on utilise la méthode de Ward pour calculer cette distance :

$$d_{Ward}(G_i, G_j) = \frac{p_i p_j}{p_i + p_j} d^2(g_i, g_j)$$

soient $d(G_i, G_j)$, la distance de Ward de deux groupes

La méthode de Ward consiste à regrouper les classes de façon à ce que l'augmentation de l'inertie interclasse soit maximum, ou ce qui revient au même d'après le théorème de Huygens (Gleason, 1957), de façon à ce que l'augmentation de l'inertie intra-classe soit minimum.

On peut d'abord effectuer la CHA sur les variables (dates). L'objectif est de regrouper les variables liées entre elles afin de construire des classes de variables aussi homogènes que possible.

La classification CHA est le plus souvent proposée pour réunir les individus (blocs des modèles de résistivité). La CHA des individus nous permet de rassembler les blocs de résistivités qui ont les mêmes tendances de variation temporelle et de former les différentes classes des individus. À l'aide de cette classification, on peut réduire le nombre de données à analyser, par exemple, on peut faire une analyse tenant compte de 10 au lieu de 2080 points. Dans notre cas d'étude, la CHA par individu autorise l'identification des zones de résistivités considérées comme homogènes. Un exemple est donné pour présenter les individus sur le plan F1/F2 en fonction de leur appartenance aux différentes classes issues de la CHA (Figure 37), et l'interprétation sera donnée dans le chapitre suivant (cf. 3.3).

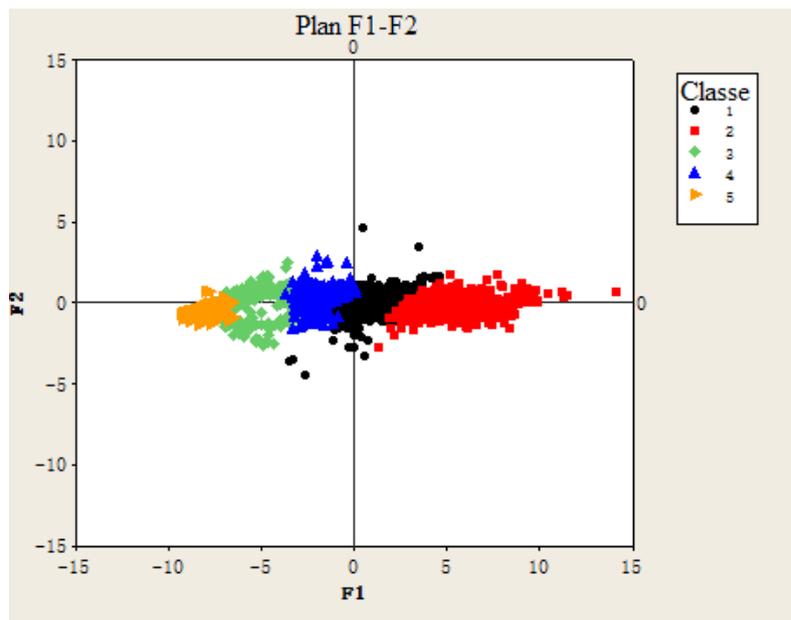


Figure 37. Individus regroupés par classes projetés sur le plan des axes F1 (91%)/F2 (3%) après ACP.

2.2.3. Arbre de décision

Dans le cadre de cette thèse, le traitement des profils est long et détaillé. Une procédure d'analyse est mise à la disposition du lecteur (Figure 38).

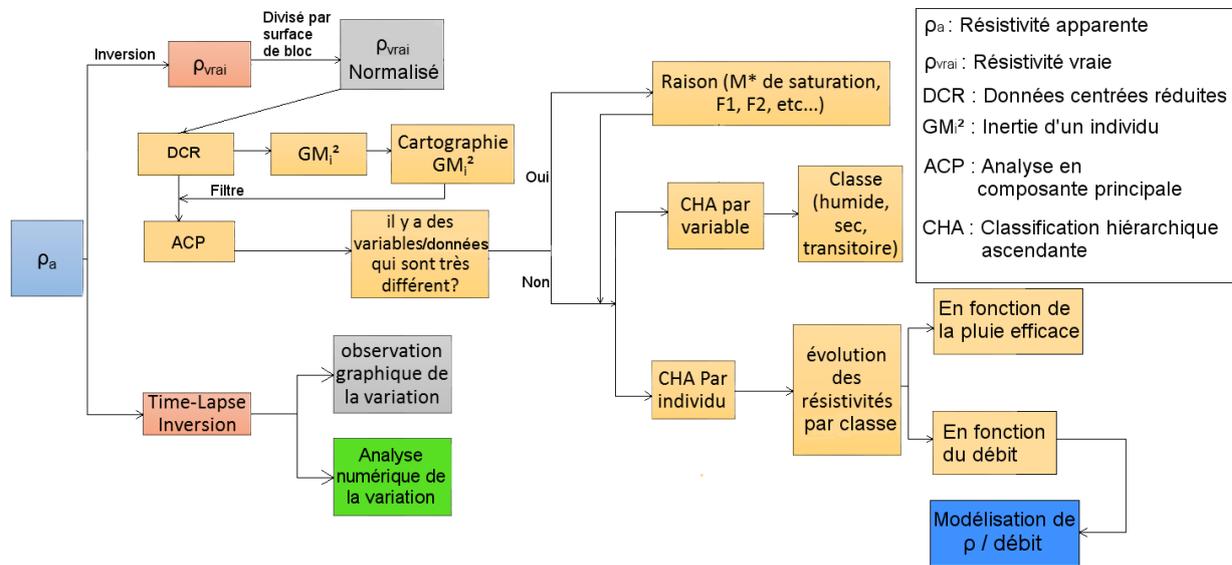


Figure 38. Arbre de décision pour le traitement des données de TRE 2D.

L'analyse d'un profil de TRE se fera ci-dessous en suivant la stratégie établie et décrite selon l'arbre de décision de la figure 38, l'objectif étant, à partir des mesures de TRE, de prédire ou de suivre l'évolution du débit dans la grotte en fonction de la variation de résistivité.

Chapitre 3

Analyses détaillées et interprétation du profil I-50

À partir des résistivités apparentes obtenues pour le profil I-50 (Figure 17), on a effectué trois types de traitement qui sont exposés dans cette partie :

- modèle de résistivité par inversion,
- modèle de changement de résistivité par « time-lapse » inversion et,
- analyse par traitements statistiques essentiellement ACP et CHA des données de résistivités interprétées « vraies ».

3.1. Modèles de résistivité

On a vingt et une mesures pour le profil I-50 du 6 juin 2012 au 28 mars 2014 (*cf.* 2.1). Les données de résistivité apparente nous permettent ici de reproduire le modèle de résistivité interprétées « vraies ». On présente ci-dessous les modèles de résistivité obtenus par inversion en utilisant la norme L1 (Figure 39). Un modèle obtenu pour un écartement des électrodes de 1 m s'étendant plus vers le sud-est (Figure 40) et qui sera étudié au paragraphe 4.1 est également donné afin d'y situer d'ores et déjà les différentes zones de résistivité qui seront identifiées sur le premier profil.

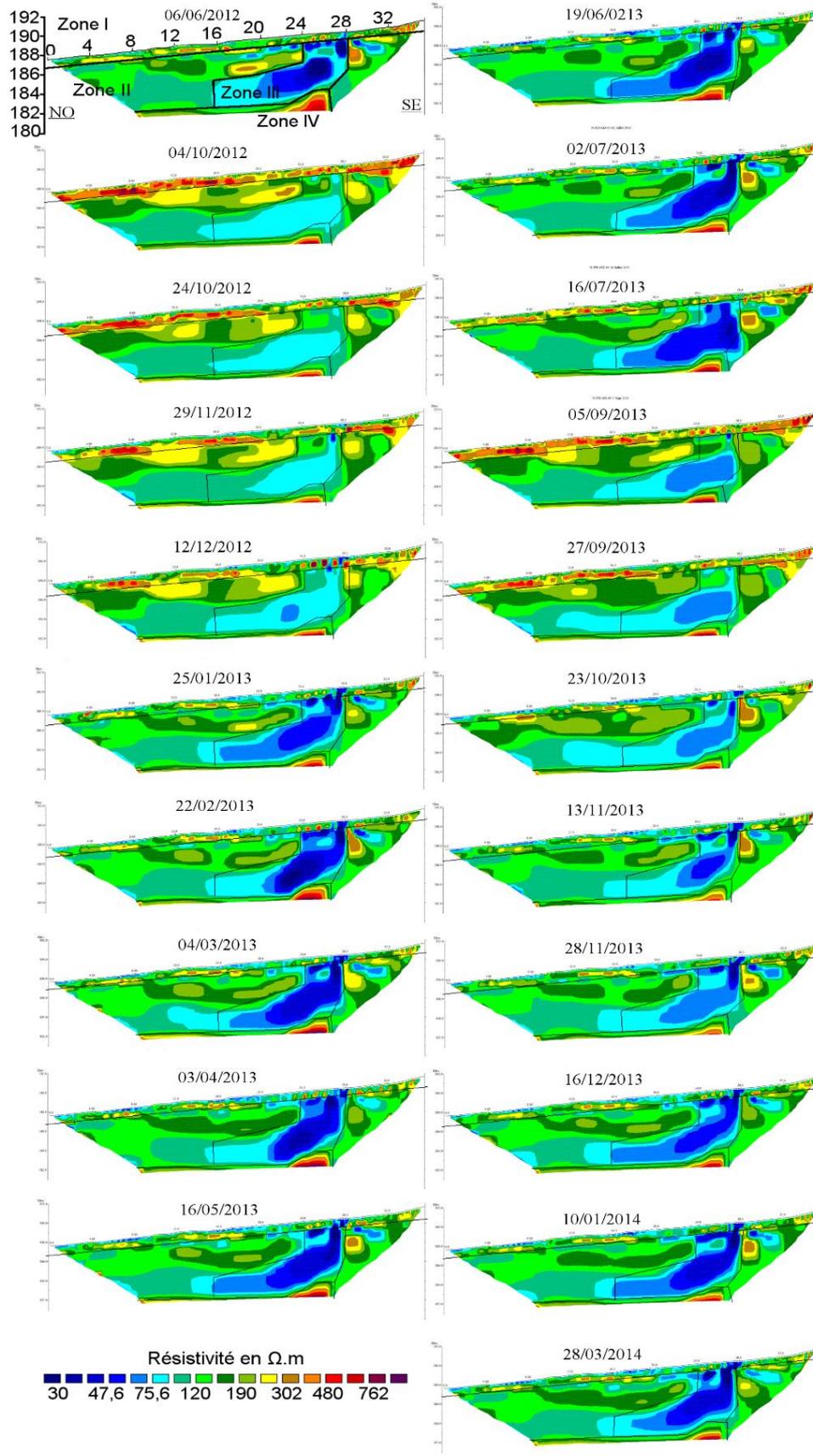


Figure 39. Modèles de résistivité inversés sous norme L1 avec les quatre zones de résistivité marquées manuellement. Les erreurs absolues après six itérations sont comprises entre 0,2% et 0,6%.

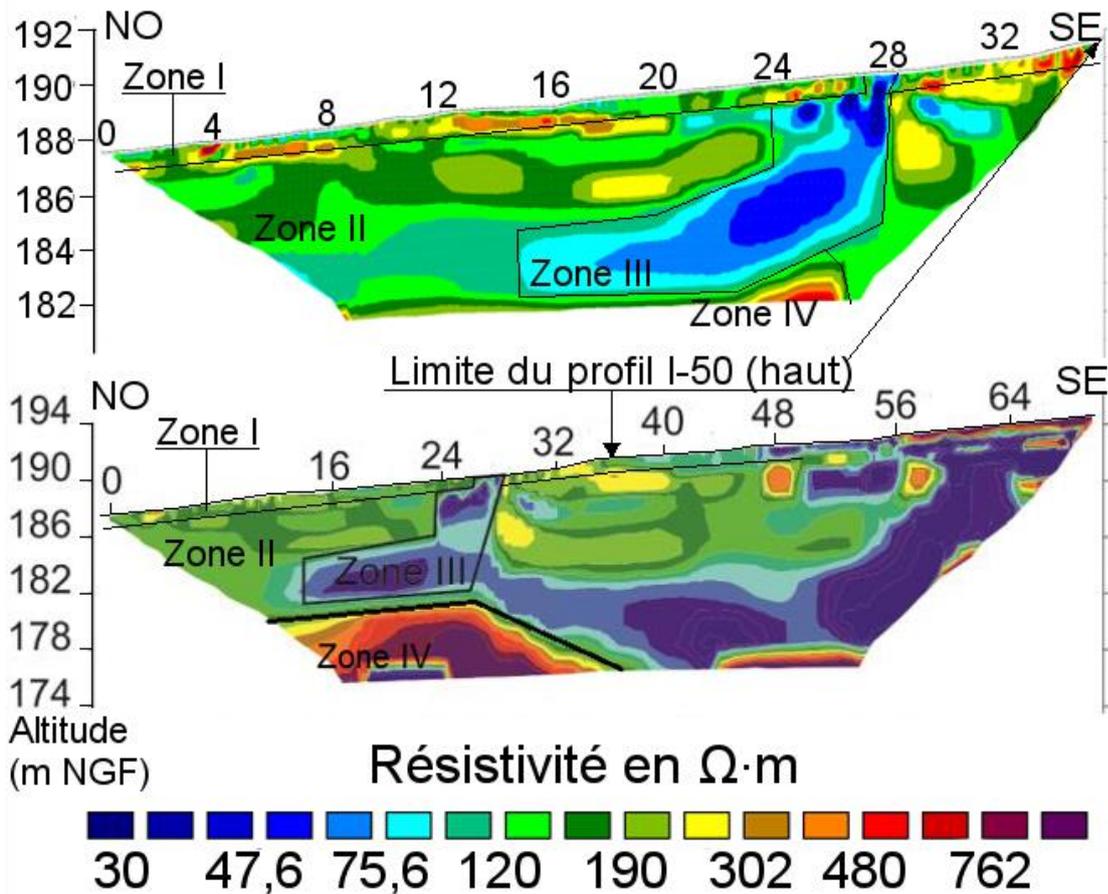


Figure 40. Délimitation des quatre zones (profil I-50, figure du haut) avec leur emplacement sur le modèle du profil I-100 du 25 janvier 2013, montrant l'existence de la zone IV (figure du bas).

3.1.1. Description qualitative des modèles de résistivité

Sur les deux premiers mètres (Zone I), on observe tout d'abord un domaine résistant ayant atteint $750 \Omega \cdot m$ le 4 octobre 2012, il correspond à des calcaires reconnus à l'affleurement. Puis, à partir de 2 m de profondeur (Zone II), on passe à des valeurs centrées autour de $179 \Omega \cdot m$ (moyenne des résistivités), valeurs qui évoluent peu dans le temps. La résistivité électrique augmente à nouveau à partir de 6 m de profondeur (182 m NGF sur le profil I-50, Zone IV) ; ce qui se constate également sur le modèle du profil I-100 (Figure 40). On peut supposer qu'il s'agit du passage de l'épikarst à la zone d'infiltration, plus compacte mais fracturée selon la terminologie de Mangin (1975).

La zone III, localisée entre les abscisses 16 et 28 m se marque par une résistivité inférieure à $300 \Omega \cdot m$ (entre 30 et $300 \Omega \cdot m$, mais avec très peu de fortes valeurs). C'est dans cette zone que les variations sont les plus évidentes en fonction du temps. On observe en effet une faible résistivité sur le modèle du 6 juin 2012, puis une croissance de résistivité pour chacun des quatre modèles suivants (du 4 octobre 2012 à 12 décembre 2012). Le modèle du 25 janvier 2013 montre une diminution de résistivité au centre de la zone III. En outre, du 22 février 2013 au 16 juillet 2013, la zone III est semblable à elle-même et conductrice. On observe à nouveau une augmentation de la résistivité du 5 septembre 2013 au 23 octobre 2013, puis une diminution du 13 novembre 2013 au 28 mars 2014. On peut d'ores et déjà observer que, lorsqu'il y a écoulement dans la grotte (Tableau 4) et qu'il y a eu des

précipitations au cours des mois précédant les mesures de TRE, les résistivités sont faibles. Par contre, les résistivités sont plus élevées lorsque la quantité de pluie efficace cumulée au cours des 30 jours précédant les mesures était faible et qu'il n'y avait pas, non plus, d'écoulement dans la grotte.

On constate donc que les faibles résistivités de la zone III correspondent à des périodes humides avec écoulement dans la grotte et les fortes résistivités à des périodes plutôt sèches sans écoulement dans la grotte. Au cours du suivi, nous avons eu (Figure 26) un premier cycle de variation, depuis la fin d'une période humide (13 juin 2012), passant par une sécheresse (du 13 juin 2012 au 24 novembre 2012) puis par une autre période humide (du 11 janvier 2013 au 21 juin 2013) ; ensuite un deuxième cycle a suivi avec une période sèche (du 22 juin 2013 au 5 septembre 2013), puis une période plus humide (du 06 septembre 2013 au 4 mars 2014).

3.1.2. Approche statistique concernant une zone probable de recharge

Le seul paramètre pouvant expliquer ces variations de résistivité de la zone III, la structure du terrain restant inchangée, est la teneur en eau et comme les variations de résistivité dans cette zone semblent étroitement liées au changement de débit dans la grotte (Figure 41), il est possible qu'il s'agisse d'une zone participant à l'alimentation de l'eau de la nappe temporaire du sas1 (Figure 6). Pour vérifier l'hypothèse selon laquelle, la zone d'alimentation de l'eau du sas1 proviendrait de la zone III, on étudie la variation de résistivité en fonction des saisons.

Afin de bien mettre en évidence l'évolution des résistivités de la zone III, la distribution des fréquences cumulées des valeurs de résistivité par date et par blocs de cette zone est présentée en prenant quatre dates comme exemple (6 juin 2012, 4 octobre 2012, 29 novembre 2012 et 25 janvier 2013), simulant un cycle « humide – sec – humide » (Figure 42). Les valeurs médianes sont égales à 67 $\Omega.m$ en juin, 97 $\Omega.m$ en octobre, 95 $\Omega.m$ en novembre, et 67 $\Omega.m$ en janvier. Elles montrent la tendance des résistivités de cette zone à varier en fonction de la période de mesure. Les courbes de distribution des résistivités ne se rejoignent que pour une fréquence cumulée relative supérieure à 97% qui correspond à 150 $\Omega.m$, soit une valeur assimilable à celle de la résistivité du calcaire de la zone II (médiane à 160 $\Omega.m$ et moyenne à 179 $\Omega.m$).

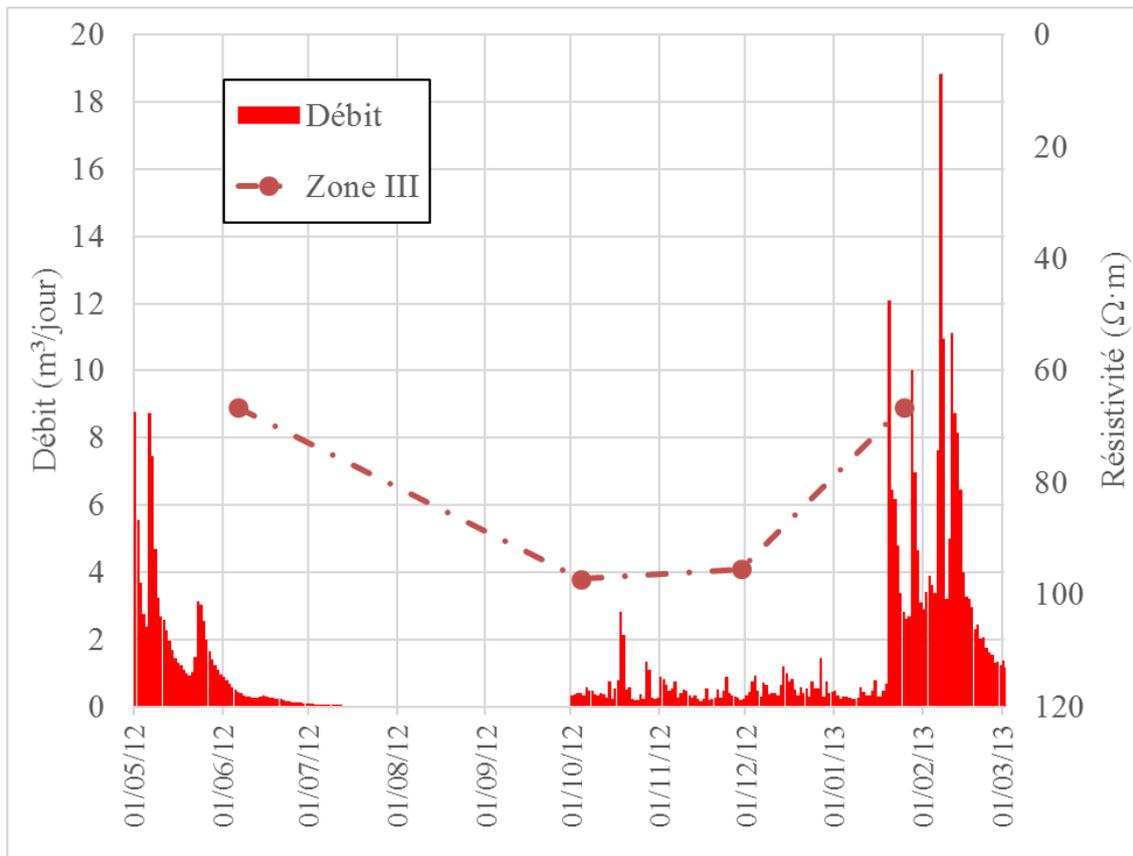


Figure 41. Changement du débit dans le sas1 (axe principal) et médianes des résistivités de la zone III pour les quatre exemples (axe secondaire).

Ces courbes permettent donc de mettre en évidence la variabilité de cette zone en fonction du temps lorsque les résistivités sont inférieures à 150 $\Omega \cdot m$. Les distributions des résistivités obtenues aux mois de juin 2012 et janvier 2013 situées à gauche de celles des mois d'octobre et novembre 2012 montrent un étalement plus important avec une queue de distribution marquée à gauche (pour les faibles valeurs). De plus, les courbes des 4 octobre 2012 et 29 novembre 2012 ont des coefficients d'aplatissement (Tableau 5) plus faibles que les deux autres courbes, ce qui traduit bien que pendant une période sèche, la distribution de résistivité est plus resserrée autour de la moyenne alors que pendant une période humide, les valeurs de résistivité sont plus dispersées. Il est également intéressant de remarquer que tout en ayant la même médiane les deux courbes situées à gauche (6 juin 2012 et 25 janvier 2013) n'ont pas la même forme selon qu'elles représentent une fin de période humide ou un début de période humide : la courbe des fréquences cumulées du 25 janvier 2013 est plus resserrée autour de sa médiane que celle du 06 juin 2012. On peut penser également que les blocs qui ont une résistivité inférieure à la médiane du 25 janvier 2013 n'ont pas eu le temps de s'humidifier car on est en début de période humide alors qu'en fin de période humide ils montrent une résistivité plus faible. Les blocs qui ont une valeur de résistivité inférieure à la médiane se trouvent globalement au centre de la zone III. On peut penser que les blocs au centre de la zone III sont alimentés par l'eau contenue dans les blocs situés autour alors que ces derniers deviendraient plus résistants après avoir participé à l'alimentation du centre.

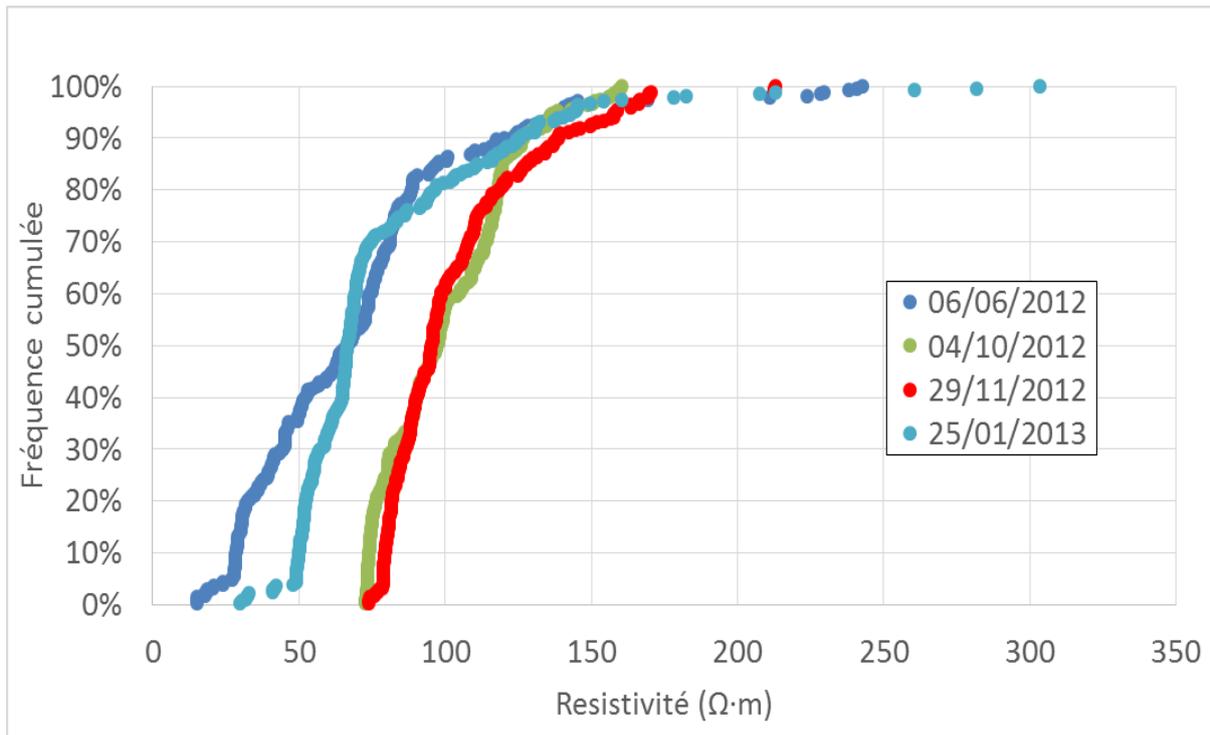


Figure 42. Distributions des fréquences cumulées des résistivités dans la zone III des quatre exemples.

Cependant, de très fortes valeurs de résistivités allant jusqu'à 309 $\Omega \cdot m$ sont présentées (Figure 43) dans le cas de mesure du 06 juin 2012 et du 25 janvier 2013. Ces blocs se trouvent à gauche et droite de la partie peu profonde et un peu plus en profondeur, connectés à la zone IV. Leur présence influence fortement le calcul de la moyenne ce qui justifie l'usage des valeurs médianes dans la présentation. On rappelle que la zone III est manuellement délimitée ; on verra que ces blocs seront exclus de cette zone par la méthode de la classification hiérarchique (cf. 3.3.3).

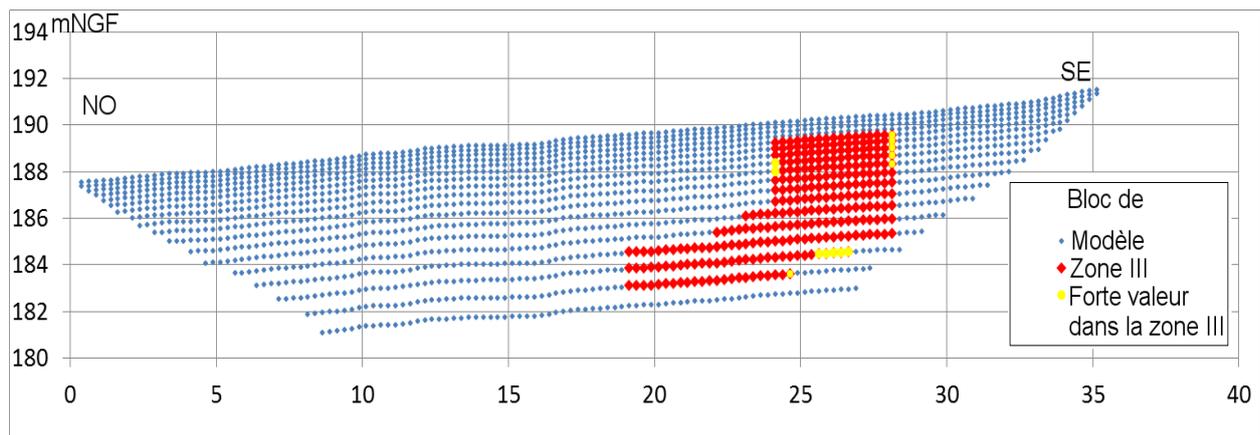


Figure 43. Positions des blocs de la zone III ayant de très fortes valeurs de résistivité.

Cette approche statistique des résistivités nous permet d'analyser de façon quantitative (Tableau 5) la variabilité des résistivités de cette zone probable de recharge.

Tableau 5. Valeurs statistiques des résistivités de la zone III dans les quatre exemples

	06/06/2012	04/10/2012	29/11/2012	25/01/2013
Minimum	15	73	74	30
Quartile 1	40	80	84	55
Quartile 2 (Médiane)	67	97	95	67
Quartile 3	83	116	111	86
Maximum	243	161	213	309
Moyenne	70	100	103	78
Ecart type	41	22	26	39
Nombre	273	273	273	273
Coefficient d'aplatissement	4,5	-0,2	3,1	11,9
Coefficient d'asymétrie	1,7	0,7	1,7	2,9

Conclusion

L'analyse numérique de la variation de résistivité permet d'observer les différences quantitatives entre les mesures. Cette variation est liée à l'alternance de périodes sèches ou humides. C'est une approche statistique élémentaire. La précision du regroupement (délimitation manuelle) des blocs de résistivité n'est pas optimale, ceci pourrait influencer fortement les résultats qu'il s'agisse d'une zone ou d'une autre, or il existe la méthode du suivi temporel (« Time-Lapse » en anglais) qui donne des résultats montrant les changements relatifs de résistivité. Cette méthode calcule le changement de résistivité à partir de différences de résistivité apparente. De plus, les méthodes statistiques multidimensionnelles permettent de regrouper les blocs selon des critères moins arbitraires que celui d'un choix manuel. C'est pourquoi la méthode d'inversion tenant compte de l'évolution des résistivités dans le temps (cf. 3.2) et une méthode utilisant les statistiques multidimensionnelles (cf. 3.3) ont été utilisées et les résultats sont présentés ci-dessous.

3.2. Inversion par la méthode « Time-Lapse »

Les modèles de changement de résistivité sont présentés dans cette partie. On a pris les résistivités apparentes issues des mesures avec le dispositif pôle-dipôle complet comme données d'entrée. Le modèle de référence est celui du 4 octobre 2012. Ce modèle de résistivité est globalement résistant (cf. 3.1.1) que l'on se réfère à la moyenne (240 $\Omega \cdot m$) ou à la médiane (197 $\Omega \cdot m$) des résistivités interprétées de l'ensemble des blocs (Figure 44). L'autre date dont le modèle présente une forte moyenne de résistivité (189 $\Omega \cdot m$) et également une médiane élevée (162 $\Omega \cdot m$) est le 12 décembre 2012, mais elle a un coefficient de variation (76%) plus important que celui (67%) du modèle du 4 octobre 2012. On constate donc que le modèle du 4 octobre 2012 est plus homogène que celui du 12 décembre 2012. On note également que ce modèle est obtenu un jour de débit quasi nul (0,4 m³/j), que le débit cumulé

sur 60 jours ($1,8 \text{ m}^3/\text{j}$) est le plus faible de toute la période étudiée et la pluie efficace cumulée sur 30 jours est également la plus faible (6,7 mm). En prenant cette date comme modèle de référence, on espère avoir plutôt des variations relativement négatives mettant ainsi en évidence les baisses de résistivité qui sont probablement significatives de l'amplitude de la teneur en eau du terrain.

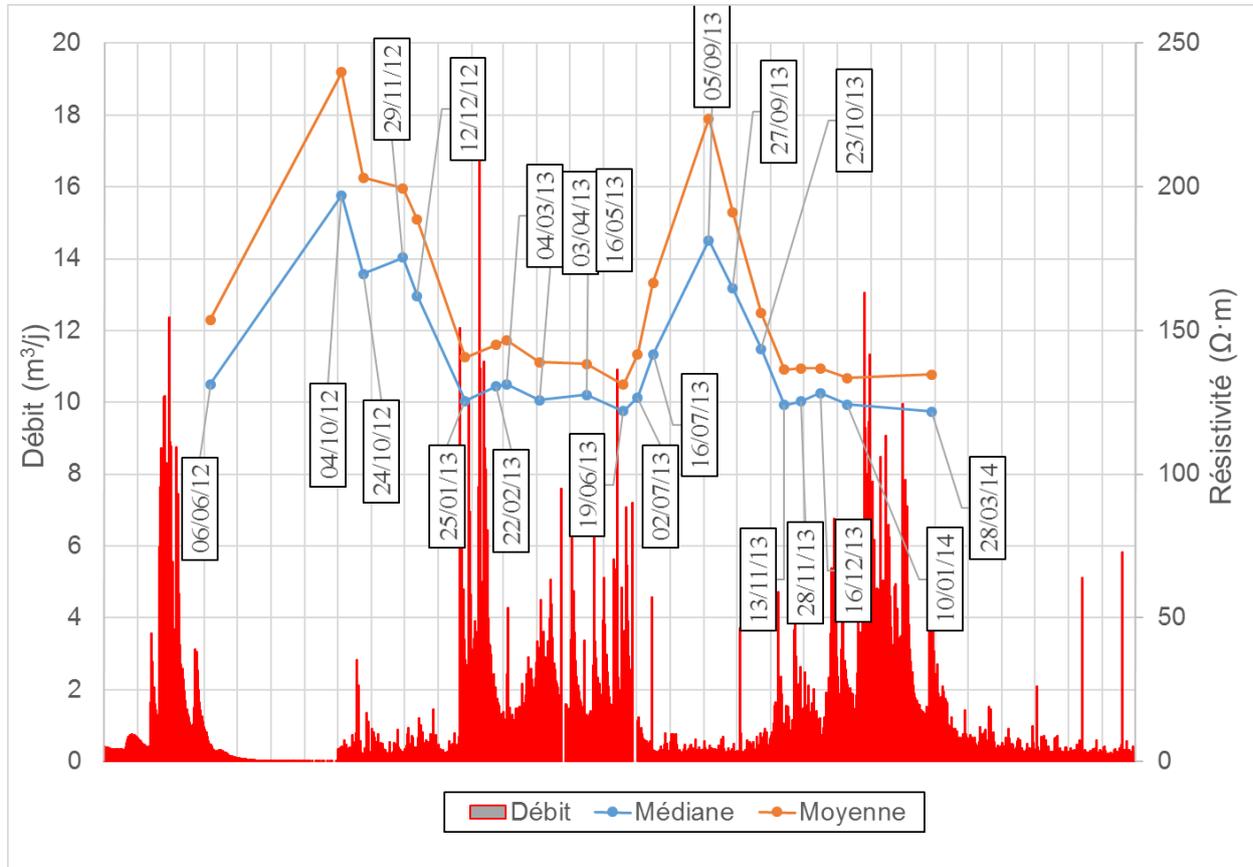


Figure 44. Évolution des résistivités vraies de l'ensemble des blocs.

3.2.1. Application au site de Lascaux

Les modèles de changement relatif de résistivité sont présentés figure 45. Les modèles sont obtenus en deux temps en raison de la limite de la mémoire vive (4G) du PC utilisé : la première série s'étend du 24 octobre 2012 au 16 juillet 2013, et la deuxième série du 5 septembre 2013 au 28 mars 2014, prenant dans les deux cas le modèle du 4 octobre 2012 comme référence.

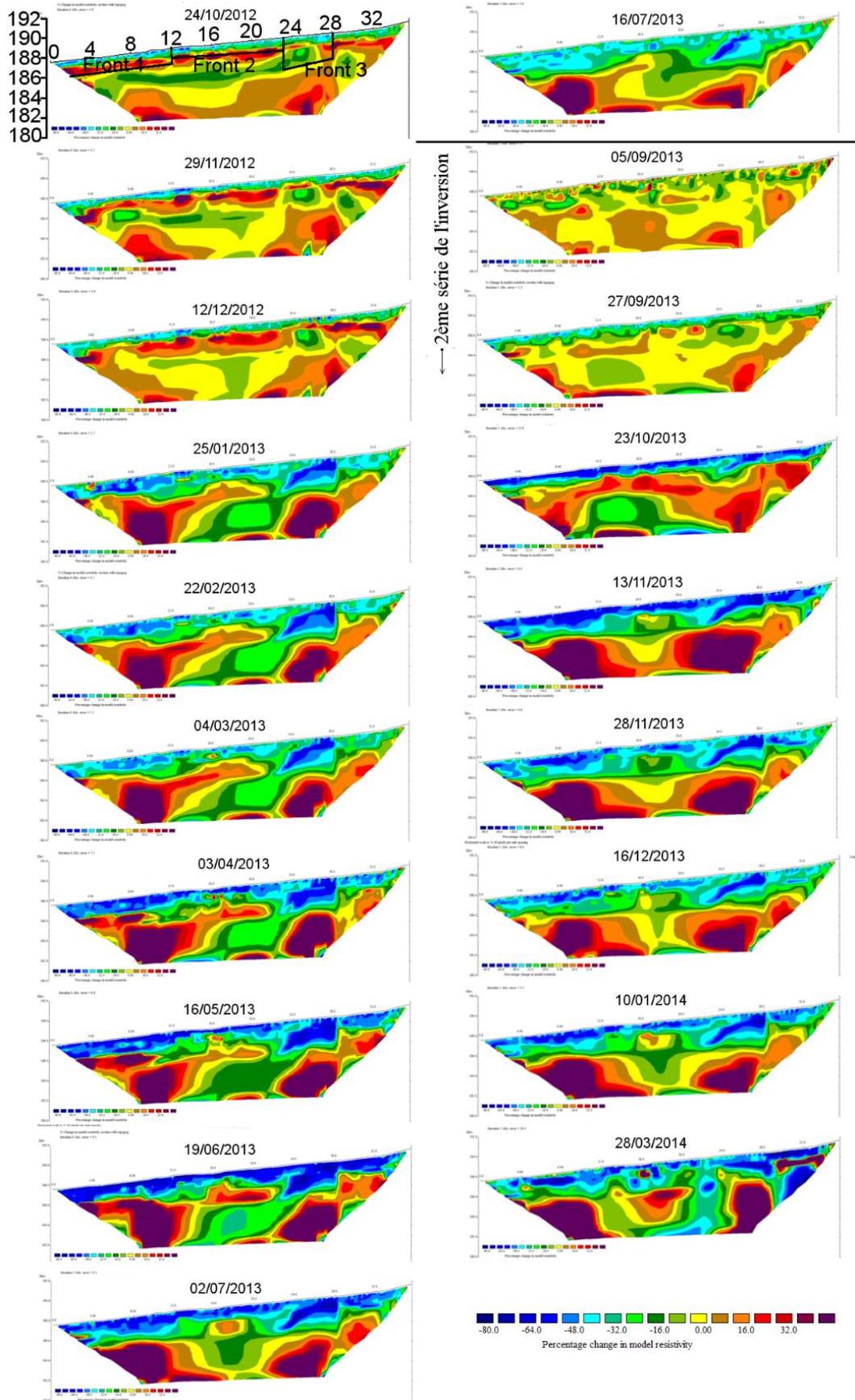


Figure 45. Modèles obtenus par « Time-Lapse » inversion, montrant les changements relatifs de résistivité exprimés en pourcentage par rapport aux résistivités du 4 octobre 2012. L'échelle varie de -80% (bleu foncé) à 40% (rouge foncé).

Globalement, par comparaison aux mesures du 4 octobre 2012, on observe :

- Une diminution relative de la résistivité en surface et jusqu'à 2,4 m de profondeur et 3 m entre 22 et 28 m (Front 1, 2 et 3 : Figure 46). Cette diminution relative varie entre -80% et -32% (zones majoritairement de couleur bleue). Mais cette zone contient des variations positives lors des périodes sans pluie lors des mesures du 24 octobre 2012 au 12 décembre 2012 et du 5 septembre 2013 au 27 septembre 2013.
- Une zone plus profonde (z2 sur la Figure 46) est marquée par une diminution plus faible (-16 %, de couleur verte) jusqu'à 8% entre 16 et 23 m le long du profil et en profondeur (de 1,6 à 7,9 m).
- Les domaines restants (z1 et z3) montrent une augmentation relative de la résistivité autour de 32% et pouvant atteindre 200%.

Dans le détail, la partie superficielle évolue dans le temps et l'on peut distinguer trois limites assimilables à des fronts d'humidité (Figure 46) :

- Front 1 : entre 0 et 12 m le long du profil, une zone où la diminution est importante et atteint une profondeur de 2 m ;
- Front 2 : entre 12 et 23 m, et de 28 m à la fin du profil, la diminution est moins importante et concerne une zone moins profonde (1,2-1,5 m) ;
- Front 3 : entre 23 et 28 m, une zone ayant de faible résistivité et pouvant atteindre 3 m de profondeur.

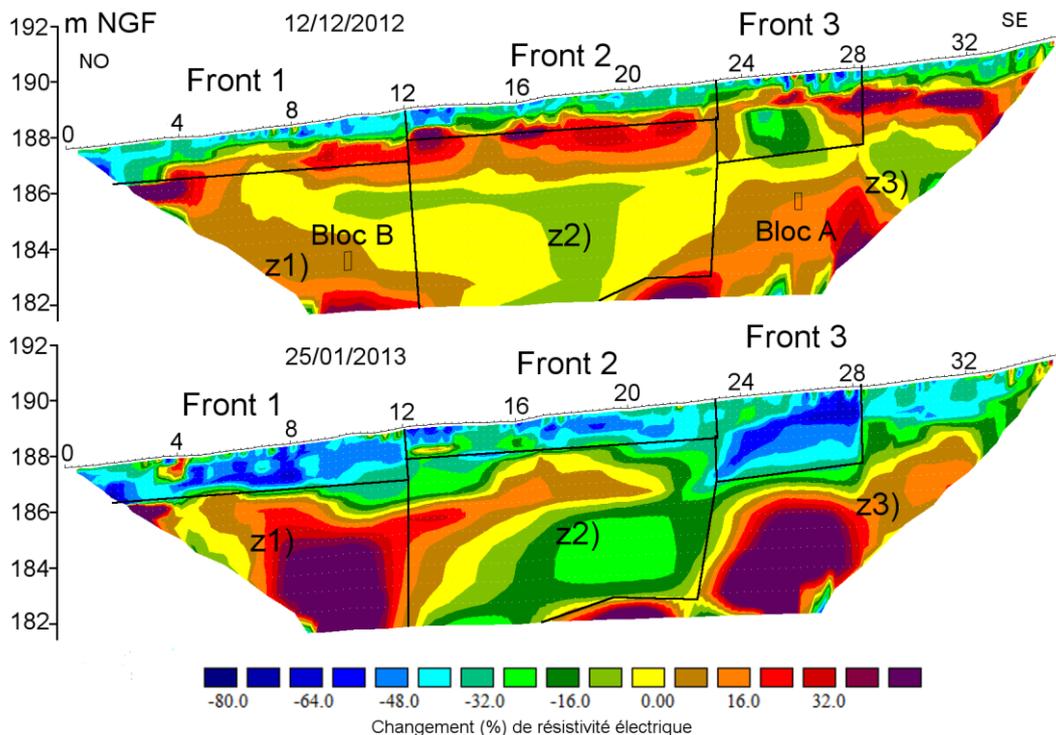


Figure 46. Exemple de deux modèles (12/12/2012 et 25/01/2013) de « Time-Lapse », montrant l'évolution de front d'humidité.

On constate que la diminution sur les 2,4 premiers mètres semble montrer que le front d'humidité descend depuis la surface vers l'intérieur du massif (Figure 45). Cette progression

est cohérente avec la variation de la pluie efficace, par exemple après les pluies du 18 janvier 2013 au 24 janvier 2013 (55,9 mm), on observe une diminution de résistivité significative sur le modèle du 25 janvier 2013 (Figure 46). Les trois zones décrites précédemment (0-12 m, 12-23 m et 23-28 m) pour lesquelles, la diminution de résistivité traduit la circulation rapide des eaux de pluie correspond à une zone calcaire (reconnue à l’affleurement) perméable donc altérée et/ou fracturée.

En profondeur :

- entre 4 et 12 m depuis l’origine du profil (zone z1), la variation n’a jamais atteint de valeurs négatives, ce qui signifierait que le terrain n’aurait jamais été plus conducteur donc plus humide qu’à la date du 4 octobre 2012 et pourrait de ce fait être considéré comme présentant un état de saturation minimale dans cette partie.
- entre 12 et 23 m (zone z2), la variation est moins importante ; une partie de la zone III décrite au paragraphe 3.1.1 y est incluse.
- entre 23 et 28 m, démarre la zone III (cf. 3.1.1), on constate que de 183 à 185 m NGF, la variation devrait être négative ou nulle par rapport au 4 octobre 2012 sachant que cette zone présente des valeurs de résistivité plus faibles que celles du modèle indépendant du 4 octobre 2012 (observation sur les modèles de résistivité obtenus par l’inversion indépendante, Figure 39). Mais le résultat de l’inversion « Time-Lapse » montre une augmentation de résistivité supérieure à 40% sur tous les modèles. Cette augmentation observée pourrait être due au fait qu’il suffit d’avoir certains blocs avec de fortes valeurs pour former cette zone de forte augmentation de résistivité. Une autre possibilité est que l’inversion « Time-Lapse » ne donne pas entière satisfaction, cela a besoin d’être consolidé plus tard.

L’inversion « Time-Lapse » montre, dans la partie peu profonde (< 2,4 m), un front d’humidité qui réagit rapidement aux précipitations (Figure 28). Cependant, cette conclusion repose sur les inversions faites à partir de résistivités apparentes non corrigées de l’effet de la température dont on sait (Figure 22) qu’elle n’est pas négligeable en surface, aussi l’interprétation d’un front d’humidité en faible profondeur, bien que vraisemblable peut être, de ce fait, sujette à caution.

Néanmoins, comme pour les modèles de résistivité, les modèles obtenus par la méthode « Time-Lapse » permettent également de regrouper qualitativement les dates des modèles. On remarque d’abord des modèles ayant des changements faibles par rapport au modèle du 4 octobre 2012, dont les dates sont le 24 octobre 2012, le 29 novembre 2012, le 12 décembre 2012, le 5 septembre 2013 et le 27 septembre 2013. A ces dates, les précipitations ont repris mais le débit journalier dans la grotte est quasiment nul (Tableau 4). Les autres modèles correspondent aux dates pour lesquelles le débit est relativement fort dans la grotte, à l’exception du 16 juillet 2013 alors que le débit du jour de mesure est faible (0,3 m³/j) nous noterons cependant qu’il y avait eu une crue relativement importante et rapide (4,6 m³/j) un jour avant (Figure 28).

3.2.2. Analyse numérique de la variation de résistivité

On s'intéresse aux changements relatifs de la résistivité lors d'évènements pluvieux, notamment de la variation dans la partie dite « front d'humidité » que l'on a décrit dans le paragraphe précédent (cf. 3.2.1). Les analyses numériques seront réalisées ci-dessous en considérant indépendamment chacune des trois parties du front (Figure 46).

A partir des résultats d'inversion, on dispose des valeurs des variations relatives de ces trois parties. Elles sont comprises entre -10% à -63%. L'observation du front d'humidité montre sa progression en profondeur sur les modèles réalisés pendant les périodes humides, alors que l'approche numérique (Figure 47) permet d'identifier les changements tout au long du suivi. Plus détaillées que l'observation graphique, les courbes de variations relatives (médiane de la variation) montrent une relation quasi-synchronisée à la pluie efficace avec une différence faible de l'une à l'autre allant au maximum jusqu'à 10%. De manière générale, il y a une décroissance des variations relatives lors d'une période pluvieuse, et une augmentation lors d'absence de pluie.

En détaillant le comportement durant la période pluvieuse, on constate une variation de résistivité qui apparaît rapidement après une modification de la pluviométrie (Figure 47).

- ainsi pour les périodes sans pluie (Tableau 3), par exemple du 15 février 2013 au 6 mars 2013 et du 23 novembre 2013 au 12 décembre 2013, on observe une hausse de la résistivité. Les mesures étant réalisées seulement 5 ou 7 jours après l'arrêt des précipitations, on ne peut pas savoir si l'augmentation de résistivité n'est pas apparue plus tôt (exemple d'une mesure effectuée le 22 février 2013, alors que la pluie efficace était devenue nulle le 15 février 2013 ; le même cas se produit avec la mesure du 28 novembre 2013 alors que la pluie s'est arrêtée le 23 novembre 2013).
- Lorsque la pluie reprend, par exemple le 13 décembre 2013, la mesure du 16 décembre 2013 montre alors une diminution de la résistivité soit trois jours maximum après la reprise de précipitation.

En phase pluvieuse, une absence de précipitation se manifeste par une augmentation de résistivité après une période au maximum de 5 jours, et par une diminution de résistivité après une période maximale de la reprise de précipitation de 3 jours. Le pas de mesure des TRE ne permet pas d'estimer de façon plus précise les temps de réponse.

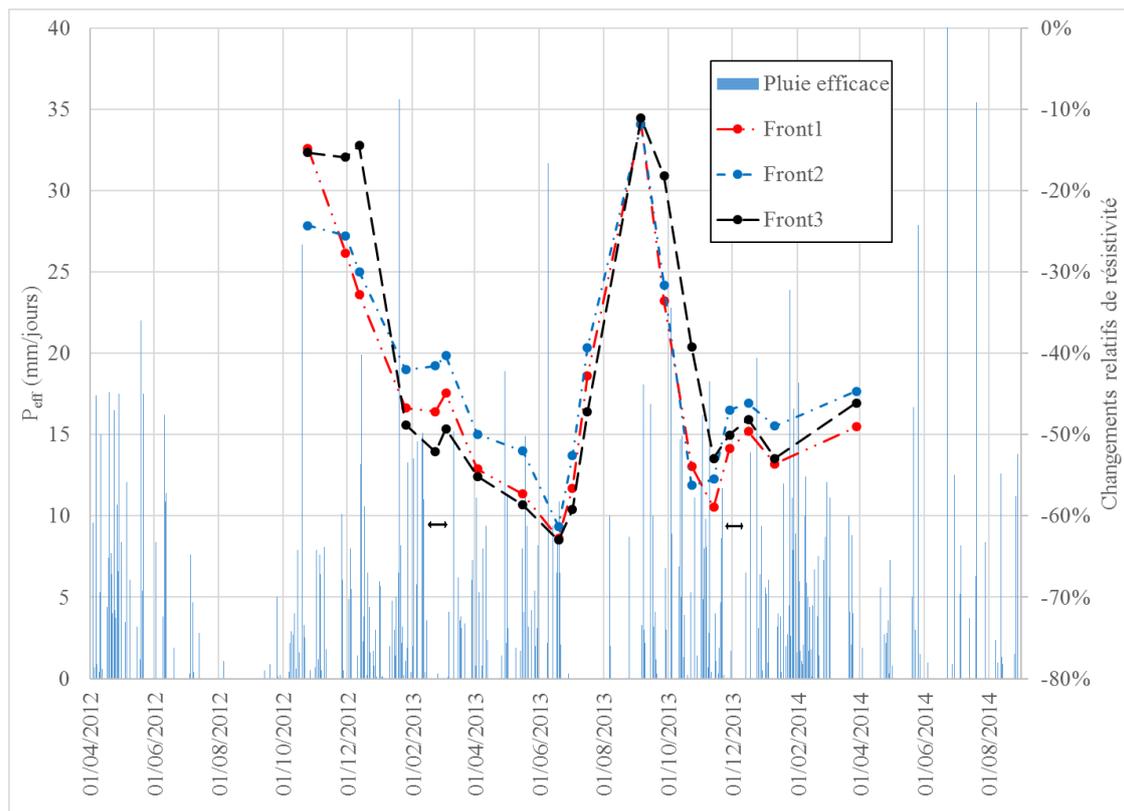


Figure 47. Changements relatifs de résistivité (médiane) de trois parties du front humidité et la pluie efficace journalière.

En profondeur, on choisit manuellement deux blocs situés à l'endroit ayant une forte variation temporelle auprès les inversions paramétrées (A et B sur la Figure 46), A situé à 26 m le long du profil et à une profondeur de 4,8 m et B situé à 10 m le long du profil et à 6,2 m en profondeur afin d'y étudier l'évolution des résistivités (Figure 48).

Globalement, les gammes de résistivités sont différentes, moins résistantes pour A que pour B, de plus l'évolution des résistivités au cours du temps est également différente. Au point A, les résistivités obtenues par chacun des types d'inversion (indépendante ou Time-Lapse) évoluent quasiment de façon opposée. Cette opposition est particulièrement remarquable entre janvier et juillet 2013. L'évolution au cours du temps obtenu par l'inversion indépendante est cohérente avec les variations du débit dans la grotte, alors que le résultat de la méthode Time-lapse montre une variation inverse, la résistivité augmente lorsqu'il y a du débit et diminue en l'absence de débit.

Au point B, l'inversion indépendante présente une variabilité de résistivité faible au cours du temps mais le résultat de la méthode « Time-Lapse » montre une très forte variabilité. On observe comme pour le point A, une évolution inverse à celle du débit.

On considère, à ce stade, que la méthode dite « Time-Lapse » (Loke *et al.*, 2014) n'est pas cohérente avec l'observation des mesures de TRE en 2D telle que nous l'avons mise en œuvre et paramétrée. Les questions relatives à ces observations restent pour le moment des questions ouvertes. On propose ensuite les méthodes statistiques pour exploiter au mieux les mesures TRE.

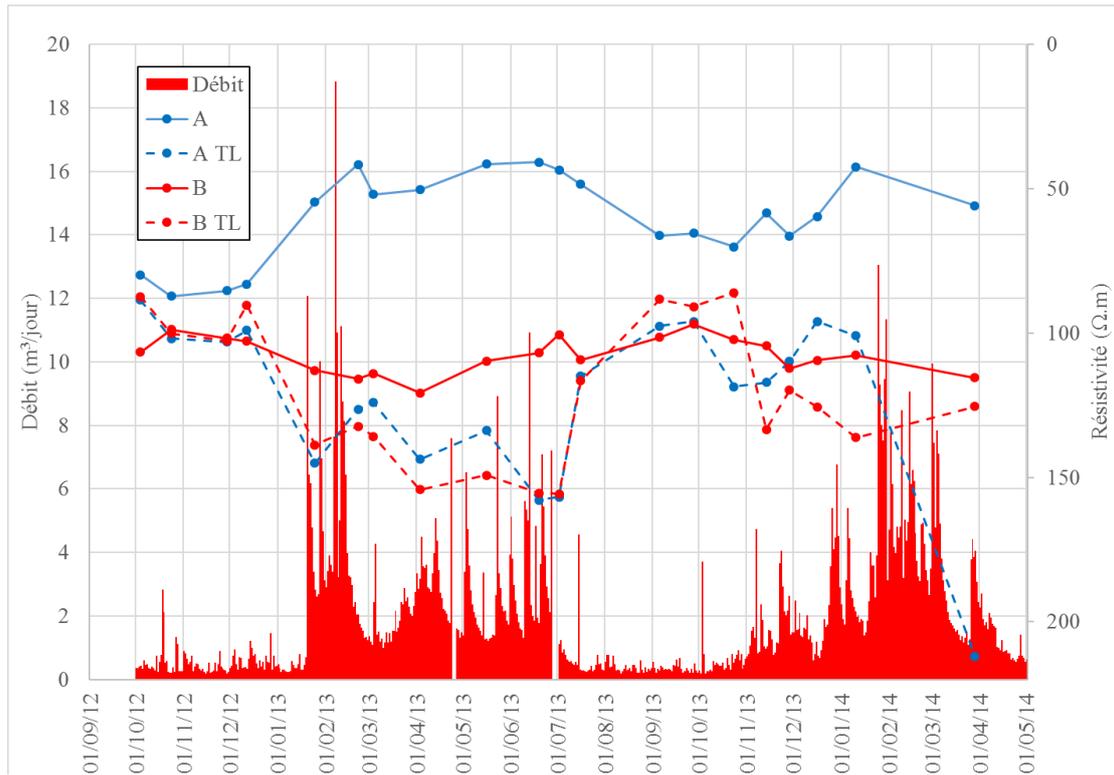


Figure 48. Comparaison des variations de résistivités obtenues par l'inversion indépendante (A et B) et par Time Lapse (A TL et B TL).

3.3. Approche statistique

Tenant compte des résultats obtenus au moyen des deux méthodes précédentes – inversion normale et inversion dite « Time-Lapse » et pour tirer au maximum profit des mesures effectuées, on réalise une analyse statistique multidimensionnelle des données des résistivités vraies par ACP et CHA au moyen du logiciel Minitab®, version 16.2.4.

3.3.1. ACP

On rappelle que l'analyse porte sur un ensemble d'individus (ici les blocs des modèles) pour lesquels on dispose de valeurs prises par des variables (ici les dates des mesures). Cet ensemble constitue une matrice de 2080 lignes (correspondant aux 2080 blocs) et 21 colonnes (correspondant aux 21 dates), valeurs de résistivités extraites dans les modèles inversés indépendamment les uns des autres, du profil I-50.

En se fondant sur le critère d'inertie (cf. 2.2.2.1), on cherche à identifier les individus dont les résistivités paraîtraient aberrantes afin de les filtrer. On calcule donc les inerties des logarithmes en base dix des résistivités normalisées par unité de surface en données centrées réduites $[\log_{10}(\rho_{us})]$, puis on les rapporte à l'inertie totale.

On reporte enfin ces inerties calculées en fonction du numéro des blocs (Figure 49) identifiés d'en haut à gauche à en bas à droite (lecture latine). On constate que l'inertie des blocs est très faible (majoritairement inférieure à 0,2%), ce qui conforte le choix de travailler avec le logarithme des données normalisées. Il n'est donc pas nécessaire d'appliquer un filtre (cf. 2.2.2.1). Une remarque supplémentaire s'impose :

- les blocs numéro 1-688, correspondant aux cinq niveaux superficiels de 0 à 1,06 m de profondeur, montrent une variabilité importante peu structurée et participent beaucoup à la variance totale qui est égale à 21. Cette participation élevée est expliquée par la forte variabilité temporelle à cette profondeur avec parfois de très fortes valeurs de résistivité, observées sur les modèles de résistivité. Ces blocs correspondent partiellement à ceux des fronts d'humidité observé par inversion « Time-Lapse » (cf. 3.2.2) ;
- les blocs N°688-1320, de 1,33 à 2,75 m, ont une variabilité globalement plus faible voire très faible, structurée et régulière en fonction du numéro du bloc. La régularité se manifeste pour les blocs de la zone II décrite dans 3.1.1, et les points qui ont une plus forte participation à la variance totale correspondent à la zone III (cf. 3.1.1).
- les derniers blocs (N°1321-2080) montrent à nouveau une variabilité importante mais également structurée en raison des blocs de la zone III. En se déplaçant le long d'un niveau de blocs de gauche à droite, la variabilité des blocs augmente de façon continue jusqu'à un maximum au cœur de la zone très conductrice et puis elle diminue.

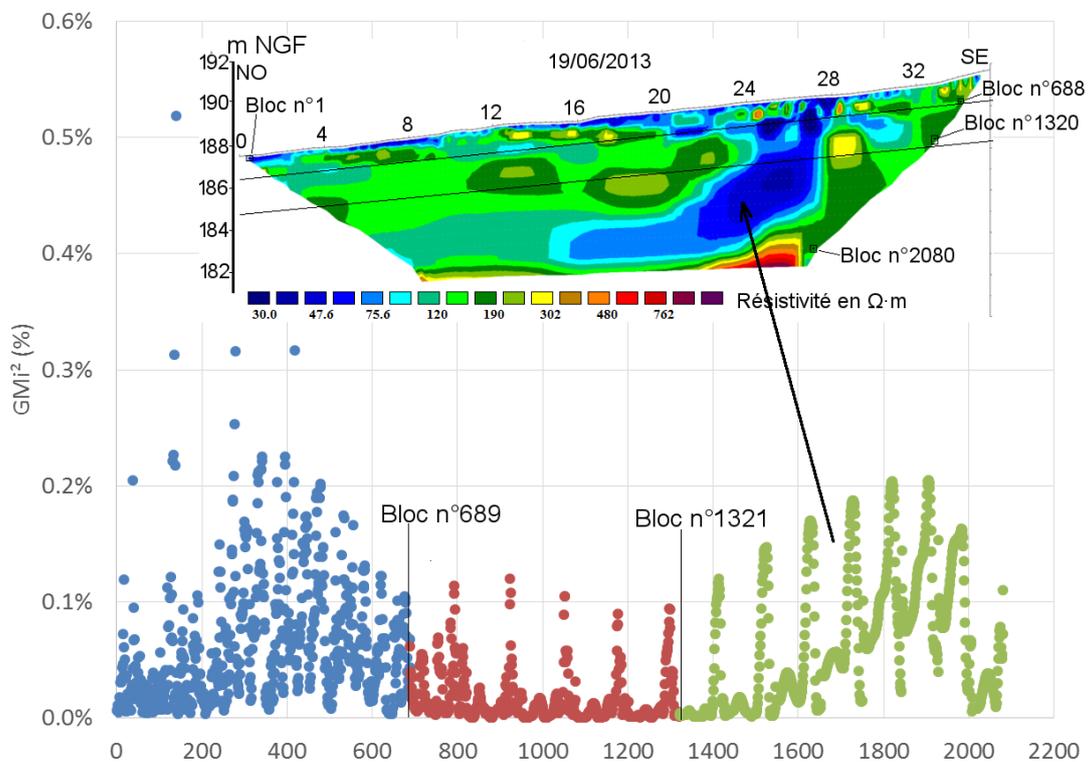


Figure 49. Inverties G_{Mi}^2 en fonction du numéro de bloc.

Les variables (dates) sont projetées sur les nouveaux axes factoriels (Figure 50), ici les axes F1 et F2 du cercle des corrélations. On observe que les variables sont toutes positivement corrélées à l'axe F1 mais dispersées sur l'axe F2 (Annexe II.B). Cette dispersion permet cependant de réunir les variables dans deux groupes :

- Groupe « a » : les dates qui ont une composante négative sur l'axe F2 ;
- Groupe « b » : les dates qui ont une composante positive sur l'axe F2.

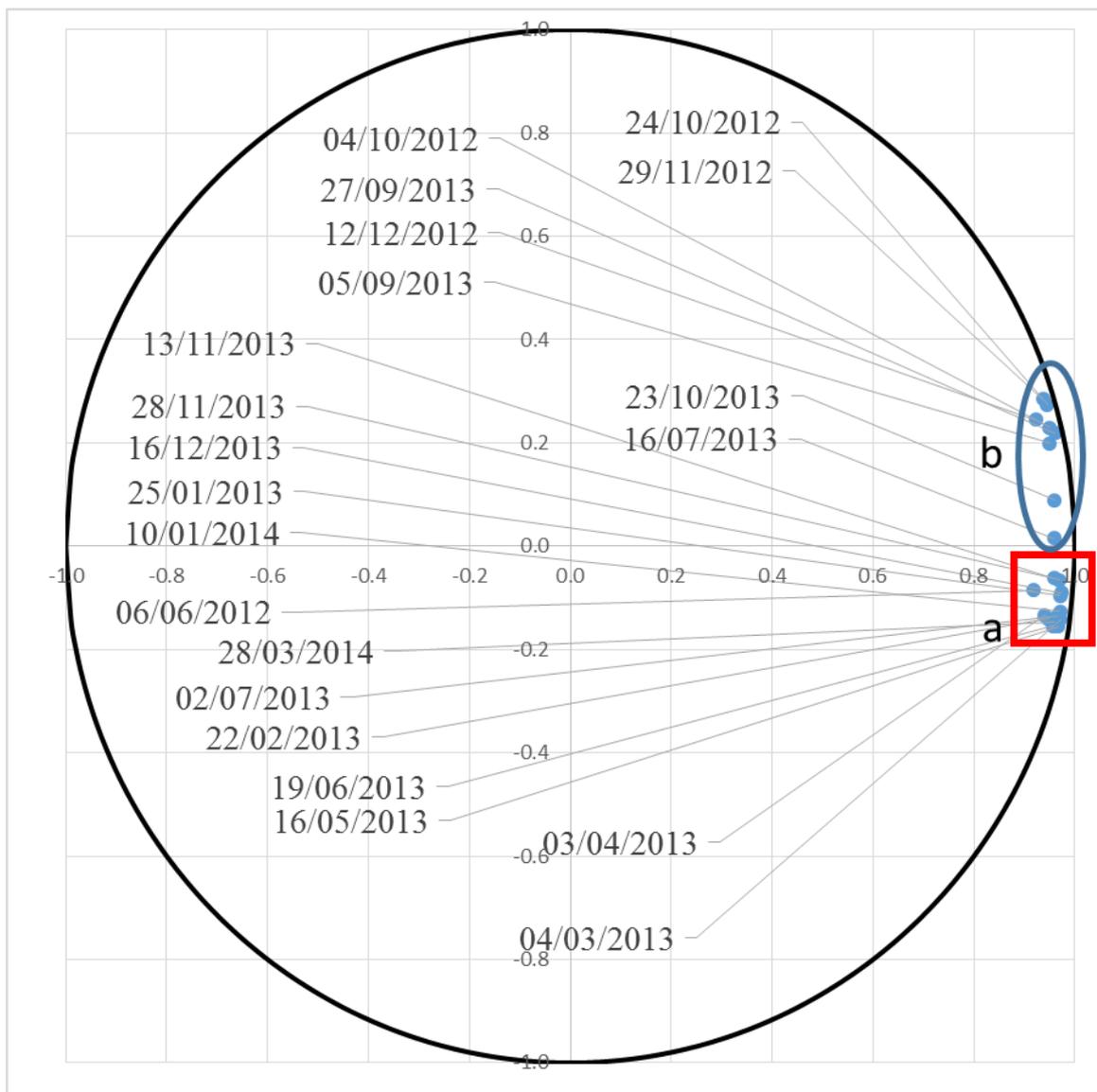


Figure 50. Cercle des corrélations (axes factoriels F1-91% et F2-3%).

D'après cette classification, on peut réaliser une première analyse en fonction du débit journalier (Figure 53). Globalement, la classification permet d'opposer les modèles des dates du groupe « a » à ceux du groupe « b » qui correspondent à des périodes de faibles (voire très faibles) débits. Il serait intéressant, d'ores et déjà, de comparer cette organisation en deux groupes avec le résultat d'une classification plus rationnelle des variables par CHA qui sera proposée au paragraphe 3.3.2.

Les variables du groupe « a » à composantes négatives sur F2 apparaissent plus groupées dans le plan F1/F2 que celles du groupe « b » à composantes positives dispersion due aux dates du 16 juillet 2013 et de 23 octobre 2013. En effet, la variable du 16 juillet 2013 est rattachée ici au groupe « b », mais elle a une corrélation proche de zéro sur l'axe F2, cette variable est donc indépendante du facteur F2. Le fait que cette variable soit éloignée des autres variables dans le même groupe montre que la classification des variables sur la base des deux premiers axes factoriels issus de l'ACP seule n'est pas suffisante bien que la variance absorbée par ce plan soit relativement importante (F1-91% et F2-3%). Pour comprendre la spécificité de cette variable, l'évolution de sa saturation (Figure 51 et Annexe

II.A et II.B) est comparée à celle de deux variables (une du groupe « a » - le 28 novembre 2013 et une autre du groupe « b » - le 29 novembre 2012). Elle montre que la variable du 16 juillet 2013 se comporte comme la variable du 28 novembre 2013 pour la deuxième composante, mais elle s'éloigne de cette variable à partir de la troisième composante et rejoint la variable du groupe « b » jusqu'à la 4^{ème} composante. La spécificité de cette variable est sa corrélation quasi nulle (0,02) avec l'axe F2 (augmentation non significative de saturation). Même si la « classification visuelle » sur le cercle des corrélations F1/F2 absorbant une très grande part de la variance totale permet de séparer correctement la plupart des variables, elle n'est pas suffisante. On gardera donc la classification issue de la CHA présentée au paragraphe suivant.

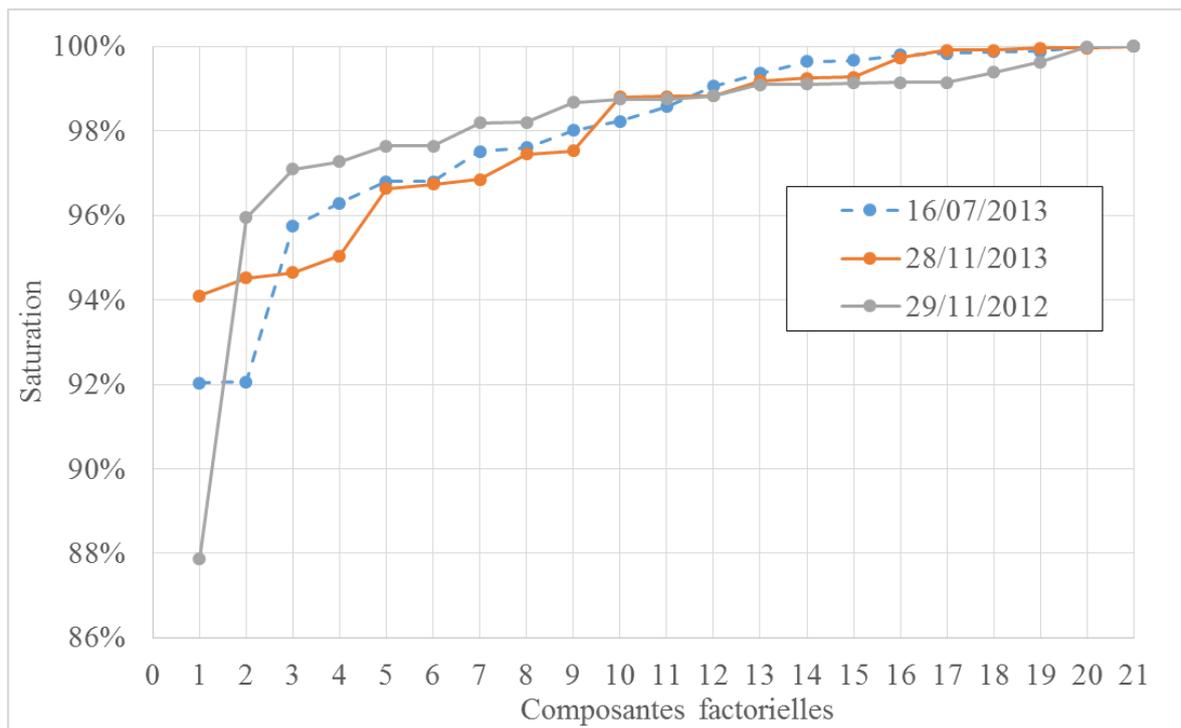


Figure 51. Evolution de la saturation de trois variables en fonction des composantes factorielles.

3.3.2. CHA des variables (des dates)

On présente donc la CHA des variables (Figure 52), qui réunit les dates de mesures ayant de fortes similarités. On peut identifier deux classes regroupant les dates dont les modèles de résistivité se ressemblent. Les dates sont présentées en tenant compte de leur classe sur la figure 53 figurant les données météorologiques afin de visualiser les conditions microclimatiques les jours de mesure. Les valeurs correspondant aux dates de mesure sont également données au tableau 6. Le volume journalier moyen des 18 jours précédant une mesure, le volume journalier moyen 7 jours après la mesure (y compris le jour de mesure), les pluies efficaces et brutes cumulées pendant 30 jours avant le jour de mesure sont également présentées (Tableau 6).

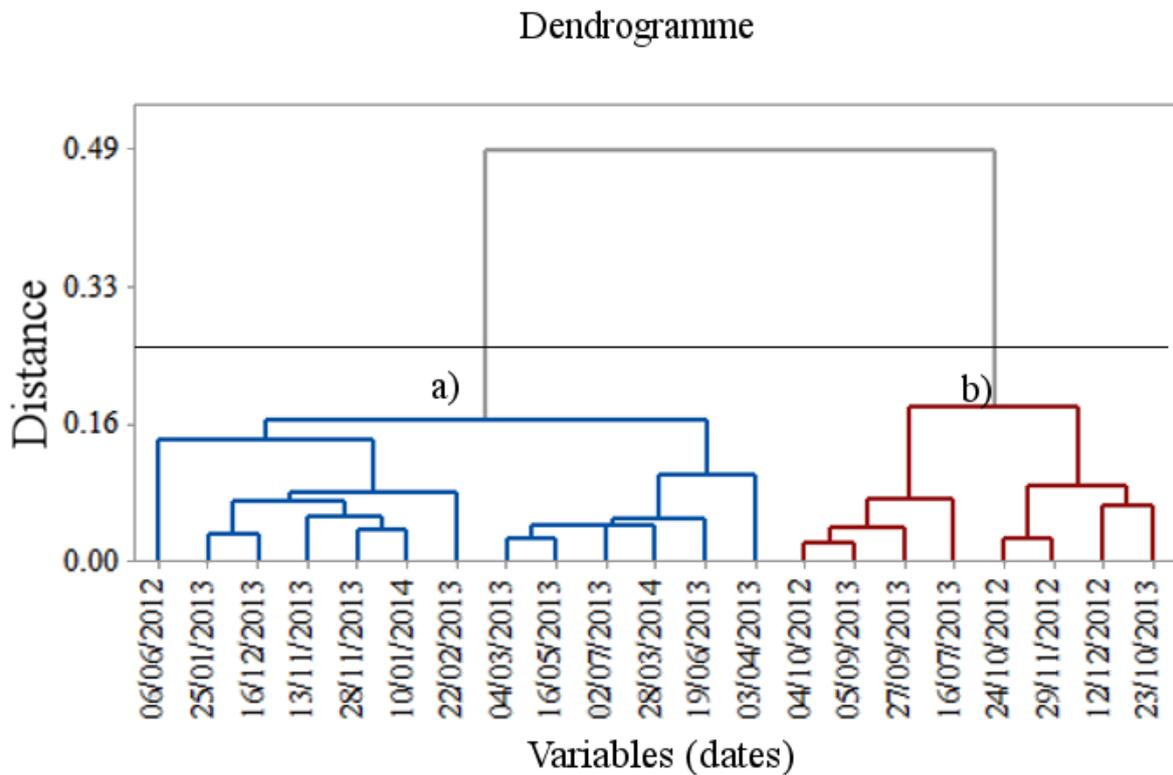


Figure 52. Dendrogramme de CHA des variables.

Tableau 6. Les données météorologiques aux dates de mesure, avec la classe d'appartenance issue de la classification CHA.

Date du suivi	Q_j (m ³ /j)	\bar{V} (-18j) (m ³)	\bar{V} (+7j) (m ³)	P_{eff} (mm)	P_{eff} (-30j) (mm)	P_{brut} (-30j) (mm)	Classe
06/06/2012	0,5	1,4	0,3	0,0	63,8	90,2	a
04/10/2012	0,4	0,1	0,4	0,0	6,7	26,0	b
24/10/2012	0,2	0,7	0,6	0,0	60,1	92,5	b
29/11/2012	0,2	0,3	0,5	0,0	50,9	67,2	b
12/12/2012	0,3	0,4	0,8	0,0	36,5	44,4	b
25/01/2013	2,8	2,3	4,7	1,1	90,7	104,9	a
22/02/2013	1,7	5,9	1,5	0,0	100,9	111,9	a
04/03/2013	2,4	2,1	1,7	0,0	79,1	86,9	a
03/04/2013	3,2	2,3	3,4	0,0	64,8	94,2	a
16/05/2013	1,3	2,4	2,6	0,0	48,5	71,7	a
19/06/2013	1,8	3,3	4,0	10,9	104,6	147,6	a
02/07/2013	1,1	3,5	0,8	0,0	78,0	111,1	a
16/07/2013	0,3	0,9	0,3	0,0	34,7	59,4	b
05/09/2013	0,3	0,3	0,3	0,0	20,7	33,6	b
27/09/2013	0,2	0,4	0,9	0,0	62,3	81,9	b
23/10/2013	0,5	0,4	0,7	0,0	93,7	120,4	b
13/11/2013	1,0	1,3	1,2	0,0	124,5	148,5	a
28/11/2013	2,6	1,8	1,7	0,0	115,3	127,8	a
16/12/2013	1,2	1,5	1,3	0,0	36,7	42,1	a
10/01/2014	2,1	3,5	1,8	0,0	77,4	90,1	a
28/03/2014	3,8	1,9	2,6	0,0	73,2	87,2	a

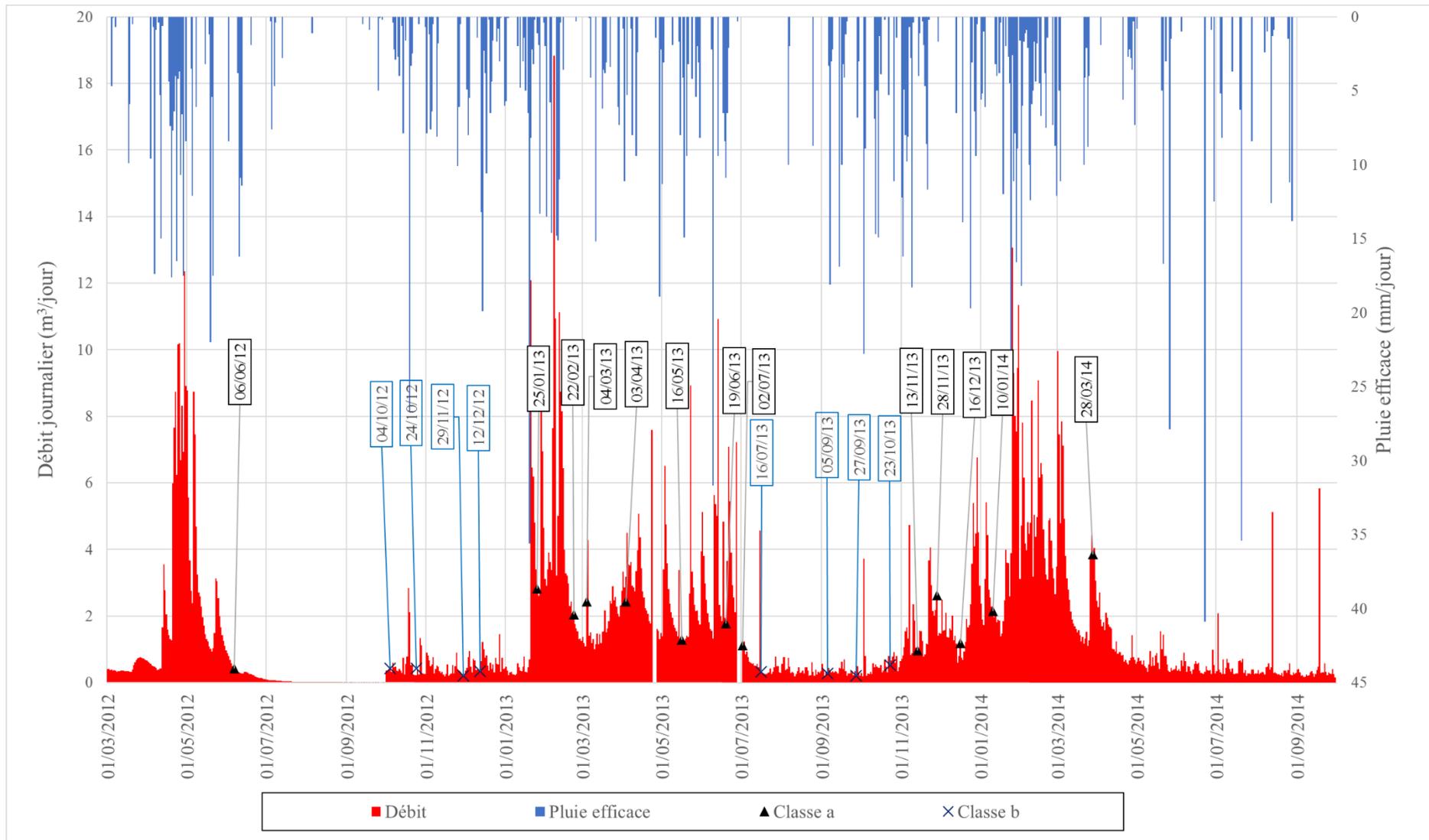


Figure 53. Débits des jours de mesure représentés tenant compte des classes (a et b) reportés sur les débits journaliers (axe principal) et la pluie efficace journalière (axe secondaire).

Afin d'analyser en détail les différentes classes, on définit des sous-classes de variables (Figure 54).

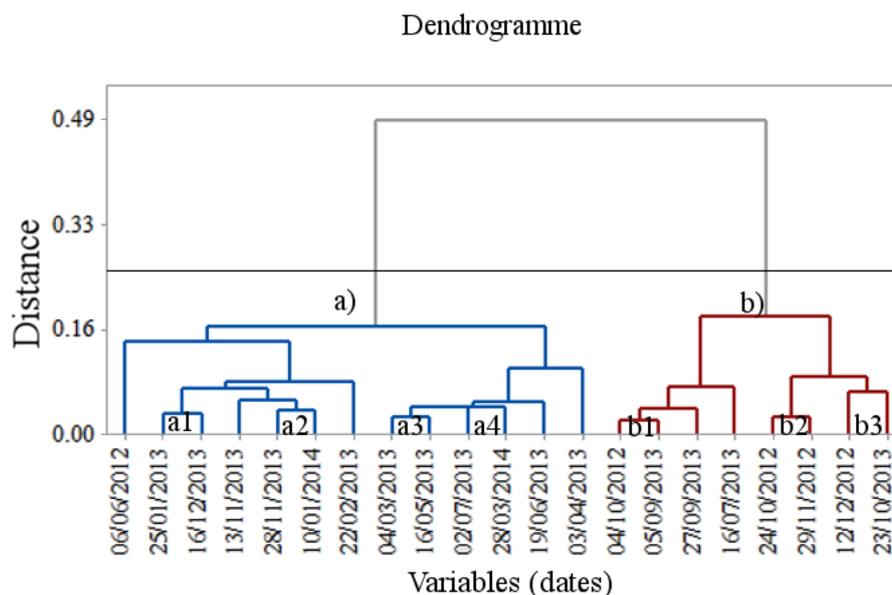


Figure 54. Sous classes par pair de variable ayant les distances le plus proche.

➤ Classe a

Globalement, les médianes des résistivités calculées sur l'ensemble des blocs ne sont pas élevées, elles sont comprises entre 122 et 131 $\Omega \cdot m$ (Tableau 7). Dans cette classe a, on peut identifier quatre sous-classes : a1 (Figure 55), a2 (Figure 56), a3 (Figure 57) et a4 (Figure 58). On constate d'abord que la forme de la partie extrêmement conductrice (cf. zone III, 3.1.1) est très proche d'un modèle à l'autre, ensuite, la couche située de part et d'autre de cette partie conductrice présente une gamme de résistivité d'environ 200 $\Omega \cdot m$, la partie montrant le plus de différences correspond à la couche superficielle sur une profondeur de moins de 1 m, correspondant au premier niveau des blocs dans les modèles d'inversion.

Tableau 7. Médiane de résistivité sur l'ensemble de blocs dans la classe a

Date	Médiane
06/06/12	131
25/01/13	126
22/02/13	130
04/03/13	131
03/04/13	126
16/05/13	128
19/06/13	122
02/07/13	127
13/11/13	124
28/11/13	125
16/12/13	128
10/01/14	124
28/03/14	122

- Sous-classe a1 (Figure 55) : deux dates (25 janvier 2013 et 16 décembre 2013) ayant environ 11 mois (325 jours) de décalage, les deux modèles se trouvent au début de la reprise du débit (2,8 et 1,2 m³/j). A la date du 16 décembre 2013, on observe une diminution du débit bien que l'on soit en phase saisonnière de reprise du débit ; ceci peut expliquer ce qui fait que la zone conductrice soit moins conductrice (67 Ω·m du 25 janvier 2013 et 68 Ω·m du 16 décembre 2013) et conforte l'hypothèse de zones de circulation de l'eau. La partie superficielle est marquée par des résistivités fortes, et la zone la plus conductrice semble établir une connexion avec la partie profonde (extension vers le nord-ouest <184 m NGF) entre 8 et 12 m. Au-dessus de cette « connexion », les blocs de la partie intermédiaire ont des résistivités autour de 200 Ω·m. La résistivité de la partie superficielle est moins faible le 16 décembre 2013 parce que la pluie efficace cumulée sur 30 jours est moins forte le 16 décembre 2013 (36,7 mm) que le 25 janvier 2013 (90,7 mm), alors que dans les modèles « Time-Lapse » de mêmes dates, les fronts sont partiellement conducteurs mais ils commencent à sécher. De plus, il y avait un fort cumul de la pluie efficace avant le 16 décembre 2013 sur plus de 30 jours, qui fait que la zone entourée en pointillé s'étend plus vers le nord-ouest le 16 décembre 2013 que le 25 janvier 2014.

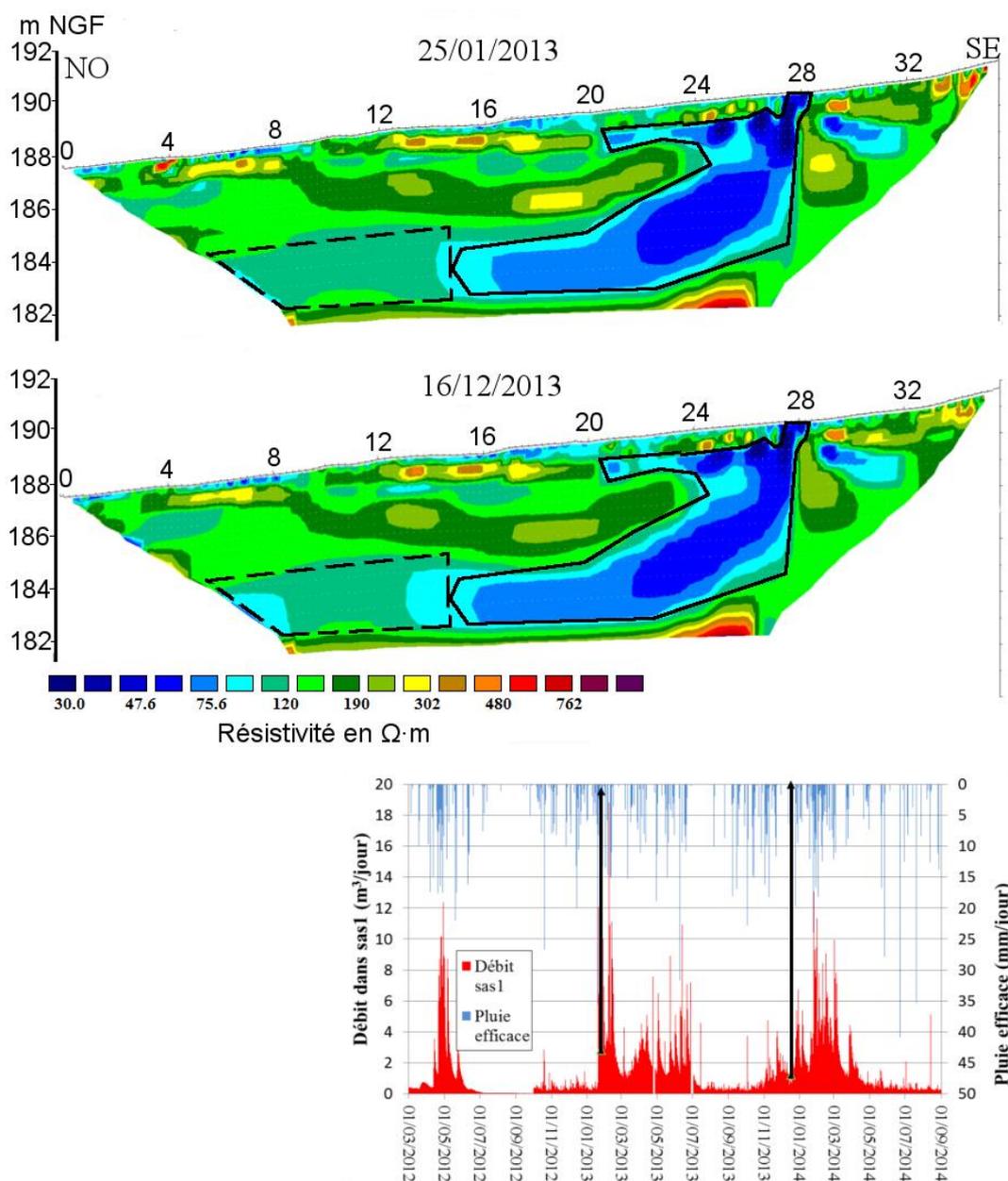


Figure 55. Modèles de résistivité de la sous-classe a1 (du 25/01/2013 et du 16/12/2013).

- Sous-classe a2 (Figure 56) : deux dates ayant 43 jours d'écart (28 novembre 2013 et 10 janvier 2014). Les deux modèles se situent globalement dans une période humide avec reprise du débit dans la grotte, avec cependant une courte période (5 ou 6 jours) sans pluie efficace (du 23 novembre 2013 au 28 novembre 2013 et du 04 janvier 2014 au 09 janvier 2014) précédant les jours de mesure. Le 28 novembre 2013, on note un débit élevé ($2,6 \text{ m}^3/\text{j}$) alors qu'il n'avait pas plu au cours des sept derniers jours mais l'antécédent du 13 novembre 2013 était de 124,5 mm (pluie efficace) ; cela met en évidence un probable décalage calculé avec certaines analyses statistiques entre les pluies et l'écoulement dans la grotte.

Cette sous-classe présente quasiment les mêmes caractères que la sous-classe a1, cependant, la partie superficielle contient quelques zones très conductrices, par exemple, de 0 à 2 m, de 5 à 8 m et de 16 à 20 m. La zone particulièrement conductrice

du 28 novembre 2013 est plus résistante (la médiane est égale à 75 $\Omega\cdot m$ le 28 novembre 2013 et à 65 $\Omega\cdot m$ le 10 janvier 2014), alors qu'il y a un arrêt de précipitation ainsi qu'une diminution de débit le jour après la mesure (1,4 m^3/j). De plus, la zone intermédiaire du modèle du 28 novembre 2013 est plus résistante, ceci est aussi visible par les inversions « Time-Lapse » (Figure 45). De plus, les dates appartiennent à cette sous-classe encadrent celle du 16 décembre 2013 étudiée précédemment. En regardant particulièrement la zone la plus conductrice des modèles, cette zone devient de plus en plus conductrice du 28 novembre 2013 au 10 janvier 2014 par l'intermédiaire de la date du 16 décembre 2013, alors que ces trois dates se trouvent dans la phase de la reprise du débit.

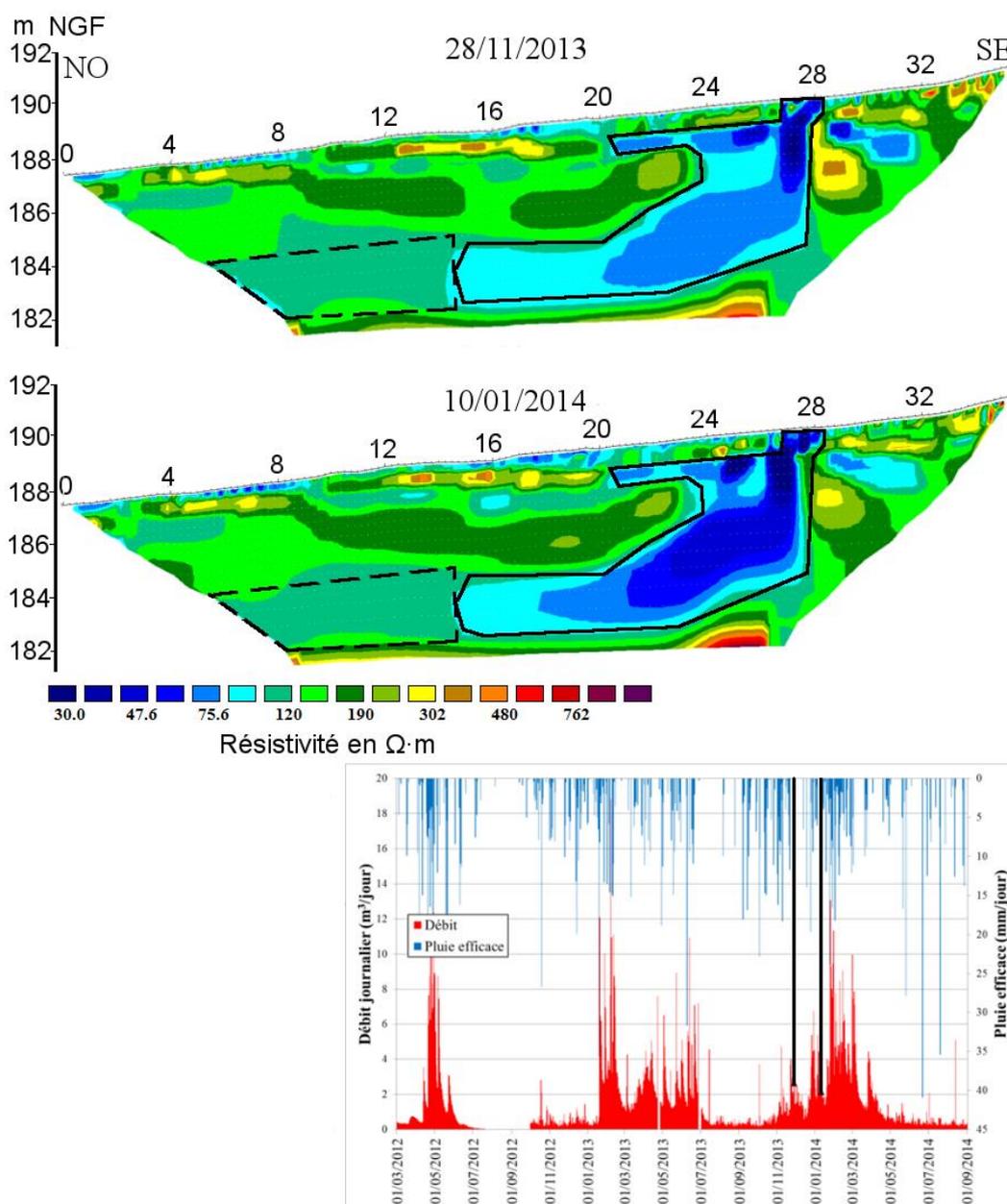


Figure 56. Modèles de résistivité de la sous-classe a2 (du 28/11/2013 et du 10/01/2014).

- Sous-classe a3 (Figure 57) : dates 04 mars 2013 et 16 mai 2013 distantes de 73 jours. Les deux modèles correspondent au tout début d'une période pluvieuse. Les précipitations ont un rôle très important pour ces deux modèles (Figure 57), la partie superficielle devient très conductrice ($128 \Omega \cdot m$ le 04 mars 2013 et $125 \Omega \cdot m$ le 16 mai 2013) sur une grande longueur. Ceci est cohérent avec l'observation du front d'humidité lors des inversions « Time-Lapse » (Figure 45). Les parties spécifiquement conductrices se ressemblent d'un modèle à l'autre, tandis que les débits à chaque mesure sont élevés ($2,4$ et $1,3 \text{ m}^3/j$). Cette partie conductrice s'étend vers le côté nord-ouest (partie entouré de pointillés). En comparant avec la classe a2, la partie centrale conductrice présente des résistivités plus faibles, marqués par des couleurs plus foncées.

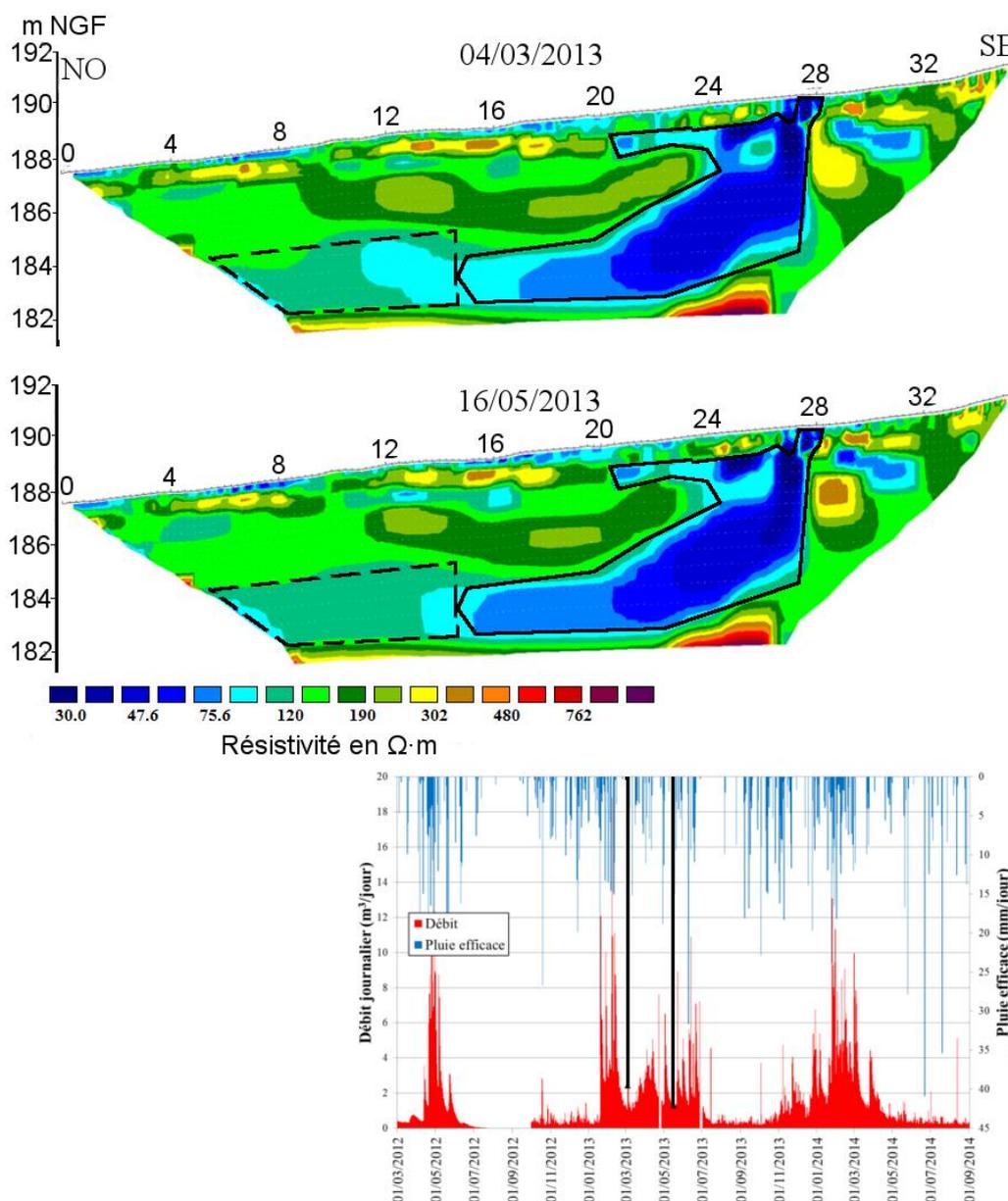


Figure 57. Modèles de résistivité de la sous-classe a3 (du 04/03/2013 et du 16/05/2013).

- Sous classe a4 (Figure 58) : dates 2 juillet 2013 et 28 mars 2013 distantes d'environ neuf mois. Les deux modèles correspondent chacun à la fin d'une période pluvieuse. La partie superficielle du 02 juillet 2013 est moins conductrice ($143 \Omega \cdot m$) que dans le second modèle ($117 \Omega \cdot m$), alors qu'il n'y a plus de pluie efficace depuis 10 jours avant la première mesure mais uniquement depuis 3 jours avant la seconde. Ceci est cohérent avec l'observation du front d'humidité lors des inversions « Time-Lapse » (Figure 45). Les parties spécifiquement conductrices se ressemblent d'un modèle à l'autre, tandis que les débits à chaque mesure sont élevés ($1,1$ et $3,8 \text{ m}^3/\text{j}$). Cette partie conductrice s'étend vers le côté nord-ouest (partie entourée de pointillés). En comparant avec la classe a1 et a2, la partie centrale conductrice montre des résistivités plus faibles, marquées par des couleurs plus foncées.

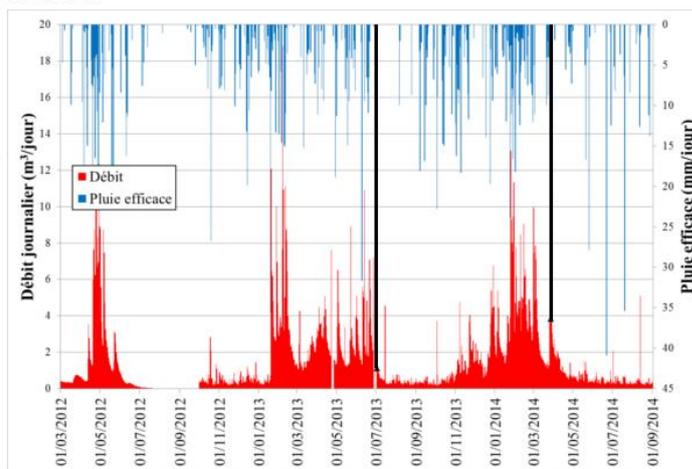
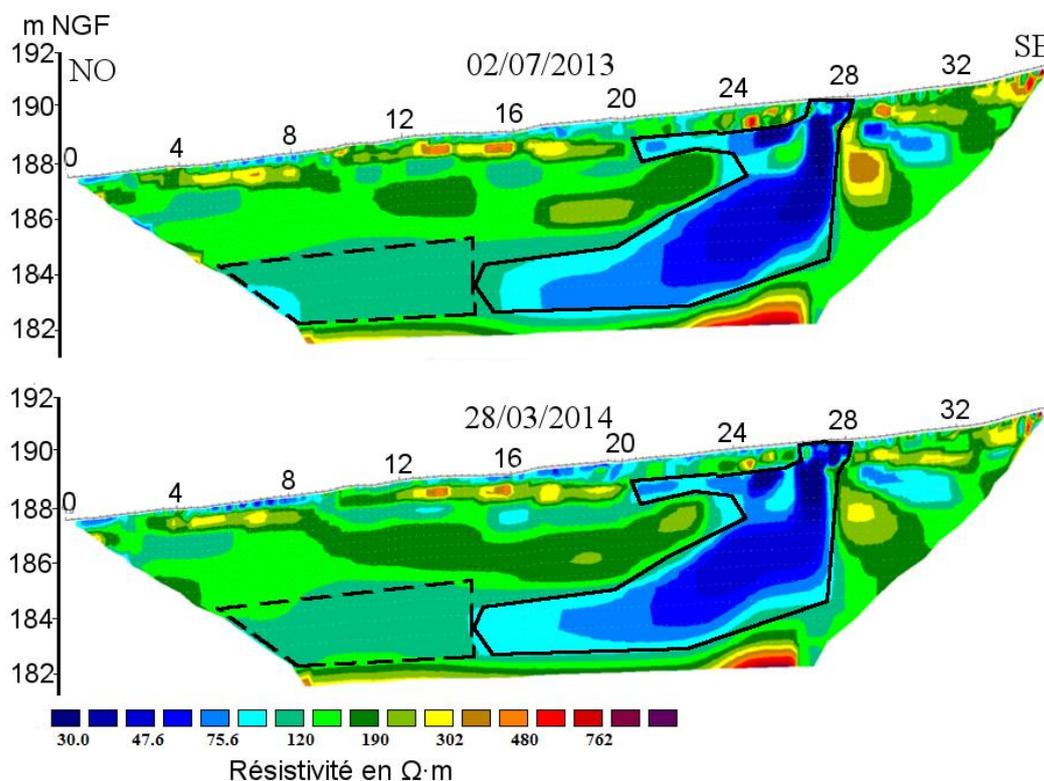


Figure 58. Modèles de résistivité de la sous-classe a4 (du 02/07/2013 et du 28/03/2013).

➤ Classe b

Cette classe correspond aux modèles les plus résistants parmi l'ensemble des modèles de résistivité comme le montrent les valeurs des médianes calculées sur l'ensemble des blocs (Tableau 8). On constate que même si la couche superficielle (< 1 m) reste hétérogène, elle est plus résistante que dans le cas de la classe a. La couche sous-jacente (*cf.* zone II, 3.1.1) est un peu plus résistante ($200 \Omega \cdot m < \rho < 300 \Omega \cdot m$) que pour les modèles de la classe a. En outre, la partie particulièrement conductrice (*cf.* zone III, 3.1.1) devient moins conductrice relativement aux modèles de la classe a, mais elle reste quand même la plus conductrice pour chacun des modèles de cette classe. De plus, cette partie se prolonge vers le nord-ouest jusqu'au bord du modèle, tout comme la classe a. Les dates des modèles de la classe b correspondent à l'automne, avec le début de la reprise des précipitations que ce soit en 2012 ou en 2013, mais aussi aux périodes pour lesquelles le débit journalier est très faible (inférieur à $0,5 \text{ m}^3/\text{j}$) dans la grotte.

Tableau 8. Médianes des résistivités calculées sur l'ensemble des blocs des modèles de la classe b

Date	Médiane
04/10/12	197
24/10/12	170
29/11/12	175
12/12/12	162
16/07/13	142
05/09/13	181
27/09/13	165
23/10/13	144

- Sous-classe b1 (Figure 59) : (4 octobre 2012 et 5 septembre 2013 ; dates distantes de onze mois) en plus de la description générale de la classe b, cette sous-classe contient deux modèles où la partie superficielle est particulièrement résistante, parce que les deux mesures se trouvent chacune à la fin d'une période sans pluie (6,7 et 20,7 mm de pluie efficace cumulée au cours des 30 jours précédant les mesures). Le 4 octobre 2012 est la référence de l'inversion « Time-Lapse », tandis que le 5 septembre 2013 est aussi le début de la sécheresse du front d'humidité de l'année 2013, ceci confirme la présence de forte résistivité à faible profondeur. En plus, la moyenne de changement relatif de résistivité du 5 septembre 2013 est égale à -30%. De plus, suite aux orages estivaux au cours de l'été 2013 (10 mm le 6 août 2013 et 8,7 mm le 25 août 2013), les résistivités du modèle du 05/09/2013 sont significativement diminuées. Les médianes sur l'ensemble de modèles varient de 197 à 181 $\Omega \cdot m$, tandis que dans la zone conductrice elles sont égales à 88 $\Omega \cdot m$ le 04 octobre 2012 mais à 81 $\Omega \cdot m$ le 5 septembre 2013.

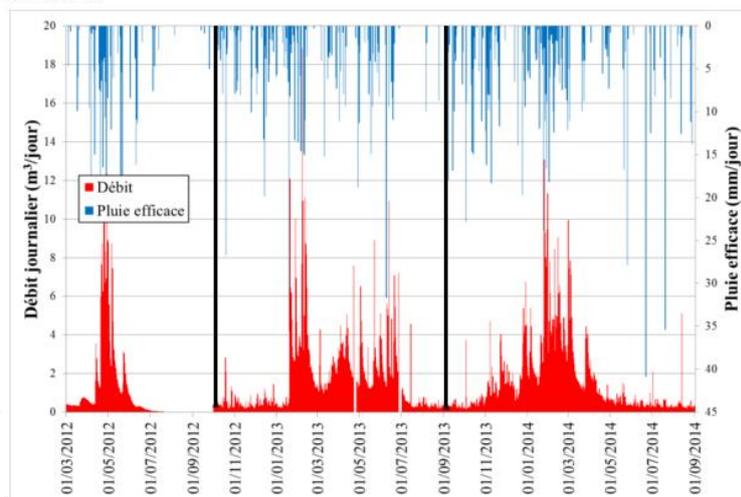
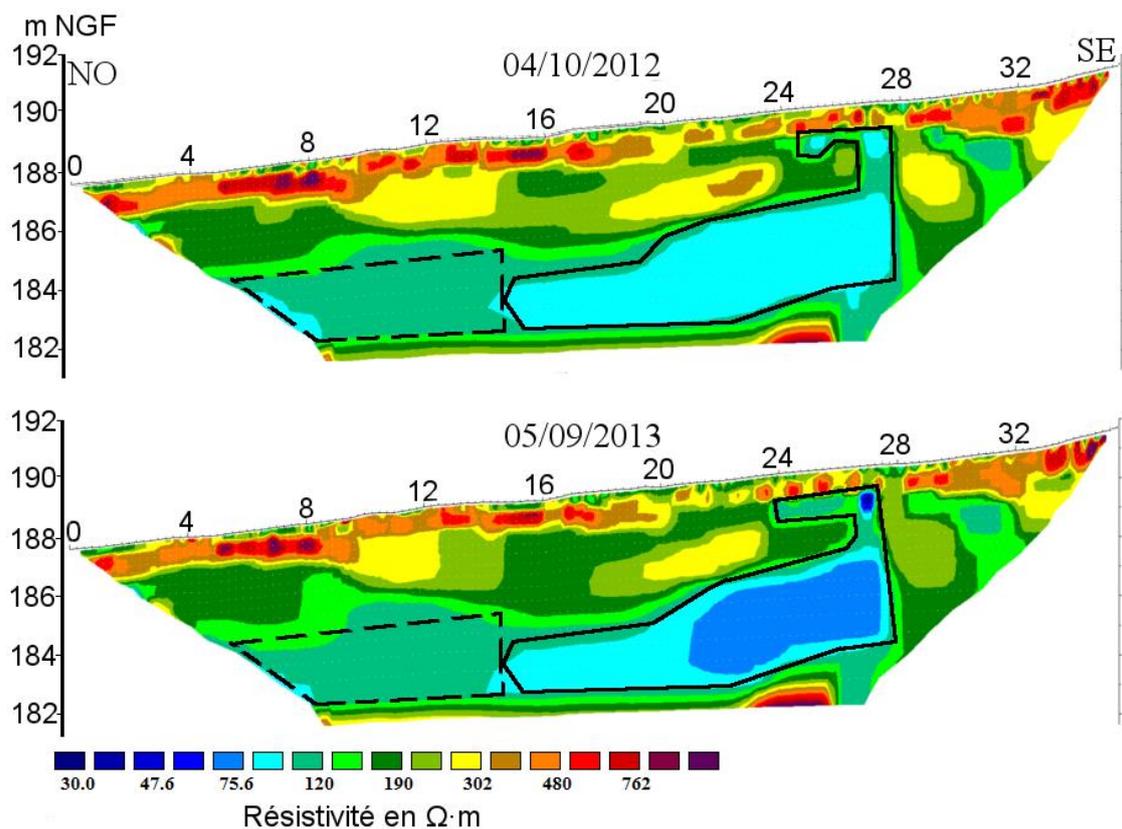


Figure 59. Modèle de résistivité de la sous-classe b1 (du 04/10/2012 et du 05/09/2013).

- Sous-classe b2 (Figure 60) : (24 octobre 2012 et 29 novembre 2012) le débit journalier lors de ces deux mesures est quasiment nul dans la grotte, alors que les précipitations ont déjà repris. C'est la raison pour laquelle il y a certains blocs en surface marqués par de faibles valeurs de résistivité. En plus, sur le modèle du 29 novembre 2012, on observe clairement le démarrage de l'humidification de la zone conductrice centrale avec une baisse de résistivité au droit de 27,5 m. Les fronts d'humidité dans les modèles « Time-Lapse » sont marqués par une diminution de la résistivité à très faible profondeur et par de fortes valeurs dans la partie plus profonde du front.

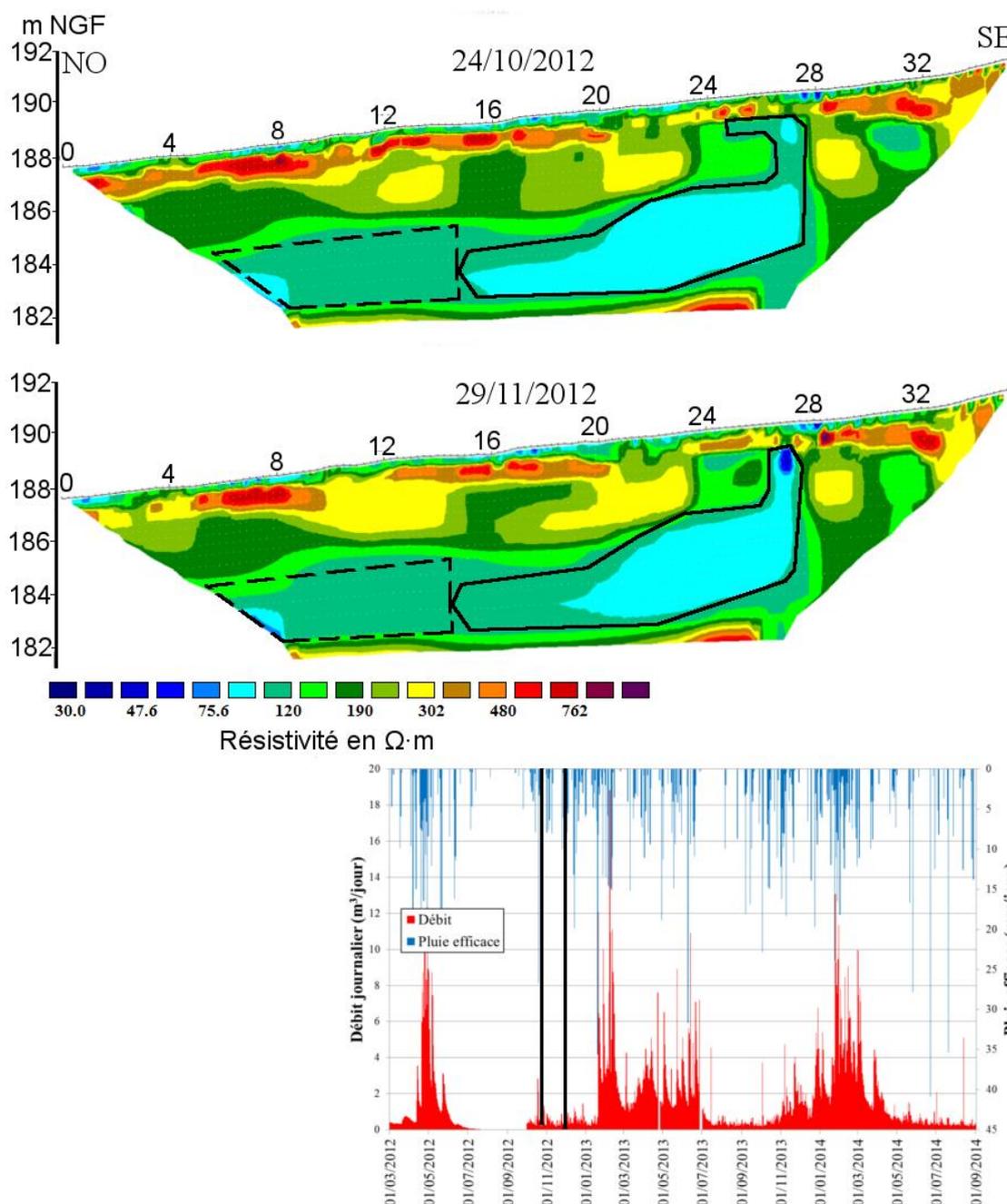


Figure 60. Modèle de résistivité de la sous-classe b2 (du 24/10/2012 et du 29/11/2012).

- Sous classe b3(Figure 61) : dates 12 décembre 2012 et 23 octobre 2013 distantes de 315 jours. Le débit est quasiment nul dans la grotte (0,3 et 0,5 m³/j), alors que la pluie efficace cumulée est assez significative (36,5 et 93,7 mm). Due à la présence de la

pluie efficace, la partie superficielle est conductrice. Les fronts d'humidité sont aussi remarquables pour les mêmes dates dans les modèles « Time-Lapse » (Figure 45). La partie spécifique (zone entourée) est plus conductrice pour le deuxième modèle, tandis que le débit dans le deuxième cas est plus important ($0,5 \text{ m}^3/\text{j}$) que pour le premier ($0,1 \text{ m}^3/\text{j}$) ; on se rapproche de la reprise du débit. Cette partie conductrice s'étend vers le côté nord-ouest (partie entourée de pointillés). En comparant à la classe a, la partie la plus conductrice (zone entourée) montre des résistivités plus faibles, marqués par des couleurs moins foncées (en bleu).

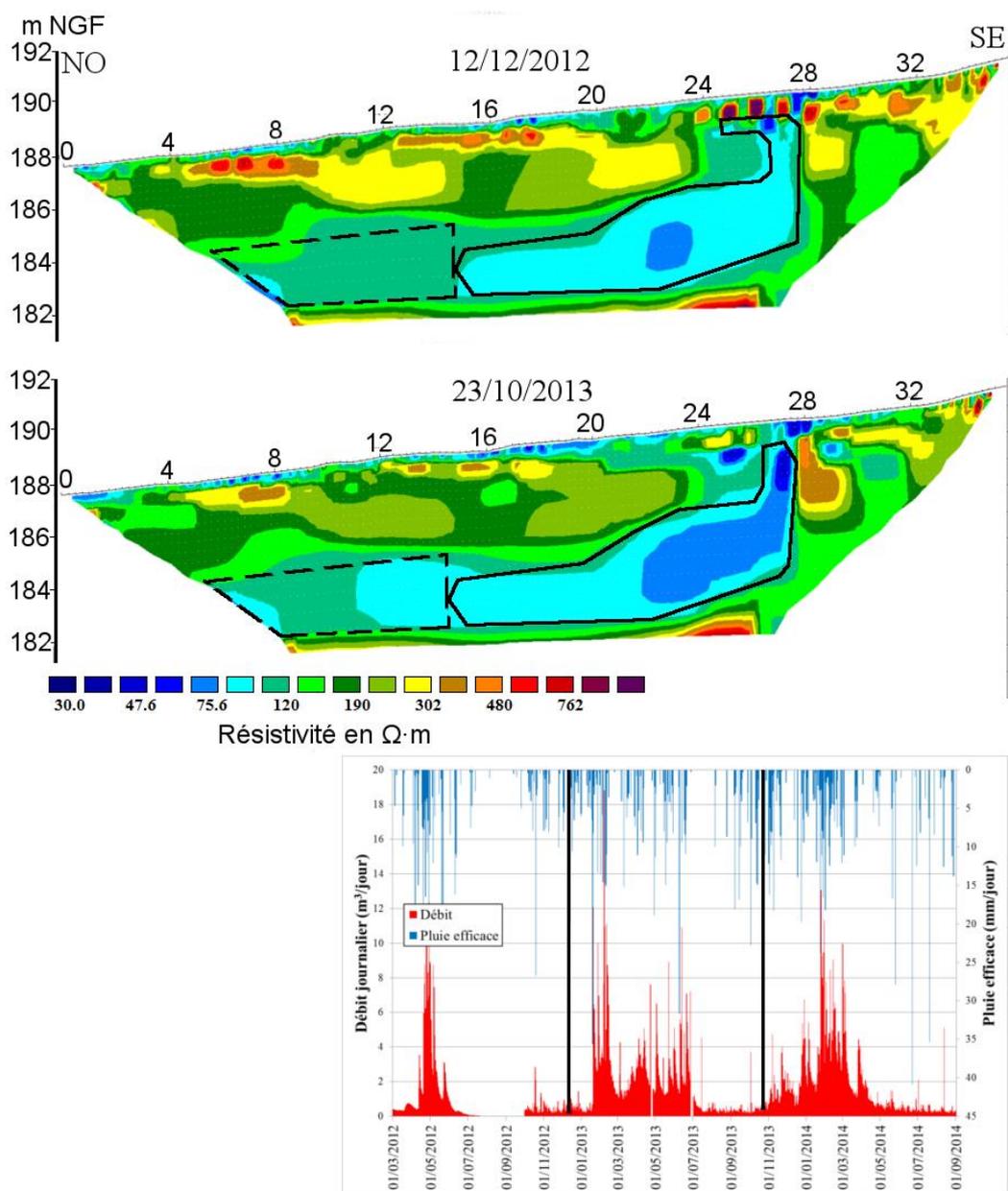


Figure 61. Modèle de résistivité de la sous-classe b3 (du 12/12/2012 et du 23/10/2014).

Synthèse de CHA des variables

Cette classification par variable (date) permet de regrouper les dates des deux années par similarité de gamme de résistivité. En faisant les comparaisons dans les sous-classes, on peut donc donner une description synthétisée pour chaque classe :

- Classe a : correspond aux dates pour lesquelles les modèles montrent de faibles valeurs de résistivité, et les débits sont supérieurs à $1 \text{ m}^3/\text{j}$ (à l'exception du 06 juin 2012 qui est à la fin d'une période de crue). Ces dates contiennent également celles correspondant à la reprise et à la fin des périodes de débit important. Par ailleurs, la pluie efficace cumulée sur 30 jours avant une mesure est plutôt importante ($> 34,7 \text{ mm}$), avec de courtes périodes sans pluie (Tableau 6). On remarque aussi qu'il y a la zone III où la résistivité est toujours faible ($< 84 \Omega \cdot \text{m}$).
- Classe b : regroupe les dates pour lesquelles il n'y a pas de débit journalier ($< 0,5 \text{ m}^3/\text{j}$, négligeable) dans la grotte. Les dates correspondent aux automnes des années 2012 et 2013 alors que la pluie a repris (pluie efficace cumulée sur 30 jours $> 26,0 \text{ mm}$) avant que le débit ne démarre. Les modèles sont plus résistants que ceux pour le groupe a. Cependant, on observe l'humidification depuis la surface vers la zone conductrice (zone III) sur les modèles de ce groupe.

L'influence de la pluie efficace se manifeste globalement sur une faible profondeur (en générale $< 1 \text{ m}$, entre 24 et 28 m le long du profil, elle peut descendre à 2,4 m). La couche superficielle s'humidifie sous l'effet de la pluie efficace. Lorsqu'il y a une absence de pluie, on observe une augmentation de résistivité traduisant une sécheresse de cette couche superficielle. L'identification de cette zone pourrait confirmer la présence du « front humidité » de l'inversion « Time-Lapse ».

On peut observer une similarité entre 2012 et 2013 avec un décalage d'environ 11 mois. Ce décalage permet de constater une répétition de cycle « conducteur – résistant – conducteur » du début à la fin d'une année hydrologique. On constate que cette répétition de résistivité de presque un an est simultanée à l'évènement du débit (Figure 53) dans la grotte. Cette relation sera étudiée dans le paragraphe suivant de façon quantitative.

3.3.3. CHA des blocs (des individus)

Une autre façon de traiter un ensemble de données par CHA consiste à faire une classification des individus (ici, les blocs des modèles de résistivité). Ceci consiste à mettre en évidence différents groupes de blocs de résistivité (à partir de $\log_{10}\rho_{us}$) selon leur variation temporelle. Le dendrogramme où l'on voit que cinq ou sept classes peuvent être choisies est donné en annexe (Annexes II.C et II.D).

Choix de nombre de classes

La classification peut être analysée, soit en tenant compte de cinq classes (CHA-a Figure 62.a), soit de sept classes (CHA-b Figure 62.b) en séparant la classe n°1 et n°2 en deux ; ces deux classes sont constituées des blocs superficiels. La classe 1B est constituée pour partie de blocs en position superficielle et pour partie de blocs plus profonds entourés de blocs de la classe 1A. La classe 2B correspond à des blocs situés au cœur de blocs de la classe 2A.

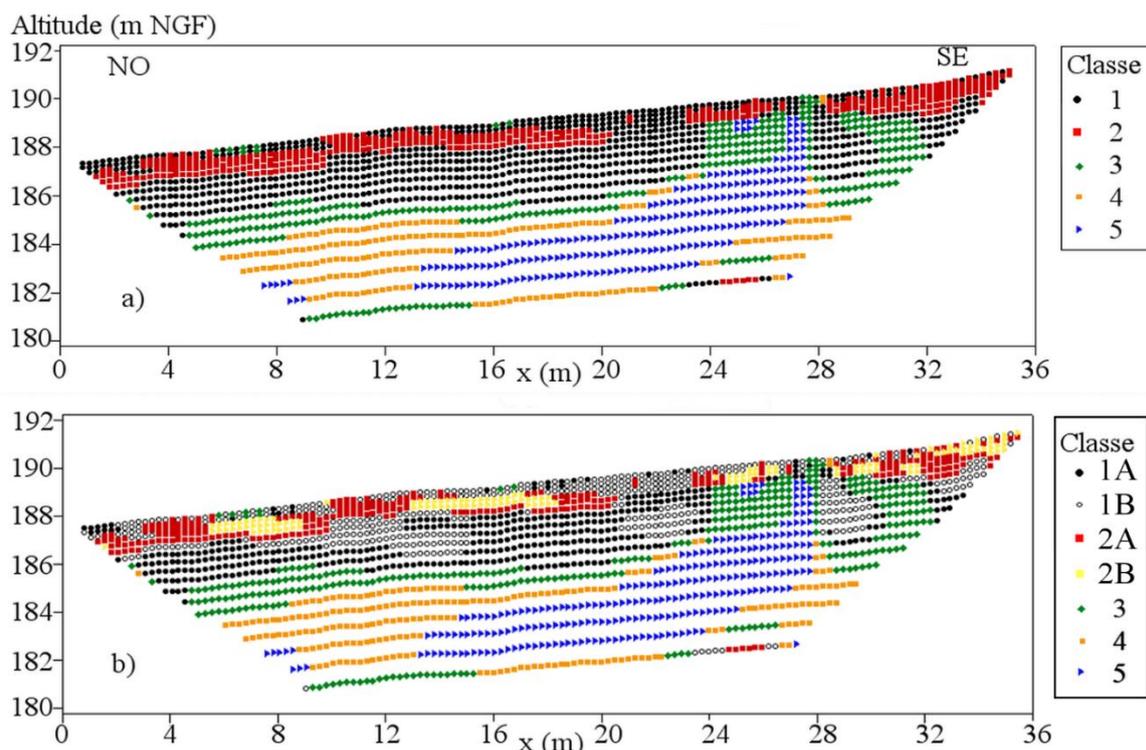


Figure 62. Répartition des blocs tenant compte des résultats de CHA par individu du profil I-50 – 5 classes (a) et 7 classes (b).

On se demande alors s'il est nécessaire de conserver cette distinction pour les étapes suivantes. L'évolution temporelle des médianes (calculée à partir des valeurs de résistivités interprétées) de ces quatre classes est tracée (Figure 63) sur un même graphe afin d'étudier si elles diffèrent ou pas. On observe clairement que leurs variations se comportent de la même façon au cours du temps. La subdivision de la classe n°1 (CHA-a) ne semble pas séparer des blocs ayant une gamme de résistivité très différente ; cependant des différences apparaissent en fin de période sèche ; à ces moment-là les médianes des résistivités sont plus élevées pour la classe 1B que pour la classe 1A. La classe 1B reste en jaune lors des périodes sèches et en période humide on observe que les classes 1A et 1B sont souvent en vert clair, donc plus conductrice. Les médianes de la classe n°2 (CHA-a) se situent entre les deux autres médianes mais en restant plus proches de celles de la classe 2A que de celles de la classe 2B (blocs de résistivité plus élevées que ceux de la classe 2A). La classe 2B de CHA-b est marquée par des fortes résistivités, où se trouvent des blocs très résistants, peu profonds (Figure 39 et Figure 64) comme on peut le voir sur le modèle du 19 juin 2013 dont la médiane est la plus faible ($165 \Omega \cdot m$). A la date du 4 octobre 2012, la médiane prend la valeur de $443 \Omega \cdot m$ qui est la valeur la plus élevée de toutes les classes. Ces blocs peuvent correspondre à des blocs calcaires moins altérés que les calcaires fissurés autour, cela peut être observé à l'entrée de la fouille Vouvé ou sur les affleurements de calcaires sur la colline de Lascaux où on trouve des calcaires altérés en plaquette avec des blocs de calcaire à l'intérieur. On va donc garder la classification en cinq classes pour les interprétations suivantes.

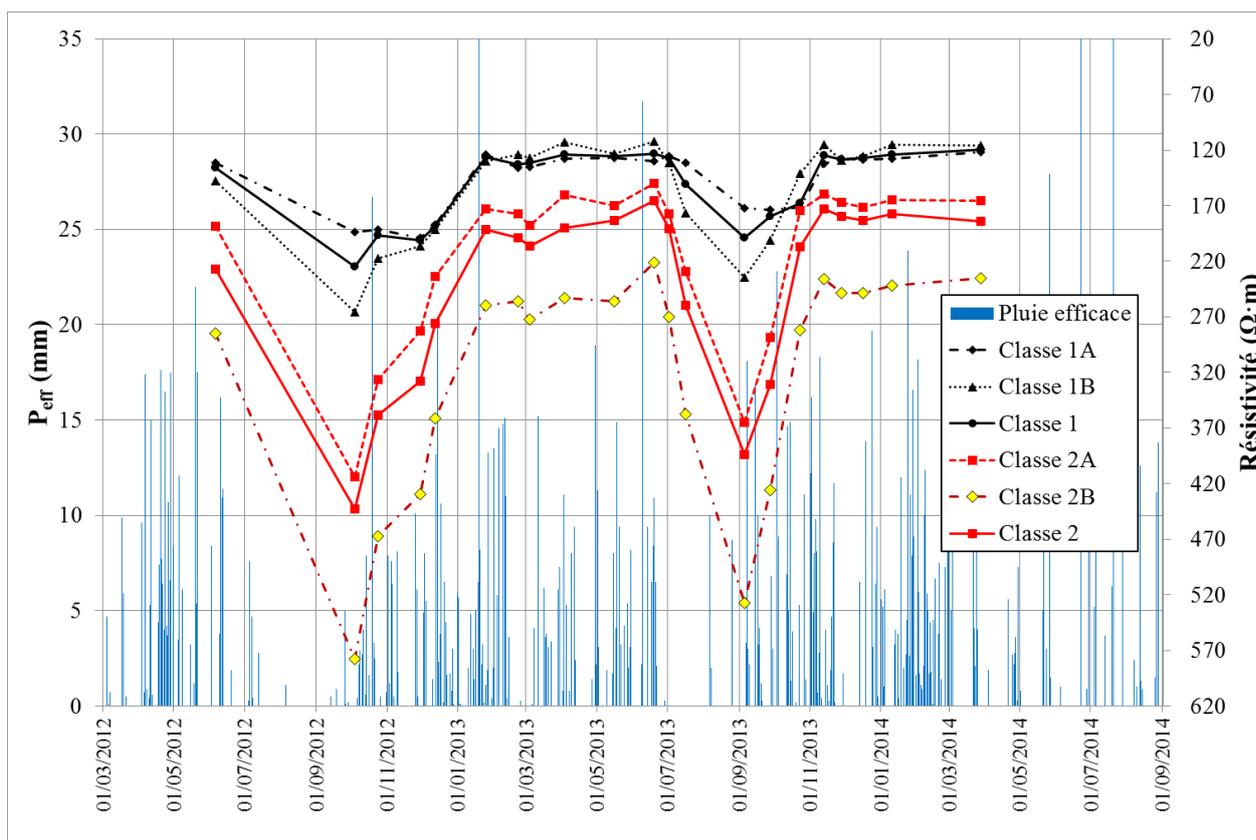


Figure 63. Evolution des médianes des classes n°1 et n°2 de la CHA-a, n°1A, n°1B, n°2A et n°2B de la CHA-b.

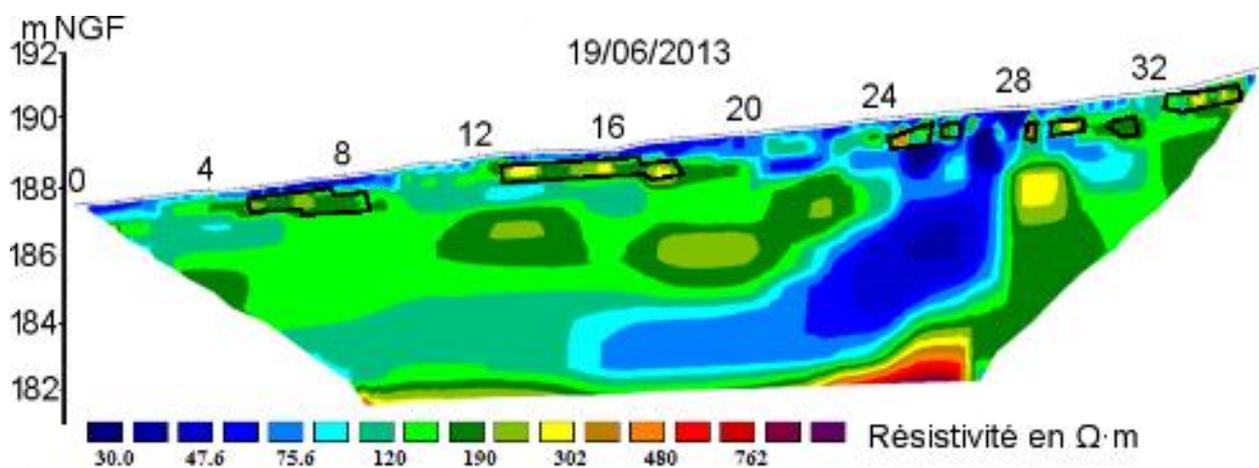


Figure 64. Blocs de la classe n°2B entourés sur le modèle de résistivité du 19/06/2013.

Analyse de la distribution des résistivités par classe (5 classes)

L'objectif attendu est de montrer si les variations temporelles de résistivité peuvent être directement ou indirectement liées au débit dans le sas1 ou à la pluie efficace (P_{eff}). Les courbes des variations de la médiane des résistivités interprétées de chaque classe au cours du temps (Figure 65) montrent d'abord l'ordre de grandeur en fonction de la classe (Tableau 9).

Par ordre de résistivité croissante des médianes, on a :

- la classe n°5 (en bleu, Figure 62) est la plus conductrice avec des valeurs de médiane qui varient de 58 à 94 $\Omega \cdot m$. Elle est assez semblable à la zone III décrite au paragraphe 3.1.1,
- la classe n°4 (en orange, Figure 62) avec des valeurs de médiane entre 100 et 121 $\Omega \cdot m$; elle est localisée autour de la classe n°5 tout en la prolongeant vers le nord-ouest.
- les classes n°1 (en noir, Figure 62) et n°3 (en vert foncé, Figure 62) ont une médiane de résistivité semblable (environ 150 $\Omega \cdot m$, sachant que la moyenne est sensible aux valeurs extrêmes) à la zone II mais la classe n°3 a une faible amplitude (116-154 $\Omega \cdot m$) par rapport à la classe n°1 (120-225 $\Omega \cdot m$). Les blocs de la classe 3 sont majoritairement situés en dessous de ceux de la classe 1, à l'exception de la zone située entre 24 et 27,5 m.
- la classe n°2 (en rouge, Figure 62) ayant la plus forte résistivité avec des valeurs de médiane variant entre 165 et 443 $\Omega \cdot m$) correspond aux blocs de la partie la plus superficielle, qui comprend des blocs les plus résistants ; de plus elle est la classe ayant la plus forte amplitude de variation.

Tableau 9. Médianes des résistivités par classe pour chaque date de mesure

Date	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
06/06/12	136	227	116	115	76
04/10/12	225	443	154	105	88
24/10/12	197	358	143	105	94
29/11/12	202	328	150	108	94
12/12/12	188	276	138	104	90
25/01/13	126	191	128	112	68
22/02/13	133	199	134	117	68
04/03/13	131	206	141	116	59
03/04/13	124	190	135	121	62
16/05/13	126	183	134	113	59
19/06/13	124	165	128	113	62
02/07/13	127	191	126	108	61
16/07/13	151	260	123	106	58
05/09/13	199	394	151	105	81
27/09/13	180	331	147	100	83
23/10/13	168	207	137	104	81
13/11/13	124	173	126	110	84
28/11/13	129	180	125	111	75
16/12/13	127	183	135	112	68
10/01/14	124	177	129	110	65
28/03/14	120	184	134	115	65
Min	120	165	116	100	58
Max	225	443	154	121	94

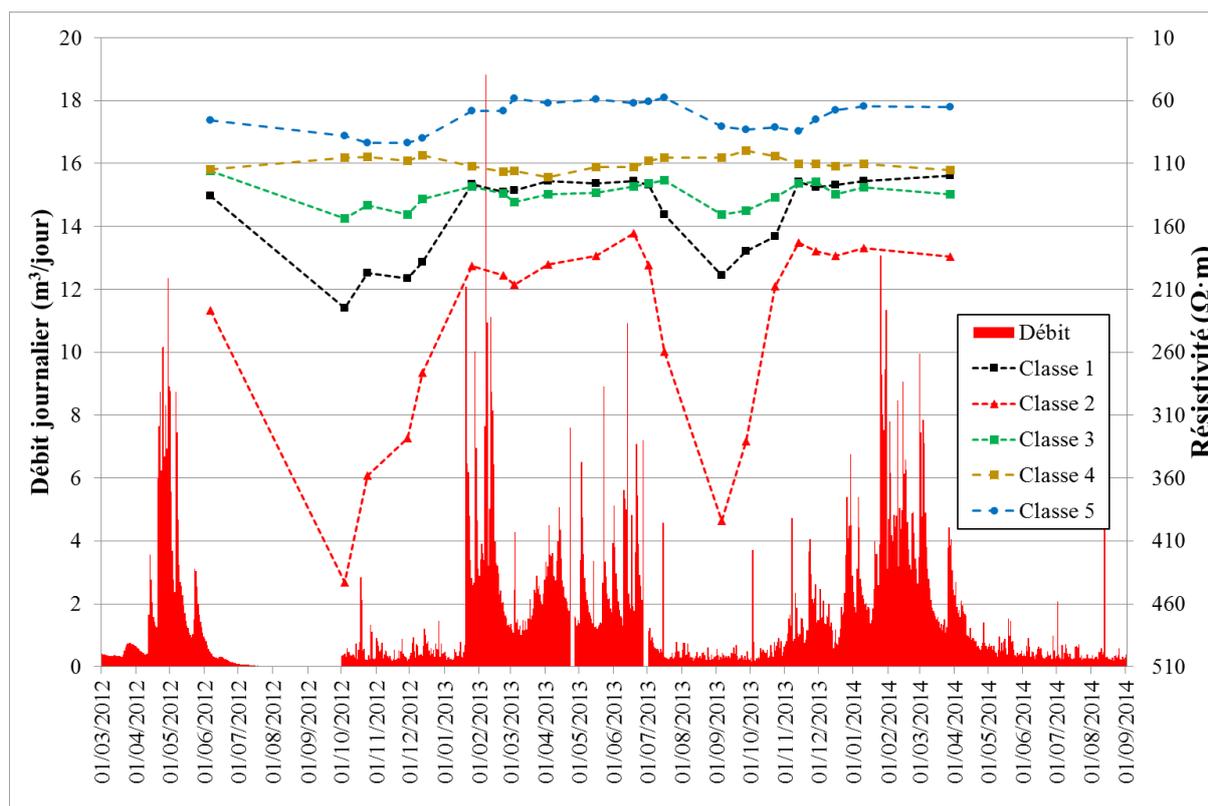


Figure 65. Evolution temporelle des valeurs des médianes des résistivités pour chacune des cinq classes.

Classe n°1

La classe n°1 contient le plus de blocs comparés aux autres classes, la médiane de résistivités varie entre 120 et 225 $\Omega \cdot m$ avec un coefficient de variation égale à 0,48 qui est légèrement plus élevée que celui de la classe n°3 (Tableau 9 et Annexe II.E). Les blocs sont répartis globalement en deux zones : une partie en surface et la plupart des blocs constituent la zone allant en profondeur de 1,3 jusqu'à 3,7 m. La partie en surface permet d'établir un lien hydraulique entre la surface et le sous-sol en passant par les domaines que recouvrent les blocs de la classe n°2.

Classe n°2

La classe n°2 contient les blocs les plus résistants, elle est la plus hétérogène (coefficient de variation = 0,61). De manière générale, les blocs de cette classe recouvrent l'ensemble du modèle depuis la surface jusqu'à 1,6 m de profondeur, à l'exception de quelques zones occupées par la classe n°1.

Puisque l'on constate que la variation des classes n°1 et n°2 ne semble pas présenter de corrélation avec le débit (Figure 66), on essaie de trouver une relation avec la pluie efficace, notée P_{eff} . Les blocs des deux classes se comportent de la même façon, quant à la variation de la pluie efficace. L'augmentation de la résistivité entre les deux premières mesures correspond à une période sans pluie (Figure 66). La résistivité décroît à partir du 4 octobre 2012 et jusqu'au 19 juin 2013 lors de la reprise de la pluie efficace, dans cette période. La diminution même momentanée de la pluie efficace engendre une augmentation très ponctuelle de résistivité (du 24 octobre 2012 au 12 décembre 2012 et du 22 février 2013 au 4 mars 2013). Avec l'absence de la pluie efficace, la résistivité augmente à nouveau entre le 19 juin 2013 et

le 5 septembre 2013. A la suite de la reprise de la pluie efficace, la résistivité diminue jusqu'au 13 novembre 2013, elle augmente ensuite quand la pluie efficace devient faible le 10 janvier 2014. Les deux dernières dates ne sont pas considérées comme interprétables parce qu'il n'y a pas de données après ces deux dernières mesures pour établir la tendance de la courbe de résistivité ; de futures mesures nous permettraient de valider ou invalider cette variation de résistivité simultanée à la pluie efficace.

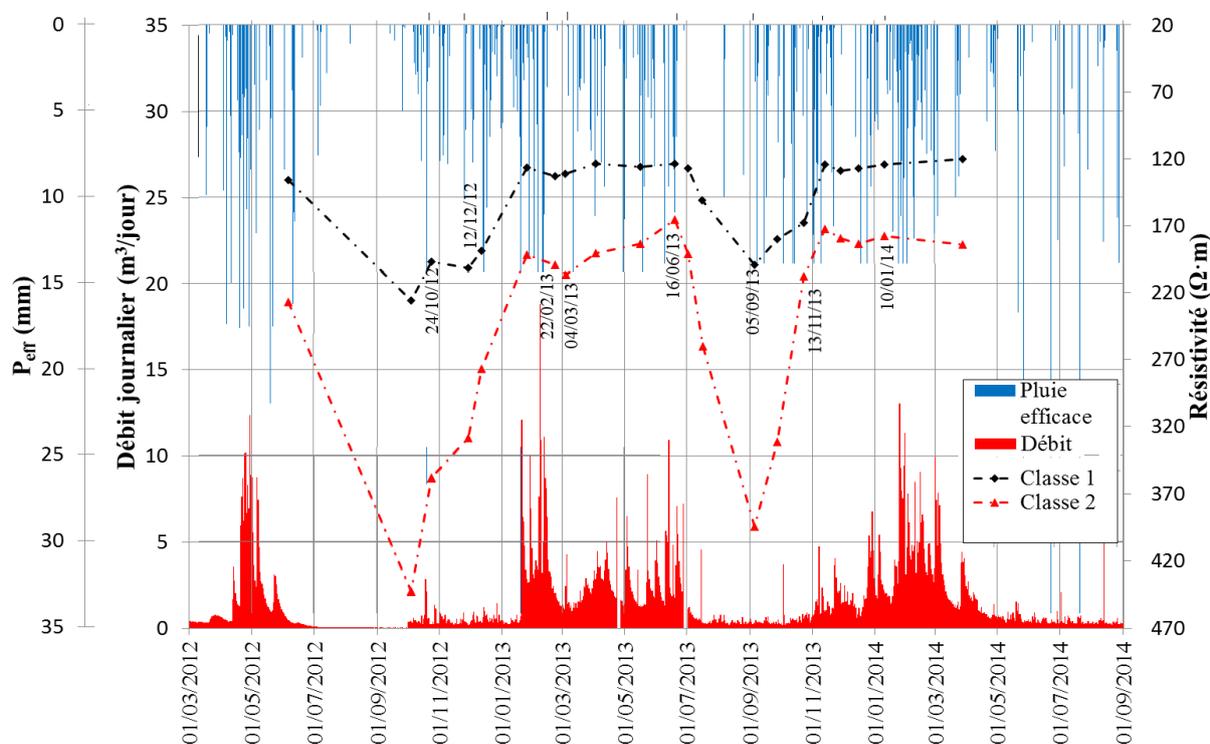


Figure 66, Variations de résistivité des classes n°1 et n°2 (axe à droite), avec la pluie efficace et le débit (axe à gauche).

Ces deux classes de blocs correspondent à des domaines sensibles aux précipitations : la pluie efficace. La forme et la profondeur atteinte par les blocs de ces classes ressemblent à la forme dite « front d'humidité » obtenue à partir de l'inversion « Time-Lapse » (cf. 3.2.1). Comparant les médianes de ces deux classes à chaque date de mesure au changement relatif de résistivité du front d'humidité (Figure 67), on constate une tendance semblable. L'approche statistique, permet d'obtenir un résultat proche de l'inversion « Time-Lapse » mais de façon plus discriminante. Avec la méthode « Time-lapse », les deux domaines sont confondus. Le changement relatif se rapproche de la variation de la classe n°2 qui est majoritairement superficielle. Les blocs correspondant aux classes n°1 et n°2 constituent donc la zone de recharge rapide de l'épikarst, probablement une zone altérée/fissurée avec une forte porosité qui favorise l'écoulement de l'eau. Ceci se traduit par la réponse quasi-instantanée de la résistivité à la pluie efficace.

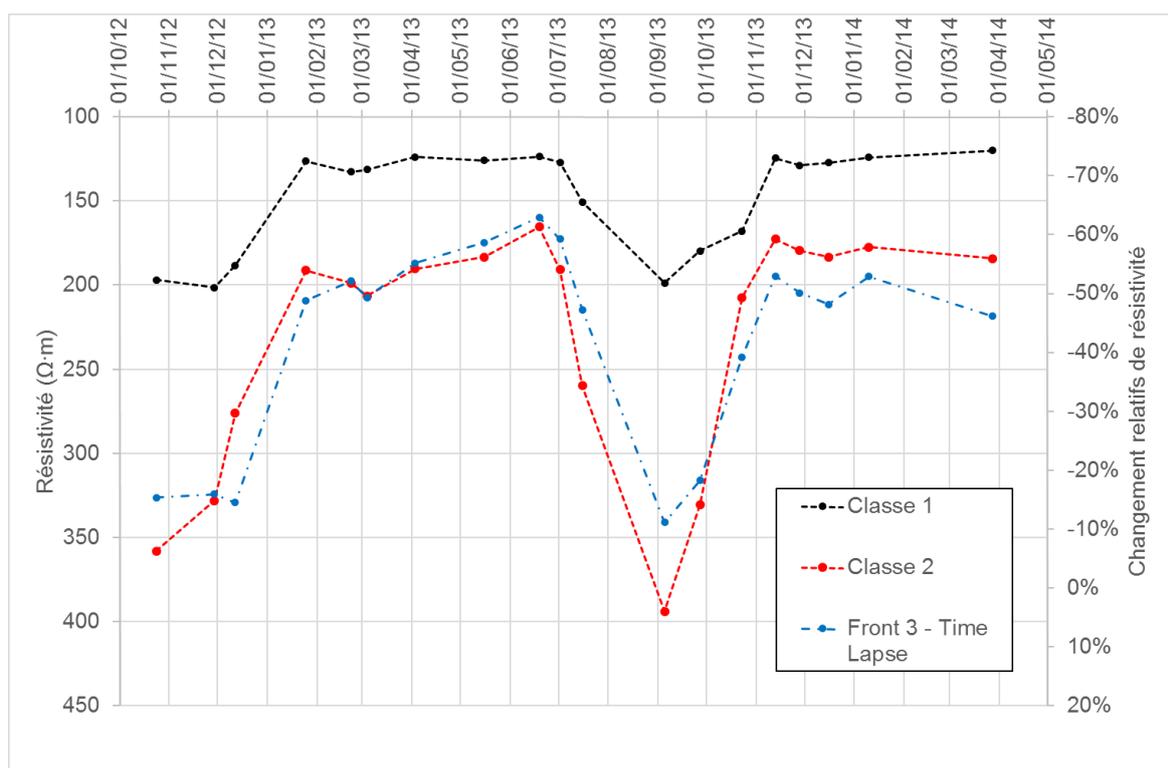


Figure 67. Comparaison entre l'évolution de résistivité des classe n°1 et n°2 et le changement relatif de résistivité obtenue par « Time-Lapse » inversion.

Les blocs des classes n°1 et n°2 situés en surface sont, au cours du temps, les plus résistants et ceux qui montrent le plus de variabilité car ils sont naturellement directement influencés par les précipitations. La classe n°2, ayant une amplitude de variation des résistivités plus importante et étant plus résistante, correspond probablement aux blocs superficiels de nature calcaire fracturé alors que la classe n°1 représente des calcaires moins altérés et peut être plus marneux.

Classe n°3

La classe n°3 présente une médiane (116-154 $\Omega \cdot m$) se rapprochant de celle de la classe n°1 mais avec un coefficient de variation égale à 0,43, la plus faible dans les classes (Tableau 9 et Annexe II.E). Cette classe a un comportement plus homogène au cours du temps. Les blocs de cette classe s'étendent quasiment de part en part du modèle à l'exception de la zone conductrice qui traverse le modèle (classe n°5). Les blocs de la classe n°3 sont plus profonds que ceux de la classe n°1. Ils se trouvent notamment entre 2 et 4,8 m de profondeur, exceptionnellement de 1 à 1,3 m entre 24 et 29 m le long du profil, avec en plus quelques points appartenant à la dernière couche (7,9 m). La classe n°3 est remarquable par des médianes quasi constantes au cours du temps variant entre 116 et 154 $\Omega \cdot m$ (Figure 68). Le rapport de saturation estimé (S_w) d'après la loi d'Archie entre une mesure au temps T_i et la mesure suivante au temps T_{i+1} (Équation 13) est proche de 1 (Figure 68). La date du 6 juin 2012 correspond au temps T_i , la saturation est définie à 1 pour cette date afin de faciliter le calcul et la comparaison.

$$\frac{S_w(T_{i+1})}{S_w(T_i)} = \sqrt{\frac{\rho(T_i)}{\rho(T_{i+1})}} \quad (\text{Équation 13})$$

Le comportement ressemble à celui d'un niveau qui varie peu, c'est-à-dire sans grande modification de teneur en eau. On peut faire l'hypothèse que ces blocs pourraient correspondre à un niveau ayant un contraste faible de perméabilité. Les formations géologiques correspondantes peuvent être une formation calcaire moins fissurée que celle de la classe 1, où il serait possible que la circulation de l'eau n'y ait pas lieu ou difficilement ou aussi à un horizon plus marneux avec des fissures colmatées expliquant la faible valeur de résistivité.

Le changement du rapport de saturation estimé est aussi lié à celui du débit. Ce rapport augmente lorsqu'il y a un événement de débit avant le jour de mesure, par exemple, l'augmentation du rapport de saturation (0,95) le 25 janvier 2013 est précédée par la reprise du débit (12,1 m³/j) le 20 janvier 2013. L'augmentation du rapport (0,96) le 13 novembre 2013 est aussi précédé d'une crue du débit (4,7 m³/j) le 7 novembre 2013. Au contraire, le rapport de saturation diminue lorsqu'il y a une décroissance du débit.

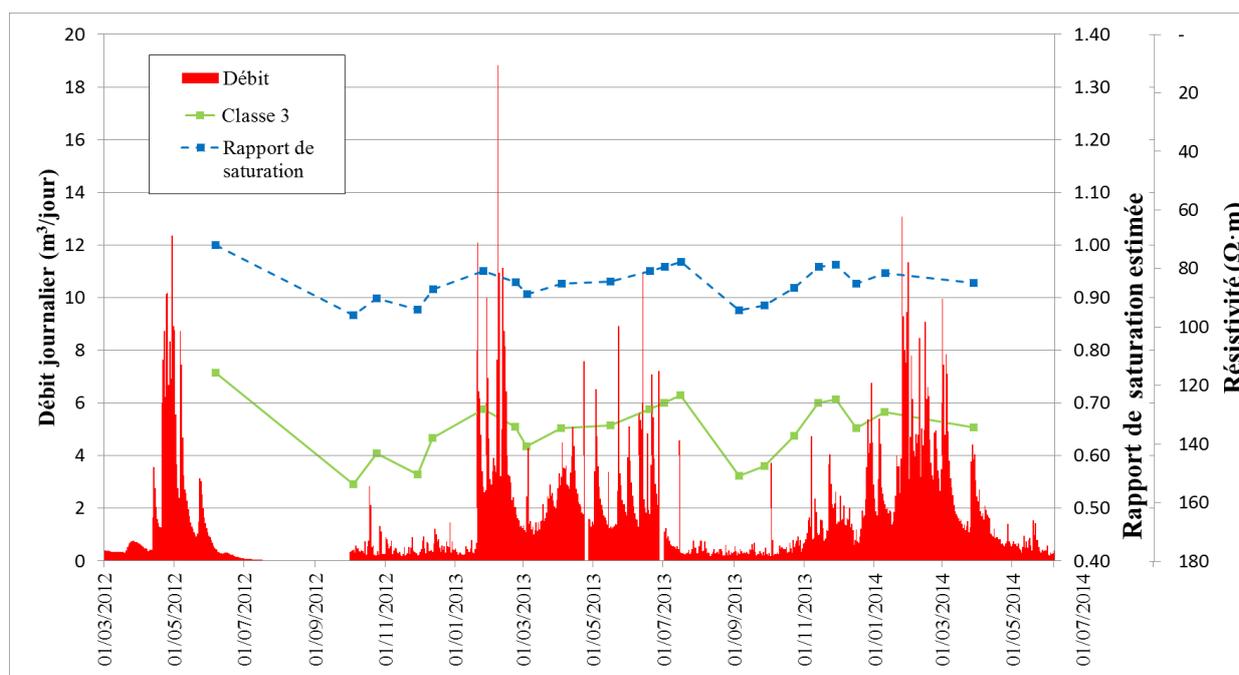


Figure 68. Evolution des médianes des résistivités et du rapport de saturation de chaque mesure par rapport à la mesure précédente.

Les classes n°4 et n°5 correspondent aux blocs les plus conducteurs avec le fait que la classe n°4 présente la variabilité temporelle la plus faible (Tableau 9). Les classes n°4 et n°5 sont les deux classes qui nous intéressent le plus, car elles montrent une relation directe avec le débit du sas1 (Figure 69), On analyse ci-dessous successivement le comportement des blocs de ces deux classes.

Classe n°5

Les blocs de la classe n°5, présentent la plus faible résistivité (de 58 à 94 Ω·m) mais une

grande variabilité (coefficient de variation égale à 0,29) qui est cohérente avec l'observation graphique faite au paragraphe 3.1.1 de la zone III.

Graphiquement, la variation de la classe n°5 est quasiment synchronisée à celle du débit (Figure 69). Depuis la première mesure jusqu'au 24 octobre 2012, la résistivité n'a pas cessé d'augmenter pendant que le débit était négligeable, elle stagne entre les mesures du 24 octobre 2012 au 29 novembre 2012 alors que le débit a un peu repris à partir du 18/11/2012. Lors de la période de crue (du 18 novembre 2012 au 3 juillet 2013), la résistivité a d'abord diminué et puis s'est maintenue à un seuil autour de 62 $\Omega \cdot m$ (Figure 70). La période sèche suivante montre une croissance de la résistivité jusqu'au 13 novembre 2013. Puis la résistivité décroît jusqu'au seuil de 62 $\Omega \cdot m$ avant la dernière mesure du 28 mars 2013.

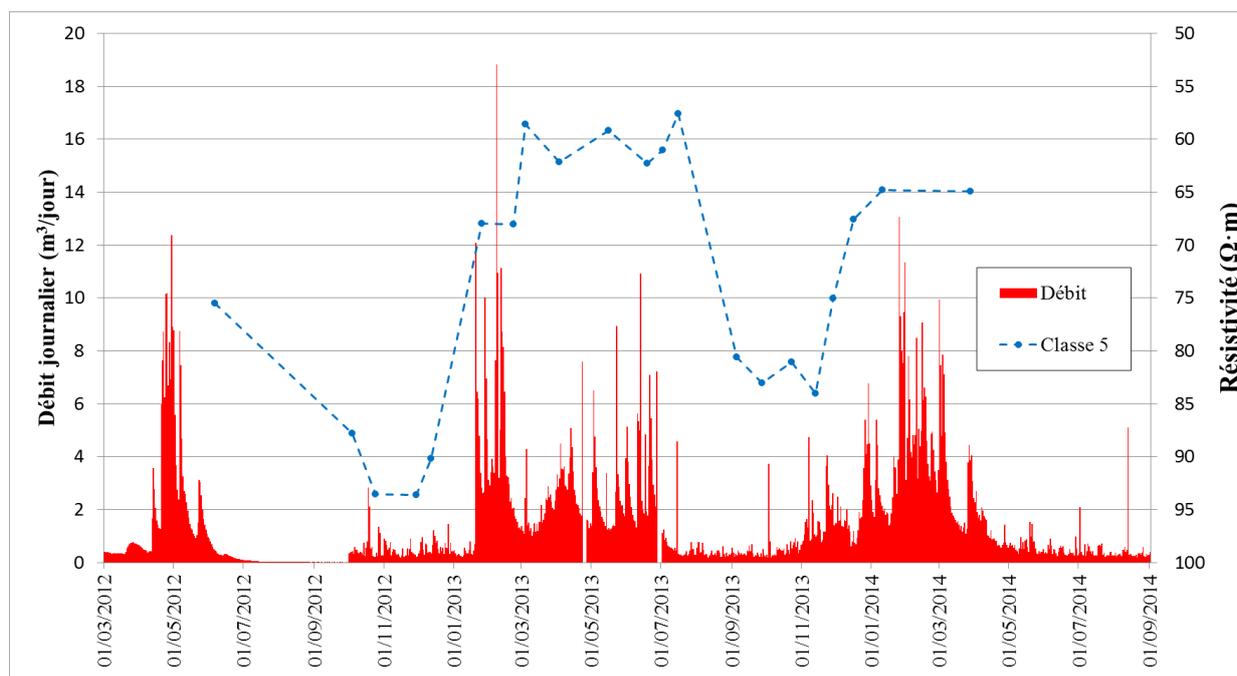


Figure 69. Evolution des médianes de résistivités de la classe 5.

On s'appuie sur la période de fort débit afin de décrire le seuil de résistivité (Figure 70). Entre le 1 mars 2013 et 1 juillet 2013, sept augmentations de débit sont marquées (noté 1 à 7, Figure 70), chaque augmentation du débit est précédée par une pluie efficace supérieur à 10 mm (pluie efficace cumulée pendant 3 jours avant la mesure). Dans ces conditions, la pluie efficace joue un rôle quasiment instantané sur l'augmentation du débit. Lorsque la résistivité atteint le seuil de 62 $\Omega \cdot m$, le réservoir de la nappe réagit donc très rapidement à un événement de pluie, il fait augmenter le débit un jour après. Dans le cas où les résistivités sont fortement supérieures à 62 $\Omega \cdot m$, par exemple le 29 novembre 2012 (la médiane de résistivité est alors à 94 $\Omega \cdot m$, soit 52% supérieur à 62 $\Omega \cdot m$), il y a eu 16,7 mm de pluie efficace cumulée sur 4 jours avant la mesure mais il n'a pas eu d'augmentation significative du débit.

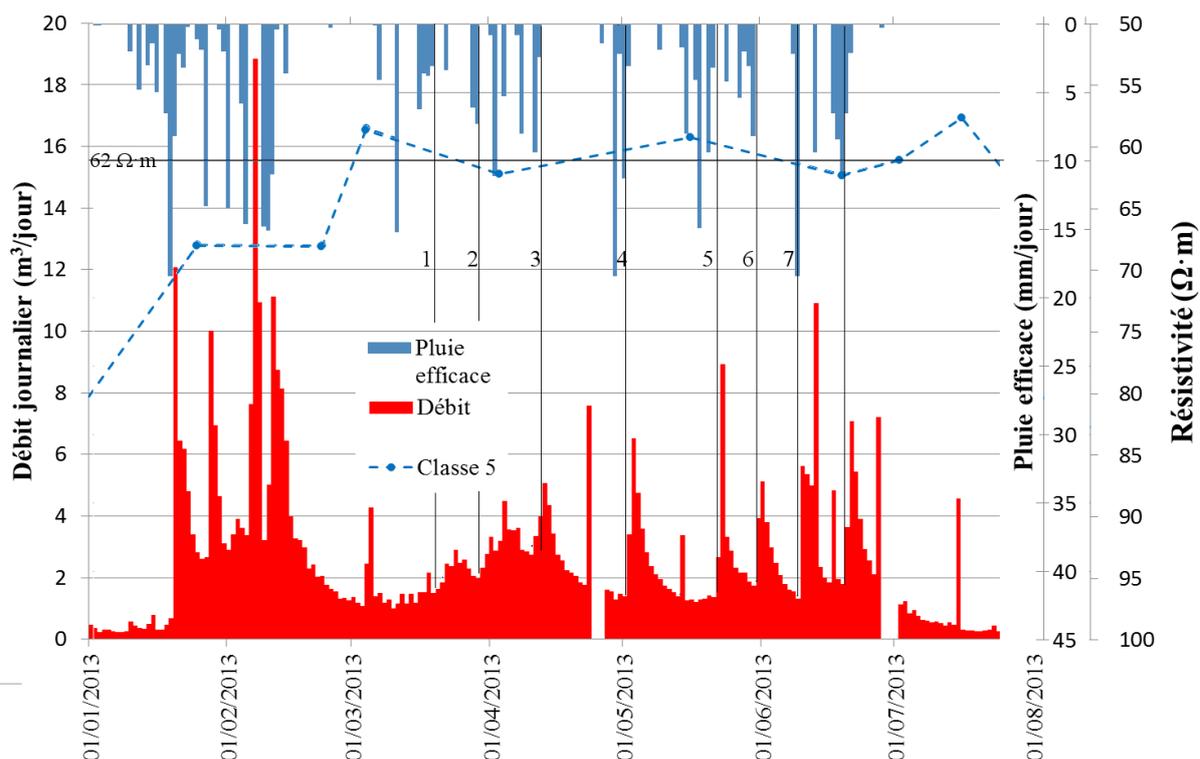


Figure 70. Zoom sur la période de crue, avec le débit sur l'axe à gauche, la pluie efficace sur l'axe à droite 1 et l'évolution de résistivité sur l'axe à droite 2.

Les blocs de cette classe montrent une variation des résistivités électriques synchronisée au débit ; ils peuvent correspondre au chemin préférentiel dans la partie épikarstique qui alimente la nappe de la grotte. Il peut s'agir d'un calcaire poreux très altéré soit avec une porosité matricielle très importante soit très fracturé dont la teneur en eau varie en fonction du temps.

Classe n°4

La classe n°4, ayant la plus faible variabilité (coefficient de variation = 0,27), enveloppe le groupe des blocs de la classe n°5. Cette classe correspond à l'« extension » latérale vers le nord-ouest de la zone la plus conductrice, elle ne semble pas avoir une relation simultanée au débit (Figure 71).

La zone correspondant aux blocs de la classe n°4 peut être constituée d'un calcaire poreux avec des formations plus argileuses. Ce type de formations a été rencontré dans un forage (nommé SG) réalisé le 14 mai 2014 en dehors de l'enceinte, où on a observé le même type d'anomalie conductrice semblable à la classe n°5 par les mesures TRE (cf. 5.3.1). L'altitude de ce forage est à 193,7 m NGF et l'on a trouvé des matériaux argileux entre les joints de calcaire de 5,5 à 7 m de profondeur, soit 186,7 à 187,7 m NGF. Le résultat de l'analyse micro-granulométrique de ce matériau montre que c'est un limon sablo-argileux contenant 44% de limon, 32% de sable et 24% d'argile. La classe n°4 peut être constituée en partie par ce matériau, ce qui permet de faire varier la teneur en eau en fonction de la saison. Lors d'une période de crue, cette zone se met en charge et puis peut alimenter la nappe alors que le débit diminue.

On peut, à propos de cette classe, constater que si l'on décale de 120 jours plus avant les

résistivités (Figure 71, pointillé), un lien entre le débit et la résistivité semble s'établir. Il ne pourrait être confirmé qu'avec un suivi temporel plus long (4 ans). L'hypothèse peut cependant être partiellement confirmée à la fin de la période de suivi où l'on aurait des fortes valeurs de résistivité lors d'une période sans débit, après le mois de mai 2014. Ce déphasage, s'il peut être vérifié par d'autres mesures, pourrait être la signature d'un écoulement, décalé dans le temps, depuis les blocs de la classe n°4 soit vers ceux de la classe n°5 soit vers la grotte et montrerait un stockage de l'eau pendant 120 jours avec les périodes de forts débits dans la grotte. Ce déphasage pourrait être en lien avec la progression temporelle de l'humidité des joints calcaires observés dans la salle des Taureaux.

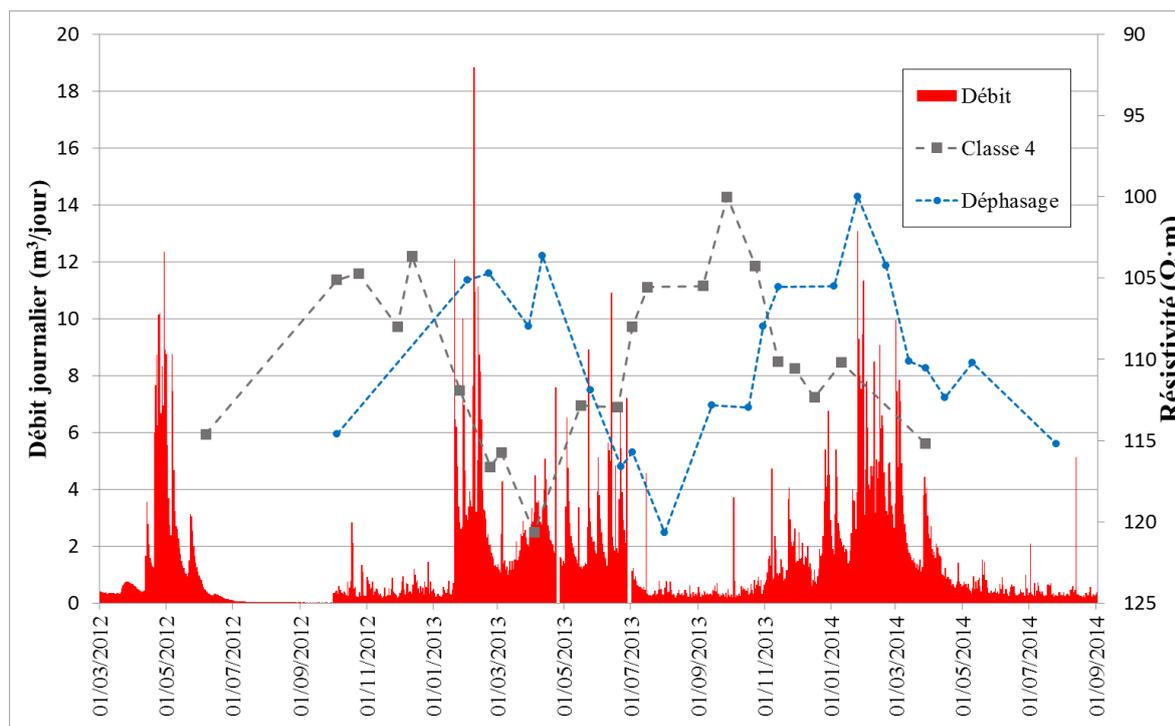


Figure 71. Evolution de résistivité de la classe 3 (verte), puis un déphasage de 120 jours vers le futur (bleu en pointillé).

3.3.4. Synthèse sur le suivi temporel du profil I-50

Les modèles de résistivité pour chaque date de mesure nous permettent d'identifier clairement une zone spécifique, conductrice qui a une variation remarquable au cours du temps. L'environnement autour de cette zone semble être stable à l'exception de la partie superficielle. Cette dernière a une relation significative avec la variation de la pluie efficace.

Les inversions « Time-Lapse » ont mis en évidence ces effets dans la partie superficielle (0 à 2,4 m), où l'on met en évidence un front d'humidité. Au-dessus de ce front, les résistivités sont très affectées par la pluie : lors d'événements pluvieux intenses, les variations de résistivité décroissent et tendent vers une valeur constante. Or, ce front s'arrête vers 2,4 m, profondeur à partir de laquelle la variation devient moins importante au cours du temps. En profondeur, les résultats obtenus avec la méthode dite time-lapse (Loke *et al.*, 2014) ne sont pas cohérents avec l'observation des mesures de TRE en 2D telle que nous l'avons mise en œuvre et paramétrée.

En conséquence, l'approche statistique multidimensionnelle a été proposée afin de quantifier les comportements de différentes zones. Une CHA a mis en évidence cinq classes regroupant les blocs ayant la même tendance de variation temporelle. La médiane de chaque classe montre des liens étroits soit avec la pluie efficace, soit avec le débit dans la sas1. Les blocs superficiels des classes - n°1 et n°2, réagissent vite aux événements pluvieux. L'enveloppe de ces deux classes ressemblent beaucoup à la forme du front humidité obtenu par l'inversion « Time-Lapse ». Ces deux classes peuvent être constituées de calcaires altérés, fissurés, mais à un degré plus élevé pour les blocs de la classe n°2. La classe n°3, ayant quasiment les mêmes valeurs de médiane que la classe n°1, se trouve dans la couche sous-jacente de la classe n°1 et n'a qu'une très faible variation temporelle. On peut penser que cette classe, situé plus profond et protégé par les classes n°1 et 2, est moins érodé sous l'effet climatique, et elle correspond à une même formation que la classe n°1 mais avec une altération plus faible, formant ainsi un horizon quasi imperméable pour la nappe perchée de la grotte. C'est aussi à cette profondeur (2,4 m) que le front d'humidité s'arrête selon l'inversion « Time-Lapse ».

Le classe n°5 contient les résistivités les plus faibles, et elle se comporte de façon synchronisée aux variations du débit. On remarque que cette classe peut être la zone d'alimentation directe du point de décharge dans la sas1. Finalement, la classe n°4, ayant une réponse tardive par rapport au débit, est marquée par une variation temporelle déphasée de quatre mois par rapport à celle de la classe n°5. Ce déphasage peut être la signature d'écoulement depuis la classe n°4 soit vers la classe n°5 soit vers la grotte et un probable stockage de l'eau pendant 4 mois lors des périodes de fort débit dans la grotte.

Les mesures de TRE ont été réalisées avec un pas d'environ 1 mois. Les variations entre les mesures sont donc interpolées de manière linéaire, ce qui ne favorise pas l'estimation des faibles variations liées au débit ou aux précipitations plus ponctuelles. Un dispositif de mesure mis en place de façon permanente et des mesures régulières pourraient résoudre cette question de précision et nous permettraient de mettre en évidence quantitativement la prévision de l'écoulement de l'eau,

Chapitre 4

Profil I et II, analyse et modélisation

A l'exception du profil I-50, on a trois autres profils dont les modèles de résistivité peuvent donner les informations supplémentaires sur la zone des formations détritiques (I-100) et à côté de la grotte (II-50 et II-100). On s'intéresse, d'une part, aux connections éventuelles entre la zone conductrice du profil I-50 étudié précédemment et les informations des altérites présentes sur le profil I-100. D'autre part, sur les deux autres profils, on essaie à la fois d'identifier des zones semblables à celles du profil I-50 et aussi de mettre en évidence des endroits qui correspondent à des formations géologiques différentes.

4.1. Profil I-100

L'approche par traitements statistiques est également appliquée au profil I-100 afin de mettre surtout en évidence le lien entre la zone probable d'alimentation de l'eau identifié sur le profil I-50 mais aussi la partie concernant les formations détritiques sablo-argileuse située à l'est du site de Lascaux. Les modèles de résistivité (Figure 72) sont présentés par ordre chronologique. Il y a 20 variables (dates) au total, avec quelques différences sur la série des dates analysée avec le profil I-50. Il n'y a pas de mesures le 6 juin 2012 tandis que la mesure du 4 octobre 2012 n'est pas exploitable (flute inversé pendant la mesure). La mesure du 6 février 2013, pour ce profil, est utilisable alors que celle du profil I-50 est perdue (flute inversé pendant la mesure du profil I-50). Les traitements statistiques commencent donc du 24 octobre 2012 jusqu'au 28 mars 2014. Les mêmes paramètres d'inversion sont utilisés. Chaque modèle de résistivité contient 2080 blocs. Ces résistivités dites vraies sont aussi corrigées des effets de température et normalisées par unité de surface à l'identique de ce qui a été fait pour le profil I-50.

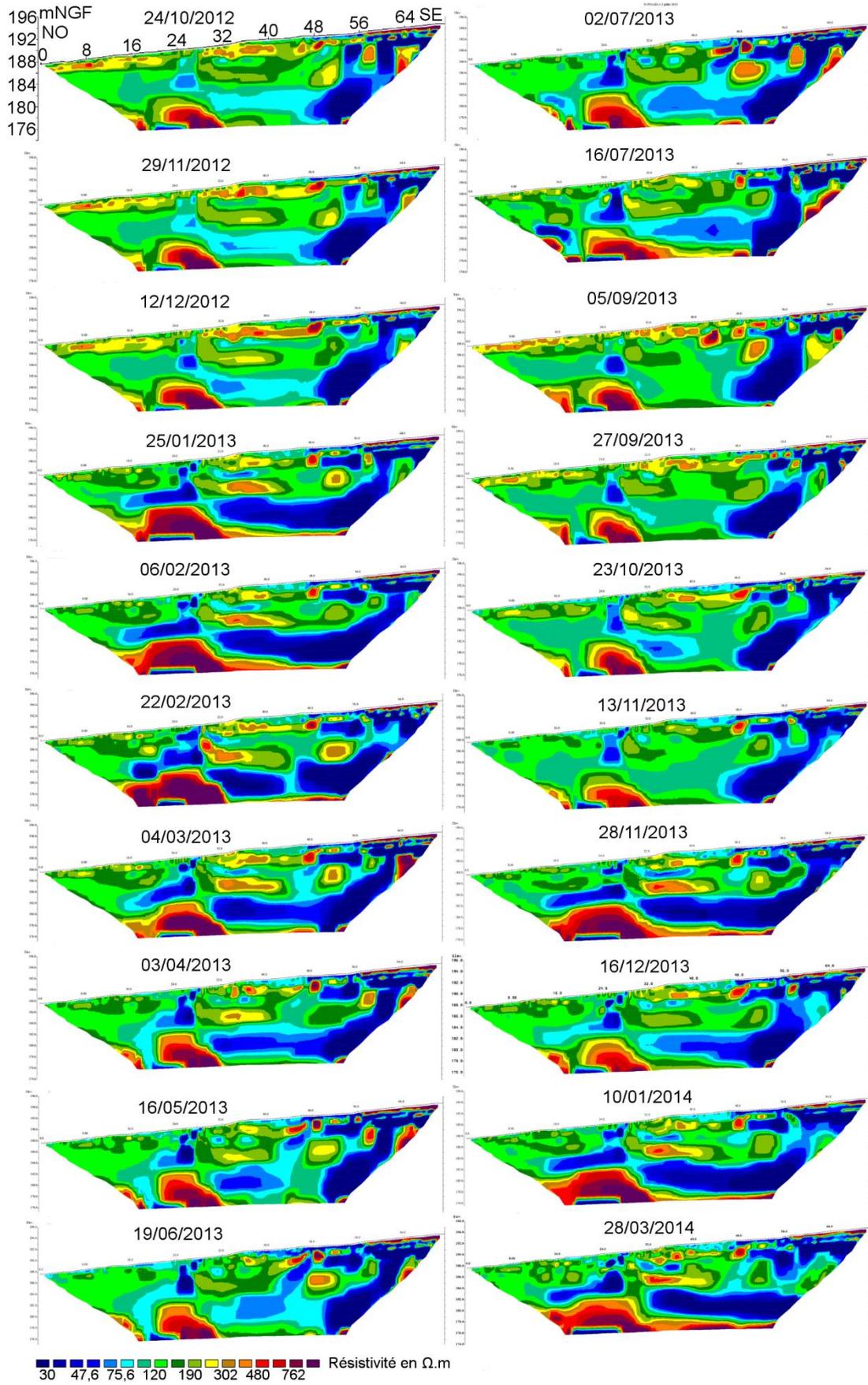


Figure 72. Modèles de résistivité du profil I-100.

4.1.1. Artéfact numérique lors de l'inversion

Les modèles de résistivité du profil I-100 montrent une anomalie conductrice qui se situe en bas à gauche du modèle. Prenons l'exemple de deux modèles obtenus par l'inversion en concaténant des données issues des deux dispositifs pôle-dipôle et gradient, réalisés aux différentes périodes : sèche le 5 septembre 2013 et humide le 10 janvier 2014. On observe que l'anomalie indiquée par un carré noir (Figure 73) ne présente aucune variation de résistivité mais sa forme varie légèrement. Cette anomalie comme décrit ci-dessous est interprétée comme un artéfact numérique lors de l'inversion.

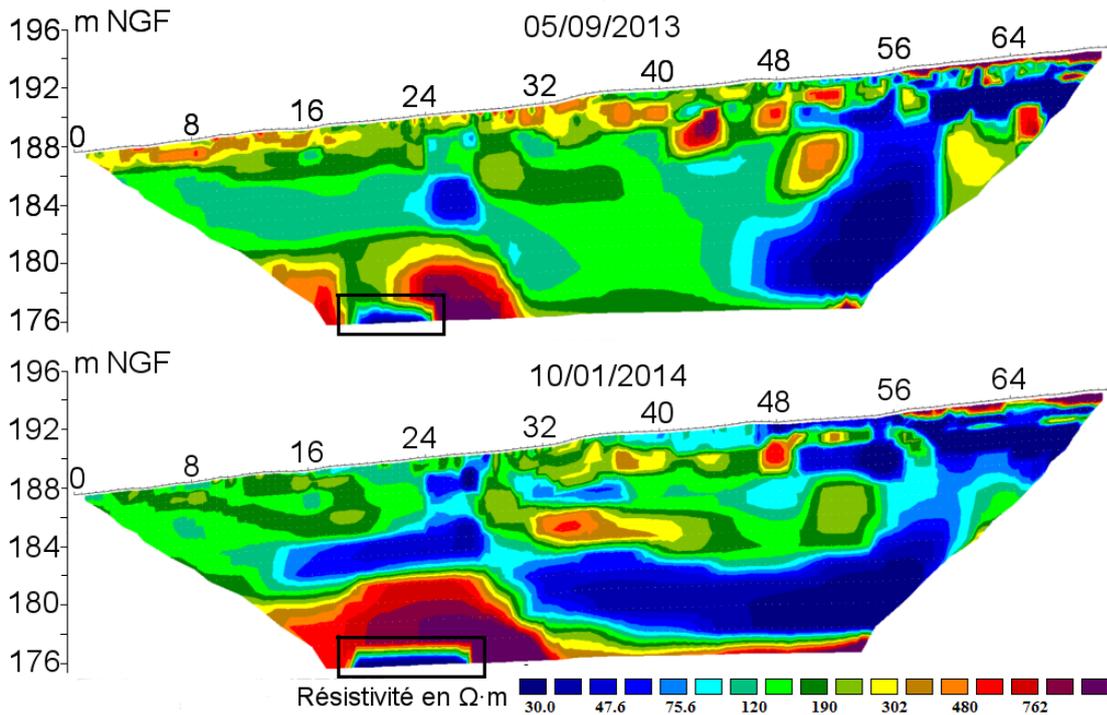


Figure 73. Les modèles de résistivité du 05/09/2013 et du 10/01/2014 montrant une anomalie conductrice située en bas à gauche et considérée comme un artéfact de calcul.

Cette anomalie apparaît aussi dans les modèles issus des données obtenues avec l'un ou l'autre des dispositifs pôle-dipôle (direct et inverse) et gradient (Figure 74). Cependant, sa position est différente : entre 18 et 22 m avec le dispositif pôle-dipôle et entre 26 et 30 m avec le dispositif gradient. Cette différence de position de l'anomalie peut confirmer l'hypothèse de l'artéfact numérique de l'inversion.

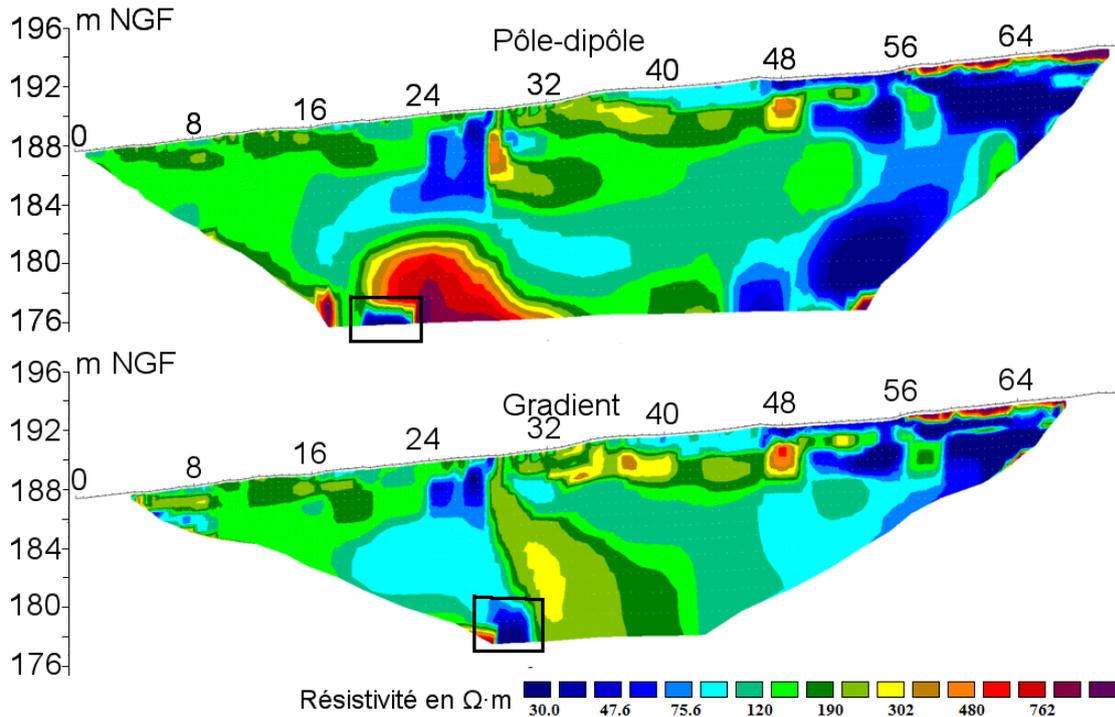


Figure 74. L'anomalie apparaît en deux endroits différents endroit sur les modèles du 10/01/2014 avec le dispositif pôle-dipôle (haut) et gradient (bas).

En termes de vérification numérique, on filtre les résistivités apparentes par niveaux successifs, puis on inverse ces données toujours avec les mêmes paramètres d'inversion. Cela revient à obtenir des modèles de résistivité dont le dernier niveau est supprimé. On observe alors que les profondeurs maximales des modèles sont progressivement diminuées, de 175 à 178 m NGF, mais l'anomalie profonde au bord gauche ne disparaît pas. Le toit de cette anomalie augmente successivement de 176 à 180 m NGF. Ceci confirme l'existence d'un artefact numérique. La partie conductrice en base terminale ne devra donc pas être prise en compte par la suite. Le niveau inférieur une fois les inversions réalisées a été supprimé pour les analyses statistiques suivantes.

4.1.2. Résultat des analyses statistiques

On étudie dans la partie suivante la variation de résistivité en fonction des classes, en supprimant la dernière couche contenant l'artefact numérique que l'on a constaté précédemment. On présente chaque classe ci-après avec leur position (Figure 75) ainsi que son interprétation associée. Le nombre de classe est choisi ici afin de trouver un équilibre entre le nombre de classes et les éléments essentiels distinguées, ce qui peut être expliqué par le dendrogramme de CHA (Annexe III.A). Les médianes de résistivité de chaque classe sont présentées sur le Tableau 10.

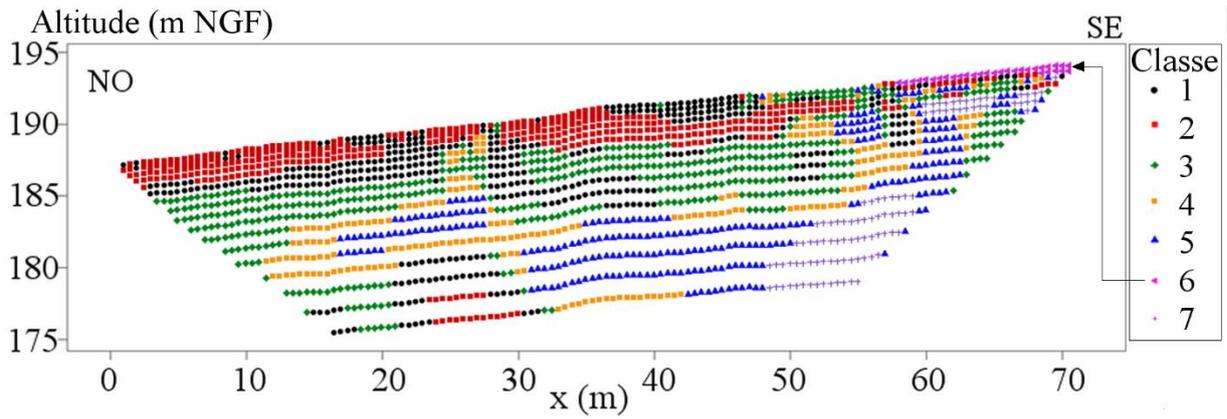


Figure 75. Répartition spatiale des blocs issus de la classification CHA pour le profil I-100, le dernier niveau est filtré.

Tableau 10. Les médianes des résistivités par classe pour chaque date de mesure du profil I-100.

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7
24/10/12	197	294	133	114	80	1976	26
29/11/12	202	298	131	112	76	1592	24
12/12/12	195	268	124	110	80	1366	25
25/01/13	141	181	126	87	40	1675	22
06/02/13	140	175	125	85	38	1480	22
22/02/13	122	189	120	79	44	1852	25
04/03/13	145	198	132	88	45	2001	24
03/04/13	142	170	126	98	54	1530	24
16/05/13	145	170	126	96	63	2017	22
19/06/13	137	153	119	103	71	1216	20
02/07/13	135	174	123	90	63	2496	18
16/07/13	149	222	124	74	66	2379	19
05/09/13	194	322	130	101	100	2224	25
27/09/13	172	263	126	108	92	1282	21
23/10/13	170	210	117	106	75	931	20
13/11/13	134	168	119	104	85	868	20
28/11/13	135	177	120	89	38	1364	23
16/12/13	138	182	125	95	66	1039	22
10/01/14	128	169	118	77	40	1050	23
28/03/14	129	161	125	85	44	1052	24
Min	122	153	117	74	38	868	18
Max	202	322	133	114	100	2496	26

Classe n°1

La classe n°1 se compose de blocs situés entre 2,1 et 3,3 m de profondeur, et aussi de certains blocs situés en profondeur (entre 21 et 30 m, en-dessous de 180 m NGF). Les médianes des résistivités dans cette classe varient entre 122 et 202 $\Omega \cdot m$ (Figure 76) au cours du temps. La variation et les valeurs de résistivité ressemblent à celles de la classe n°1 du

profil I-50 (Figure 76). Mais la classe n°1 du profil I-50 présente des résistivités légèrement plus faibles ; dans le cas du profil I-100, la classe n°1 des blocs a une forte résistivité et semble être l'extension de la zone IV (Figure 40).

Classe n°2

Cette classe est constituée des blocs situés surtout en surface et pour partie en profondeur entre 22 et 30 m. La courbe de l'évolution de la résistivité en fonction du temps de cette classe (Figure 76) montre qu'elle réagit vite avec le changement de la pluie efficace. Elle se comporte quasiment comme la classe n°2 du profil I-50 (Figure 76). Cependant, l'amplitude de la variation de la classe n°2 est plus forte que celle de la classe n°1, avec une médiane de résistivité plus forte (198 Ω·m) que celle de la classe n°1 (152 Ω·m), les blocs de la classe n°2 pourraient être plus fracturés ou plus poreux que ceux de la classe n°1.

Situés souvent en-dessous de ceux de la classe n°2, la classe n°1 pourraient contenir des calcaires moins érodés par les effets climatiques tout comme les blocs de la classe n°1 du profil I-50, et elle correspond à une même formation que la classe n°2 mais avec une altération plus faible.

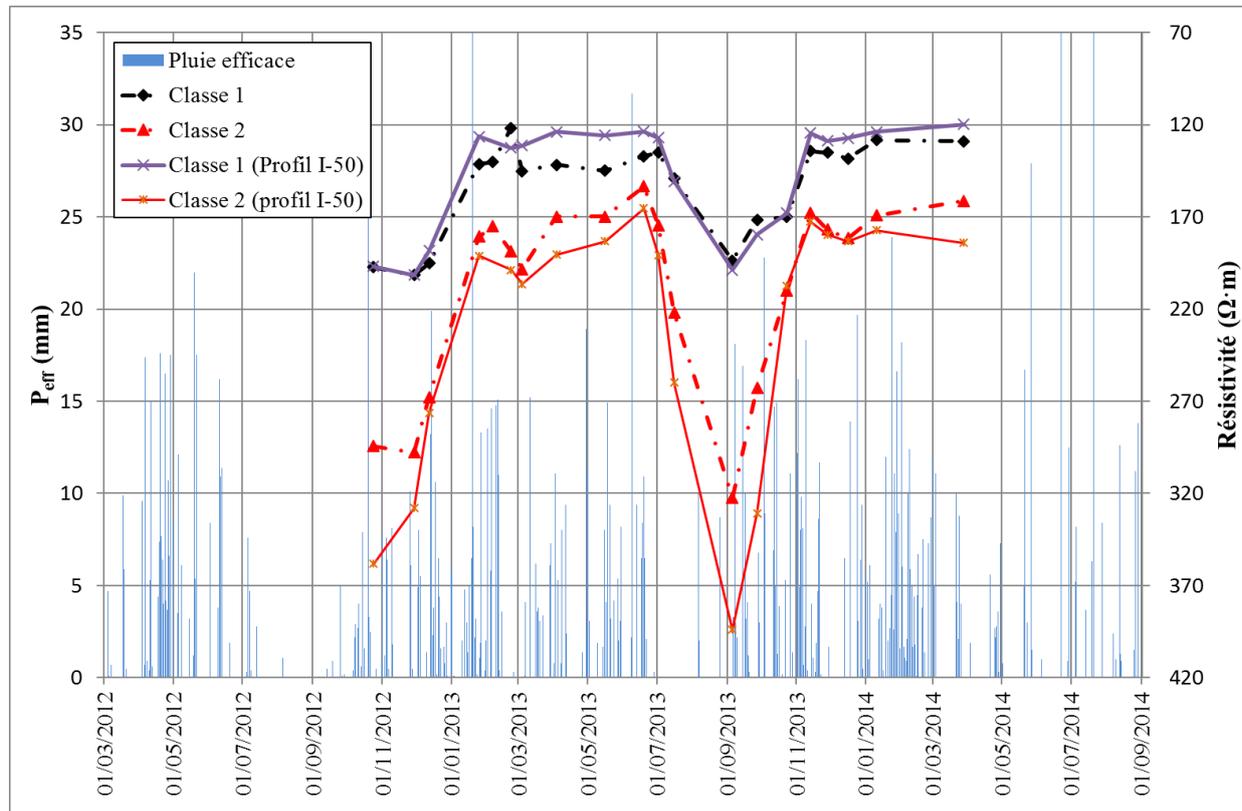


Figure 76. Pluie efficace (axe principal) et évolution de la résistivité en fonction du temps (axe secondaire).

Classe n°3

Les blocs de la classe n°3 constituent la partie située entre 2 et 6 m de profondeur avant d'atteindre une zone très conductrice (52 m le long du profil). Ces blocs sont moins résistants (médiane à 111 Ω·m) que ceux des classes n°1 et n°2. De plus, cette classe a une faible valeur d'écart-type (129), représentant une variabilité la plus faible (Figure 77). Elle ressemble à la classe n°3 du profil I-50 que nous avons attribué à un calcaire moins altéré et plus probablement marneux ou avec une plus forte teneur en eau, ce qui formerait un horizon moins

perméable. On constate une plus faible résistivité que celle de la classe n°3 du profil I-50 qui s'explique par le fait que le dispositif d'1 m est plus long et a une profondeur d'investigation plus élevée, et contenant probablement de ce fait une partie plus conductrice vers le sud-est du profil. Les blocs au-delà de 35,5 m (longueur du profil I-50) et en-dessous de 7,8 m (profondeur maximale du profil I-50) conducteurs font diminuer la médiane de la résistivité pour cette classe du profil I-100.

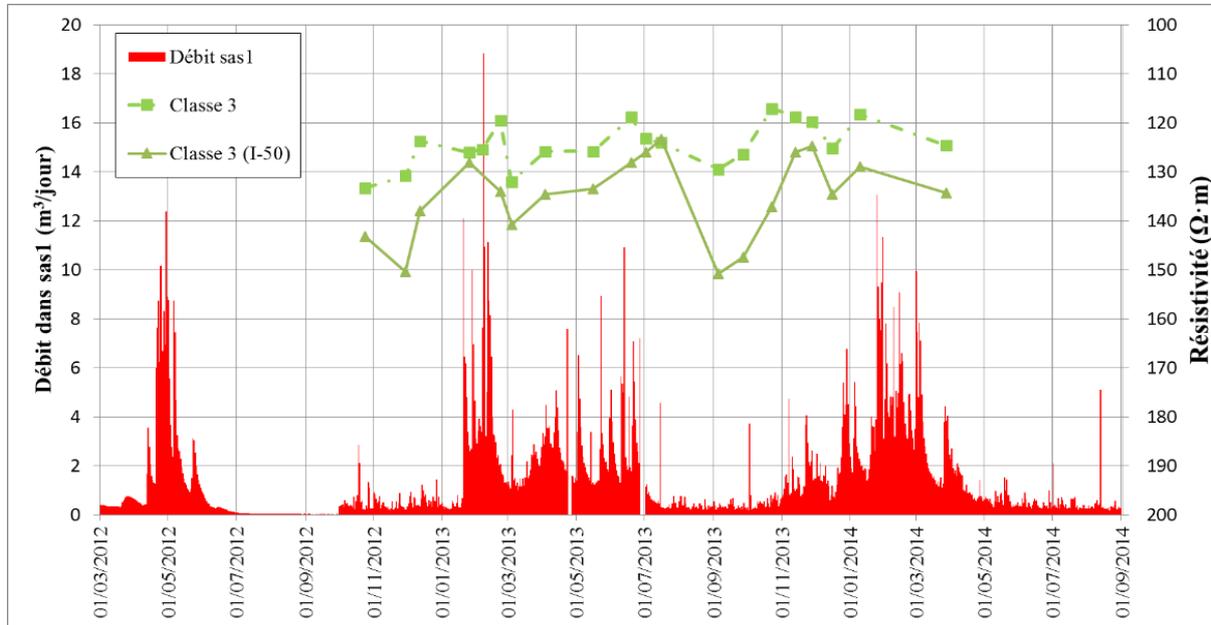


Figure 77. Evolution des médianes des résistivités de la classe n°3, en comparaison à celles de la classe n°3 du profil I-50.

Classe n°4

Cette classe est constituée principalement de blocs ayant une faible résistivité (74 à 114 $\Omega \cdot m$), mais elle a une variabilité moyenne (coefficient de variation = 0,58). Cette classe enveloppe la classe n°5 (cf. classe n°5). La variation de résistivité des blocs de cette classe semble se corréliser au débit dans la grotte (Figure 79). Elle sera étudiée avec la classe n°5 en fin de paragraphe. Géométriquement, une partie des blocs de cette classe englobe ceux de la classe n°5 du profil I-50 mais aussi ceux d'une zone plus au sud-est. Les blocs de cette dernière classe sont connexes à ceux de la classe n°7. La connexion de ces deux parties de la classe n°5 est assurée par la classe n°4.

Classe n°5

Graphiquement, les blocs constituant la classe n°5 ressemblent à ceux de la classe n°5 du profil I-50, les valeurs et l'évolution temporelle sont proches mais présentent une plus forte amplitude (Figure 78). Les blocs de cette classe montrent les plus faibles résistivités qui varient entre 39 et 100 $\Omega \cdot m$, avec un fort coefficient de variation (0,85).

Un détail peut être observé sur la variation : le passage de la variation de résistivité est marqué par une diminution puis une augmentation de la mesure du 25 janvier 2013 à celle du 22 février 2013 en passant par la mesure du 6 février 2013, alors que sur le profil I-50, ce détail n'apparaît pas. Il est évident que la mise en évidence de l'évolution serait plus précise avec

un pas de mesure plus régulier.

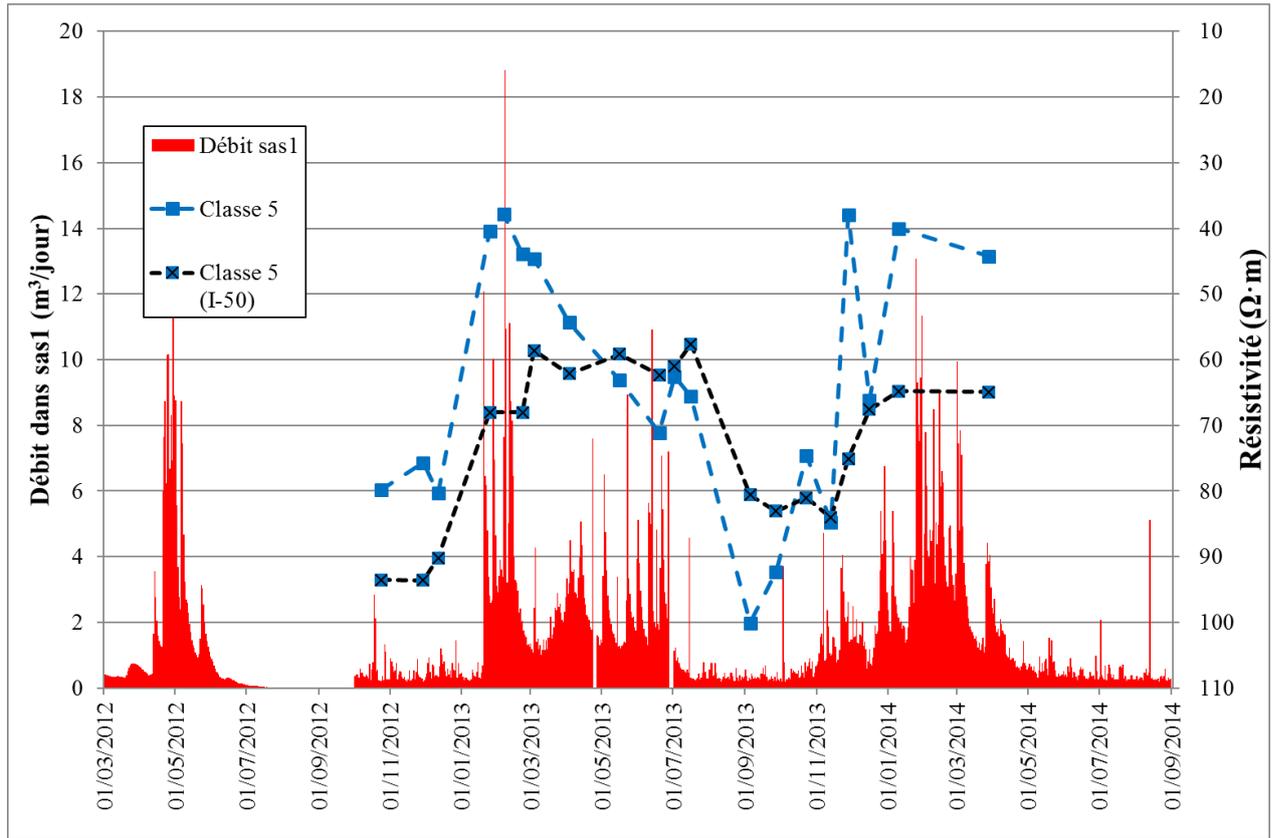


Figure 78. Comparaison des médianes des classes n°5 des profils I-50 et I-100.

Classe n°6

Les blocs de la classe n°6 se trouvent du côté sud-est du modèle et à une très faible profondeur ($< 0,7$ m). Cette classe contient des blocs ayant une résistivité très forte (868 à 2496 $\Omega \cdot m$). Sa localisation correspond à la couche superficielle de sables très résistants située à l'est du promontoire calcaire de Lascaux, reconnu par tarière (Lopez, 2009) et par les géologues comme étant des altérites autochtones (Bruxelles & Camus, 2014).

Classe n°7

C'est la classe ayant les plus faibles résistivités, les médianes varient entre 18 et 26 $\Omega \cdot m$ (Figure 79). Les blocs de cette classe se situent au sud-est du modèle entre 2 et 10 m de profondeur. Géographiquement, cette classe se trouve à l'endroit des formations détritiques sablo-argileuses. Tenant compte de ses faibles résistivités (médiane = 23 $\Omega \cdot m$ et moyenne = 25 $\Omega \cdot m$) et de variations faibles (écart-type = 18 $\Omega \cdot m$, Annexe III.B), on pense que cette classe correspond très vraisemblablement aux formations argileuses dans la zone des formations détritiques sablo-argileuses comme décrites dans Lopez (2009) et Bruxelles et Camus (2014), et situées à l'est du site de Lascaux (cf. 1.2.2.2). Ces formations argileuses ont aussi été identifiées dans le forage SG (cf. 5.4.3) situées à environ 28 m au sud-est du profil (cf. classe n°3 du profil I-50 dans 3.3.3).

Analyse de l'évolution temporelle de la résistivité pour les classes n°4 et n°5

Les classes n°4 et n°5 sont les plus conductrices des modèles du profil I-100 (à l'exception

de la classe n°7 identifiée comme de l'argile). L'évolution de la résistivité semble corrélée au débit enregistré dans la grotte (Figure 79). Les blocs constituant la classe n°5 (entre 24 et 28 m le long du profil) contiennent partiellement ceux de la classe n°5 du profil I-50, et une partie des blocs du profil I-50 appartiennent à la classe n°4. La classe n°4 est plus résistante électriquement et montre une moindre amplitude des variations au cours des saisons, laissant présager un milieu moins poreux ou moins fracturé que la classe n°5.

On peut faire l'hypothèse que les blocs des classes n°4 et 5 du profil I-100 correspondent à la zone probable de recharge identifiée sur le profil I-50 et montrent aussi la connexion à la zone des formations détritiques sablo-argileuses.

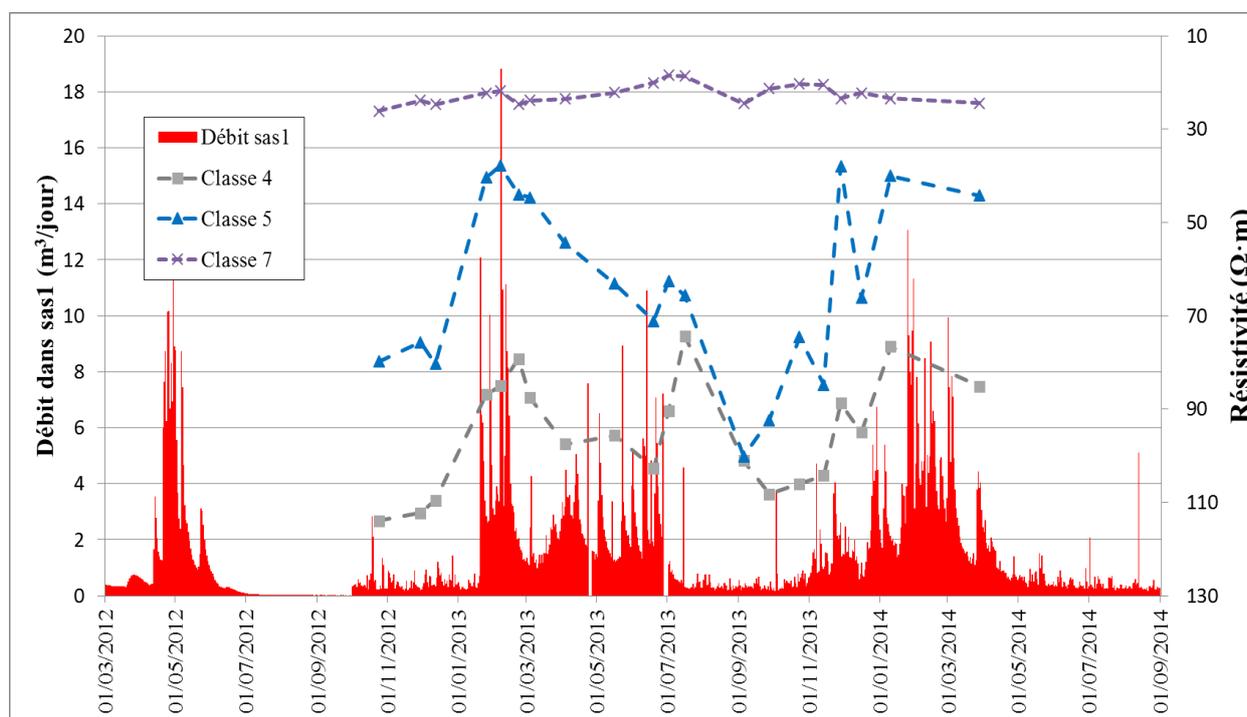


Figure 79. Evolution des médianes des résistivités des classes n°4, 6 et 7.

L'évolution temporelle des médianes des résistivités dans l'ensemble des classes n°4 et n°5 montre une différence significative avec celle de la classe n°5 du profil I-50 (Figure 80), les classes n°4 et 5 semblent réagir plus vite aux variations de débit. Sachant que les nombre de points, les tailles de blocs et les profondeurs atteintes ne sont pas du tout identiques dans les deux cas, il faut donc étudier les deux classes séparément. La résistivité de la classe n°4+5 est généralement plus élevée que celle de la classe n°5 du profil I-50 avec des valeurs autour de 100 $\Omega \cdot m$ en période de faible débit et autour de 70 $\Omega \cdot m$ en période de fort débit.

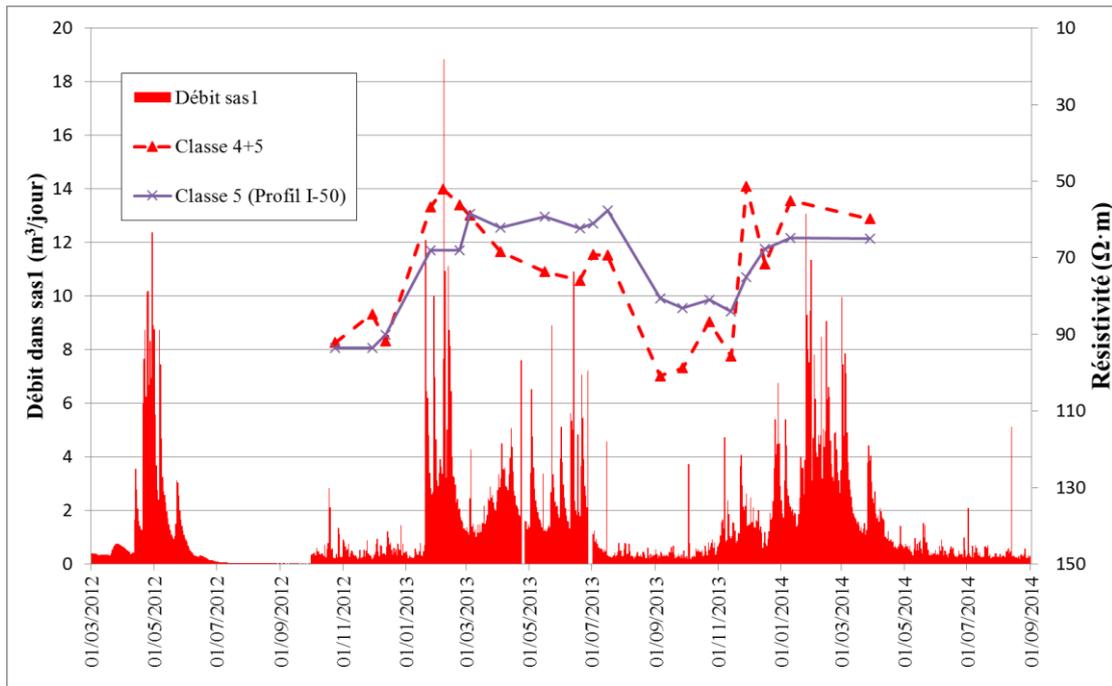


Figure 80. Evolution des médianes des résistivités des classes n°4 et 5 comparée à celle de la classe n°5 du profil I-50.

On sépare la classe n°5 en deux sous classes (Figure 81) selon le dendrogramme (Annexe III.A). Une sous-classe n°5-1 contient un noyau semblable à la zone particulière du profil I-50 et puis une partie entre 30 et 52 m. Une seconde sous-classe n°5-2 est constituée des blocs superficiels et qui se trouvent au sud-est du profil.

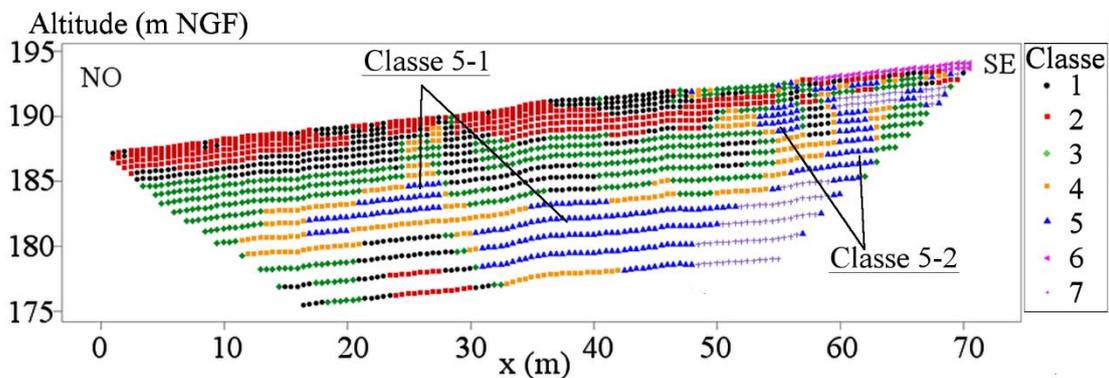


Figure 81. Séparation en deux sous-classes de la classe n°5.

Les variations des deux sous-classes n°5-1 et n°5-2 n'ont pas la même tendance. Les médianes de la sous-classe n°5-2 sont plus faibles avec une amplitude plus faible que les médianes de la sous-classe n°5-1 et de la classe 5 du profil I-50. La partie gauche dans cette sous-classe n°5-1 peut être le noyau de la zone particulière conductrice observée sur le profil I-50. La classe n°5-1 globalement plus résistante que les classes n°5 du profil I-50 et n°5-2, réagit plus aux reprises de débit, laissant penser à un milieu plus fracturé ou plus poreux. Cependant les deux sous-classes semblent varier en fonction du débit.

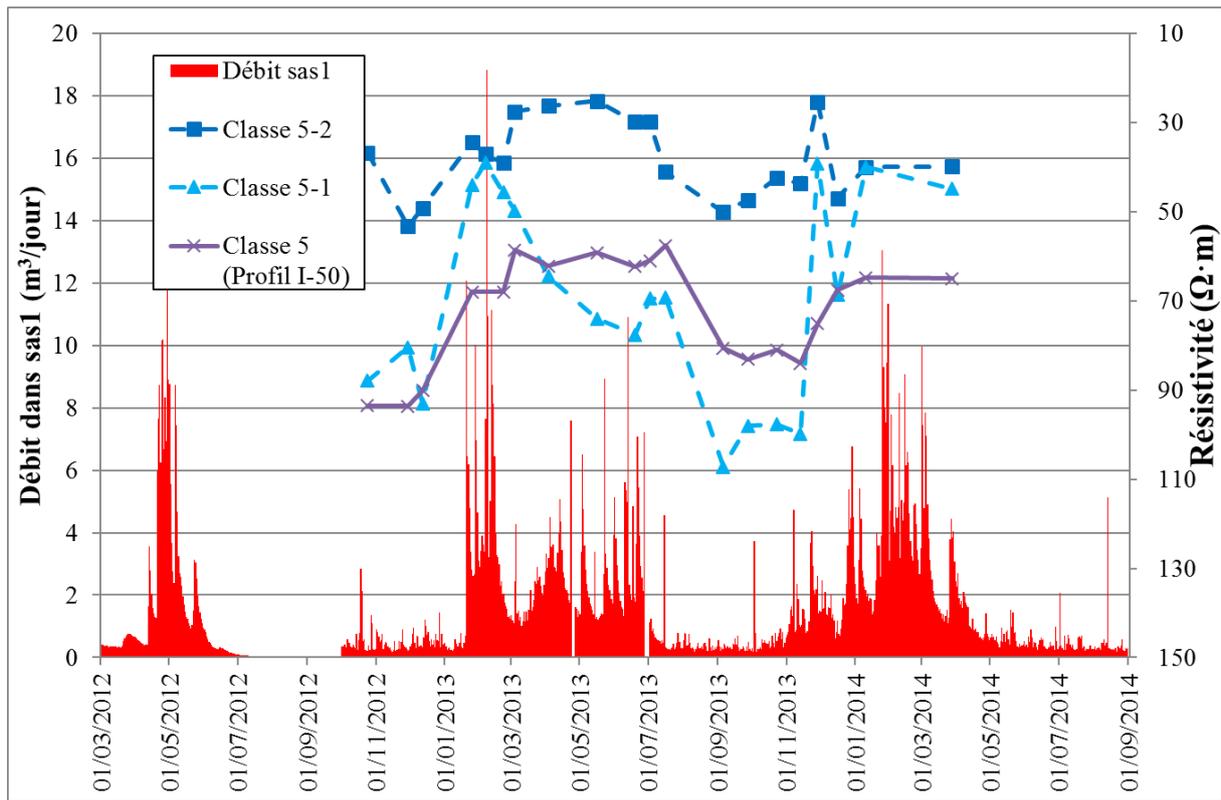


Figure 82. Evolution des médianes des résistivités de la classe 5 (deux parties) comparées à celles de la classe n°5 du profil I-50.

Puisque les deux parties de la sous-classe n°5-1 semblent être connecté par la classe n°4 puis rejoint aux blocs de la classe n°7 que l'on a attribué à de l'argile, on étudie la variation des classes n°4, n°5-1 et n°7 (Figure 83). Il est clair que les médianes des résistivités de la classe n°5-1 se trouvent entre celles des deux autres classes (à l'exception du 5 septembre 2013), ce qui pourrait constituer la partie assurant la connexion entre les remplissages et la partie conductrice. On peut penser qu'au sud-est du profil, les altérites alimentent l'écoulement vers la grotte depuis les blocs de la classe n°7 par la connexion des classes n°4 et n°5-1.

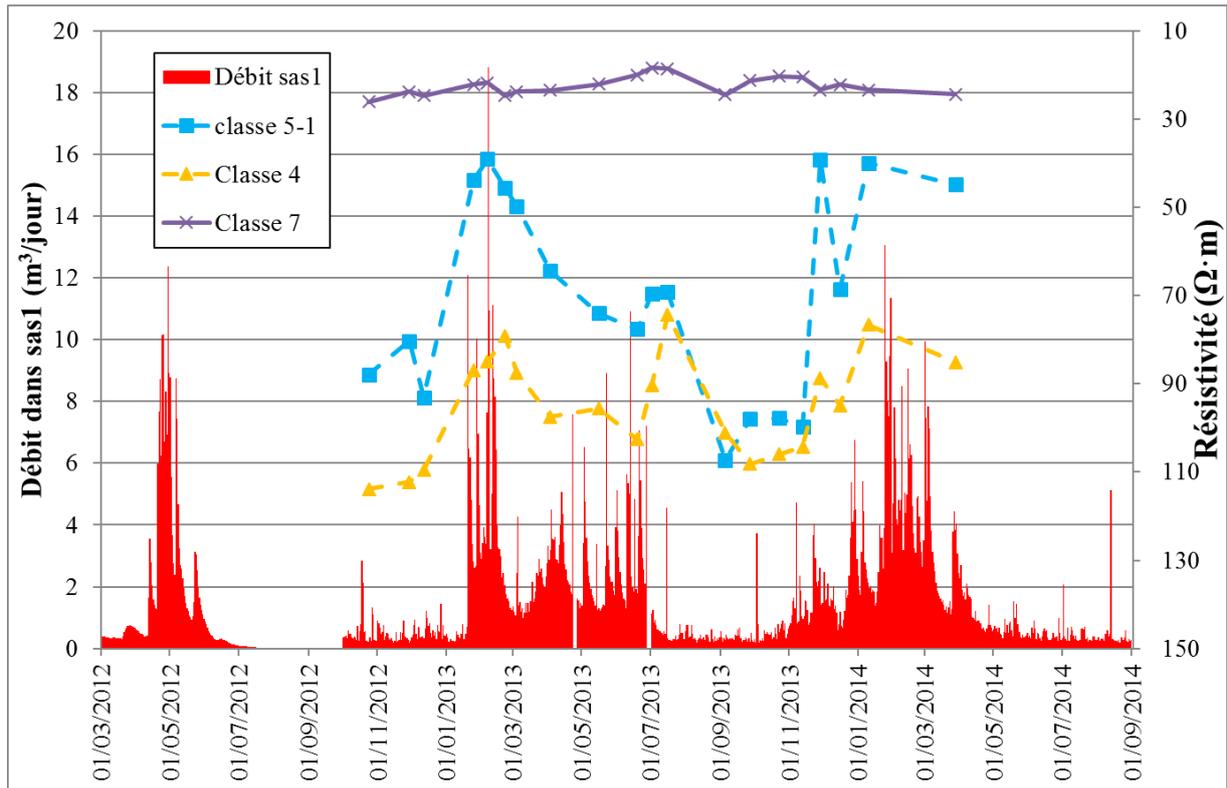


Figure 83. Evolution de la médiane des résistivités des classes 4, 5-1 et 7.

Une autre façon de comparer la classe n°5 et la classe n°5 du profil I-50 est de calquer la forme de la classe n°5 du profil I-50 sur le profil I-100 (Figure 84) et ensuite étudier sa variation de résistivité. L'étendue spatiale de la classe du profil I-50 est moins large que celle de la classe 5-1 du profil I-100 (Figure 85).

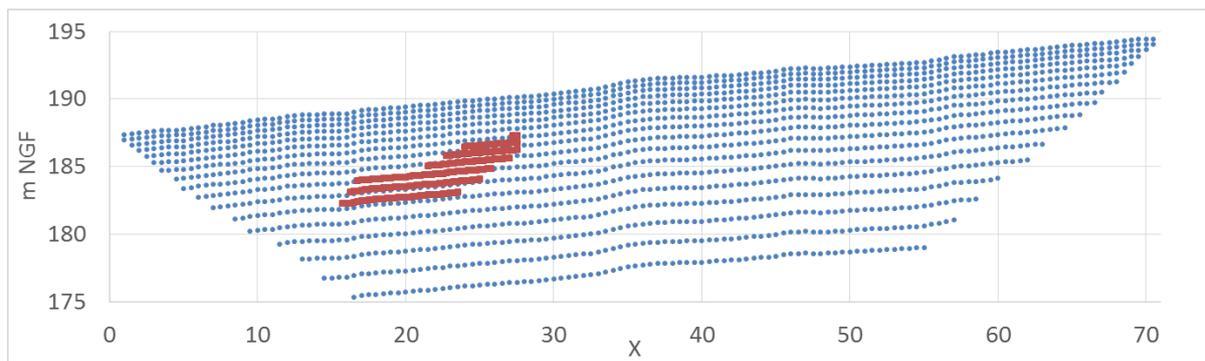


Figure 84. Position des 263 blocs de la classe n°5 du profil I-50, couvrant 78 blocs du modèle du profil I-100.

La variation de résistivité des blocs du profil I-100 compris dans les limites des blocs de la classe 5 du profil I-50 n'est pas identique à celle de la classe n°5 du profil I-50 (Figure 85). Les médianes de résistivité sont généralement plus élevées, à l'exception de celle de la mesure du 28 novembre 2013. Par contre, les données du profil I-100 se corrélaient mieux à la variation du débit dans la grotte (cf. 4.1.3).

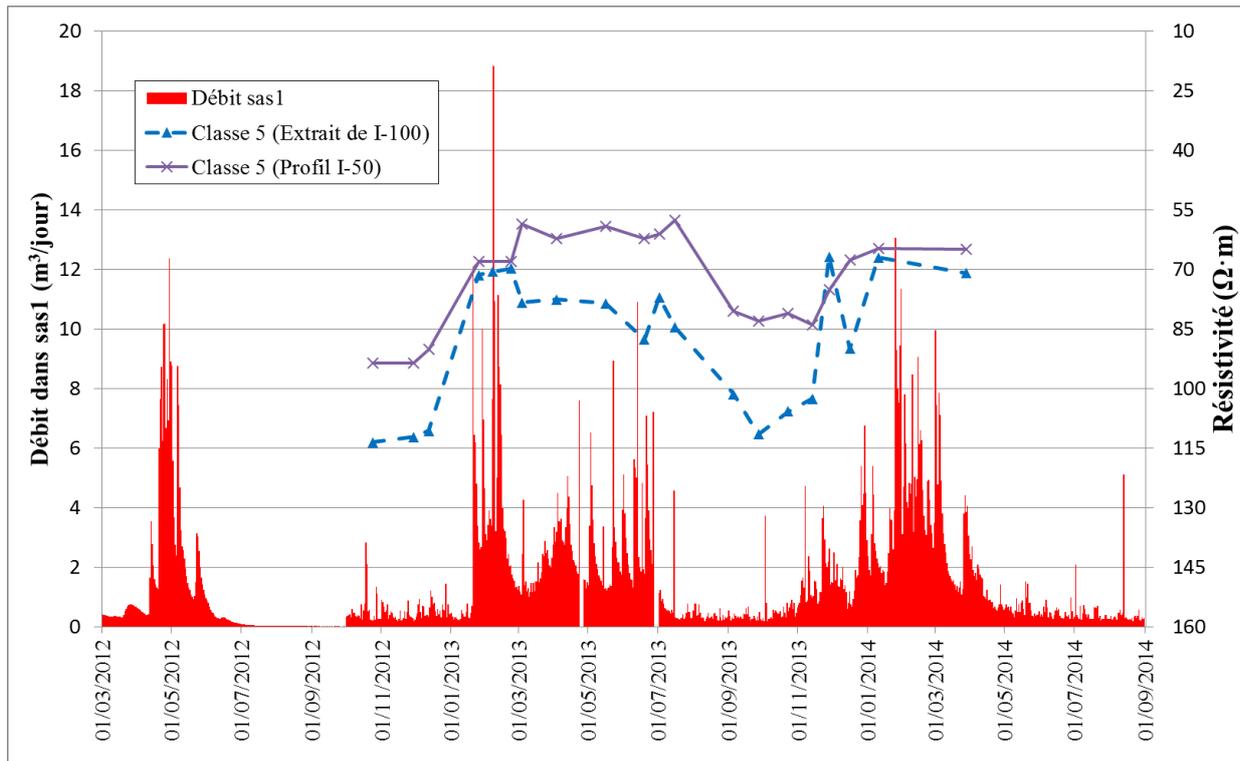


Figure 85. Variation des médianes des résistivités des blocs de la classe n°5 du profil I-100, et de ceux de la classe n°5 du profil I-50 aux quels ils se superposent.

En résumé, les modèles du profil I-100 montrent une partie superficielle résistante ayant des variations de résistivité liées à la pluie efficace, notamment les classes n°1 et n°2 pour lesquelles, la résistivité réagit très rapidement avec les changements de la pluie efficace. On peut supposer qu'elle est constituée de calcaires très fracturés, en particulier, la classe n°2 où l'infiltration de l'eau est très rapide, tandis que l'infiltration de l'eau à travers les calcaires moins fracturés de la classe n°1 est moins immédiate. Plus en profondeur, on trouve la classe n°3 qui montre une très faible variabilité temporelle. Cette classe peut être constituée de calcaires moins altérés ou marneux. De plus, le profil I-100 permet d'identifier une classe n°6 qui est très résistante. Il a bien été montré que cette classe correspond à une couche sableuse qui affleure sur le site.

En profondeur, on note que la classe n°7 est très conductrice et qu'elle a une variation de résistivité très faible. Cette classe est probablement constituée de formations argileuses dans la zone dite des formations détritiques sablo-argileuses, située à l'est du promontoire calcaire de Lascaux.

Les blocs des classes n°4 et n°5 ne sont pas résistants. Ils semblent contenir la partie conductrice corrélée au débit ; ils établissent une connexion entre cette zone conductrice et la formation sablo-argileuse. Ce sont les classes dont l'évolution de la résistivité est la mieux corrélée à l'évolution du débit dans la grotte. Grâce à plusieurs analyses, on peut faire les hypothèses suivantes :

- La résolution spatiale due aux espacements du dispositif n'étant pas identique, les mesures du profil I-100 intègre des volumes de terrain plus importants lors de l'acquisition. Les modèles obtenus par l'inversion du profil I-100 ont des blocs de taille

plus importante. Mêmes si l'on compare les positions quasiment identiques, les variations temporelles des différentes classes ne sont pas identiques (Figure 85). Mais le décalage semble acceptable puisqu'il se corrèle au débit à l'exception de la mesure du 16 juillet 2013.

- Graphiquement, la partie entre 30 et 52 m dans la classe n°5-1 se situe dans un endroit qui assure une connexion depuis la formation détritique sablo-argileuse vers la partie conductrice du modèle qui est probablement une zone d'alimentation d'après l'étude du profil I-50. Cependant la variation de cette classe n°5-1 ne permet pas, à elle seule, de conclure sur cette connexion. Selon la modélisation géostatistique en 3D (cf. 5.3), cette liaison ne se situe pas exactement à la verticale du modèle, elle se trouve légèrement au sud du profil.
- Les variations de résistivité montrent des relations directes avec le débit pour les classes n°4 et n°5. En comparant avec la classe n°5 du profil I-50, la variation des classes n°4 et n°5 du profil I-100 semblent se corrélent mieux avec la variation du débit, surtout dans la période de mars à juillet 2013. Ces deux classes peuvent présenter une source d'alimentation partielle au sas1, et il existe forcément d'autres zones d'alimentation de l'eau vers le point de décharge au sas1. Alors que sur le profil I-50, cette probable source ne peut pas être mesurée à cause d'une extension spatiale moins importante. C'est la raison pour laquelle les variations de résistivité dans ces deux classes du profil I-100 ont des relations avec le changement du débit du sas1, tandis que le profil I-100 peut détecter une zone d'alimentation probable depuis les altérites situées au sud-ouest du site.

4.1.3. Modélisation de la résistivité des blocs de la classe n°5

Les résultats précédents montrent que, pour les blocs de la classe n°5 du profil I-100, l'évolution temporelle de la résistivité est liée à celle du débit enregistré en continu (cf. 2.1.3.2). D'après le variogramme du débit enregistré durant la période du suivi temporel (Figure 30), on a identifié trois portées : 7, 18 et 60 jours. Ces portées ont naturellement un sens physique que l'on tente de relier à la résistivité. Après plusieurs essais, la prise en compte du volume moyen écoulé au cours des 18 jours avant une mesure et, d'autre part, 7 jours après une mesure a été fructueuse en tentant d'établir une relation entre ces volumes moyens et les médianes des résistivités de la classe 5.

Afin de mettre en relation les médianes des résistivités de la classe n°5 du profil I-100 et les volumes moyens écoulés au cours des 18 jours précédant chaque mesure, il est nécessaire de choisir une équation pour établir une régression des résistivités au regard des volumes d'eau. Pour ce faire, on propose de s'inspirer d'une loi strictement décroissante comme, par exemple, la loi d'Archie. Plutôt que d'utiliser la loi d'Archie (Equation 14 et Annexe VI) dans sa forme originale (Archie, 1942). On choisit d'utiliser une formulation analogue à une nouvelle écriture de la loi d'Archie (Équation 15) introduite (Zhou *et al.*, 1997) car cette nouvelle loi a l'avantage d'introduire un paramètre supplémentaire : la saturation au seuil de percolation (saturation critique).

$$\rho_r = a\rho_w\phi^{-m}S_w^{-n} \quad (\text{Équation 14})$$

$$\rho_r = \frac{\rho_w}{a} \left[\frac{\Phi(S_w - S_w^{critique})}{1 - \Phi S_w^{critique}} \right]^{-n} \quad (\text{Kozlov, 2012}) \quad (\text{Équation 15})$$

où ρ_r est la résistivité de la roche, ρ_w est la résistivité de la saumure, Φ est la porosité, n est un exposant, S_w est la saturation et $S_w^{critique}$ est la saturation critique (au seuil de percolation). Le facteur a est déterminé par la condition limite : $\rho_r = \rho_w$ quand $\Phi=1$ et $S_w = 1$.

L'analogue (Équation 16) à la loi d'Archie modifiée, est donc une formule empirique reliant la résistivité au volume moyen écoulé tenant compte d'un seuil de percolation :

$$\rho_{vrai} = \rho_p \times A \times \left[\frac{B \times (\bar{V} - C)}{1 - B \times C} \right]^D \quad (\text{Équation 16})$$

Où l'on propose que :

- ρ_{vrai} étant la médiane des résistivités de la roche, soit la variable expliquée,
- ρ_p soit la plus faible médiane de résistivité obtenue au cours du suivi, qui joue le rôle de paramètre au seuil de percolation,
- \bar{V} étant le volume d'eau écoulée moyen dans le sas1 au cours des 18 jours antérieurs à la mesure soit la variable explicative,
- A, B, C et D sont des coefficients empiriques à ajuster. B serait alors une estimation de la porosité, C celle du volume nécessaire pour que la percolation ait lieu alors qu'A et D seront des facteurs empiriques.

En prenant comme résistivité minimale la valeur minimale des médianes de résistivités de la classe 5 (38 $\Omega \cdot m$), la courbe de régression utilisant l'équation empirique (Équation 16) (Figure 86) est ajustée à partir des données de vingt mesures. L'ajustement des coefficients dans l'équation 16 et l'intervalle de confiance au risque de 5% sont réalisés par la méthode de « Trust Region » (Lin & Moré, 1999; Lin, et al., 2008), avec A = 1,3 ; B = 0,3 ; C = 0,1 et D = -0,2. Le coefficient de détermination égal à 0,70. L'erreur quadratique moyenne des valeurs estimées et les données d'entrée est égale à 11,5 alors que la moyenne des médianes de résistivités est égale à 63 $\Omega \cdot m$. Tenant compte de ces résultats, on considère que ce mode de régression est acceptable pour estimer les résistivités à partir du volume moyen écoulé au cours des 18 jours précédant la mesure.

Admettant cette hypothèse, la porosité du massif de calcaire à l'endroit de la classe n°5 serait égale à 0,3 (B), donc 30% pour la zone d'alimentation dans les calcaires coniaciens laissant penser à des calcaires très altérés soit très fracturés soit sableux. En outre, le coefficient C est proche de 0,1 m³, il représenterait le volume d'eau minimal qu'auraient contenu les blocs de la classe n°5 au cours de l'étude, tenant compte du fait que l'on a pris 38 $\Omega \cdot m$ comme résistivité minimale dans l'équation 16.

Cela signifie que l'on dépasse pendant l'année le seuil de percolation mais il n'y a pas un volume d'eau minimal contenu dans les blocs de la classe n°5 au cours de l'étude. Cette valeur de C pourrait être le volume minimal à partir duquel il peut y avoir débit donc percolation mais elle est calculée à partir de la médiane minimale des résistivités au cours du suivi qui n'est pas la résistivité au seuil de percolation.

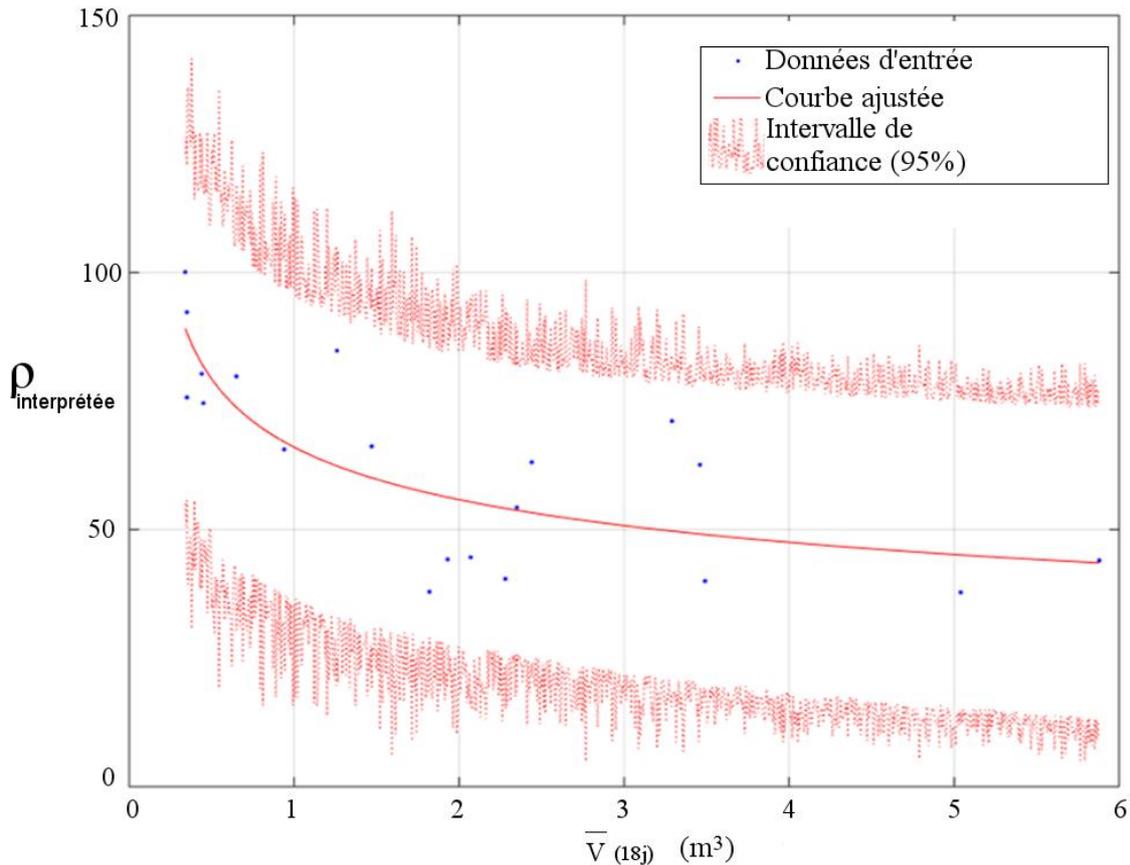


Figure 86. Courbe de l'équation empirique entre la résistivité et la moyenne de volume.

Considérant cette relation comme applicable non plus à partir du volume cumulé sur 18 jours mais du volume d'une seule journée (celui du jour de la mesure de TRE), on propose de simuler la résistivité ($\rho_{\text{estimée}}$) à partir de ce seul volume (Figure 87). Cela repose sur l'hypothèse que l'équation ajustée pour 18 jours avant peut représenter une réalité physique dans la partie du système karstique étudiée.

Les valeurs estimées sont dans l'ensemble proches des valeurs réelles (erreur quadratique moyenne = 11,5) avec ce modèle à l'exception des mesures du 19 juin 2013 (sous-estimé), du 13 novembre 2013 (sous-estimé) et du 28 novembre 2013 (surestimé). Pour ces deux dernières dates du mois de novembre 2013, l'explication peut être attribuée à une diminution brutale du débit dans les 18 jours avant la date de mesure alors que la période était une période de reprise du débit. Cela montre, à ce stade, et avec seulement 20 mesures, que l'estimation de résistivité journalière pourrait avoir une incertitude vis-à-vis des événements soudain de débit.

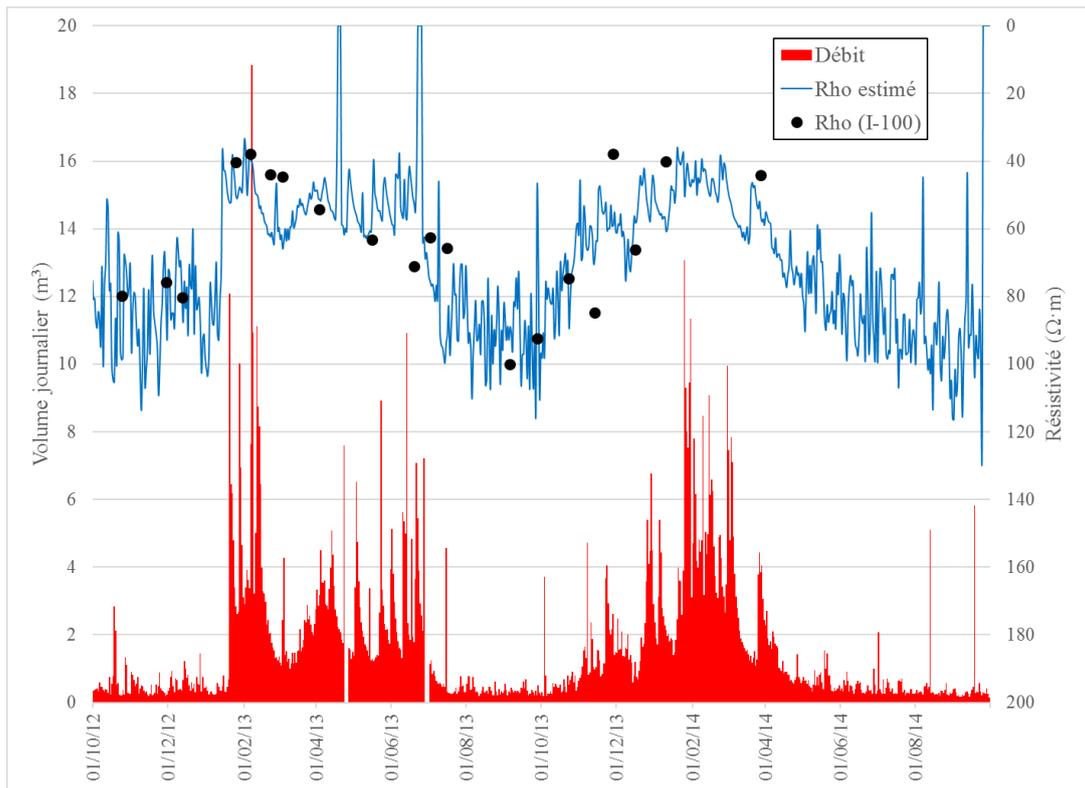


Figure 87. Estimation de l'évolution de la médiane des résistivités en fonction du volume journalier.

Il apparait donc que les volumes écoulés peuvent être statistiquement reliés aux valeurs des médianes des résistivités ; l'objectif final est cependant d'estimer le volume qui s'écoulera (le volume du « futur ») à partir de la résistivité afin de prédire le débit dans la grotte. Il s'agit donc d'inverser le rôle des paramètres ; la résistivité deviendrait variable explicative et le volume écoulé la variable expliquée.

On part d'une forme similaire de la formule de la loi d'Archie, en prenant le volume d'eau moyen écoulé durant 7 jours après une mesure de la résistivité et la résistivité interprétée.

$$\bar{V}_{7j} = \left[\frac{(\rho_{interprétée} - E)}{F} \right]^{-0,5} \quad (\text{Équation 17})$$

Avec la même technique de régression non-linéaire « Trust Region », les coefficients sont déterminés avec $R^2 = 0,84$ et l'erreur quadratique moyenne = 1,85 (Figure 88) :

$E = 37,4$; l'estimation de la valeur minimale de la médiane de résistivité ;

$F = 31,8$; le coefficient empirique permettant de traduire la résistivité en volume d'eau.

L'équation 17 a été proposée pour établir la régression non linéaire de la médiane des résistivités au regard du volume écoulé au cours des 18 jours précédant la mesure. En admettant que l'inversion du rôle des variables soit légitime, on peut chercher à estimer, toujours par régression non linéaire, les coefficients de l'équation 18 en prenant la résistivité interprétée comme variable explicative et le volume cumulé sur les 7 jours postérieurs à la mesure comme variable expliquée.

$$\bar{V}_{7j} = \left[\frac{(\rho_{\text{interprétée}})}{\rho_p A'} \right]^{1/D'} \times \frac{(1-B'C')}{B'} + C' \quad (\text{Équation 18})$$

Où $\rho_p = 38 \Omega \cdot m$, $A'=1,4$, $B'=0,9$, $C'= 0,1$ et $D'= -0,2$ avec $R^2 = 0,56$ et l'erreur quadratique moyenne = 3,22.

Pour la prédiction, on décide d'utiliser l'équation 17 qui donne une meilleure estimation par rapport aux résultats de l'équation 18 tenant compte d'une plus faible R^2 et aussi plus faible erreur quadratique moyenne.

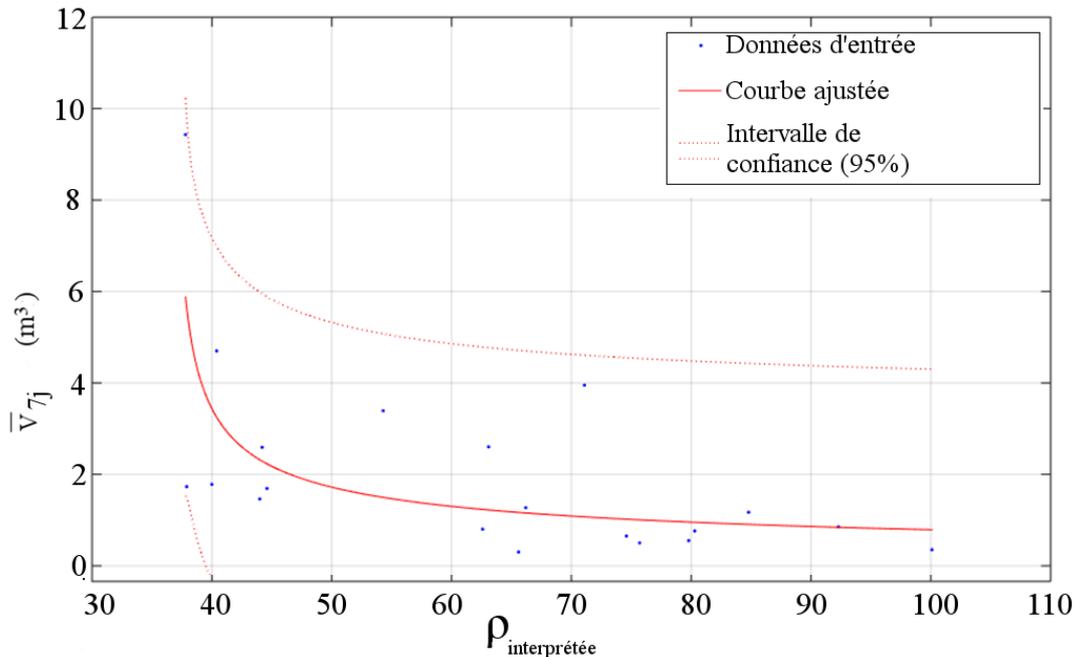


Figure 88. Estimation de la moyenne du volume écoulé au cours des 7 jours après les mesures à partir des résistivités mesurées.

Sur la base de cette régression, on estime la moyenne du volume qui aurait coulé dans la grotte au cours des 7 jours suivant une valeur de résistivité électrique estimée au moyen de l'équation 17 telle qu'elle a été utilisée pour établir la figure 88; cette estimation permet d'avoir une valeur de résistivité pour chaque jour pour lesquels le débit a été mesuré.

La moyenne du volume ainsi estimée est ensuite comparée au volume réel (Figure 89). De manière générale, le volume estimé est cohérent avec les différentes périodes de l'écoulement, il est également capable de reproduire les événements de crue. Cependant, pendant une période de fort débit, le débit est toujours sous-estimé à l'exception de quelques pics brutaux, tandis que pendant des périodes sèches, il est surestimé. Le décalage entre les valeurs vraies et estimées est lié à l'usage du volume journalier lors de la modélisation. On constate qu'il y a une bonne cohérence pour les faibles valeurs (0 à 1 m³) des volumes moyens des 18 jours et ceux du jour de mesure, ce qui traduit la faible différence entre les valeurs vraies et estimées pendant les périodes sèches. Cependant, il y a une dispersion pour les valeurs comprises entre 1 et 4 m³, la valeur du volume journalier est souvent plus faible, ceci rend la prédiction du débit pendant les périodes de crue souvent sous-estimée. (Annexe III.C).

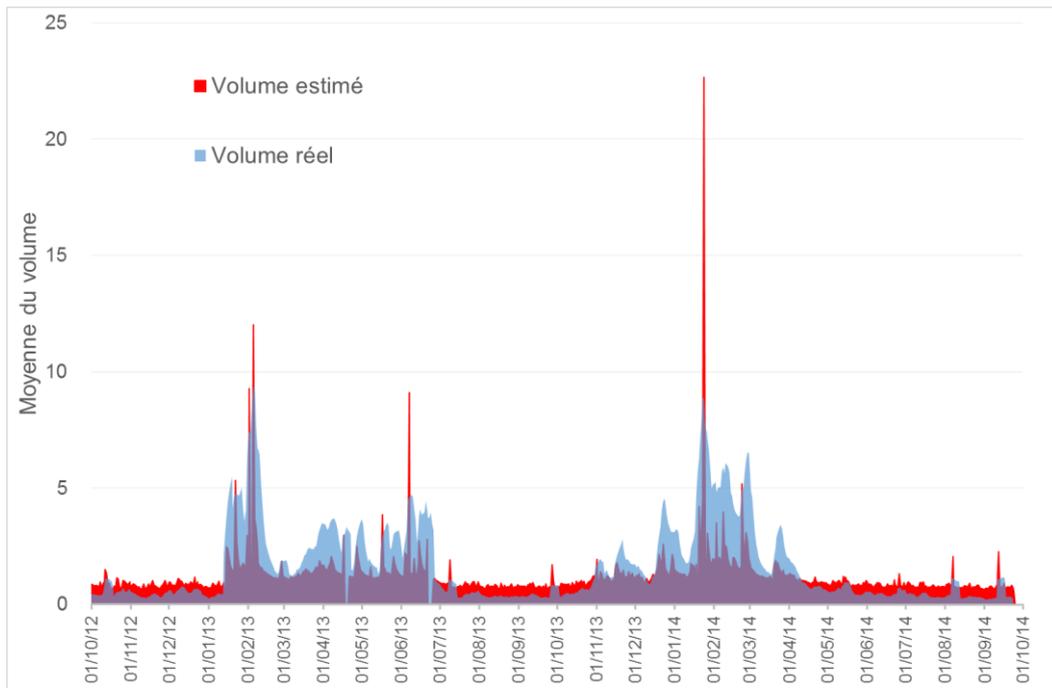


Figure 89. Comparaison du volume moyen prédit au volume réel.

Néanmoins, il n’y a guère que cinq mesures pendant le période de faible débit. On peut également essayer de corriger le volume estimé lors de cette période en faisant une estimation partielle (Figure 90). Une régression polynomiale d’ordre trois est obtenue (Equation 19), avec $p1 = -1,8 \times 10^{-4}$, $p2 = 0,04$, $p3 = -3,7$ et $p4 = 101$ ($R^2=0,81$).

$$\bar{V}_{7j} = p1 \times \rho_{interprétée}^3 + p2 \times \rho_{interprétée}^2 + p3 \times \rho_{interprétée} + p4 \quad (\text{Équation 19})$$

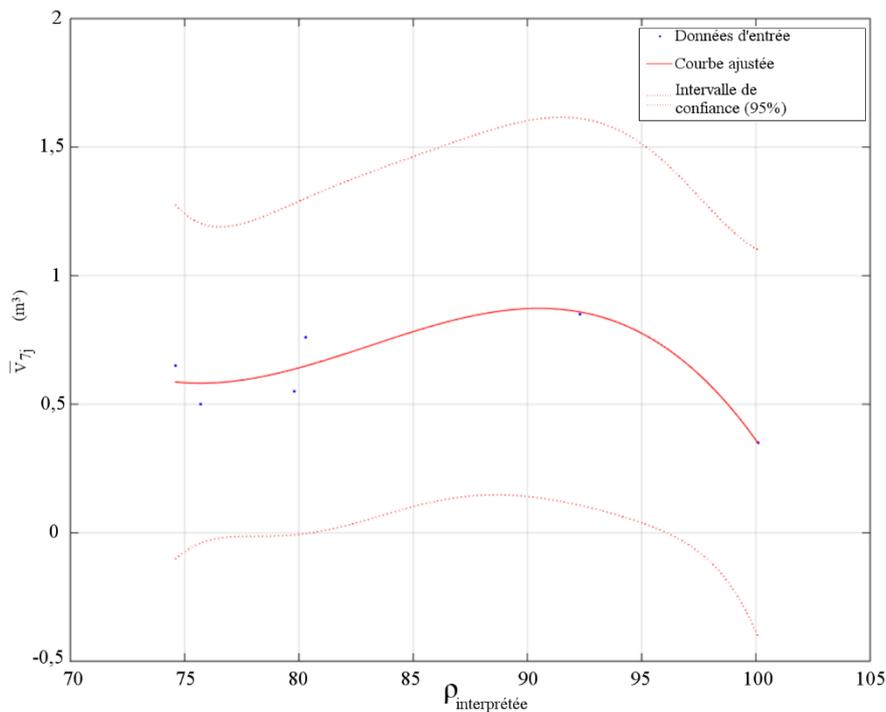


Figure 90. Ajustement de la courbe de volume en fonction de résistivité, pendant les périodes sèches.

Cette nouvelle équation est appliquée pour les périodes sèches. Les surestimations du volume deviennent moins importantes (Figure 91), mais il y a des dates où l'estimation est absente pendant les périodes sèches. Sachant qu'il n'est pas évident de corriger en se basant uniquement sur 5 mesures, ceci n'assure pas la précision de la prédiction lors de périodes sèches.

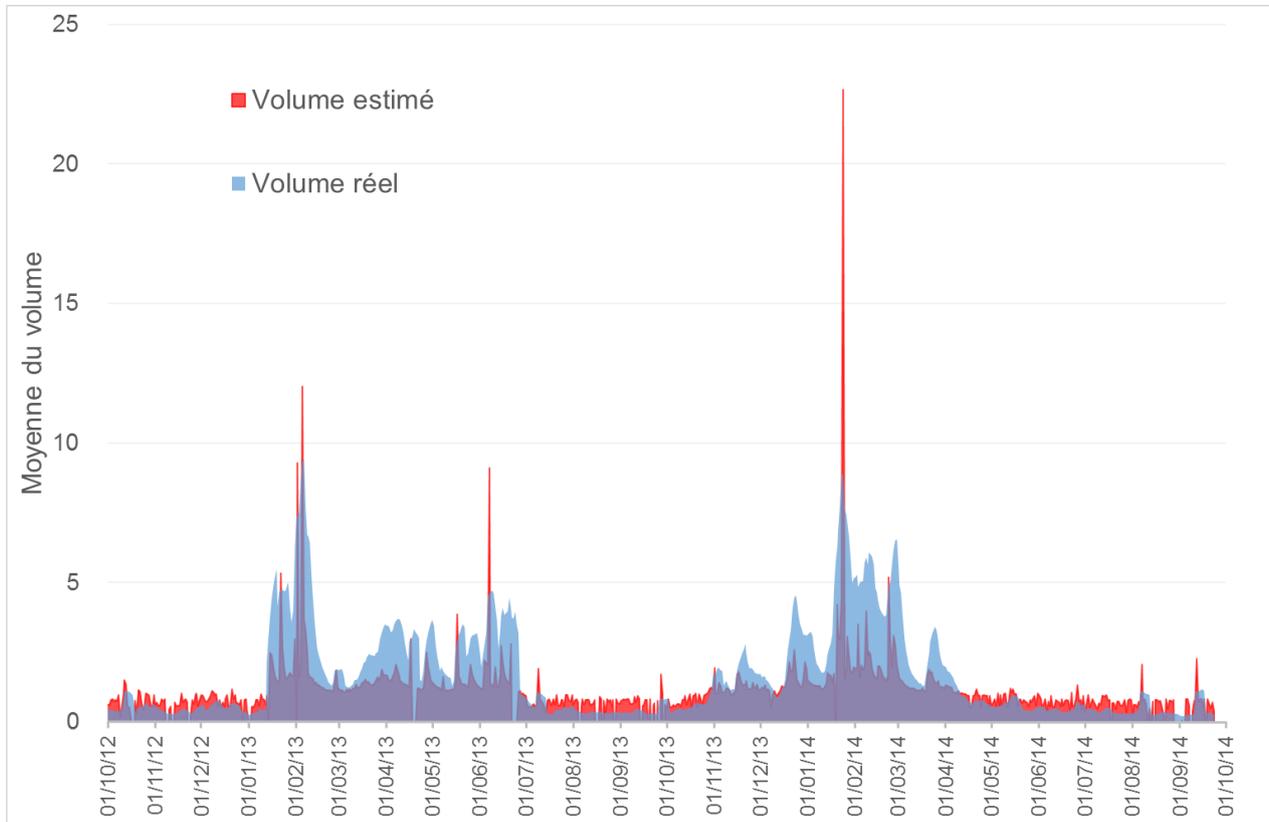


Figure 91. Volume estimé en corrigeant les périodes sèches.

Le schéma synthétique pour la modélisation du débit et de la résistivité est le suivant (Figure 92) :

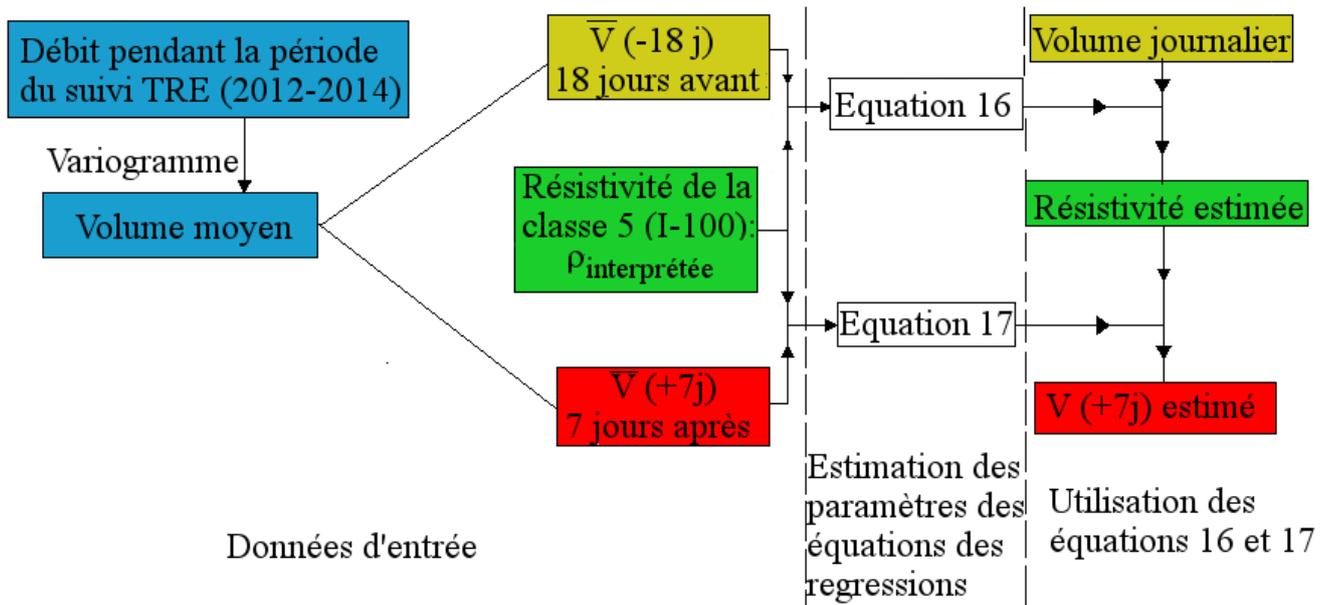


Figure 92. Schéma synthétique de la procédure de la modélisation.

La qualité de la prédiction peut être améliorée par :

- Un pas de suivi temporel plus court et régulier, notamment inférieur à 7 jours pour que la prédiction puisse être en continu. La réduction du pas de suivi permettrait également d'améliorer la qualité de la régression des équations empiriques utilisées (équations 16 et 17) ;
- Une modélisation prenant en compte la pluie efface ce qui pourrait potentiellement influencer le début de la reprise du débit dans le sas1 et permettrait de déterminer le volume d'eau nécessaire (dans les blocs de la classe n°5, capacité au champ) pour la reprise de l'écoulement ;
- Modéliser les périodes de faible débit et fort débit séparément. La théorie de la percolation pouvant se manifester différemment dans les différentes périodes. Dans notre cas, le nombre de mesure n'est pas suffisant pour réaliser cette séparation, surtout pendant la période de faible débit (Figure 89).

4.2. Profil II-50

Le profil II-50 se trouve légèrement au sud du profil I-50 (Figure 17). Les modèles de résistivité obtenus par la même méthode que pour le profil I, sont présentés par ordre chronologique (Figure 93). Ils permettent de mettre en évidence deux zones conductrices :

- une première zone conductrice superficielle qui se situe entre 18 et 22 m dont la forme varie au cours du temps mais l'ordre de grandeur de la résistivité ne semble pas montrer de changement significatif.
- une seconde zone conductrice généralement moins conductrice que la première qui se situe entre 12 et 16 m, et qui montre un changement temporel.

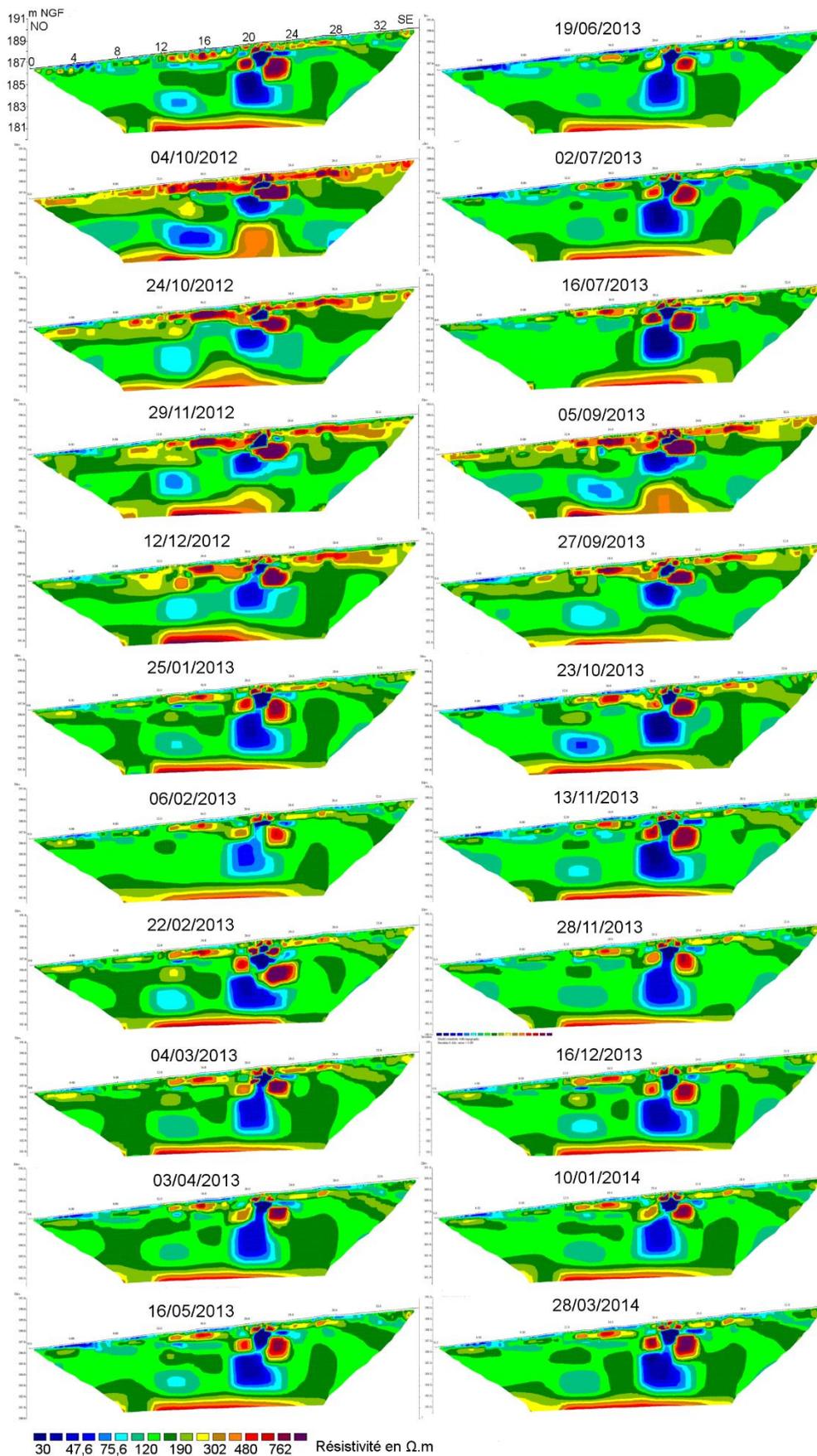


Figure 93. Modèles de résistivité du profil II-50.

Sur ce profil, situé à proximité de la grotte, la CHA permet d'identifier cinq classes

principales chacune pouvant être subdivisée en deux sous-classes (Annexe IV.A). La figure 94 montre que les blocs se répartissent spatialement selon deux groupes de classe : d'une part les blocs des classes n°1,2 et 3 en surface et, d'autre part en profondeur, ceux des classes n°4 et 5 allant de 2,4 m à 8 m de profondeur ; la classe n°5 inclut les blocs les plus conducteurs.

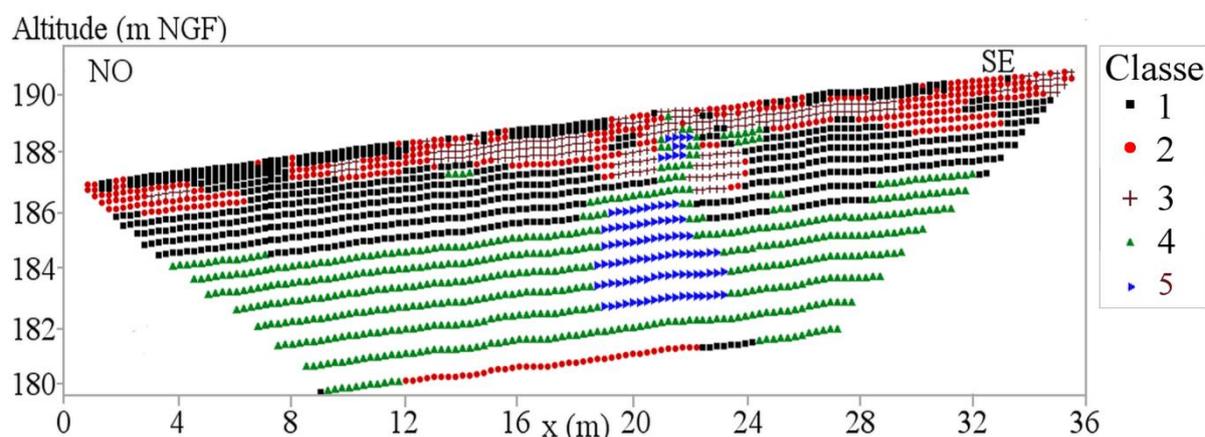


Figure 94. Répartition des blocs tenant compte des résultats de la CHA du profil II-50.

Classe n°1

La classe n°1 incluant beaucoup de blocs couvre la plupart de la partie superficielle allant jusqu'à 2,4 m de profondeur comme dans les cas précédents (Profil I-50 et I-100). L'évolution des médianes des résistivités de la classe n°1 est semblable à celles de la classe n°1 du profil I-50 (Figure 95), allant de 122 à 207 $\Omega \cdot m$; les différences, particulièrement en période humide ne sont pas significatives. La partie superficielle de ce profil et du profil I-50 situé 8 m plus au nord est donc constitué des mêmes formations, c'est à dire des calcaires coniaciens altérés, par lesquels l'infiltration a lieu jusqu'au 2,4 m de profondeur au maximum.

Dans la zone couverte par la classe n°1 se trouvent les blocs des classes n°2 et 3.

Classe n°2

Les médianes des résistivités des blocs de la classe n°2 (140 à 349 $\Omega \cdot m$) sont plus élevées et l'amplitude des variations (coefficient de variation = 0,75, Annexe IV.B) est plus grande que pour la classe n°1 (coefficient de variation = 0,50). Ces blocs peuvent correspondre à des zones plus fracturées, isolant des blocs calcaires les uns des autres (classe n°3). Les deux classes (2 et 3) ont des variations quasiment synchronisées avec la pluie efficace (Figure 95). En comparant les résistivités de la classe n°2 à celles de la classe n°2 du profil I-50, on constate qu'elles sont légèrement moins résistantes. Cette classe n°2 pourrait être constituée de blocs de calcaire plus fracturés comme dans le cas du profil I-50.

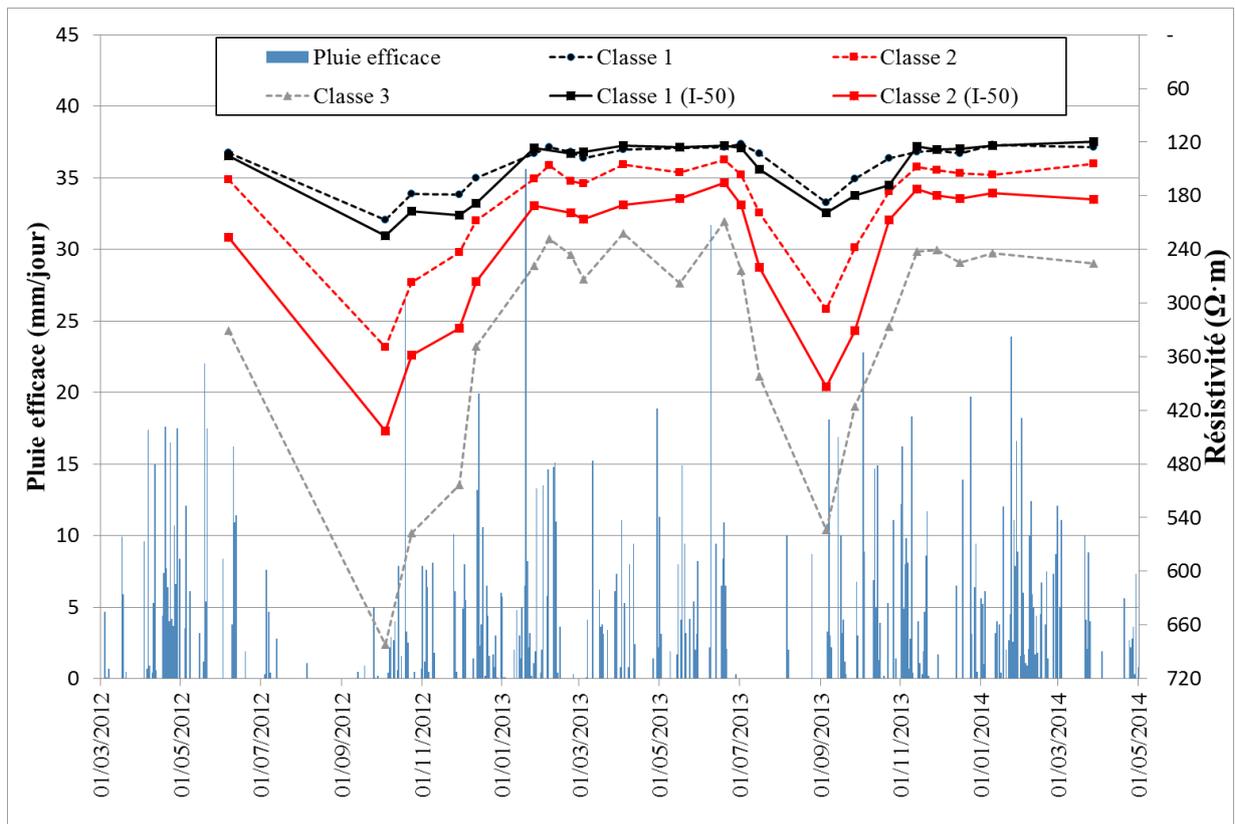


Figure 95. Evolution des médianes des résistivités des classes n°1, 2 et 3 (en pointillé) du profil II-50 et du profil I-50 (ligne continue), pour comparaison à la P_{eff} .

Classe n°3

Cette classe est relativement proche de la classe n°2 (Figure 95) du point de vue statistique (CHA). La résistivité des blocs de cette classe est très élevée, elle varie entre 209 et 682 $\Omega \cdot m$ ayant la plus forte variation temporelle (coefficient de variation = 0,88). Cette gamme de résistivité ressemble celle la classe n°2 du profil I-50 (Figure 95) que l'on a attribuée à des blocs de calcaires moins altérés. Au droit de 22 m, il y a une anomalie conductrice comprise entre deux structures résistantes appartenant à la classe n°3. Cette organisation pourrait correspondre à un artéfact numérique lié à la proximité d'une fracture (Gance *et al.*, 2015).

Classe n°4

Cette classe est constituée des blocs situés généralement en-dessous de 2,4 m de profondeur et qui enveloppent les blocs de la classe n°5. Les médianes des résistivités de cette classe sont comprises entre 124 et 145 $\Omega \cdot m$. La gamme des résistivités ressemble à celle de la classe n°3 du profil I-50 (Figure 96).

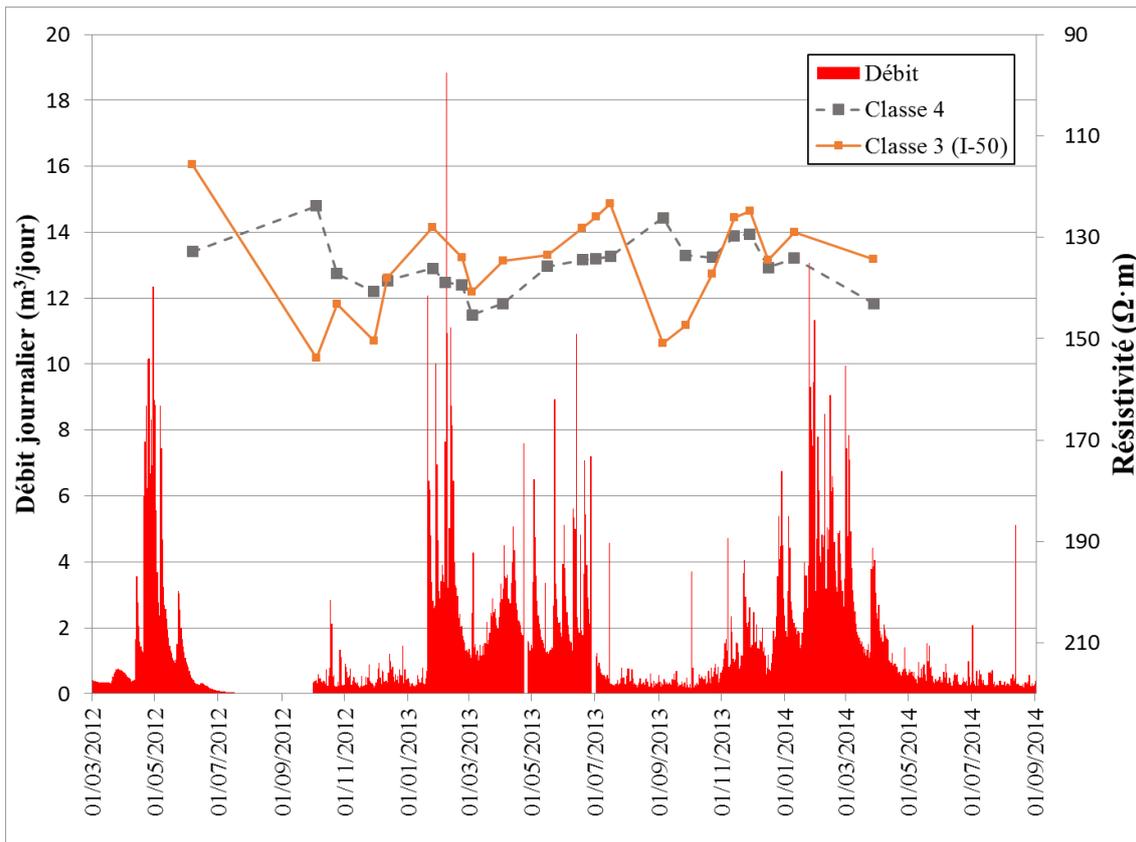


Figure 96. Evolution des médianes des résistivités de la classe n°4, pour comparaison à celles de la classe n°3 du profil I-50.

La similarité des variations de la résistivité dans cette classe et dans la classe n°3 du profil I-50 montre que les blocs de ces deux classes peuvent être constitués du même type de formation. De plus, les blocs, dans les deux cas, occupent les mêmes profondeurs. Cette classe pourrait correspondre à un niveau ayant un contraste faible de perméabilité, soit des calcaires plus compacts ou plus marneux ou encore avec des joints argileux, comme dans le cas du profil I-50.

Classe n°5

Les blocs de la classe n°5 se trouvent entre 18,5 et 23,5 m ; elle contient l'anomalie conductrice centrale observée sur les modèles de résistivité (Figure 93). Cette classe montre des variations de résistivité liées au débit, avec une forte amplitude (coefficient de variation = 1,21). En les comparant à celles des médianes de la classe n°5 du profil I-50 (Figure 97), on constate qu'elles réagissent intensément au changement du débit dans la grotte. Par exemple, il y a une diminution de résistivité le 24 octobre 2012 après une crue du 18 octobre 2012, et une augmentation de résistivité le 6 février 2013 alors que le débit a commencé à diminuer depuis le 29 janvier 2013. La résistivité atteint une valeur très faible ($43 \Omega \cdot m$) le 16 juillet 2013, alors qu'il y avait un pic de débit le jour précédent ($4,6 \text{ m}^3/j$, le 15 juillet 2013).

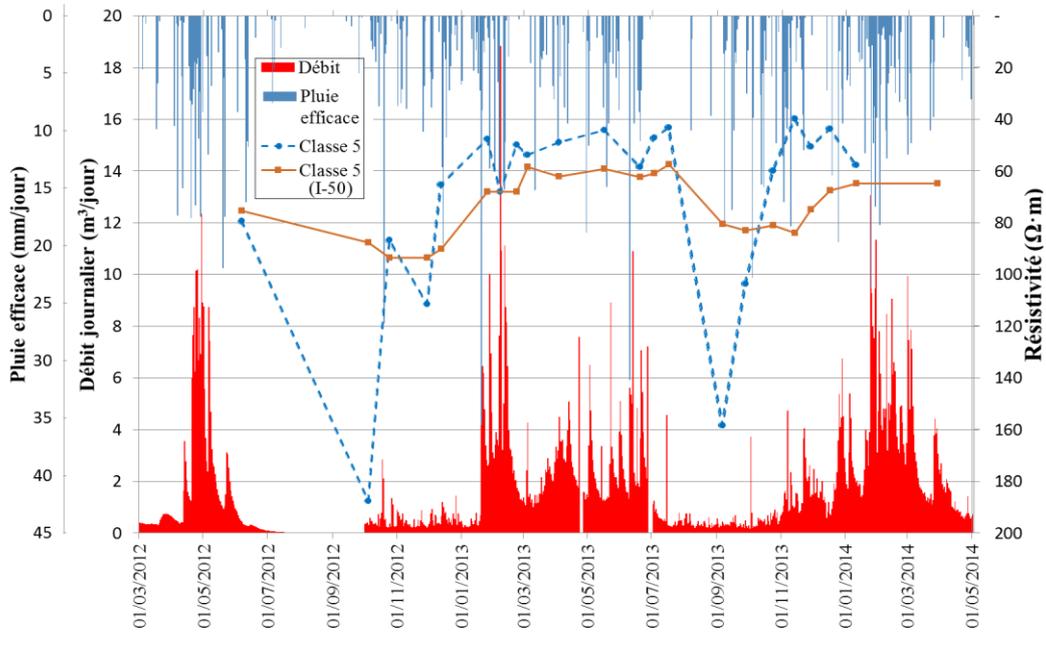


Figure 97. Evolution des médianes des résistivités de la classe n°5 pour comparer à celles de la classe n°5 du profil I-50.

L'évolution des médianes des résistivités la classe n°5 est influencée par le changement de la pluie efficace. En la comparant à celle de la classe n°5 du profil I-50, on constate que la résistivité de la mesure du 4 octobre 2012 est plus forte dans la classe n°5, alors qu'il n'y avait pas eu de pluie pendant 72 jours (du 14 juillet 2012 au 24 septembre 2012) et encore une absence de pluie efficace de 6 jours (du 29 septembre 2012 au 5 octobre 2012). La mesure du 19 novembre 2012 semble anormalement plus forte en résistivité, lorsqu'il y avait une absence de pluie pendant 13 jours (du 11 novembre 2012 au 24 novembre 2012).

En résumé, le profil II-50, situé à proximité de la grotte, peut être séparé en deux parties selon la profondeur. Une partie superficielle allant jusqu'à 2,4 m est rapidement influencée par le changement de la pluie efficace du site de Lascaux. Cette partie peut être le lieu de l'infiltration rapide. Une autre partie plus profonde, depuis 2,4 m jusqu'à 7,9 m, contient des calcaires moins fracturés et fissurés, dans lesquelles, il y a une zone probablement connectée à la zone d'écoulement dans le sas1.

La partie superficielle du profil II-50 est généralement plus conductrice que celle du profil I-50. Elle peut être plus fissurée ce qui favorise l'infiltration vers la partie profonde. C'est la raison pour laquelle on trouve une classe n°5 ayant une variation de résistivité à la fois liée au débit mais aussi à la pluie efficace. Les blocs de cette classe n°5 peuvent être dans la continuité de ceux de la classe n°5 du profil I-50, ils sont probablement une zone d'alimentation de la nappe perchée dans la grotte, cette continuité sera observée par la modélisation géostatistique dans le chapitre suivant (cf. 5.3).

De plus, ce profil se situe à proximité de la grotte où l'on mesure le débit (sas1) et observe l'humidification des joints calcaires de la salle des Taureaux. Il se peut que l'eau se stocke et circule lentement à l'endroit du profil I-50, puis passant par le profil II-50 avec une vitesse plus rapide arrive à la grotte. En complément de la prévision du débit avec le profil I, le profil II-50

pourrait servir dans le futur à surveiller les changements rapides du débit dans la grotte et éventuellement l'arrivée du front d'humidité dans les joints de la salle des Taureaux.

4.3. Profil II-100

Le profil II-100, ayant le même point de départ que le profil II-50, se prolonge jusqu'à 6 m en dehors de l'enceinte de protection du site. On peut identifier cinq anomalies conductrices notées A à E (Figure 98) sur les modèles de résistivité présentés de façon chronologique (Figure 99) :

- la première (A) est située entre 18 et 22 m le long du profil, a déjà été identifiée sur le profil II-50,
- la deuxième (B) se situe entre 9 et 15 m, de 181 à 183 m NGF (également identifié sur le profil II-50),
- la troisième (C) se situe entre 36 et 40 m, de 177 à 172 m NGF.
- la quatrième anomalie (D) se trouve en surface à l'extrémité sud-est du profil (géographiquement, sur le chemin des pompiers autour de l'enceinte),
- la dernière (E) est au sud-est du profil mais plus profond.

Les formes et les valeurs de résistivité de ces deux anomalies (B et C) semblent varier au cours du temps. Les formes de ces deux dernières anomalies (D et E) varient en fonction du temps, quant à leur résistivité, elles sont toujours très conductrices, avec une gamme de résistivité qui ne semble pas avoir changé au cours du temps. Une analyse à l'aide de CHA permettra d'identifier les différents blocs ayant la même tendance de variation temporelle en termes de résistivité.

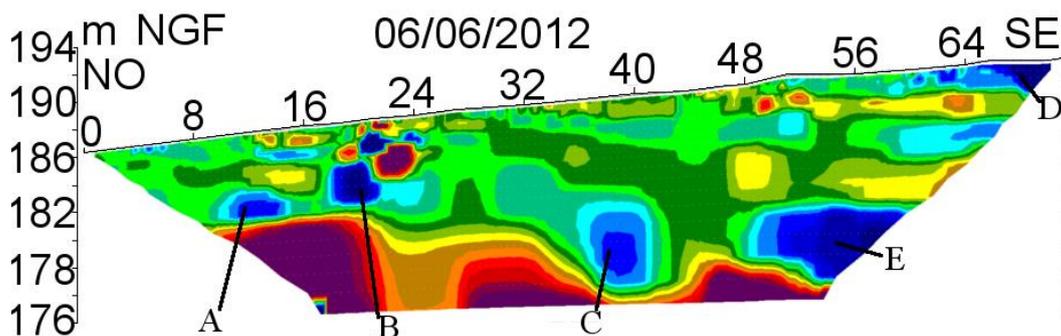


Figure 98. Anomalies conductrices sur le profil II-100, exemple du 06/06/2012.

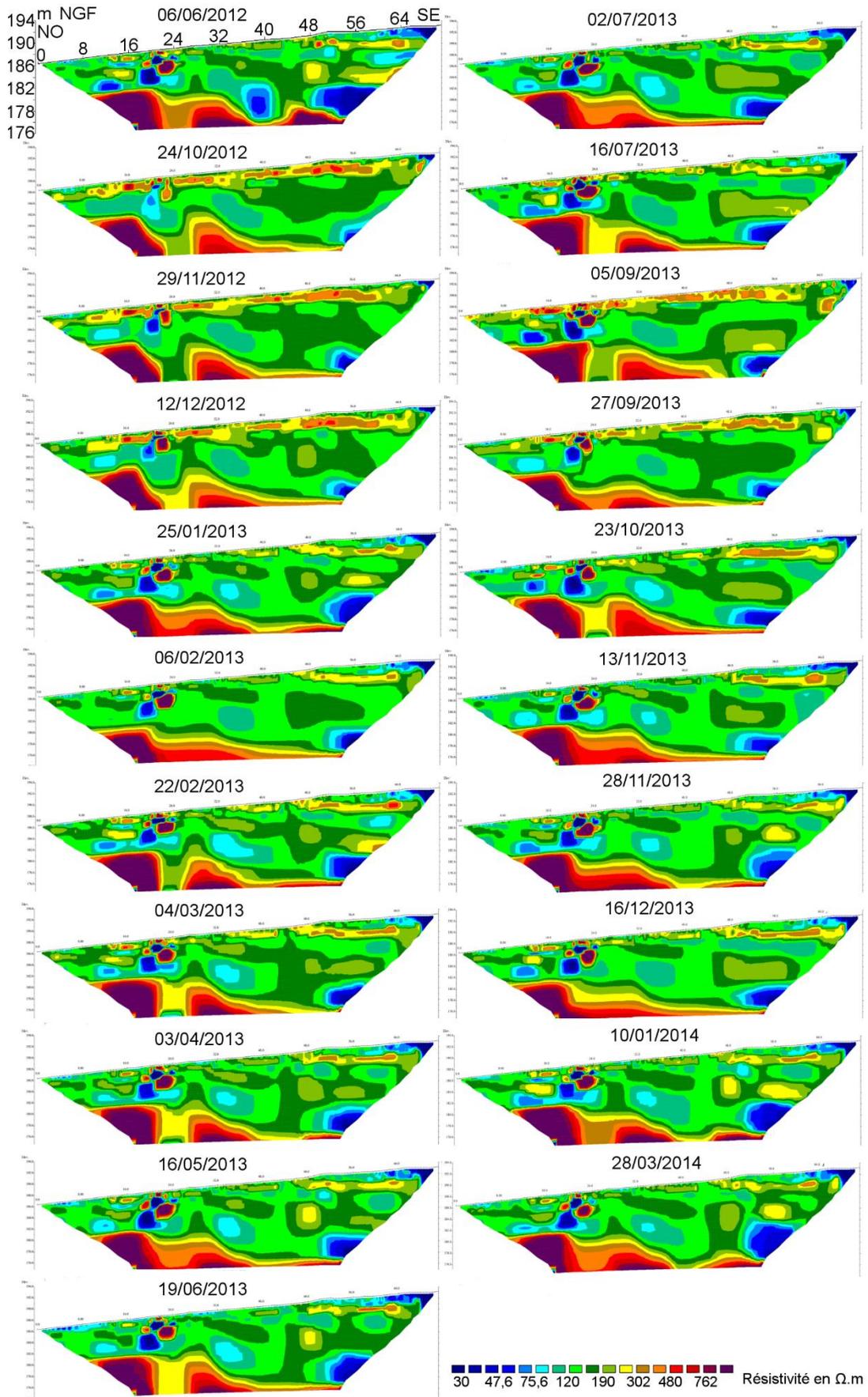


Figure 99. Modèles de résistivité du profil II-100.

On choisit de séparer les blocs du modèle du profil II-100 en six classes (Figure 100) selon le dendrogramme (Annexe V.A). Les classes n°1 et 2, de la surface jusqu'à 2,7 m de profondeur, constituent généralement une couche superficielle. En-dessous de cette couche, les classes n°3 et n°6 se trouvent graphiquement aux endroits ayant de faibles variations temporelles ce qui est observable sur les modèles de résistivité (Figure 99). Les classes n°4 et n°5 couvrent la zone qui varie le plus dans le temps.

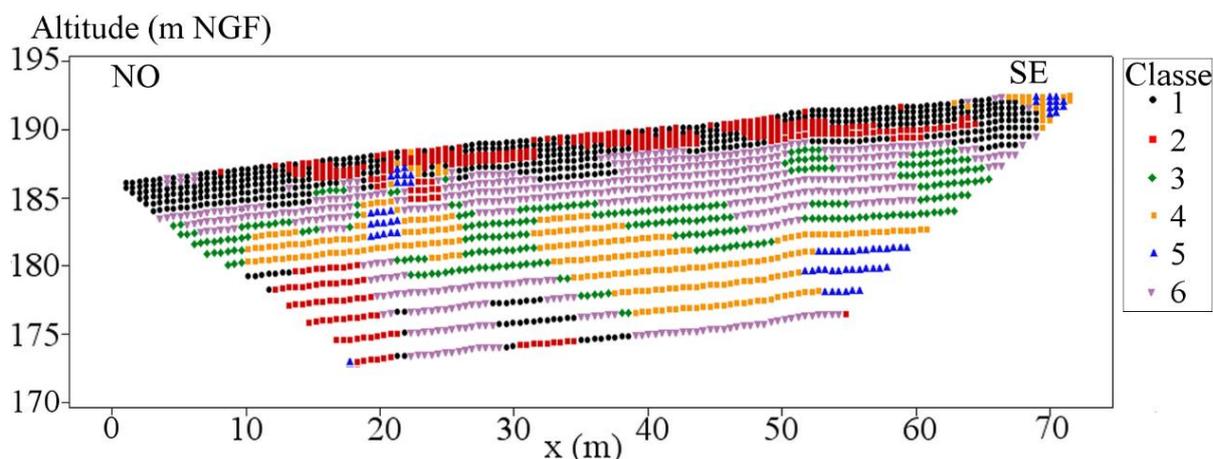


Figure 100. Répartition des blocs tenant compte des résultats de CHA par individu du profil II-100.

Classe n°1

La classe n°1 contient les blocs situés en surface allant jusqu'à 2,7 m, avec quelques blocs plus en profondeur (entre 30 et 40 m, en-dessous de 12,4 m). Cependant, les blocs de cette classe ne couvrent pas l'ensemble de la partie superficielle du profil – il y a globalement quatre zones où s'intercalent les blocs de la classe n°2. La variation de résistivité (Figure 101) pour cette classe est fortement influencée par le changement de la pluie efficace et ressemble à celle du profil II-50.

Classe n°2

Les blocs de cette classe se séparent en deux parties : l'une est située en surface entre 13-15 m, 21-24,5 m, 34-39,5 m et 45-49 m le long du profil ; et l'autre contenant 129 blocs en profondeur (notamment au-delà de 8,5 m) et dont les valeurs de résistivité sont très élevées (médiane de ces 129 blocs = 1076 $\Omega \cdot m$). Ce sont ces blocs qui font que la médiane de résistivité augmente par rapport à celle des blocs de la classe n°2 du profil II-50 ; ils peuvent correspondre à un niveau plus compact du calcaire coniacien.

Les variations de résistivité des classes n°1 et n°2 sont similaires à celles du profil II-50. C'est-à-dire que la partie superficielle réagit vite au changement de la pluie efficace, les infiltrations passent rapidement jusqu'à 2,7 m. En changeant l'espacement du dispositif de mesure, la médiane de résistivité de la classe n°1 ne montre pas de grande différence. Cependant, la classe n°2 du profil II-100 se marque par des résistivités plus fortes que pour le profil II-50, cette différence est liée à la séparation des classes n°2 et n°3 dans la partie superficielle et peut aussi indiquer qu'au-delà de 35,5 m le long du profil, cette classe n°2 est constituée par des matériaux plus résistants, probablement des calcaires moins fracturés.

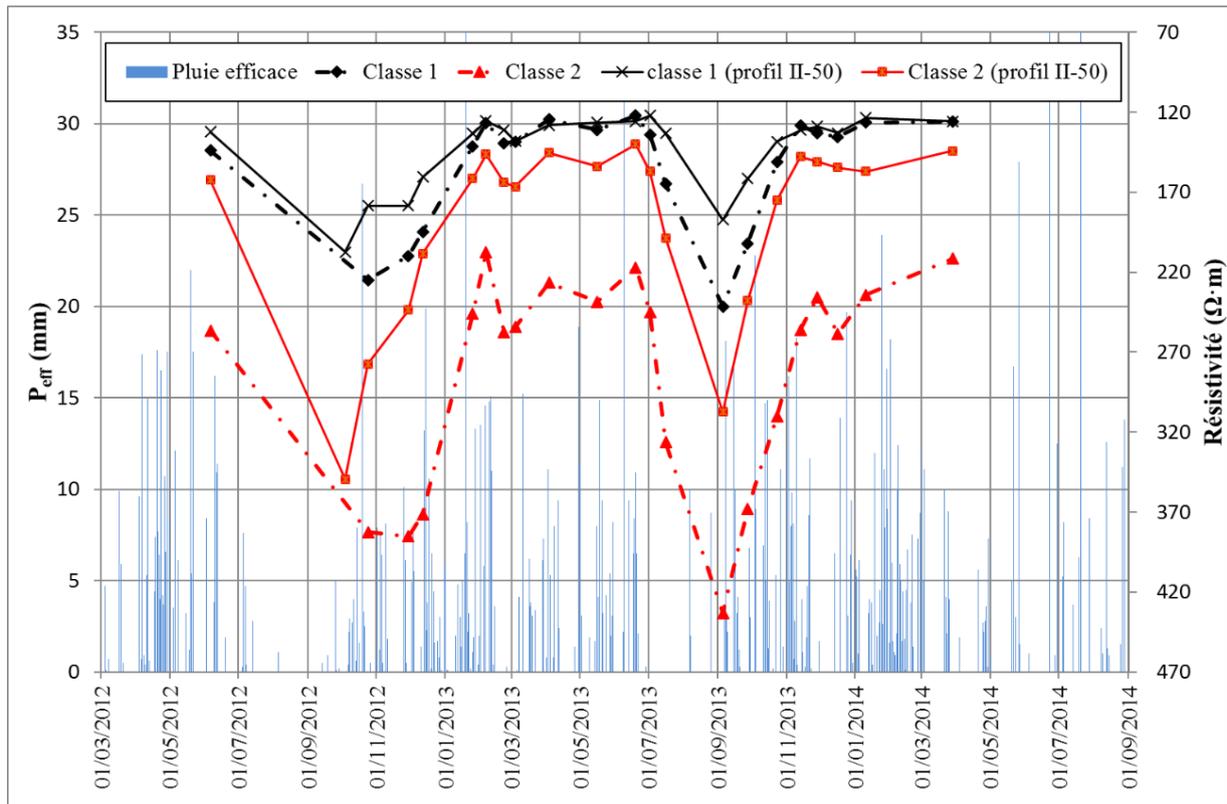


Figure 101. Evolution des médianes des résistivités des classes n°1 et 2 (en pointillé) du profil II-100 et du profil II-50 (trait plein), en fonction de la pluie efficace P_{eff} .

Classe n°3

Les blocs de cette classe se situent au milieu du modèle, notamment entre 2,7 - 9,6 m de profondeur. Graphiquement, ils correspondent à une zone dont la variation de résistivité est faible. La résistivité varie en effet entre 128 et 151 $\Omega\cdot m$, et elle varie peu dans le temps (coefficient de variation = 0,31). L'analyse de l'évolution des médianes des résistivités se fera avec celle de la classe n°6 (Figure 102).

Classe n°6

Les blocs de la classe n°6 se situent au-dessus des blocs de la classe n°3. Les résistivités varient entre 148 et 169 $\Omega\cdot m$. Cette classe contient également 129 blocs situés en profondeur (> 8,5 m) dont les valeurs de résistivité sont plus élevées (médiane pour ces 129 blocs profonds = 360 $\Omega\cdot m$) (Annexe V.B). La résistivité est légèrement plus importante que celle de la classe n°3 mais le coefficient de variation (0,84) de cette classe est relativement fort. Cependant, l'amplitude des variations de résistivité (Figure 102) reste faible tout le long de l'année.

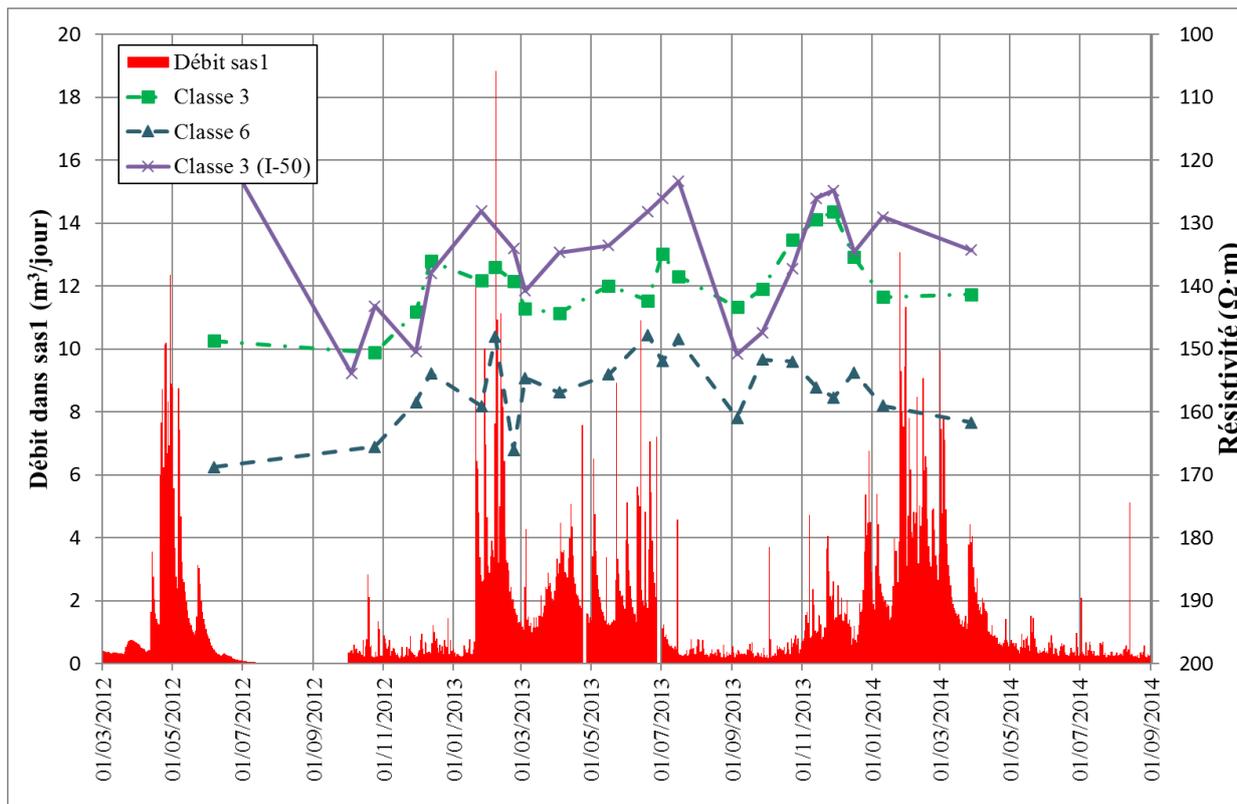


Figure 102. Evolution des médianes des résistivités des classes n°3 et n°6 du profil II-100, pour comparaison à celle de la classe n°3 du profil I-50.

Cependant, les résistivités pour ces deux classes sont proches de celles de la classe n°3 du profil I-50 (Figure 102). L'amplitude de la variation pour la classe n°3 (23 $\Omega \cdot m$) est proche de celle de la classe n°6 (21 $\Omega \cdot m$) tandis que les blocs de la classe n°6 sont plus résistants et moins profonds. Ces blocs (classe n°6) peuvent correspondre au niveau fissuré de calcaire où la circulation de l'eau passe par la zone d'infiltration située plus en profondeur alors que ceux de la classe n°3 pourraient correspondre à un niveau de perméabilité faible englobant ceux des classes n°4 et 5 ayant des plus fortes variations de résistivité.

Classe n°4

Les blocs de cette classe se trouvent généralement autour de ceux de la classe n°5. La résistivité varie entre 91 et 130 $\Omega \cdot m$. L'évolution temporelle de la résistivité de cette classe se corrèle au débit, et ressemble à l'évolution temporelle des médianes de la classe n°5 du profil II-50 (Figure 103). Graphiquement, cette classe enveloppe les anomalies notées B et E (Figure 98).

Classe n°5

Les blocs de la classe n°5 se situent à l'intérieur de ceux de la classe n°4. La médiane de résistivité varie entre 29 et 87 $\Omega \cdot m$. Ayant une forte amplitude de variation (coefficient de variation = 1,65), la tendance de variation pour cette classe ressemble à celle de la classe n°4 et de la classe n°5 du profil II-50. Par ailleurs, les précipitations semblent influencer plus directement cette classe sur le profil II, cela se manifeste par exemple, lors de la période de 15 février 2013 à 6 mars 2013 par une augmentation de résistivité. Graphiquement, l'espace occupé par ces classes est relié à la classe n°2 qui est considérée comme une zone de « front

d'humidité ». Alors que la classe n°5 du profil I-50, ayant la même gamme de résistivité, n'est pas directement connectée avec la partie superficielle.

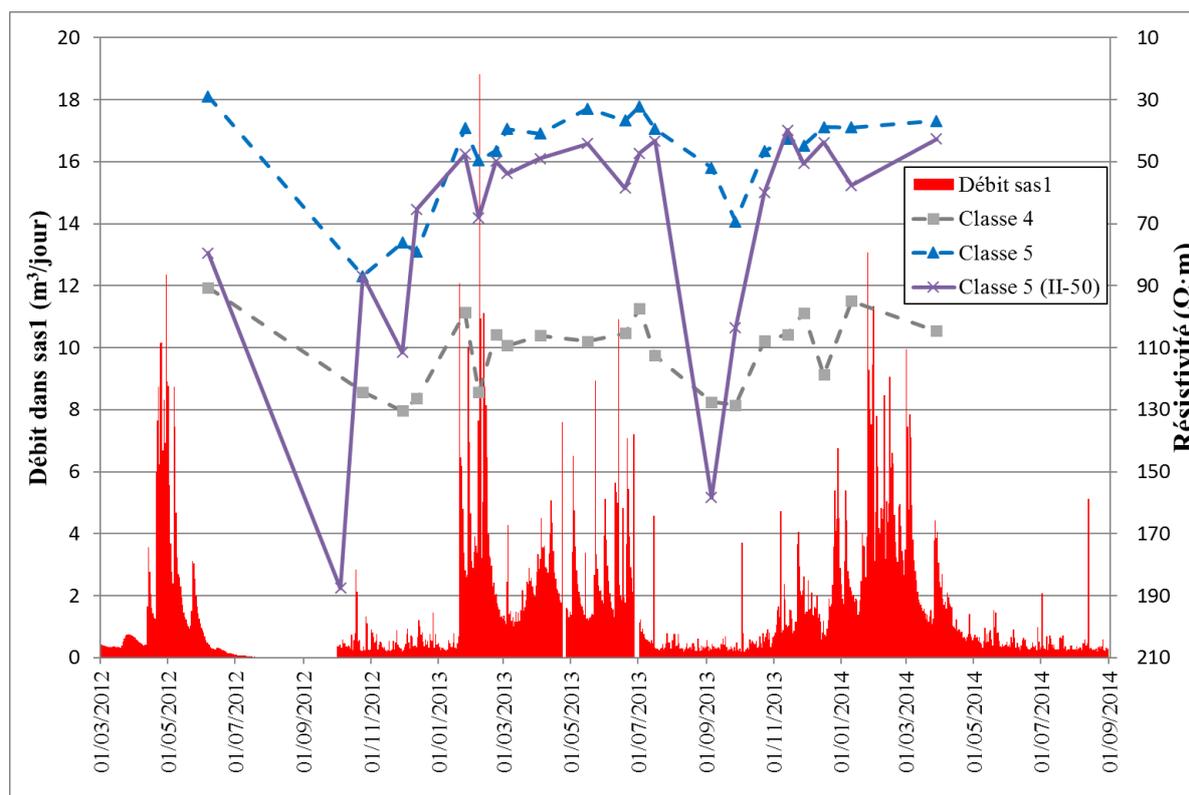


Figure 103. Evolution des médianes des résistivités des classes n°4 et n°5 du profil II-100, pour comparaison à celles de la classe n°5 du profil II-50.

Conformément aux interprétations mises à évidence du profil II-100, les variations de résistivité dans les classes n°4 et 5 sont à la fois liées au débit dans le sas1, et également influencées par la variation de la pluie efficace. De plus, les résistivités de la partie superficielle sont moins fortes que pour le profil I, ceci traduit que le terrain superficiel du profil II est plus altéré que celui du profil I.

4.4. Conclusion sur le suivi temporel de TRE

Avant de discuter les résultats du suivi temporel de TRE, il est utile, de discuter les méthodes employées et les stratégies développées. Tout d'abord, les électrodes ne sont pas implantées de façon permanente, cependant les profils sont bien repérés avec des repères installés à demeure, ce qui permet de retrouver les emplacements des électrodes avec une incertitude inférieure à 1 cm (on peut retrouver les trous de la dernière mesure). Selon les modèles d'inversion, on n'observe pas de décalages remarquables des positions des électrodes entre les mesures effectuées aux différentes dates. Avec les électrodes mises à demeure, ce qui assurerait, bien sûr, des positions parfaitement fiables des électrodes, la mesure serait plus simple à mettre en route. La mise en place à demeure des électrodes favorisera également un suivi temporel avec un pas de temps plus régulier. Ensuite, il serait intéressant que les données microclimatiques utilisées soient toutes enregistrées sur le site de Lascaux, par exemple, la pluie efficace (précipitation, ETP, etc.). Ceci favoriserait la

validation de la corrélation éventuelle entre les résistivités et les données microclimatiques, alors qu'à ce stade, la corrélation est seulement effectuée en utilisant les données de Montignac et Gourdon.

Les campagnes de mesure du suivi temporel de TRE à proximité de la grotte de Lascaux permettent d'identifier différentes structures géologiques ou zone d'altération et éventuellement une zone potentiellement chargée en eau qui alimenterait probablement la nappe perchée de la grotte. La synthèse détaillée du suivi temporel est la suivante.

4.4.1. Synthèse du suivi temporel de TRE

De manière générale, les modèles de résistivité des quatre profils peuvent être découpés en quatre parties :

- Partie I : les blocs majoritairement situés depuis la surface topographique jusqu'à 2,7 m de profondeur, pouvant atteindre 3,3 m en certains endroits. La médiane des résistivités dans cette partie peut varier de 120 $\Omega\cdot m$ à 443 $\Omega\cdot m$. La variation de la pluie efficace montre une corrélation rapide avec celle des résistivités. Limité par le nombre de mesures réalisées, on constate que la résistivité réagit dans un délai maximum de cinq jours après les épisodes pluvieux. Cette zone est probablement constituée d'un niveau de terre végétale superficiel et de calcaires altérés et fracturés. Un pas de mesure plus resserré permettrait de déterminer exactement la durée écoulée entre le moment où il y a diminution de résistivité et le moment de reprise des précipitations. Cette première partie correspond, sur chaque profil aux classes n°1 et 2.
- Partie II : elle est constituée des blocs situés généralement en-dessous de 8 m de profondeur, de l'abscisse 0 m allant jusqu'à 32 m maximum le long du profil. Au-delà de 32 m, les blocs sont encore plus profonds – profondeur supérieur à 10 m. Cette partie est constituée de matériaux ayant une très forte résistivité (de 333 à 3935 $\Omega\cdot m$). Cette partie peut correspondre au début de la zone d'infiltration, constituée de calcaires plus compacts avec une faible présence de fissures.
- Partie III : les blocs sont situés entre les deux premières parties. Cette partie contient une zone qui présente une faible variation temporelle et dont la résistivité est comprise entre 116 et 169 $\Omega\cdot m$. Les calcaires de cette partie pourraient être moins altérés ou plus marneux que dans la partie I mais ils restent à un niveau d'altération assez fort ce qui permet que l'écoulement de l'eau se manifeste dans cette partie.
- Partie IV : à l'intérieur de la partie III, on trouve des matériaux dont les résistivités sont très faibles (de 18 à 100 $\Omega\cdot m$) et qui varient en fonction du temps. Sur le profil I, cette partie est probablement située en-dessous d'une couche moins perméable, qui fait que l'évolution de la résistivité de cette partie ne varie qu'avec le débit. Alors que sur le profil II, il n'y pas de couche jouant le rôle d'imperméable, la variation de résistivité est partiellement liée au débit et également influencée par l'infiltration due à la pluie efficace.

4.4.2. Rôle des arbres

Des arbres sont nombreux et en forte densité dans la zone d'étude. Ceux-ci sont notamment des chênes sur un sol carbonaté où les réserves hydriques sont faibles. D'après

Perrin (2013), les racines des arbres pourraient avoir un impact significatif sur les transferts de matière entre les sols et la grotte. On présente, sur les profils, les arbres situés à une distance de moins de 2 m des profils de mesure, notamment à l'intérieur de l'enceinte de protection (Figure 104).

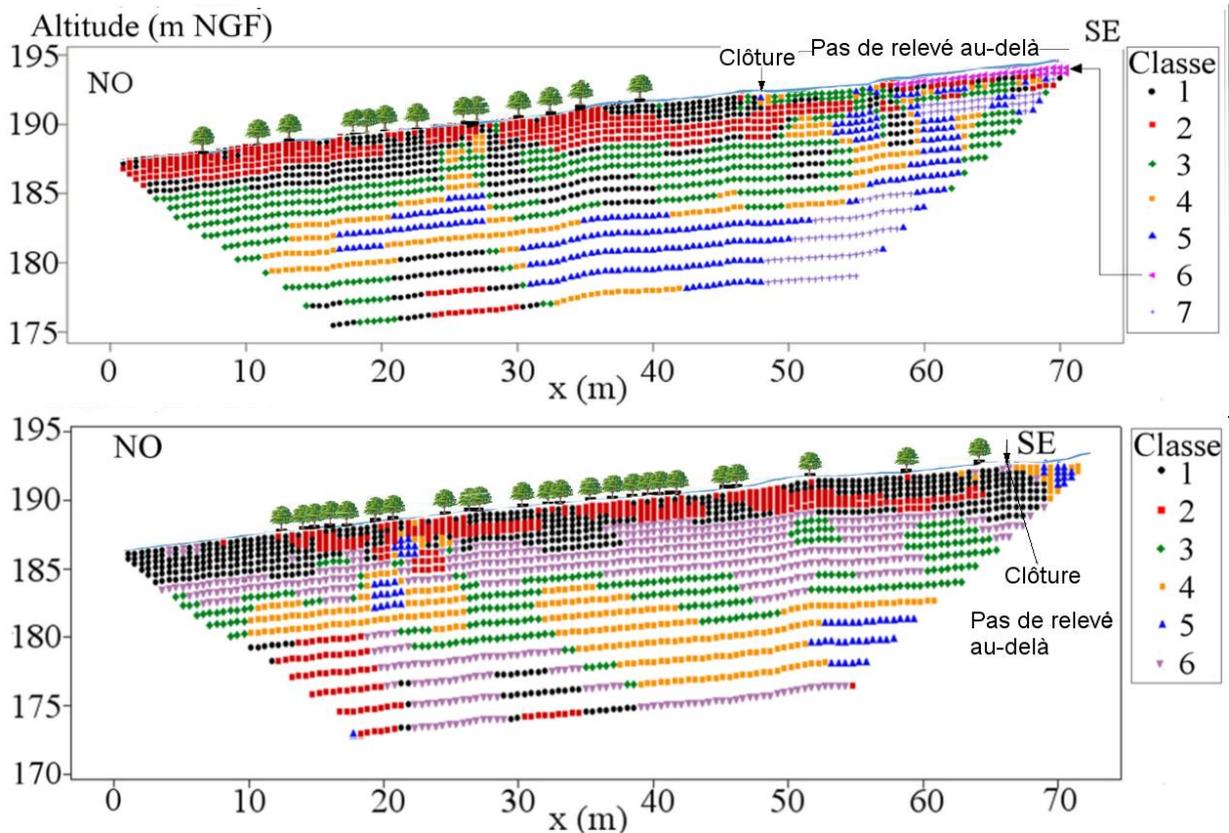


Figure 104. Emplacements des arbres (des chênes) sur chacun des profils (I-100 et II-100).

On constate que les arbres sont plutôt présents sur les zones situées au-dessus des classes n°2, sachant que la classe n°1 occupe la partie superficielle peu profonde. Rappelons qu'en surface, la classe n°2 est toujours plus résistante que la classe n°1 et la variation de résistivité est corrélée au changement de la pluie efficace (Figure 66, Figure 76, Figure 95 et Figure 101). Les racines des arbres peuvent probablement aller chercher l'eau dans les fractures de la classe n°2. De plus, les arbres augmentent l'effet de l'ETP lorsqu'il fait chaud pendant l'été ; au contraire, l'ETP provenant des arbres est faible pendant l'hiver. C'est donc une raison pour laquelle la différence des résistivités entre la classe n°1 et n°2 est plus importante en été qu'en hiver, la classe n°2 étant toujours plus résistante que la classe n°1.

4.4.3. Proposition de modèle géologique et altération

A partir des modèles de résistivité et les zonages présentés au paragraphe 4.4.1, on peut proposer deux modèles géologiques, chacun correspondant à un profil de TRE. Les limites entre les structures sont déterminées par les analyses de CHA. On délimite les formations calcaires, sableuses et argileuses et de la zone chargée en eau (Figure 105) à partir des valeurs de résistivité et de leur variation temporelle.

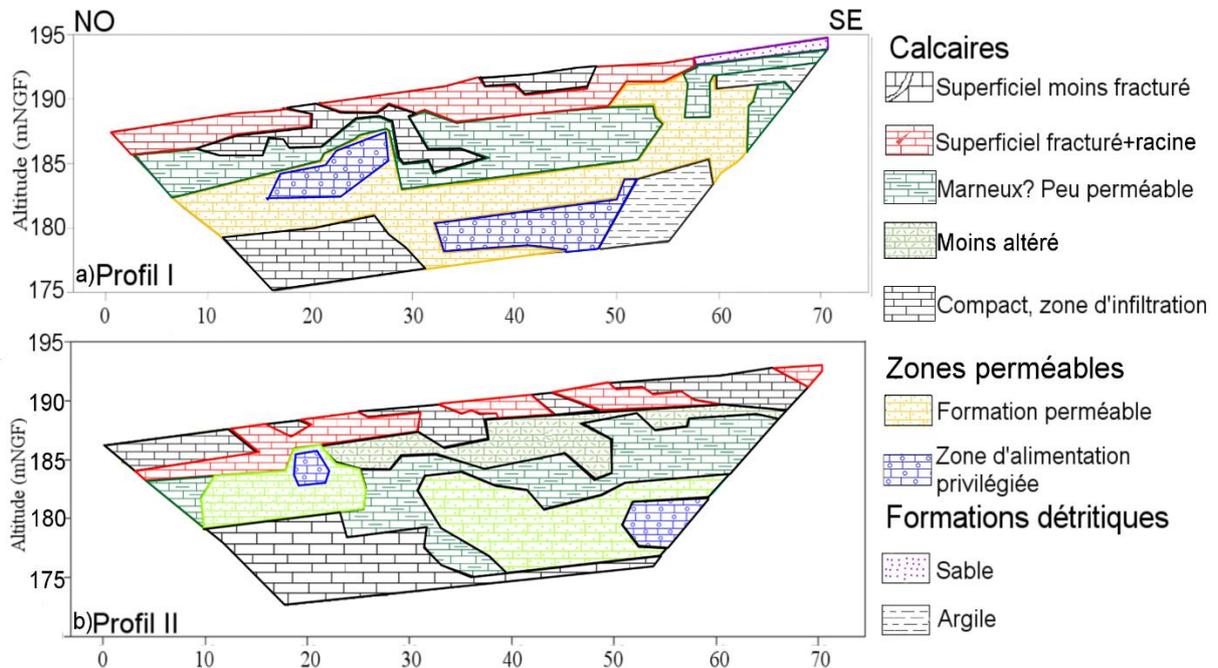


Figure 105. Les modèles géologiques estimés à partir des valeurs et des variations de résistivité, a) profil I, b) profil II.

Pour ces modèles, on peut faire une hypothèse sur les différentes formations géologiques suivantes, un tableau synthétique des paramètres statistiques est également proposé (Tableau 11) :

- Sables : ils ne sont guère présents que sur le profil I, au sud-est. La résistivité varie entre 868 et 2496 $\Omega \cdot m$, ce sont les plus fortes résistivités de toutes les zones. Ces formations ont été reconnues géologiquement (Bruxelles & Camus, 2014).
- Formations détritiques argileuses : elles n'existent que sur le profil I. Elles sont identifiées d'une part au sud-est du profil en-dessous des sables et d'une fine couche de calcaire fissuré et, d'autre part, en profondeur, au sud-est du profil I. Au cours du suivi, on remarque que la résistivité de ces matériaux ne présente quasiment pas de variation temporelle. La médiane des résistivités de cette formation est la plus faible, entre 18 et 26 $\Omega \cdot m$ (Annexe III.B). Le forage SG (cf. 5.4.3) a été réalisé à proximité de ces formations, ce qui permet de justifier la présence des matériaux argileux entre les calcaires.
- Formations perméables : elles enveloppent la zone de recharge décrite dans le prochain paragraphe, elle est potentiellement chargée en eau, permettant à l'eau

provenant du côté sud-est, dans la partie des formations détritiques, d'alimenter la zone de recharge. Les résistivités varient de 74 à 130 $\Omega\cdot\text{m}$.

- Zone d'alimentation privilégiée : c'est la zone chargée en eau, qui alimente probablement la nappe perchée du sas1. Cette zone du profil I a permis, à ce stade, de réaliser une modélisation de résistivité à partir des données du débit (cf. 4.1.3). Tandis que dans le cas du profil II, elle est aussi influencée par la pluie efficace. Les résistivités pour cette zone varient entre 29 et 100 $\Omega\cdot\text{m}$. L'emplacement de cette zone ainsi que les formations perméables l'entourant pourraient être liés à une forte altération du calcaire engendrant une porosité estimée de l'ordre de 30%, soit sous forme de porosité de fracture soit de porosité de pore comme par exemple de type « fantômisation » (Bruxelles & Camus, 2014).
- Calcaires coniaciens : par degré d'altération décroissant
 - Calcaires les plus altérés/fracturés : ils se situent en surface du terrain, allant jusqu'à 3,3 m de profondeur. Les eaux des précipitations peuvent pénétrer rapidement dans cette couche par les fractures (calcaire plus fracturé). Ils peuvent être des calcaires altérés en plaquette affleurant plus loin sur la colline de Lascaux. La médiane de résistivité varie de 122 à 441 $\Omega\cdot\text{m}$.
 - Calcaires moins altérés : ce sont les calcaires moins altérés de la couche sous-jacente, ils ne sont présents que sur le profil II (classe n°6). La médiane de résistivités varie entre 148 et 169 $\Omega\cdot\text{m}$, la variation temporelle est faible parmi les calcaires (écart-type = 181).
 - Calcaires marneux : c'est la couche sous-jacente des calcaires décrits dans les paragraphes précédents (dans le cas du profil II, le passage depuis 20 m le long du profil est assuré par des calcaires moins altérés). La médiane des résistivités varie entre 117 et 151 $\Omega\cdot\text{m}$, mais la variation temporelle par profil est faible. Il faut noter que cette couche sépare les calcaires superficiels altérés de la couche contenant des « formations perméables » dans le cas du profil I, alors que cette séparation n'existe pas sur le profil II, les calcaires s'appuient directement sur les formations perméables. On peut ainsi penser que c'est la raison pour laquelle les variations de résistivité dans les zones « perméables » et « chargées » du profil I ne sont pas influencées par la pluie efficace tandis que dans le cas du profil II, ces variations sont partiellement corrélées aux changements de la pluie efficace. Ce profil II, le plus proche de la grotte, est donc plus sensible aux précipitations et aux pollutions superficielles éventuelles, notamment des pollutions anthropiques. D'après Lopez (2009), le niveau de nitrate n'indique pas de pollution de surface (non atmosphérique) à Lascaux. Il est important de noter que sur ce profil II, le monitoring d'infiltration de la pluie de surface serait plus facile.
 - Calcaires compacts : ils occupent la partie profonde dans les modèles, majoritairement du côté nord-ouest. Les résistivités de ces calcaires sont les plus fortes, elles sont comprises entre 333 et 3935 $\Omega\cdot\text{m}$. Ces calcaires peuvent correspondre au début de la zone d'infiltration du système karstique de Lascaux.

Tableau 11. Paramètres statistiques liés aux formations proposées sur chaque profil.

	Terme	Médiane		Moyenne	Ecart-type
		Min	Max		
Profil I	Calcaire superficiel fracturé + racine	153	322	269	232
	Calcaire superficiel moins fracturé	122	202	196	160
	Calcaire marneux	117	133	142	129
	Calcaire compact	310	1059	624	362
	Formation perméable	74	114	100	58
	Formation argileuse	18	26	25	18
	Zone d'alimentation privilégiée	38	100	67	57
	Sable	868	2496	1742	1155
Profil II	Calcaire superficiel fracturé + racine	207	433	508	494
	Calcaire superficiel moins fracturé	122	241	193	147
	Calcaire moins altéré	148	169	215	181
	Calcaire marneux	128	151	145	45
	Calcaire compact	385	673	699	560
	Formation perméable	91	130	118	66
	Zone d'alimentation privilégiée	29	87	58	96

Chapitre 5

Représentation tridimensionnelle du site de la grotte de Lascaux

La représentation 3D est opérée par la modélisation 3D géostatistique des données de résistivités de TRE. Les mesures de TRE réalisées pour cette représentation spatiale (3D) seront tout d’abord présentées, ainsi que des exemples des modèles de résistivité en 2D (cf. 5.1.1). Ensuite le paragraphe 5.2 sera dédié à la description des méthodes géostatistiques qui seront utilisées. La modélisation géostatistique selon deux méthodes (krigeage ordinaire et par indicatrice), permettant une représentation tridimensionnelle des données et son interprétation sera ensuite l’objet du paragraphe 5.3. Avant de conclure, une validation des modèles obtenus est opérée par comparaison à des données géotechniques/géologiques.

5.1. Les données de résistivités

La modélisation géostatistique 3D proposée dans ce chapitre est basée sur les données de résistivités issues de l’inversion des résistivités apparentes obtenues le long de profils linéaires. On présente une synthèse des profils de TRE réalisés, avant la modélisation géostatistique.

5.1.1. Mesures de TRE

La campagne de mesure de TRE dans le périmètre de protection de la grotte de Lascaux destinée à cette représentation 3D, a été réalisée dans le courant du mois de mars 2013 (Figure 106). L’acquisition des mesures a été effectuée, tout comme celles présentées dans les chapitres précédents, avec le résistivimètre SYSCAL PRO Switch 96. Seize profils ont été réalisés et, pour chaque profil, deux types de dispositif (« gradient » et « pôle-dipôle – directe et inverse») ont été employés (96 électrodes espacées de 1,5 m). Parmi ces mesures, il y a quatre orientations, Nord-Sud (NS2-4), Ouest-Est (OE1-10), Nord Ouest-Sud Est (PS et PN) et Sud Ouest-Nord Est (OE11). De plus, quatre autres profils (Xu *et al.*, 2014) réalisés ultérieurement (3 avril 2013), dans des conditions climatiques comparables, ont été intégrés dans les données d’entrée (superposés aux profils PN et PS mais avec une longueur plus courte).

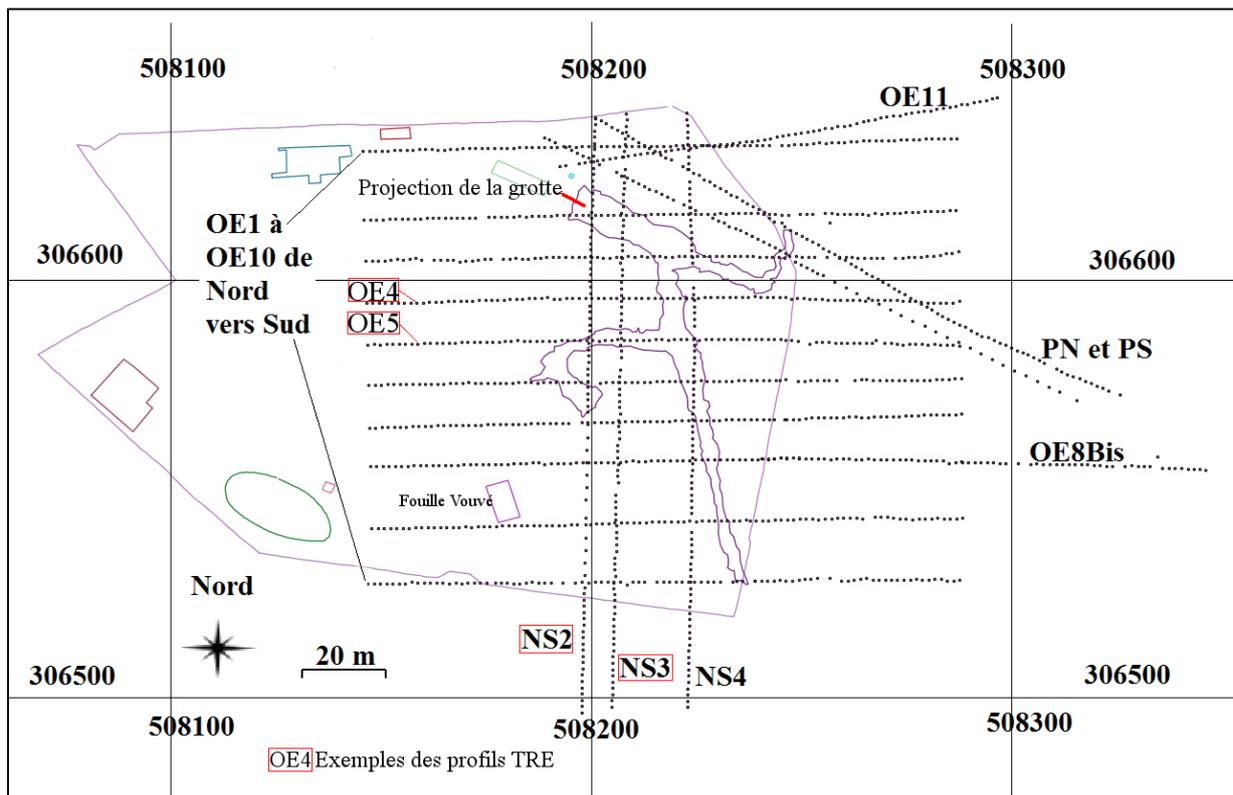


Figure 106. Emplacements des profils TRE sur le site de la grotte de Lascaux.

Les profils de TRE ont été réalisés pendant la journée entre le 21 mars et 28 mars 2013 alors que la campagne des mesures traitées dans les chapitres précédents était déjà entamée. Puisque le suivi temporel de TRE avait montré une variabilité temporelle de résistivité dans les calcaires (cf. 3.1) (Xu *et al.*, 2014), on a choisi cette période car elle a été identifiée comme présentant des conditions climatiques constantes pendant la période de mesures et elle montre de grands contrastes de résistivités dans la partie épikarstique. De plus, les températures de la roche à 0,5 et 1 m de profondeur pendant les mesures ne présentent pas de fortes variations (Figure 107) même si celle de l'air a une amplitude d'environ 20 °C. Du fait de la faible variation de température de la roche il a été décidé de ne pas appliquer la correction de température sur les résistivités « interprétée » après inversion.

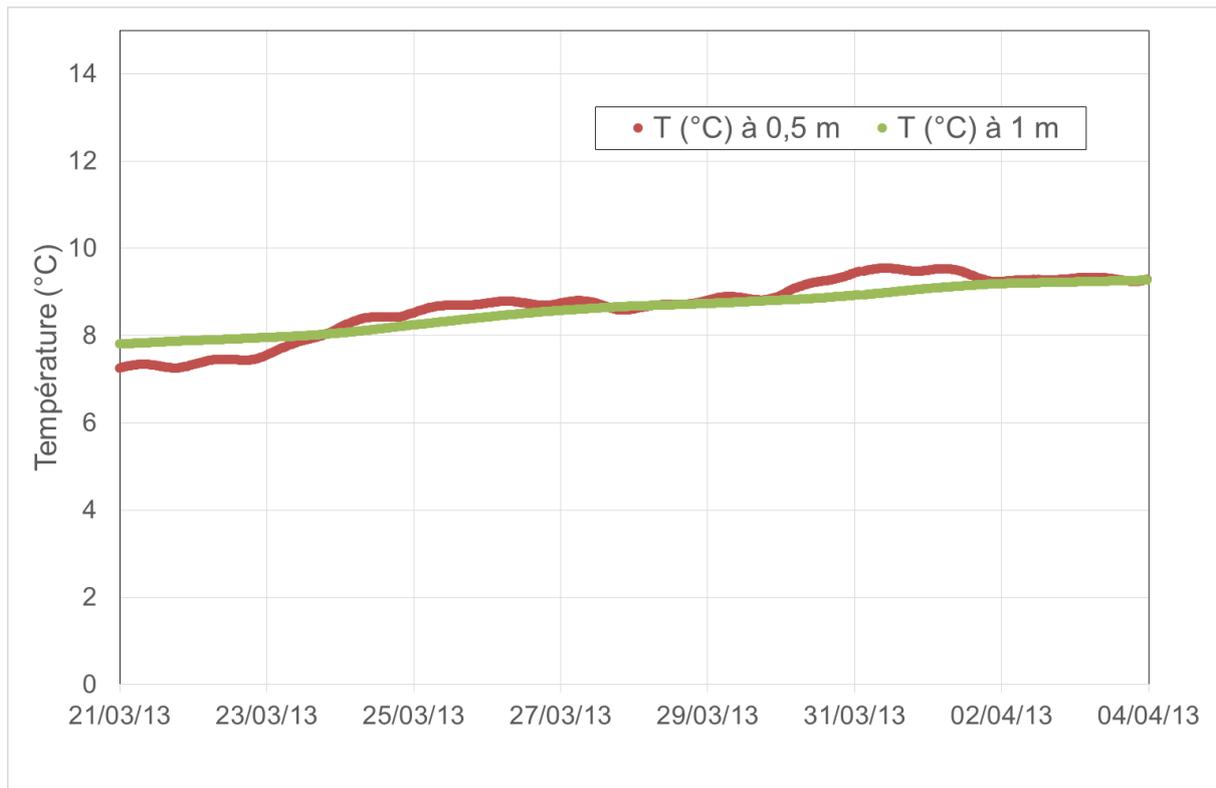


Figure 107. Températures enregistrées (tous les 30 minutes) de la roche pendant la campagne de mesures du 21/03/2013 au 04/04/2013.

5.1.2. Exemple de modèles de TRE 2D

Les modèles de résistivité 2D obtenus par TRE permettent d'identifier des structures au droit des mesures, ils donnent des informations locales sur la distribution spatiale en 2D des résistivités des terrains. L'ensemble des modèles est disponible dans le rapport d'I2M concernant ce projet d'étude (Sirieix & Xu, 2014). Dans la suite de ce sous-chapitre, quelques profils « type » sont présentés afin de mettre en avant les principales structures identifiées, et qui serviront lors de l'analyse du modèle 3D géostatistique.

5.1.2.1. Profils Ouest-Est

Les profils « OE1 à OE11 » orientés d'ouest en est montrent les formations sablo-argileuses à l'ouest et à l'est en passant par le promontoire calcaire. Ces profils permettent d'identifier les limites entre les formations sablo-argileuses et le promontoire calcaire. Un profil OE11 recoupe la partie nord du site avec une orientation N100 adaptée à l'accessibilité du site (escalier, citerne etc.). Deux profils situés au centre du site distants l'un de l'autre de 10 m (OE4 et OE5) sont présentés à titre d'exemple (Figure 108).

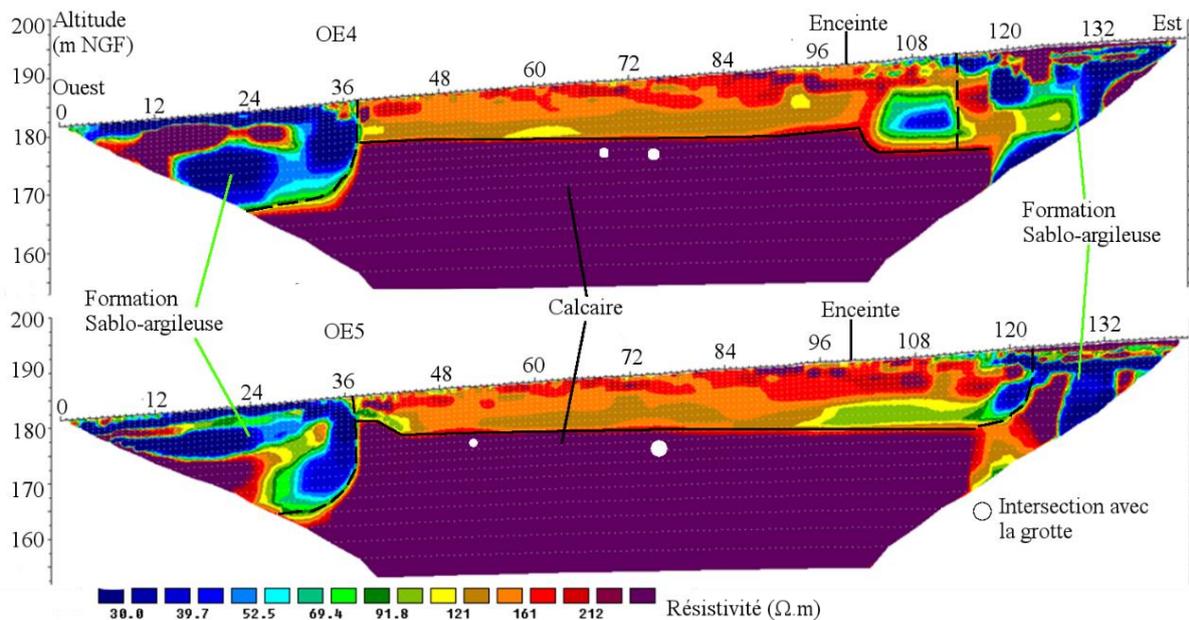


Figure 108. Modèles de résistivité des profils OE4 et OE5. Les cercles blancs correspondent à l'endroit où le profil coupe la grotte, avec une présentation schématique du diamètre de celle-ci.

De manière générale, les deux profils montrent une similarité au niveau des structures identifiées. On peut observer une limite claire à l'ouest entre une zone plus conductrice et la zone centrale globalement résistante, ainsi qu'à l'est une zone plus hétérogène mais conductrice (Figure 108). On considère donc les deux zones conductrices situées à l'ouest et à l'est du profil comme étant des formations sablo-argileuses, alors que la zone centrale résistante correspondrait au promontoire calcaire de la grotte de Lascaux.

Les formations sablo-argileuses ouest présentent globalement des résistivités faibles ($< 40 \Omega \cdot m$) avec localement, à l'intérieur, des structures résistantes ($> 200 \Omega \cdot m$). La limite entre cette zone et la zone centrale du promontoire est quasi-verticale, elle se trouve vers 37 m sur chacun des deux profils. La structure résistante se dessinant notamment en profondeur pourrait correspondre à une forme de type « lapiés » ou à la partie supérieur d'un conduit rempli de formations sablo-argileuses ; l'observation bidimensionnelle ne suffit pas à une description précise. À l'est, la limite des formations sablo-argileuses est moins marquée : on la trouve vers 117 m sur le profil OE4 et vers 125 m sur le profil OE5. La partie superficielle présente de très fortes valeurs de résistivité à l'est du profil ; elles correspondent à des couches sableuses observées sur le site. En dessous, la résistivité est plus faible ($< 50 \Omega \cdot m$) et correspond probablement à des formations plus argileuses. La nature des structures résistantes en dessous est plus difficile à déterminer. Sur les deux profils présentés, nous ne disposons pas de sondages géotechniques (pénétrromètres) permettant de confirmer les hypothèses, mais les pénétrromètres situés à proximité du profil OE6 montrent un refus au toit des structures résistantes à des profondeurs (2,5 m) cohérentes (avec l'image du modèle de Sirieix & Xu, 2014).

Le promontoire calcaire au centre des profils montre également une évolution des valeurs de résistivité dans la direction verticale. La résistivité est relativement élevée ($> 160 \Omega \cdot m$) depuis la surface topographique jusqu'à 184 m NGF, puis diminue jusqu'à 179 m NGF avant

d'augmenter fortement ($>275 \Omega \cdot m$) en-dessous de 179 m NGF. On observe également des anomalies légèrement conductrices situées juste au-dessus de 179 m NGF, par exemple une zone très conductrice ($< 70 \Omega \cdot m$) entre 103 et 112 m le long du profil OE4 à une cote comprise entre 187 et 179 m NGF, et une autre zone moins conductrice que la précédente entre 96 et 118 m le long du profil OE5 (entre 184 et 179 m NGF). La nature de ces anomalies est inconnue faute d'essais de reconnaissance géotechnique possible. Cependant ces hétérogénéités sont comparables en formes et en valeurs de résistivité à celles observées sur les profils I et II en suivi temporel (cf. 4.4). Nous confirmons aussi l'existence d'un calcaire plus résistant en-dessous de 179 m NGF.

5.1.2.2. Profils Nord-Sud

Les profils « NS2-NS4 » (Figure 109) orientés du nord au sud et distants de 7 m l'un de l'autre recoupent l'axe principal de la grotte (N119°E) à un endroit où la grotte est moins profonde qu'ailleurs. De plus, ils se situent dans la partie du promontoire calcaire déjà identifié sur les profils « OE ». Ces modèles sont donc censés présenter de fortes valeurs de résistivité, de l'ordre de celles du calcaire décrit au paragraphe 3.3.

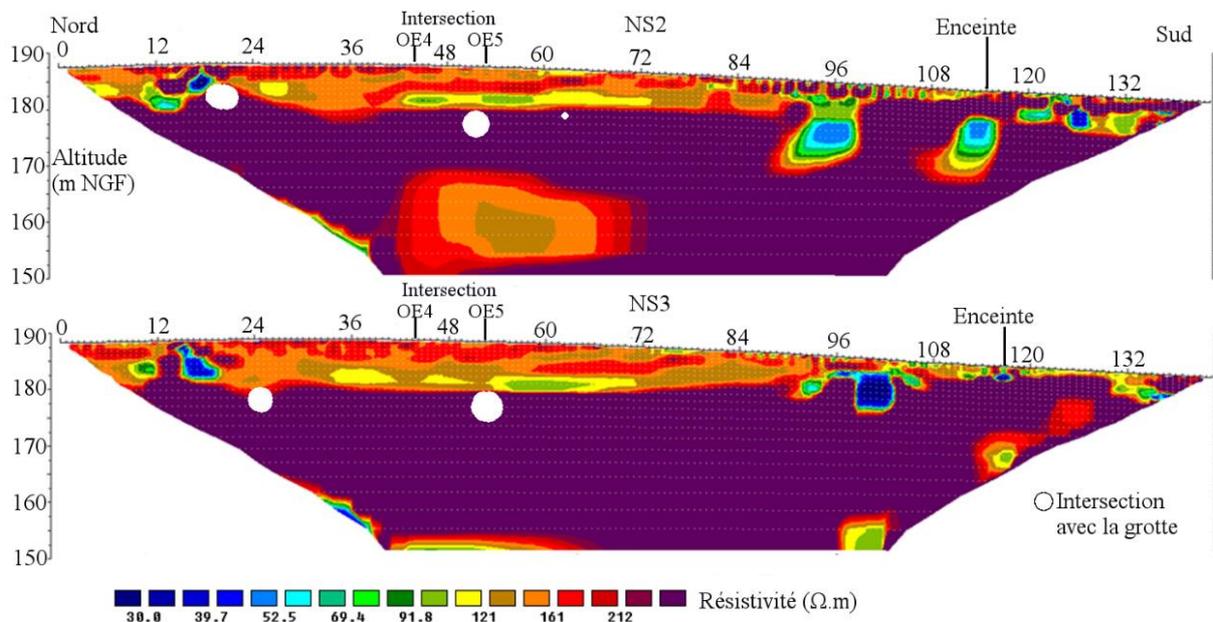


Figure 109. Modèles de résistivité des profils NS2 et NS3. Les cercles blancs correspondent à l'endroit où le profil coupe la grotte, avec une présentation approximative de leur diamètre.

Globalement, les deux modèles de résistivité présentent effectivement de fortes valeurs de résistivité avec quelques anomalies conductrices, ceci est généralement cohérent avec l'analyse des profils « OE ». Entre 30 et 90 m le long du profil NS2, le promontoire montre une évolution des résistivités vers la profondeur. Comme dans le cas des profils OE, la résistivité est croissante depuis la surface jusqu'à 183 m NGF, puis diminue jusqu'à 179 m NGF ; elle augmente à nouveau brutalement en-dessous de 179 m NGF.

Sur chacun des deux profils NS, des anomalies très conductrices apparaissent au nord et au sud. Sur le profil NS2, deux anomalies sont situées au nord entre 9 et 15 m (cotes de 180 à 182 m NGF) et entre 15 et 19 m (de 182,5 à 186 m NGF). La deuxième anomalie se trouve à proximité immédiate de la grotte et est probablement due à la présence de l'eau du sas1.

Sur le profil NS3, on observe également deux anomalies conductrices au nord qui ont les mêmes allures que celles observées sur le profil NS2 et qui semblent en continuité avec celles du profil NS2.

Au sud, des anomalies conductrices sont aussi identifiables mais leur nature reste à déterminer. Sur le profil NS2, elles sont localisées :

- entre 91,5 et 99 m, de 171 à 182 m NGF
- entre 111,5 et 117 m, de 171 à 172,5 m NGF
- entre 119 et 122 m, de 177 à 178 m NGF
- entre 125,5 et 127,5, de 176 à 177,5 m NGF
- entre 131 et 133 m, de 176 à 177,5 m NGF

et sur le profil NS3 :

- entre 97 et 103 m, de 176 à 183 m NGF
- entre 111 et 118 m, de 184 à 185 m NGF
- entre 132 et 132 m, de 182 à 183 m NGF.

La première anomalie sur le profil NS3 semble se situer dans la continuité de la première anomalie indiquée sur le profil NS2, témoignant d'une orientation nord-ouest sud-est.

Les cercles sur les profils (Figure 109) indiquent schématiquement les positions et tailles de la grotte lorsqu'un profil recoupe cette dernière. Ils se trouvent tous dans la partie très résistante tandis que la grotte, située entre 17 et 21 m sur le profil NS2, représente une forme « remontée » de la partie résistante, cette forme peut très bien représenter la grotte elle-même qui est très résistante. Les autres intersections avec la grotte ne sont pas identifiables sur les profils TRE en raison de faibles rapports diamètre sur profondeur (Sirieix *et al.*, 2014), ce rapport étant plus petit que la limite théorique (Apparao *et al.*, 1997) montrée dans des recherches antérieures.

5.2. Géostatistique

La géostatistique, historiquement utilisée pour l'estimation des gisements dans les mines, est l'étude des variables régionalisées. En comparant les méthodes d'interpolation « classiques » aux méthodes géostatistiques, celles-ci présentent la particularité de prendre en compte la variabilité et la structuration spatiale (ou temporelle) d'une variable, permettant de proposer des estimations spatiales avec une quantification de l'incertitude associée (Matheron, 1978).

5.2.1. Principe des méthodes géostatistique

Avant toute analyse géostatistique, il est nécessaire de réaliser une étude préliminaire sur les données brutes afin de comprendre et contrôler la qualité des données. L'étude variographique est ensuite réalisée de façon à mettre en évidence la structuration spatiale des données, menant à une modélisation d'un variogramme théorique. Par la suite, l'interpolation peut être réalisée en utilisant l'une des différentes méthodes géostatistiques (krigeage, co-

krigeage, simulation, etc...) en tenant compte de la structuration spatiale estimée précédemment au travers du variogramme.

5.2.2. Variogramme expérimental

Le variogramme est un outil permettant de quantifier la variabilité et la structuration d'un phénomène régionalisé (Huijbregts *et al.*, 1975). Il sert à évaluer la dépendance entre deux points d'une variable Z en fonction de la distance « h » entre ces deux points. Le variogramme d'une variable Z en fonction de « h » est donné par :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}\{Z(x+h) - Z(x)\} \quad (\text{Équation 20})$$

Où $\gamma(h)$ est le demi-variogramme (appelé variogramme par la suite). Il est lié à la covariance $C(h)$ de la variable et à la variance σ^2 :

$$\gamma(h) = \sigma^2 - C(h) \quad (\text{Équation 21})$$

D'après l'équation 21, si la covariance de Z tend vers 0 pour une distance h donnée (cas d'une variable stationnaire), le variogramme présente un palier « C » égal à la variance de la variable. La distance h à partir de laquelle le variogramme atteint ce palier est appelée portée « a ». La valeur d'un variogramme à l'origine est égale à zéro. Dans certains cas, pour une distance h infiniment petite, nous pouvons avoir une valeur du variogramme déjà éloignée de zéro, appelée effet de pépité « C_0 ». Historiquement, cela correspond au passage en mines d'une pépité d'or à une zone ne contenant quasiment pas d'or. L'effet de pépité est soit visible pour une variable très discontinue sur de courtes longueurs, soit traduit une erreur de mesures (Chilès & Delfiner, 1999). Un exemple d'un variogramme stationnaire est présenté sur la figure 110.

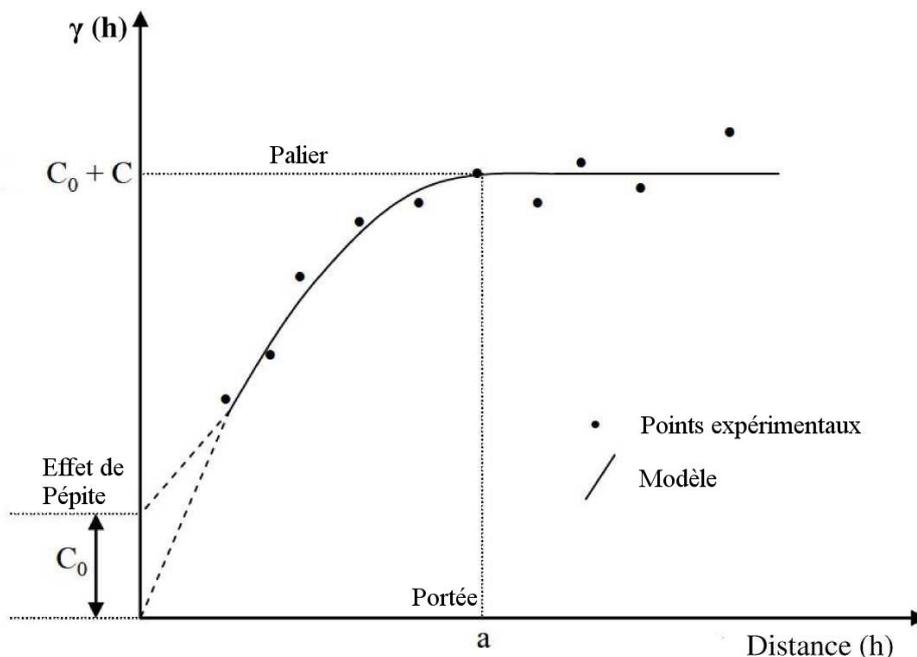


Figure 110. Exemple d'un variogramme stationnaire

En fonction des données, il est nécessaire de calculer soit un variogramme omnidirectionnel, soit un variogramme directionnel dans les directions d'anisotropie si la structuration de la variable n'est pas la même dans toutes les directions.

5.2.3. Ajustement d'un variogramme

A partir d'un variogramme expérimental, il est nécessaire d'ajuster un variogramme théorique pour la phase suivante d'interpolation (Chauvet, 1999). L'ajustement du variogramme se fait par une fonction, répondant à certaines contraintes, qui reproduit au mieux l'allure générale du variogramme expérimental. De nombreux modèles de variogramme existent, permettant de reproduire toute structuration spatiale de variable (variable stationnaire ou non, périodique...). Les modèles élémentaires les plus couramment utilisés sont les modèles puissance, sphérique, exponentiel, cubique, gaussien, linéaire et pépite pure (Figure 111 et Tableau 12). Un modèle peut également résulter de la somme de plusieurs modèles élémentaires.

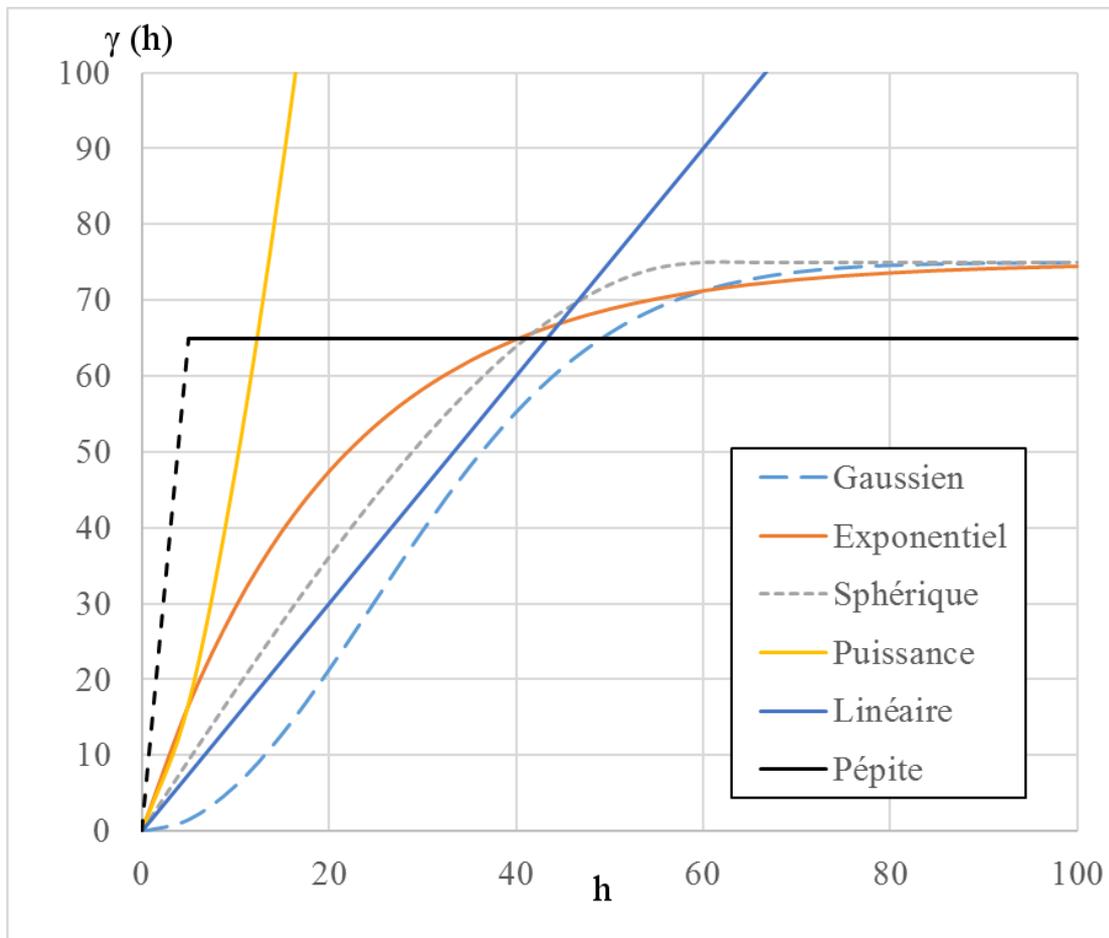


Figure 111. Exemples de modèles de variogramme.

Tableau 12. Modèles de variogramme couramment utilisés (Jaksa, 1995)

Modèle	Formule de la composante $\gamma(h)$	
Pépité pure	$\gamma(h) = C_0$	$C_0 = \text{effet de pépité}$
Sphérique	$\gamma(h) = C \left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) + C_0$	$h \leq a$
	$\gamma(h) = C + C_0$	$h \geq a$
Exponentiel	$\gamma(h) = C \left(1 - e^{-\frac{3h}{a}} \right) + C_0$	
Gaussien	$\gamma(h) = C \left(1 - e^{-3\left(\frac{h}{a}\right)^2} \right) + C_0$	
Linéaire	$\gamma(h) = ph + C_0$	$p : \text{la pente}$
Puissance	$\gamma(h) = ph^\alpha + C_0$	$\alpha \in (0,2)$
Cubique	$\gamma(h) = C \left[7\left(\frac{h}{a}\right)^2 - \frac{35}{4}\left(\frac{h}{a}\right)^3 + \frac{7}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^5 - \frac{3}{4}\left(\frac{h}{a}\right)^7 \right]$	$h \leq a$
	$\gamma(h) = C + C_0$	$h \geq a$

5.2.4. Krigeage

Dans la suite de l'étude, deux méthodes d'interpolation seront utilisées : le krigeage ordinaire et le krigeage d'indicateur. Les principes de calcul de chaque méthode sont ici succinctement présentés.

5.2.4.1. Krigeage ordinaire

Le krigeage ordinaire permet l'estimation d'une valeur Z_0^* en un point non mesuré à partir du modèle de variogramme de la façon suivante :

$$Z_0^* = \sum_i \lambda_i Z_i \tag{Équation 22}$$

Les poids de krigeage λ_i sont trouvés en minimisant une quantité appelée erreur de variance. Le développement de la théorie est exposé dans nombre de travaux de recherches (Huijbregts *et al.*, 1975; Journé & Huijbregts, 1978; Journé, 1989; Isaaks & Srivastava, 1989; Lagueche, 2006). De plus, les écart-types de krigeage associés au krigeage permettent de quantifier l'incertitude de l'estimation.

5.2.4.2. Krigeage d'indicateur

Le krigeage d'indicateur consiste à estimer de manière conditionnelle une variable en fonction d'un seuil. La variable d'origine est transformée en une nouvelle variable binaire dite « indicateur » :

$$I(x_i, c) = \begin{cases} 0 & \text{pour } Z(x) < c \\ 1 & \text{pour } Z(x) \geq c \end{cases} \quad (\text{Équation 23})$$

L'estimation de la variable indicatrice est donnée par :

$$I^*(x, c) = \sum_{i=1}^n \lambda_i I(x_i, c) \quad (\text{Équation 24})$$

Avec I : la variable binaire

λ_i : le poids de krigeage associé

c : valeur de seuil choisi

Toute l'étude géostatistique (variogramme, validation croisée, krigeage, etc.) est donc menée à partir de cette variable binaire. Le krigeage d'indicatrice, à la différence de la méthode du krigeage ordinaire, permet d'estimer la probabilité qu'une valeur soit supérieure au seuil c prédéfini et de donner une vision conditionnelle et probabiliste aux structures étudiées. Le gros avantage de la méthode est de pouvoir décider pour la modélisation d'une ou plusieurs valeurs seuils qui auraient été identifiées comme pertinentes pour une étude donnée. Les variogrammes liés aux différents seuils peuvent être différents, ce qui demande donc d'ajuster un variogramme par seuil et des covariogrammes entre valeurs seuils.

5.3. Modélisation géostatistique

Les théories expliquées précédemment permettent donc de réaliser la modélisation géostatistique en 3D à partir des données de résistivités obtenue par la TRE. Les données de base sont issues des profils inversés obtenus indépendamment en 2D et qui sont espacés en moyenne de 10 m avec des électrodes sur un profil de 1,5 m (0,5 m et 1 m sur les profils du suivi temporel).

5.3.1. Interpolation par krigeage ordinaire

Avant de procéder à la phase d'interpolation, une analyse préliminaire sur les données de résistivité est faite. En regroupant tous les profils TRE, on dispose de 64195 points de résistivité « interprétée » obtenues par inversion sous Res2Dinv (v. 3.59.119). Les valeurs de résistivité « interprétée » varient entre 3 et 57 383 $\Omega \cdot m$ avec une moyenne de 374 $\Omega \cdot m$ et une médiane de 164 $\Omega \cdot m$. Parmi ces données, il y a environ 92% des valeurs situées entre 10 et 1000 $\Omega \cdot m$. De plus, la grande différence entre la moyenne et la médiane montre l'existence de valeurs extrêmes supérieures (Figure 112), notamment au-delà de 1000 $\Omega \cdot m$ (8% des valeurs). Cependant, ces fortes résistivités pourraient correspondre à une réalité physique car elles se situent d'une part dans la zone superficielle à l'est (c'est-à-dire la zone interprétée comme étant des sables), parfois à proximité de la cavité et d'autre part en profondeur. Afin de réaliser l'étude variographique, il est nécessaire de filtrer les résistivités supérieures à 1000 $\Omega \cdot m$ pour obtenir un variogramme qui ne soit pas fortement influencé par ces valeurs extrêmes mais de les conserver lors de l'interpolation géostatistique. De plus, afin de réduire l'influence des valeurs extrêmes et d'éviter la présence de valeurs négatives après l'estimation, il a été décidé de travailler avec des données de résistivité en logarithme de base 10. A l'issue

de l'interpolation, les valeurs estimées en logarithme seront recalculées dans la base initiale afin d'obtenir le modèle final.

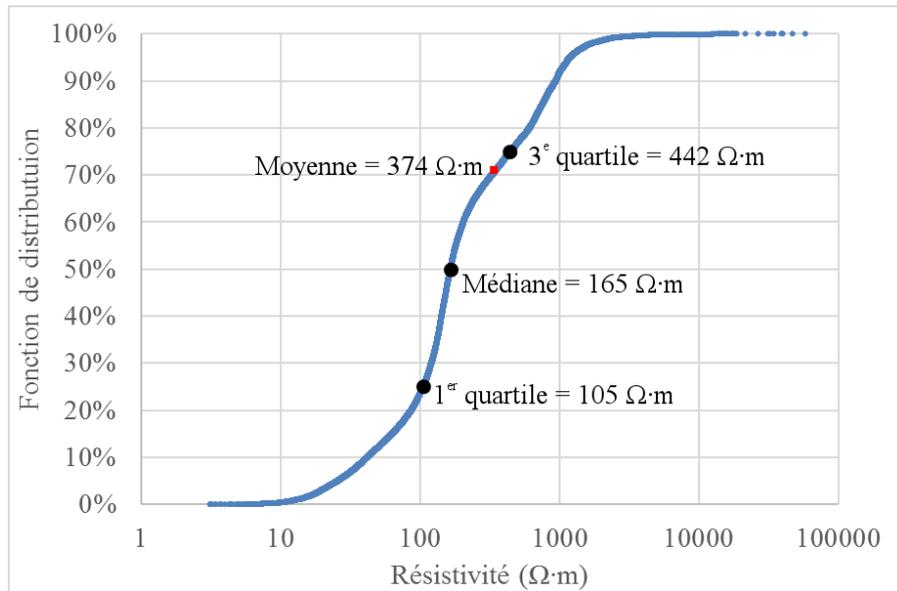


Figure 112. Fonction de distribution des résistivités de tous les profils.

5.3.1.1. Construction du modèle de résistivité en 3D

La méthode d'estimation du « krigage » se base sur la connaissance du variogramme. Ce dernier permet de décrire la structuration spatiale des valeurs de résistivité en 3D.

L'analyse variographique du logarithme des résistivités montre une structuration spatiale isotrope dans le plan XY (Figure 113) et une structuration différente dans la direction verticale.

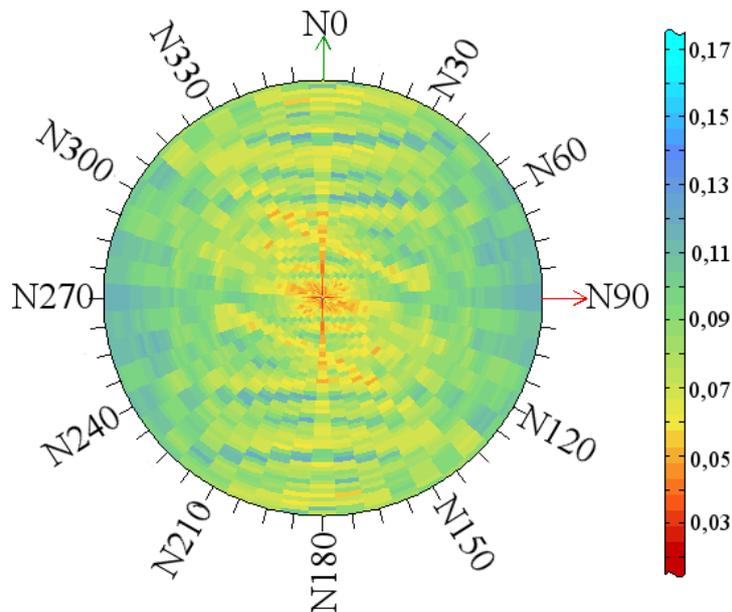


Figure 113. Carte variographique du logarithme des résistivités dans le plan XY.

Le modèle théorique ajustant le variogramme expérimental (Figure 114) est la somme de trois structures élémentaires :

- Un effet de pépite : 0,02,
- Une structure exponentielle ayant une portée 110 m exclusivement marquée dans le plan XY avec une portée 10 m dans la direction verticale et un palier de 0,105 (sans unité puisque la variable est logarithmique),
- Une deuxième structure exponentielle de portée 10 m exclusivement visualisable dans la direction verticale avec une autre portée 6 m dans le plan XY et un palier de 0,05,

L'équation du modèle de variogramme est présentée comme :

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0,105 \times \left(1 - e^{-\frac{3h}{110}}\right) + 0,05 \times \left(1 - e^{-\frac{3h}{6}}\right) + 0,02 & \text{plan XY} \\ 0,105 \times \left(1 - e^{-\frac{3h}{10}}\right) + 0,05 \times \left(1 - e^{-\frac{3h}{10}}\right) + 0,02 & \text{direction verticale} \end{cases}$$

(Équation 25)

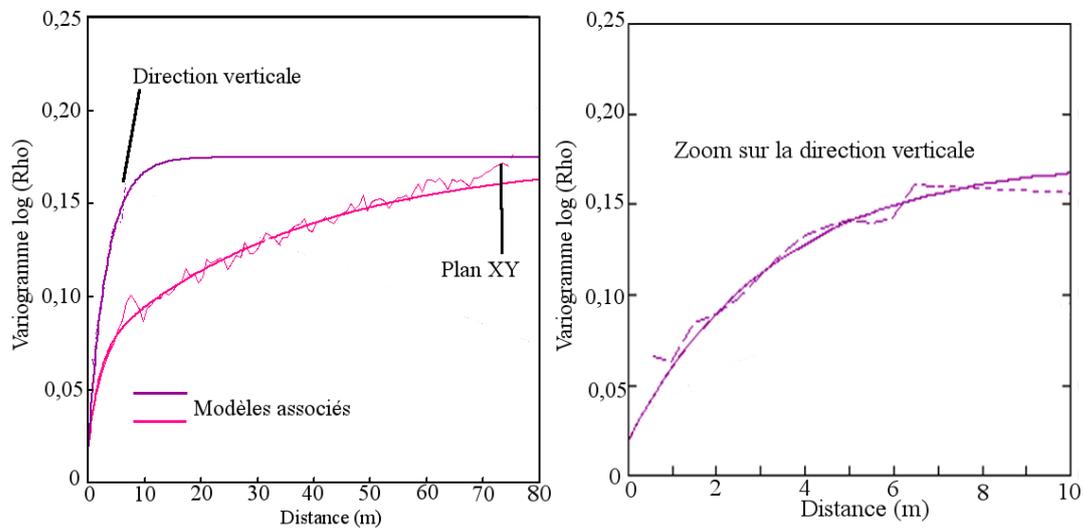


Figure 114. Variogrammes expérimentaux directionnels calculés à partir du logarithme des résistivités et modèles théoriques associés.

Une validation croisée (Figure 115) est faite afin de valider le modèle de variogramme choisi. Cette dernière montre une bonne cohérence entre les valeurs vraies et estimées (en se basant sur 49295 points de résistivité) et permet de valider le modèle de variogramme avec un coefficient de détermination de 0,96 entre les valeurs vraies et estimées. A la suite de la validation du variogramme, on peut ensuite passer à l'étape du krigeage. On définit d'abord un voisinage : le voisinage définit le domaine dans lequel les points expérimentaux seront choisis pour l'estimation des valeurs aux nœuds d'une grille régulière. Compte tenu de la forme des variogrammes dans les plans horizontal et vertical, ce voisinage est choisi de forme ellipsoïdale de révolution avec un demi grand axe horizontal de 20 m et le demi axe vertical de 2 m. Puisque la variance et la portée dans la direction verticale sont respectivement élevée et faible, on a choisi une valeur faible du demi axe (inférieure à la valeur de la portée) afin d'éliminer l'influence éventuelle liée aux écarts entre les valeurs estimées et les données de résistivité. L'estimation des résistivités est réalisée aux nœuds d'une grille de maille élémentaire cubique de 0,75m*0,75m*0,5m (0.75m selon les directions horizontales X et Y) ;

ce choix repose sur la plus petite taille des blocs utilisés lors des inversions en mode « affinage » sous Res2dinv®, et 0,5 m (Z) à l'épaisseur moyenne des blocs dans les premiers mètres du modèle de résistivité.

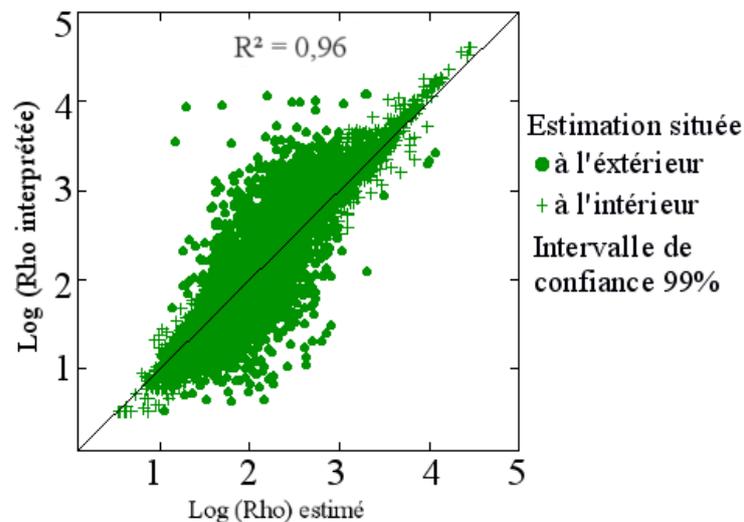


Figure 115. Validation croisée : résistivité vraie en fonction de la valeur estimée.

5.3.1.2. Interprétation

Une vue du modèle 3D depuis le sud (Figure 116) permet de monter les structures principales du modèle des résistivités. On peut identifier et interpréter cinq structures selon les gammes de résistivité, les études géologiques réalisées antérieurement (Vouvé, 1967; Lopez, 2009; Bruxelles & Camus, 2014) et notre connaissance actuelle du site:

- Des dépôts sableux à l'est du site, notamment dans la partie superficielle des formations sablo-argileuses. La médiane de résistivité est estimée à 271 $\Omega \cdot m$.
- Calcaires au centre du site : une interface subhorizontale apparaît à 179 m NGF qui sépare les calcaires en deux parties,
 - superficielle avec de faibles résistivités (médiane à 150 $\Omega \cdot m$) ;
 - profonde : la résistivité est plus forte (médiane à 556 $\Omega \cdot m$; la grotte se développe généralement dans la partie supérieure de cette zone) ;
- Des formations sablo-argileuses, avec une médiane de 45 $\Omega \cdot m$:
 - la limite des formations sablo-argileuses à l'ouest est nette, témoignant d'une verticalité depuis la surface topographique ;
 - à l'est, cette limite est moins nette. De plus, les formations sablo-argileuses sont sous la couverture de la couche sableuse qui n'est pas présente à l'ouest.

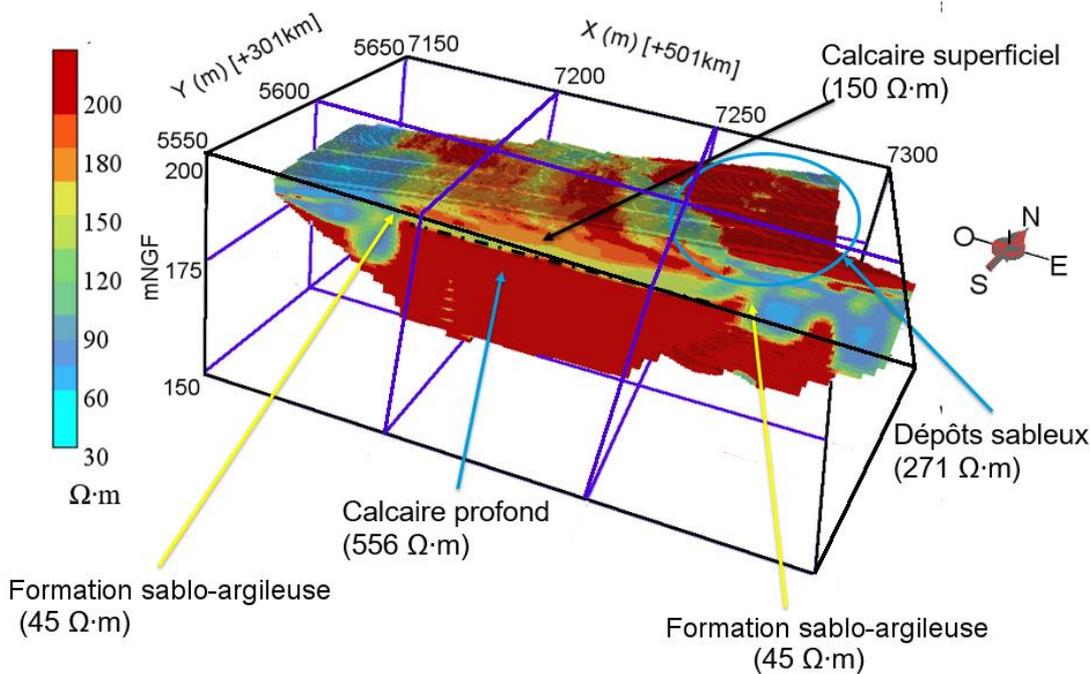


Figure 116. Vue depuis le sud du modèle géostatistique 3D avec indications des différentes structures identifiées

On présente, ci-dessous et en détail, l'interprétation de la zone superficielle, des calcaires et des formations sablo-argileuses.

a) Zone superficielle à l'ouest et l'est du promontoire

La zone superficielle du modèle montre une différence de résistivité entre l'est et l'ouest (Figure 117). Globalement, la résistivité est plus élevée à l'est qu'à l'ouest. Les limites, tant à l'est qu'à l'ouest, de ces formations sablo-argileuses et des calcaires sont nettement mises en évidence par le contraste de résistivité bien plus élevée au niveau du promontoire.

La partie à l'ouest présente une faible résistivité en surface que l'on attribue à des matériaux sablo-argileux (médiane à $45 \Omega \cdot m$). A l'est, au-delà du promontoire calcaire, on retrouve une zone plus résistante qui selon le modèle 3D observé en profondeur devrait correspondre aux formations sablo-argileuses (Figure 116) et qui devraient donc normalement être conductrices. En réalité les formations superficielles se manifestent par une forte résistivité (moyenne de $676 \Omega \cdot m$ pour les résistivités au-dessus de 195 m NGF) qui correspond à une couche très sableuse d'environ 1 à 2 m que nous avons observée sur le site et mentionnée également par Bruxelles et Camus (2014). A l'ouest, la limite avec le calcaire a une orientation d'environ $N178^\circ$ correspondant au plan de fracturation F1 (Lopez, 2009), tandis que la limite à l'est, moins claire, semble s'orienter différemment au nord et au sud : $N145^\circ$ (pouvant correspondre au plan de fracturation F4) au nord et $N178^\circ$ (pouvant correspondre au plan de fracturation F1) au sud. Les directions des limites entre formations calcaires et détritiques semblent donc bien être liées aux directions structurales relevées sur le site.

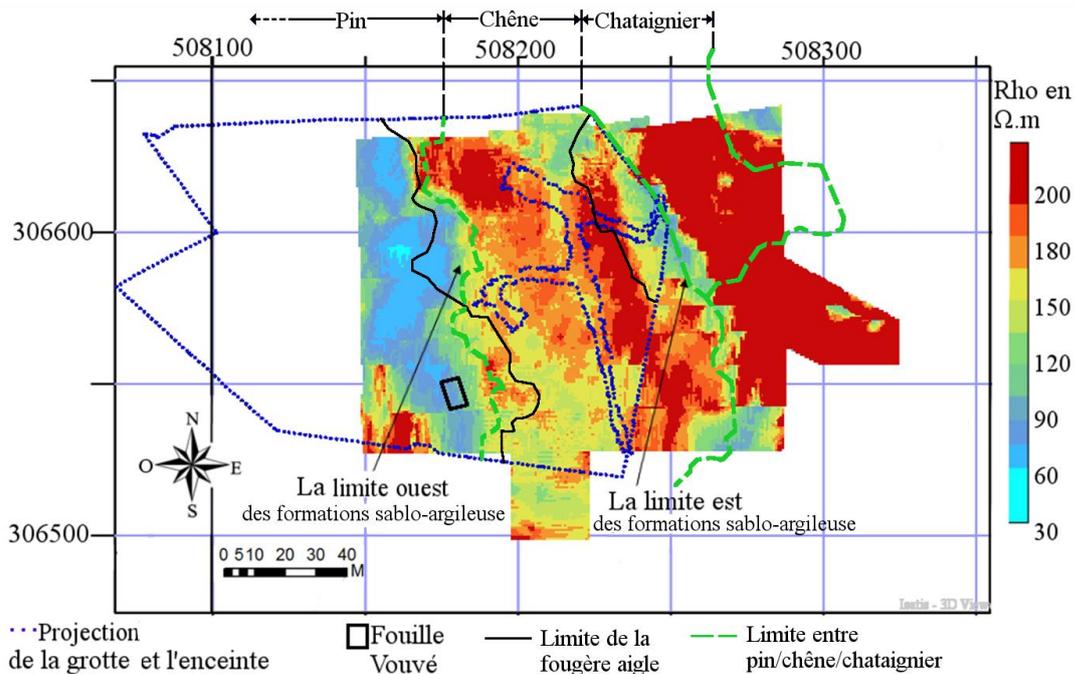


Figure 117. Vue du dessus du modèle 3D, montrant la zone superficielle. Le trait vert dessine la limite entre les différents arbres (pin/chêne/châtaignier), le trait noir dessine la limite de la fougère qui se trouve en dehors des deux traits noirs (d'après Perrin, 2013 dans le rapport de Bruxelles & Camus, 2014).

Le peuplement végétal relevé par le forestier S. Perrin montrerait que les arbres présents sur le site seraient liés à la nature des sols. Le peuplement de châtaignier se trouve notamment sur les sols des formations sablo-argileuses à l'est dont la nature est acide en surface mais très riche en argile en subsurface avec des pointements calcaires (d'après Perrin dans Bruxelles & Camus, 2014). Au centre, les arbres sont principalement des chênes sur les sols carbonatés. Finalement, dans la zone des formations sablo-argileuses à l'ouest, on retrouve des pins sur les sols moins acides mais argileux, ce qui assure une productivité élevée des arbres (d'après Perrin dans Bruxelles & Camus, 2014). Les limites des différents types d'arbre sont quasiment superposées aux limites des formations sablo-argileuses/calcaire (Figure 117). En outre, les deux traits noirs (Figure 117) délimitent la zone d'extension des fougères qui poussent essentiellement sur des sols acides. Cette limite est généralement cohérente avec le modèle de résistivité 3D à l'exception du côté nord dans la zone des formations sablo-argileuses ouest et au sud de la limite ouest.

b) Calcaires

Le promontoire calcaire se situe au centre du modèle. Il est intéressant de faire plusieurs analyses par un travail de seuillage des valeurs de résistivité afin d'aider à comprendre la structure géologique du promontoire. Les médianes des résistivités des calcaires sont égales à 556 $\Omega \cdot m$ pour la partie inférieure à 179 m NGF et 150 $\Omega \cdot m$ pour la partie superficielle. La valeur des seuils sera choisie entre les valeurs de ces deux médianes. L'histogramme des résistivités (Figure 118) montre que la fréquence des valeurs devient quasiment stable vers 275 $\Omega \cdot m$. On décide de choisir cette valeur comme le seuil (seuillage des valeurs supérieures à 275) pour étudier les formes structurales des calcaires issues du modèles 3D.

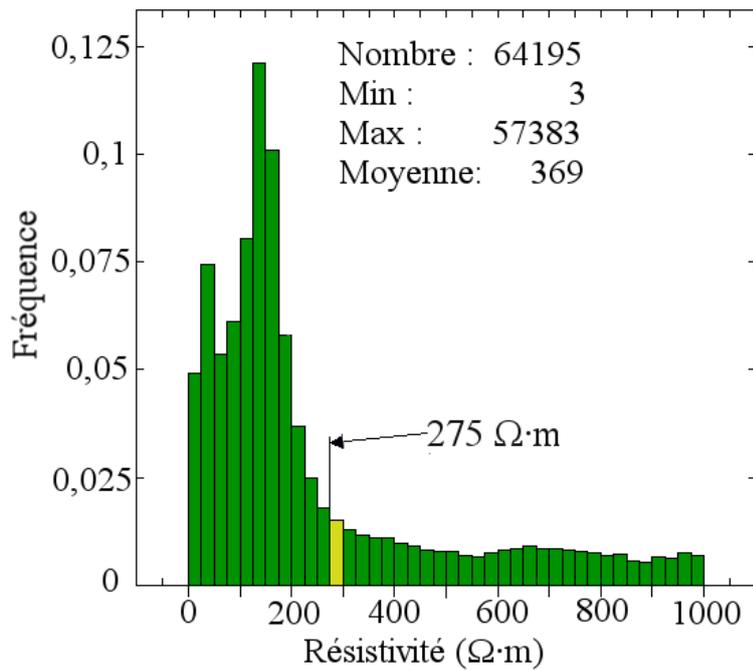


Figure 118. Histogramme des valeurs de résistivité (0-1000 $\Omega \cdot m$) sur l'ensemble des données.

Après seuillage, on constate l'existence de deux domaines sur le modèle : le premier correspond aux dépôts sableux à l'est (déjà décrits ci-dessus) et le deuxième dessine le promontoire calcaire (Figure 119). En dessous des sables, des formations résistantes ponctuelles apparaissent mais leur nature est inconnue (calcaire ou passage sableux ou silex). Au centre du promontoire, on observe une surface subhorizontale au-dessus de laquelle on sait que se trouve le toit de la salle des Taureaux et la grande diaclase (Coupes AA' de la Figure 119). Le niveau de calcaire semble plus haut à proximité de l'entrée et du sas1 de la grotte, ce qui peut être lié directement à l'effet de la cavité sur le champ électrique. Au sud, la fin du diverticule des Félines se trouve à l'intérieur du promontoire. Cet horizon est aussi observé sur certains profils TRE, notamment sur les profils orientés ouest-est (Sirieix & Xu, 2014). De plus, les formes des calcaires (les bases des formations sablo-argileuses) sont très complexes à l'ouest et à l'est, témoignant de l'hétérogénéité des formations sablo-argileuses.

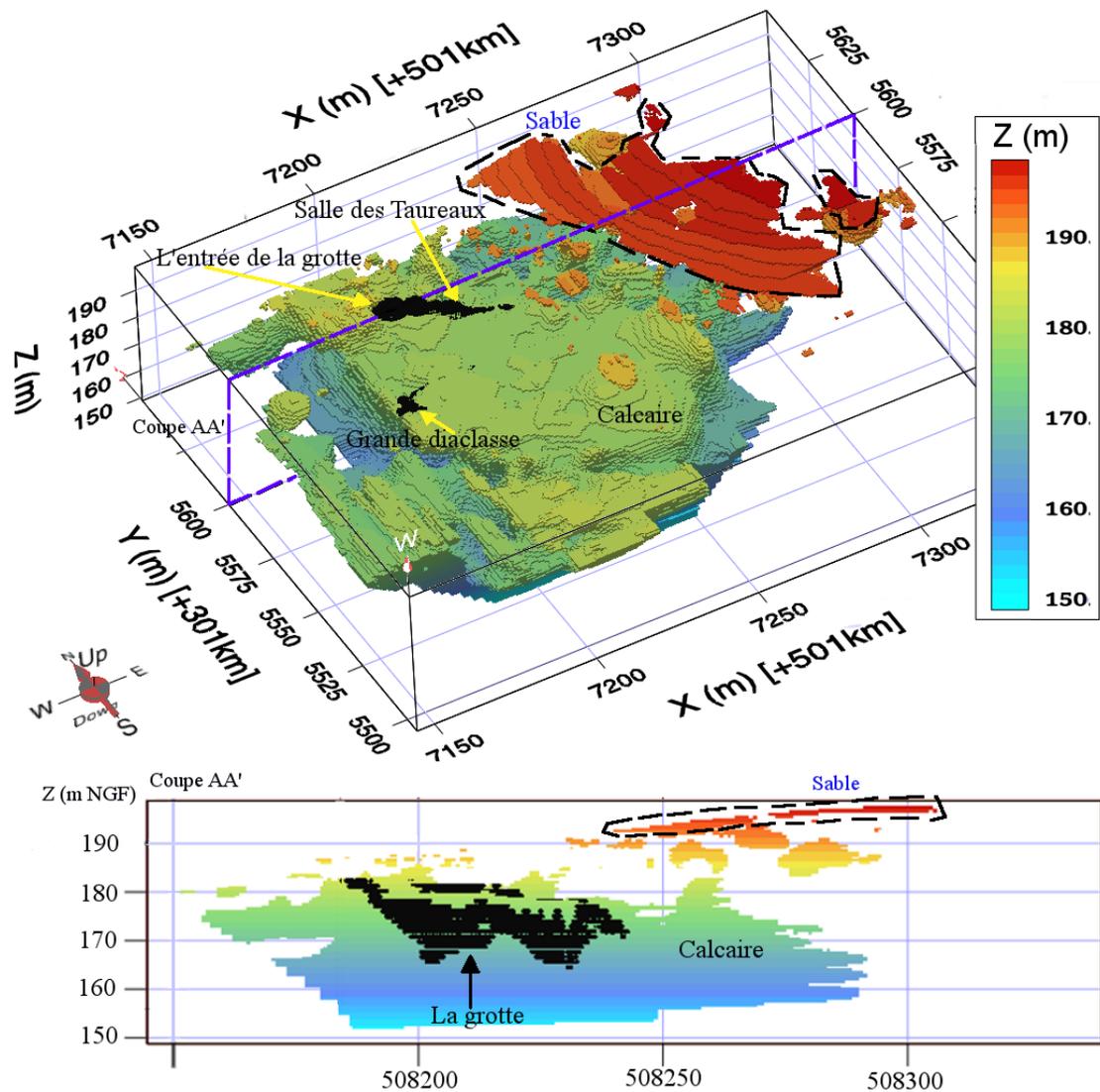


Figure 119. Modèle de résistivité 3D pour les points dont la résistivité est supérieure à $275 \Omega \cdot m$. Les points noirs dessinent la projection la grotte.

c) Analyse des formations sablo-argileuses et des anomalies conductrices

L'interprétation des données 3D nécessite de réaliser des seuillages afin de mieux comprendre les structures. Nous nous efforçons de trouver des valeurs de seuil objectives. Grâce à l'étude statistique (cf. 3.3.3) la zone probable d'alimentation et les formations sablo-argileuses ont une médiane (lorsque l'on prend en compte les données du suivi temporel à cette période- mesures du 3 avril 2013) des valeurs de résistivité de $62 \Omega \cdot m$ et un 3^{ème} quartile à $88 \Omega \cdot m$ (valeurs du profil I, le 3 avril 2013 du suivi temporel). Il est donc décidé de choisir 60 et $90 \Omega \cdot m$ comme valeurs de seuil. On s'intéresse principalement aux quatre points suivants :

- la forme et orientation des limites entre les calcaires et les formations sablo-argileuses,
- la forme et le prolongement de la zone probable d'alimentation au nord observée par le suivi temporel,
- la continuité entre les anomalies probablement détectées sur les profils orientés nord-sud et finalement,

- la continuité à l'est, marquée sur les profils orientés ouest-est.

La vue du dessus du modèle en seuillant des valeurs inférieures à $60 \Omega \cdot m$ nous permet d'identifier la limite entre les calcaires et les formations sablo-argileuses (Figure 120). On retrouve très distinctement les directions structurales mentionnées au paragraphe 5.3.1.2-a. On constate que les formes ne sont pas semblables à l'ouest et à l'est du site. La grotte se trouve dans la partie calcaire, calcaires qui semblent occuper plus de place au sud qu'au nord.

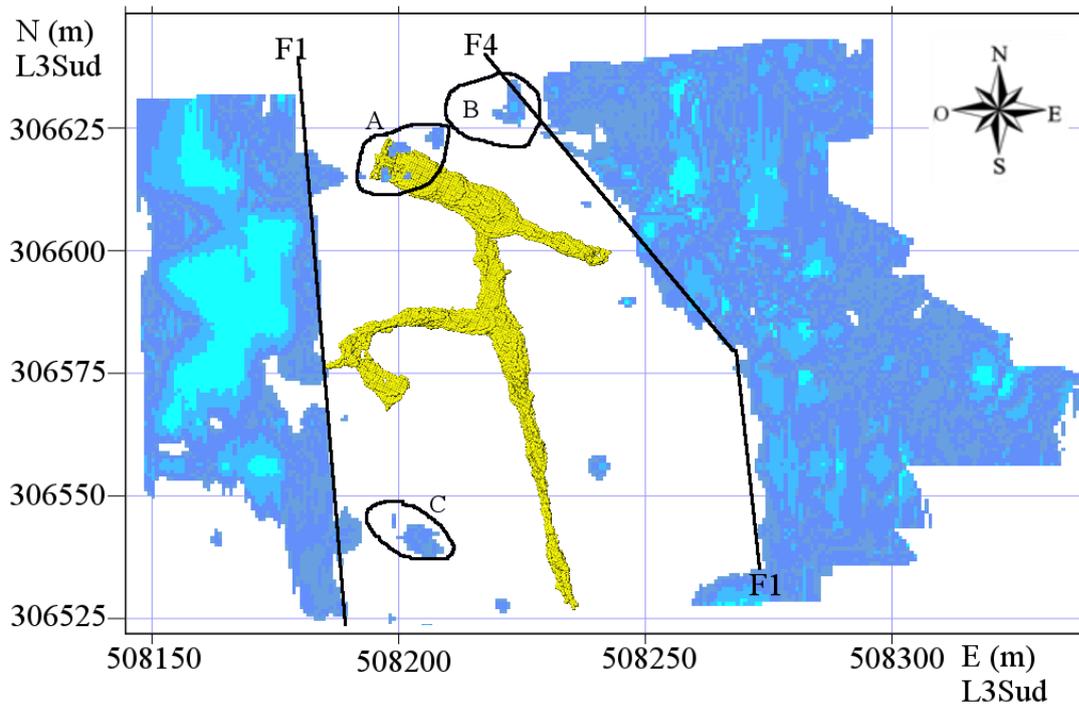


Figure 120. Vue de dessus du modèle pour les résistivités inférieures à $60 \Omega \cdot m$, les limites des formations sablo-argileuses sont nettement identifiées.

La zone d'alimentation identifiée au chapitre 3.3.3 se situe au toit du compartiment sas1 (localisé sur la zone notée A sur la figure 120). Il est intéressant d'identifier la forme et la connectivité des anomalies conductrices visibles en A et B de la figure 121 et de les comparer aux résultats du suivi temporel.

Les deux seuils définis au début du paragraphe, 60 et $90 \Omega \cdot m$, sont appliqués au niveau du sas1 (Figure 121). On constate qu'en seuillant les valeurs de résistivité inférieures à $60 \Omega \cdot m$ (Figure 121-a), les anomalies au droit du sas1 se marquent par trois structures isolées ; elles ne sont pas non plus connectées à l'anomalie conductrice à proximité du profil II du suivi temporel (Figure 121). La connexion des anomalies est en revanche visible lors de l'application du seuil à $90 \Omega \cdot m$ (Figure 121-b). Ceci permet d'accepter l'hypothèse de la connexion de l'anomalie conductrice identifiée sur le profil II jusqu'au point de décharge au sas1. Cette connexion n'est pas géométriquement rectiligne, mais est probablement assurée par les fissures ou zone d'altération dans les calcaires.

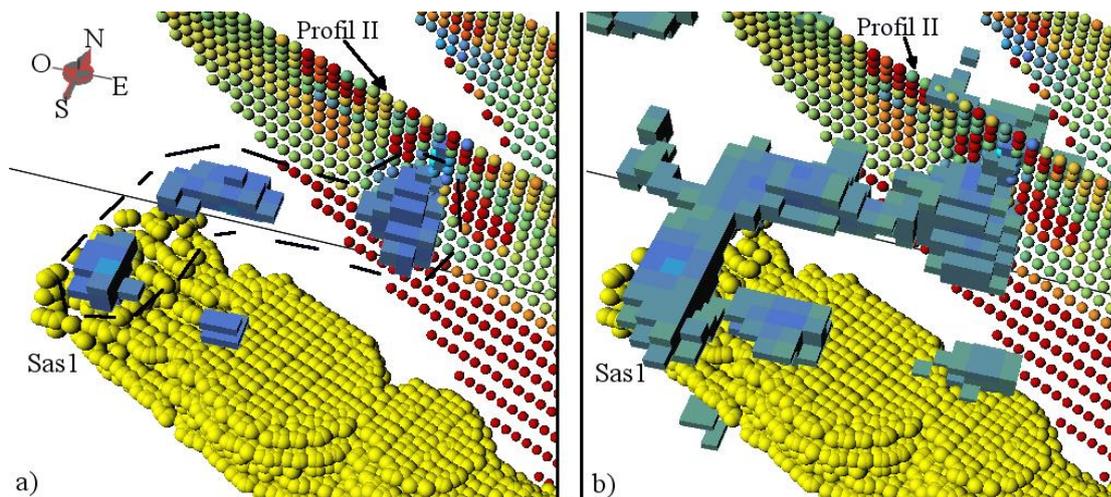


Figure 121. Anomalies conductrices au droit du sas1 ; a) $\rho \leq 60 \Omega \cdot m$; b) $\rho \leq 90 \Omega \cdot m$

En plus de cette connexion avec le sas1 et des anomalies conductrices, on s'intéresse également aux autres liens possibles entre ces anomalies dans la partie nord du modèle (Anomalie B sur la Figure 120). On constate que le seuil à $60 \Omega \cdot m$ ne permet pas de montrer des liens entre les anomalies. Des seuils à 90 et $105 \Omega \cdot m$ (centile à 90%, et aussi la valeur autour de laquelle la médiane de la classe n°4 du profil I oscille du 4 octobre 2012 au 12 décembre 2012 et du 2 juillet 2013 au 23 octobre 2013) sont appliqués pour visualiser l'ensemble des anomalies au nord (Figure 122), permettant d'identifier quatre combinaisons différentes :

- la connexion entre le sas1 et le profil II : ①, dès $90 \Omega \cdot m$
- un lien probable entre les deux profils du suivi temporel : ②, dès $90 \Omega \cdot m$
- un lien possible entre le profil I et les formations sablo-argileuse à l'est : ③, dès $105 \Omega \cdot m$
- une anomalie conductrice à proximité de la Salle des Taureaux : ④, pouvant être connecté au profil II dès $105 \Omega \cdot m$

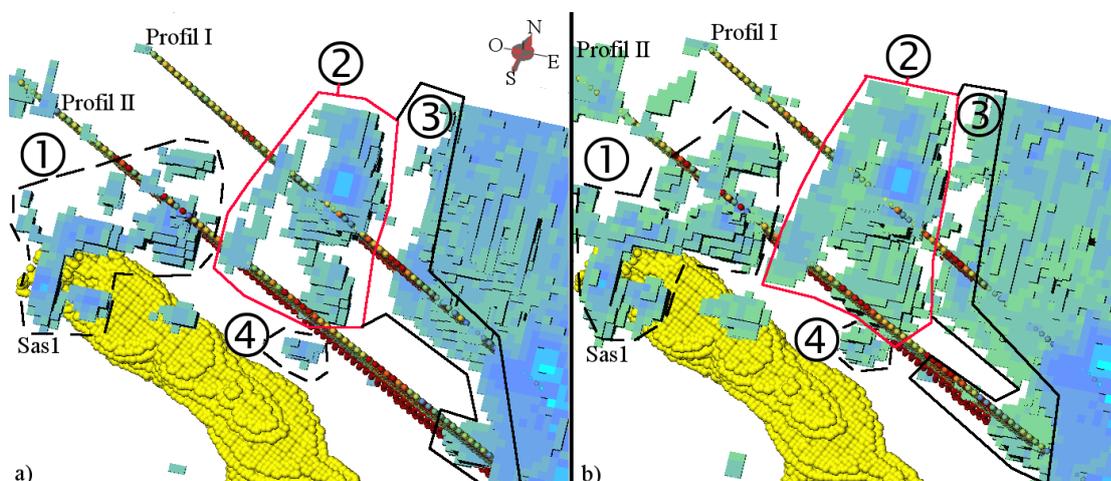


Figure 122. Anomalies conductrices au nord du modèle, a) $\rho \leq 90 \Omega \cdot m$; b) $\rho \leq 105 \Omega \cdot m$

On peut constater qu'entre les profils de TRE, la zone ② joue un rôle important pour établir les liens. La zone ③ met en évidence des liens entre les anomalies dans le promontoire calcaire et les formations sablo-argileuses, en passant par quelques petites connexions reliant la zone ② et la zone des formations sablo-argileuses. Finalement, la zone ④, située à proximité de la Salle des Taureaux, pourrait être la source des traces d'humidité observées sur les murs de la salle.

Par ailleurs, il existe aussi des anomalies conductrices au sud du site étudié (la zone notée C, Figure 120) qui pourraient être reliées d'après les modèles de résistivité issus de TRE. En seillant à 60 et 90 $\Omega\cdot m$, on peut remarquer que les deux anomalies conductrices détectées sur les profils NS2 et NS3 sont reliées (Figure 123) et sont aussi connectées aux formations sablo-argileuses à l'ouest. Cependant, l'anomalie du profil NS4 (anomalie C sur la Figure 120) ne semble pas avoir de liens avec les autres anomalies. Cette dernière se trouve à proximité du diverticule des Félines, ceci pourrait être une source de l'eau d'écoulement observée dans le diverticule. Les anomalies de petite taille situées au bout des profils NS2 à NS4 semblent être indépendantes. Il serait nécessaire de réaliser un profil intermédiaire pour établir ou non une continuité avec les formations sablo-argileuses à l'ouest. En effet l'espacement entre NS3 et NS4 est de 18 m, supérieur à la portée de 10 m observée dans le plan XY à partir du variogramme.

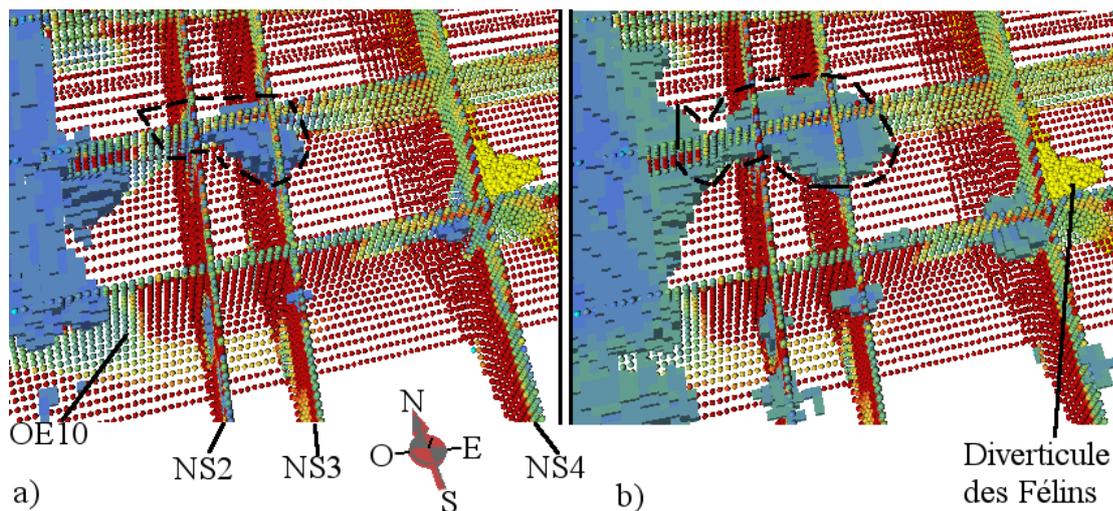


Figure 123. Anomalies conductrices au sud du modèle, a) $\rho \leq 60 \Omega\cdot m$; b) $\rho \leq 90 \Omega\cdot m$

Conclusion

A l'aide de la méthode d'interpolation du krigeage, la plupart des structures sont reconstruites, notamment le promontoire calcaire et les formations sablo-argileuses autour des calcaires. Plus en détail, le modèle 3D permet d'identifier les limites entre les calcaires et les formations sablo-argileuses ainsi que les orientations et les formes à l'intérieur des structures. La limite subhorizontale à l'intérieur du promontoire calcaire est aussi identifiée vers 179 m NGF. Elle sépare les calcaires plus conducteurs probablement très altérés, des calcaires plus résistants, nous pouvons envisager que cela soit la limite entre épikarst et zone d'infiltration. Il faut noter que même si des connexions n'apparaissent pas sur le modèle 3D, elles peuvent exister physiquement. En effet, compte tenue de l'espacement entre les profils TRE (10 m), en fonction de la taille et la largeur de ces structures conductrices, elles peuvent

passer inaperçues. Seul un suivi temporel témoin des variations de teneur en eau, pourra clairement assurer la continuité et le rôle hydraulique de ces structures conductrices et de leur prolongement.

5.3.2. Modélisation par krigeage d'indicatrice

En complément de la modélisation par krigeage ordinaire permettant d'avoir un modèle de résistivité en 3D, le krigeage d'indicatrice a également été utilisé comme méthode d'interpolation. Il permet d'obtenir un modèle probabiliste d'une variable binaire en réalisant toute la modélisation à partir de valeurs seuils. Dans notre cas, on a défini des seuils de logarithme de résistivité à 1,78, 1,95 et 2,44, correspondant à des résistivités de 60, 90 et 275 $\Omega \cdot m$ qui sont des valeurs utilisées pour les observations des formations sablo-argileuses et des calcaires dans l'étude du modèle de résistivité issu du krigeage ordinaire. Toute l'étude, du variogramme à l'interpolation, est menée à partir de la variable binaire.

La carte variographique (Figure 124 - a) dans le plan horizontal pour les seuils de 60 $\Omega \cdot m$ montre des variances élevées dans la direction N80°E et faible dans la direction N170°E. Cela met en évidence une anisotropie à prendre en compte pour le calcul des variogrammes. Cette anisotropie très significative dans le plan XY – N80 et N170, n'avait pas été identifiée lors du krigeage ordinaire. L'apport du travail par indicatrice est de pouvoir identifier une anisotropie dans le plan horizontal qui n'apparaissait pas dans le variogramme de la variable brute. Les variogrammes expérimentaux des variables binaires aux seuils de 60 et 90 $\Omega \cdot m$ (Figure 124 – a et b) sont donc calculés dans les directions N80, N170 et verticale. Cependant, le variogramme pour le seuil 275 $\Omega \cdot m$ ne semble pas montrer d'anisotropie dans le plan horizontal (Figure 124 - c), il est donc calculé de façon omnidirectionnelle pour le plan XY et dans la direction verticale.

L'ajustement des variogrammes se fait par la somme de trois structures (Figure 124) pour chacun des trois seuils en utilisant les mêmes paramètres de voisinage du krigeage ordinaire : les paramètres d'ajustement sont présentés dans le tableau 13. Les portées donnent un ordre de grandeur de la dimension des structures identifiées en TRE, de 4,5 à 10 m, globalement inférieure à l'espacement entre profils.

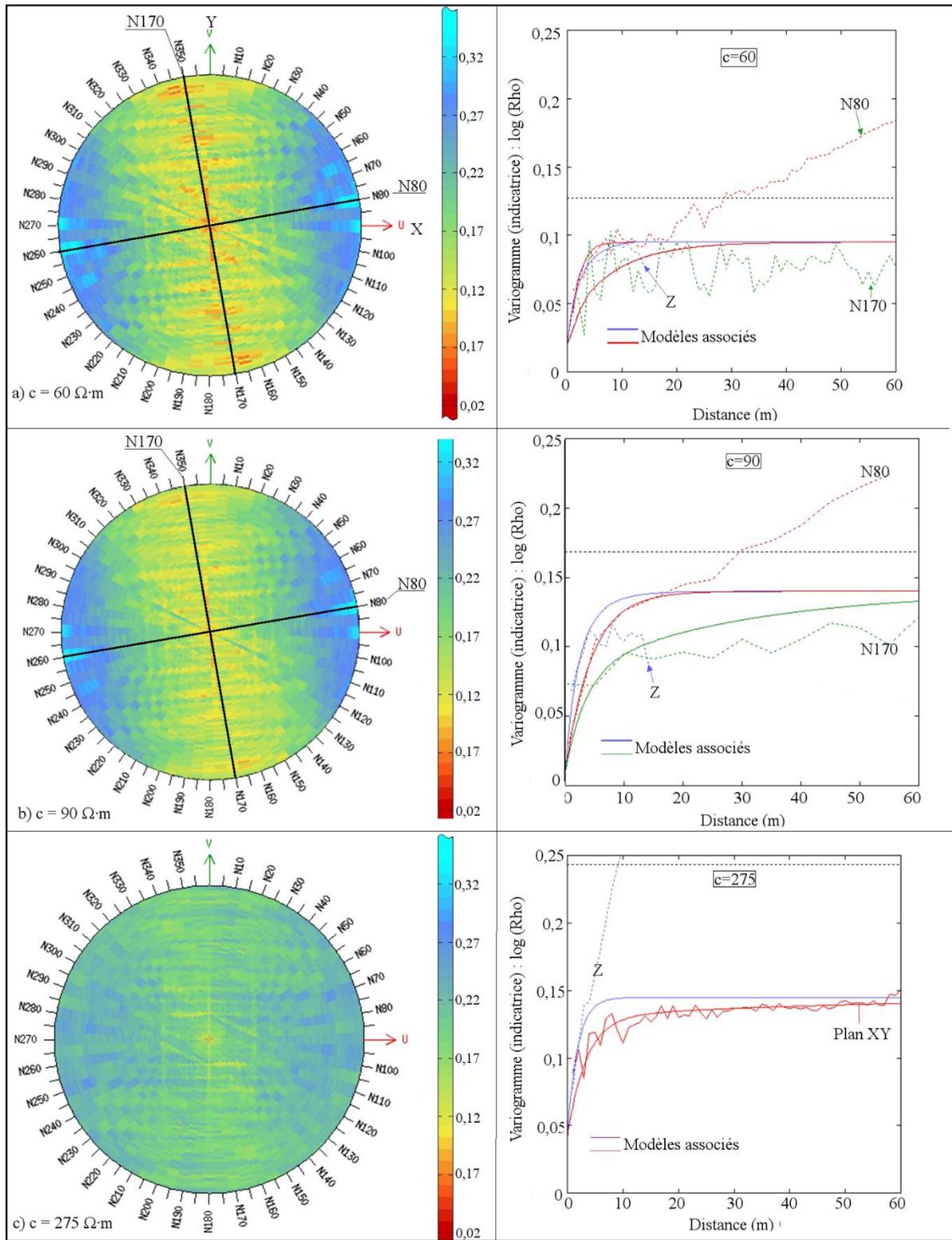


Figure 124. Cartes variographiques dans le plan XY et variogrammes de la variable binaire pour chacun des trois seuils.

Tableau 13. Paramètres des modèles de variogramme théorique (présentés à la figure 124) des variables binaires pour les trois seuils différents.

Seuils		Modèle des variogramme			
60 Ω·m		Portée (N80)	Portée (N170)	Portée (Z)	Palier
	Pépité				0,02
	Sphérique	5,5	4,5	15	0,015
	Exponentiel	5,5	40	5,5	0,06
90 Ω·m		Portée (N80)	Portée (N170)	Portée (Z)	Palier
	Pépité				0,01
	Exponentiel	5	10	12	0,07
	Exponentiel	12	400	15	0,06
275 Ω·m		Portée (X)	Portée (Y)	Portée (Z)	Palier
	Pépité				0,04
	Exponentiel	10	10	5,5	0,09
	Exponentiel	150	150	5,5	0,015

5.3.2.1. Le modèle probabiliste

On présente le modèle résultant du krigeage d'indicateurs pour le seuil de 60 Ω·m (Figure 125) depuis le sud. Bien que ne représentant pas les mêmes informations, le modèle de la figure 125 montre des ressemblances intéressantes avec celui de la figure 116 (krigeage ordinaire). Ainsi le domaine pour lesquels la probabilité que la résistivité soit supérieure à 60 Ω·m correspond globalement au promontoire et aux sables alors que les probabilités sont de plus en plus faibles lorsque l'on observe les zones des formations sablo-argileuses de leur pourtour vers leur cœur. Ce modèle présente une limite plus nette.

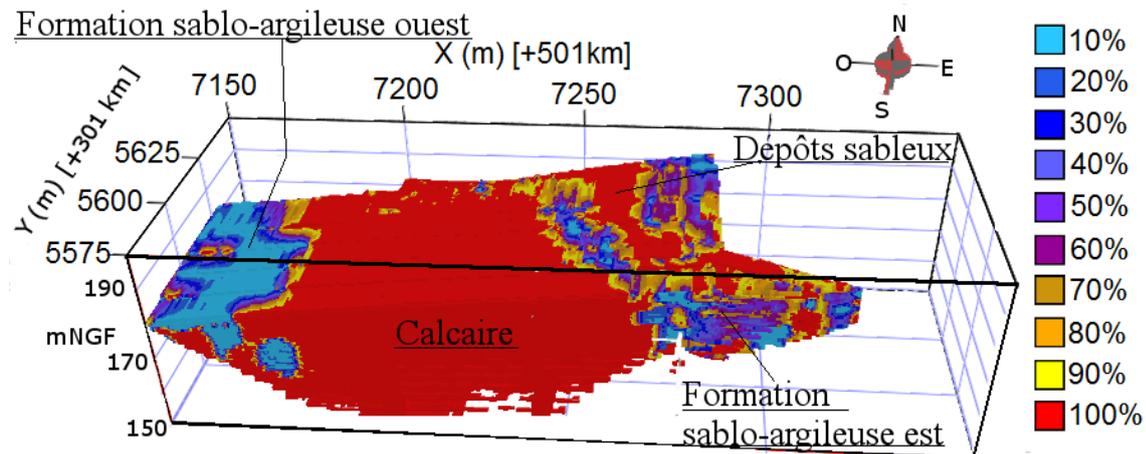


Figure 125. Modèle 3D du krigeage d'indicateur, montrant la probabilité que la résistivité en un point soit supérieure à 60 Ω·m.

5.3.2.2. Interprétation

L'intérêt du krigeage d'indicateur est de proposer une vue probabiliste selon les seuils choisis. On comparera, pour les seuils de 60, 90 et 275 Ω·m, les différentes informations données par les modèles probabilistes.

Dans ce modèle, on peut identifier des structures semblables à celles observées dans le

modèle de résistivité 3D (Figure 116). On va analyser les mêmes secteurs étudiés dans le modèle de résistivité. Il est important de noter que l'allure du modèle probabiliste change en fonction du pourcentage choisi pour la visualisation du modèle. Les pourcentages utilisés dans la suite de l'étude sont ceux qui permettent le mieux de visualiser les structures et les points d'intérêt.

a) Zone superficielle

L'analyse de la zone superficielle du modèle de résistivité 3D montre un lien avec les végétations du site. On prend les mêmes limites entre les différents arbres pour voir l'apport du modèle d'indicatrice sur cette zone. Le modèle montre les zones dont la probabilité est supérieure à 50% d'avoir une résistivité inférieure à 60 $\Omega\cdot m$ (Figure 126).

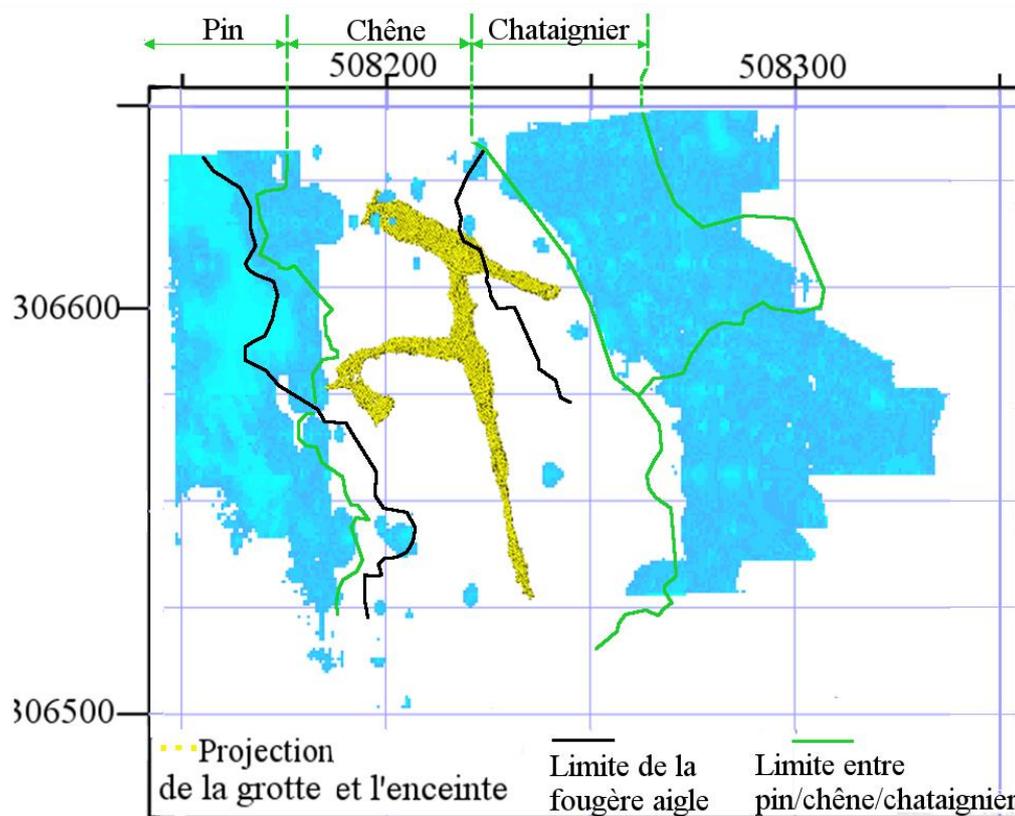


Figure 126. Modèle probabiliste : ensemble des blocs dont la résistivité a une probabilité d'au moins 50% d'être inférieure à 60 $\Omega\cdot m$. Les feuillages se trouvent en dehors des deux traits noirs.

On constate que les limites des arbres se superposent aux limites des formations sablo-argileuses lorsque l'on prend les blocs dont la probabilité est d'au moins 50% d'avoir une résistivité inférieure à 60 $\Omega\cdot m$, alors que les formes des limites pourraient changer lorsqu'on change de pourcentage pour l'affichage du modèle. Les chênes se trouvent au centre du modèle, aux emplacements où la probabilité que la résistivité soit inférieure à 60 $\Omega\cdot m$ est inférieure à 50%, ce qui correspond essentiellement au promontoire calcaire. Les châtaigniers sont situés principalement à l'est du site, alors que les pins ont poussé à l'ouest du site ; ils sont tous situés sur les domaines conducteurs que l'on attribue comme des formations sablo-argileuses. Cependant dans le détail, la limite ouest entre les pins et les chênes est plus

éloignée par cette méthode que celle obtenue par krigeage ordinaire (Figure 117), la forme de la limite dépend fortement de la probabilité choisie.

b) Calcaire

Le modèle de résistivité 3D a permis de mettre en évidence la couche des sables à l'est du site et un plan quasi-horizontale du promontoire calcaire. On va comparer le modèle probabiliste (Figure 127) en regardant l'apport du modèle d'indicatrice. Le modèle montre les blocs dont la probabilité est supérieure à 80% de montrer une résistivité supérieure à 275 $\Omega \cdot m$. Ceci permet d'observer le toit du promontoire de calcaires (ainsi que les sables) en gardant une vue probabiliste.

On observe que la couche des sables à l'est du site est devenue moins épaisse que dans le modèle de résistivité 3D. Ceci montre que les sables constituent une couche très hétérogène où les résistivités sont globalement élevées mais pouvant contenir des blocs ayant une résistivité inférieure à 275 $\Omega \cdot m$.

A l'aide du modèle probabiliste, on peut localiser les blocs supérieurs à 275 $\Omega \cdot m$, notamment des cailloux de silex ou des pointements des calcaires à l'est du site dans les formations sablo-argileuses. La comparaison entre les deux modèles (résistivité 3D et probabiliste) pourrait aider à trouver des endroits plus argileux avec une résistivité moins élevée.

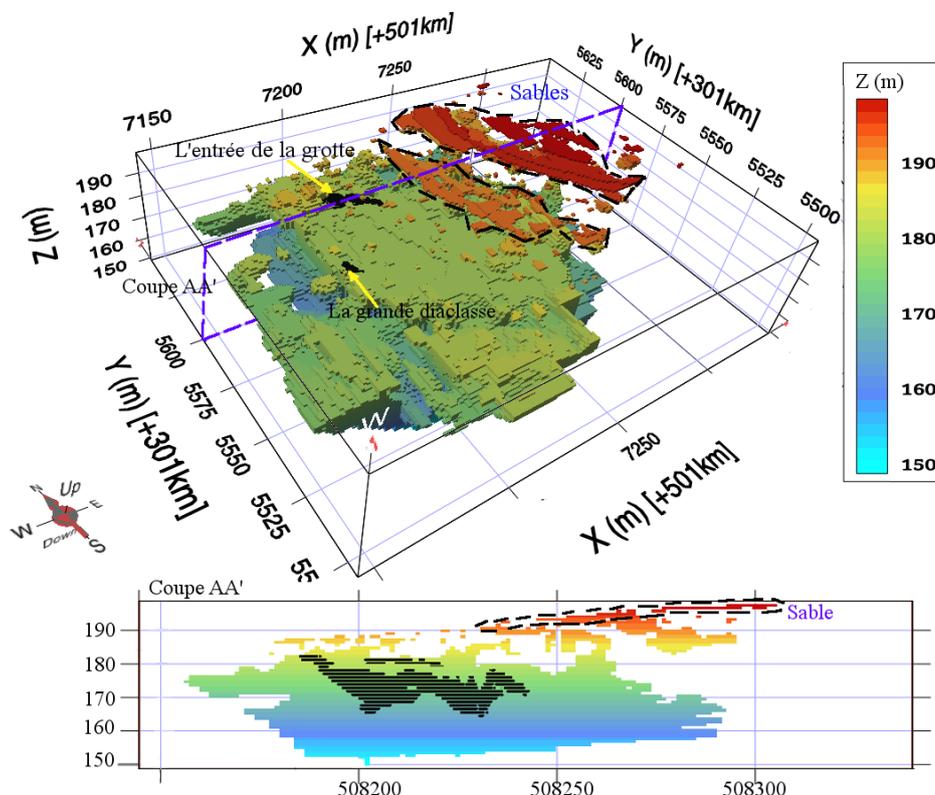


Figure 127. Modèle probabiliste : ensemble des blocs dont la résistivité a une probabilité d'au moins 80% d'être supérieure à 275 $\Omega \cdot m$.

Lorsque l'on regarde la partie en profondeur, la différence entre les deux modèles issus des deux modes de krigeage est moindre. On peut retrouver le toit de la grotte légèrement au-

dessus du toit du promontoire calcaire mais le corps de la grotte se trouve généralement dans les calcaires compacts. La faible différence entre les deux types de modèle pourrait prouver l'existence des calcaires compacts en profondeur ; soit les blocs ayant une faible probabilité de montrer une résistivité inférieure à $275 \Omega \cdot m$.

c) Formations sablo-argileuses et anomalies conductrices

Les anomalies conductrices du nord du modèle identifiées dans le modèle du krigeage ordinaire montrent les zones probables d'alimentation en eau du sas1 et également un lien possible avec les formations sablo-argileuses à l'est, en gardant les blocs ayant une probabilité supérieure à 50% d'être inférieur au seuil de $60 \Omega \cdot m$. Grâce au modèle probabiliste (Figure 128), on retrouve des éléments suivants :

- a – les anomalies autour du sas1 et du profil II ;
- b – les anomalies du profil I et c – l'anomalie à proximité de la salle des Taureaux. Comme dans le cas précédent, les anomalies ne semblent pas être reliées entre-elles avec un seuil de $60 \Omega \cdot m$.

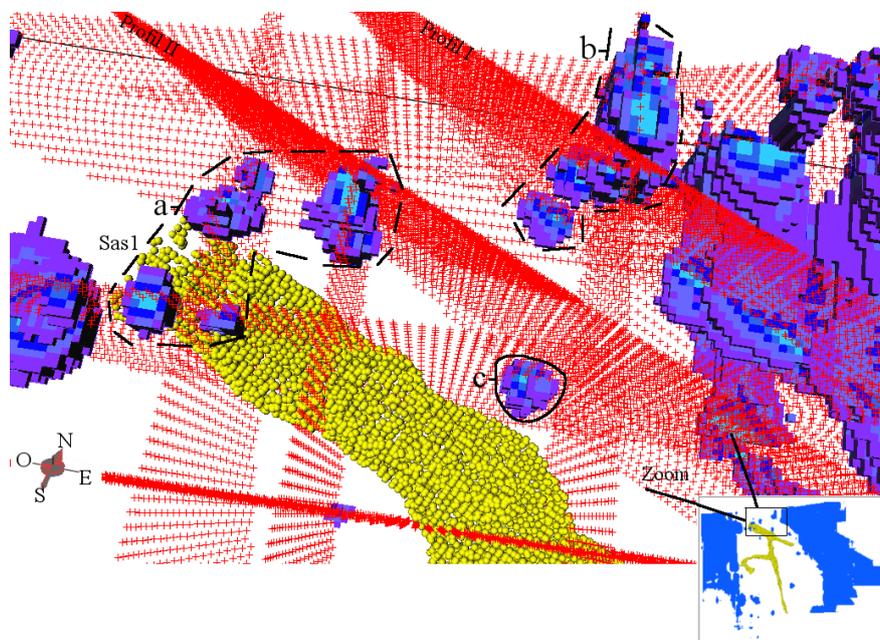


Figure 128. Vue du nord du modèle probabiliste avec un seuil de $60 \Omega \cdot m$, en gardant les blocs ayant une probabilité supérieure à 50% d'être inférieur au seuil. Les croix rouges représentent les profils des mesures de TRE et les points jaunes représentent la grotte.

Si l'on augmente le seuil à $90 \Omega \cdot m$ ce qui a pour fonction a priori soit d'agrandir soit d'augmenter les domaines observés sur la figure 129, le modèle probabiliste permet de mettre en relation certaines anomalies. Les anomalies autour du sas1 (Figure 129-a) sont reliées mais la relation entre le profil I et le profil II est moins évidente que sur le modèle de krigeage ordinaire. Par contre, les anomalies du profil I (Figure 129-b) montrent un lien fort avec les formations sablo-argileuses à l'est, cette dernière pouvant être une probable source en eau pour la nappe du sas1. De plus, la connexion entre les deux profils observée précédemment (Figure 122) n'apparaît pas sur ce modèle. Enfin, quel que soit le seuil choisi (60 ou $90 \Omega \cdot m$), on retrouve l'anomalie (Figure 129-c) à proximité de la salle des Taureaux (Figure 128 et Figure

129). Par contre, une connexion avec les formations sablo-argileuses semble envisageable. Un suivi temporel d'un profil orienté judicieusement par rapport à ces possibles structures permettrait de lever toute ambiguïté.

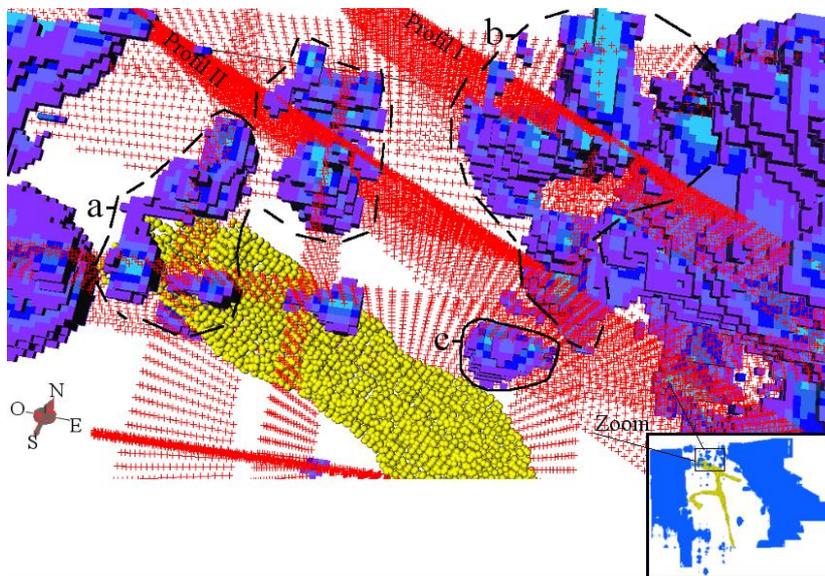


Figure 129. Vue du nord du modèle probabiliste avec un seuil de $90 \Omega\cdot m$, en gardant les blocs ayant une probabilité supérieure à 50% d'avoir une résistivité inférieure au seuil. Les croix rouges représentent les profils des mesures de TRE et les points jaunes représentent la grotte.

Au sud, la connexion entre les anomalies des profils NS2 et NS3 (TRE) est identifiable avec le seuil de $90 \Omega\cdot m$ (Figure 130) comme dans le cas du krigeage ordinaire. Plus à l'est, l'anomalie conductrice du profil NS4 reste isolée. Le modèle issu du krigeage d'indicateur ne montre pas plus d'information au niveau des anomalies au sud.

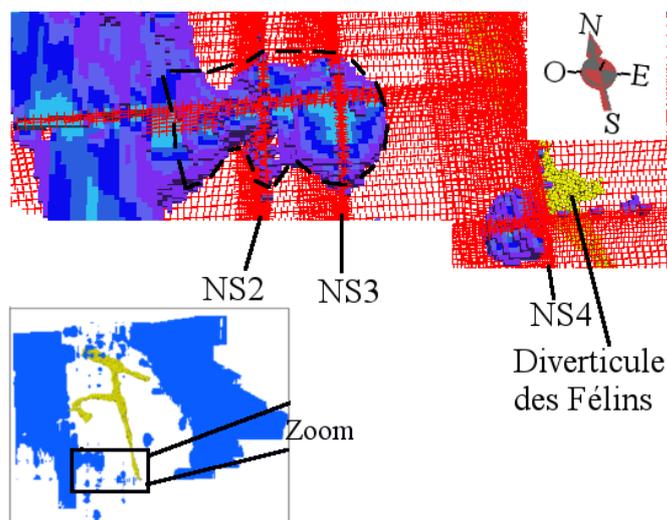


Figure 130. Vue du sud du modèle probabiliste avec un seuil de $90 \Omega\cdot m$, en gardant les blocs ayant une probabilité supérieure à 50% d'avoir une résistivité inférieure au seuil. Les croix rouges représentent les profils des mesures de TRE et les points jaunes représentent la grotte.

5.4. Validation des modèles construits

Les données des forages de Vouvé (1966 ; 1967), les pénétrètres de Lopez (2009) et les forages réalisés en 2014 (I2M) donnent des informations géologiques/géotechniques ponctuelles et directes en fonction de la profondeur. Les pénétrètres de Lopez (2009) ne sont pas tous situés sur le secteur de mesure, il y en a huit à l'intérieur de la zone d'étude. Les données de J. Vouvé ont été repositionnées, à partir de plans anciens et de points toujours identifiables sur le site. La précision du report est de quelques mètres et le rayon des cercles représente l'imprécision de leur position spatiale (Figure 131). Nous n'avons conservé que les forages que nous avons identifiés sans ambiguïté. Pour comparer ces données à celles issues des modèles, on extrait les valeurs de résistivité (modèle issu du krigeage ordinaire) ou de probabilité (krigeage d'indicatrices) aux endroits où se situent les forages et pénétrètres (Figure 131). Les valeurs extraites sont ensuite comparées aux données géologiques ou géotechniques afin de procéder à une validation des modèles géostatistiques.

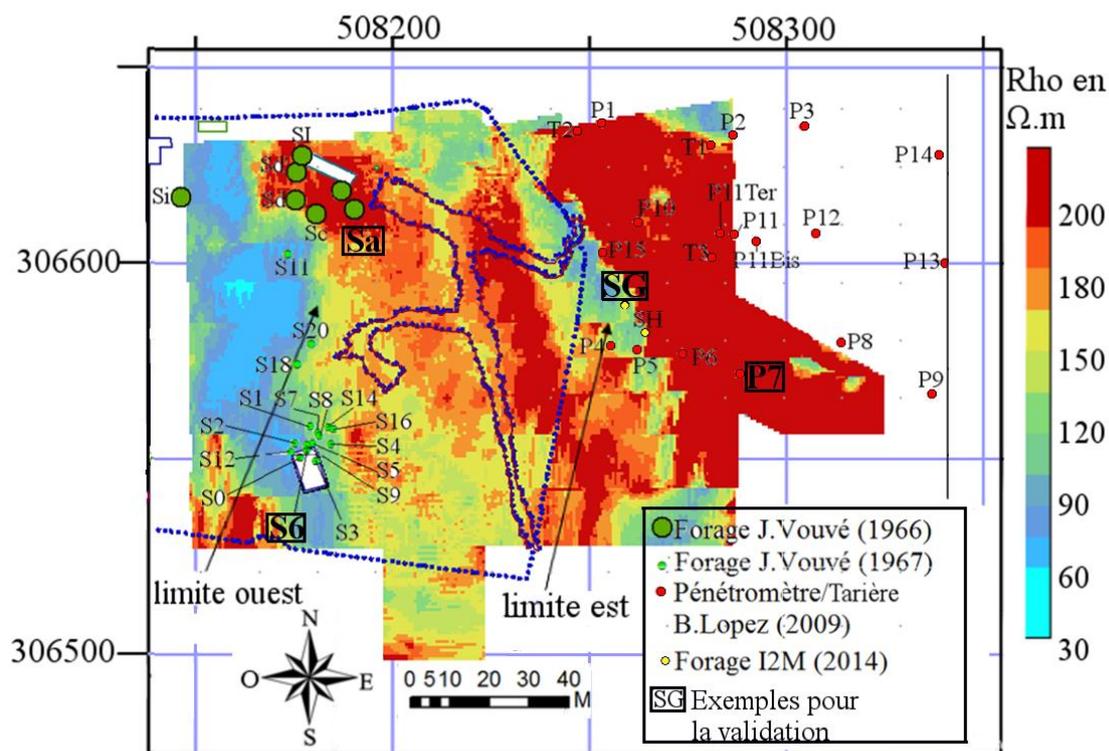


Figure 131. Emplacements des forages et pénétrètres superposés au modèle de résistivité vu de dessus, le trait bleu correspond à l'enceinte de protection du site.

On note que les forages de J. Vouvé se répartissent en deux endroits, un premier à proximité de l'entrée de la grotte et un second autour de la fouille Vouvé. Les pénétrètres se trouvent à l'extérieur de l'enceinte, notamment sur les formations sablo-argileuses. Le forage réalisé en 2014 se situe près de la limite du changement de formations géologiques. Quatre exemples vont être présentés (Sa, S6, SG et P7), provenant de différentes campagnes de mesure et répartis dans les différents secteurs du site.

5.4.1. Le forage Sa

Ce forage se trouve légèrement au sud de l'entrée de la grotte. D'après les descriptions du rapport de Vouvé (1966), il y a une forme de « surplomb » de calcaire remarqué dans ce forage. On compare cette description à l'évolution des résistivités issues du krigeage ordinaire ou des probabilités en fonction de la profondeur en cet endroit (Figure 132).

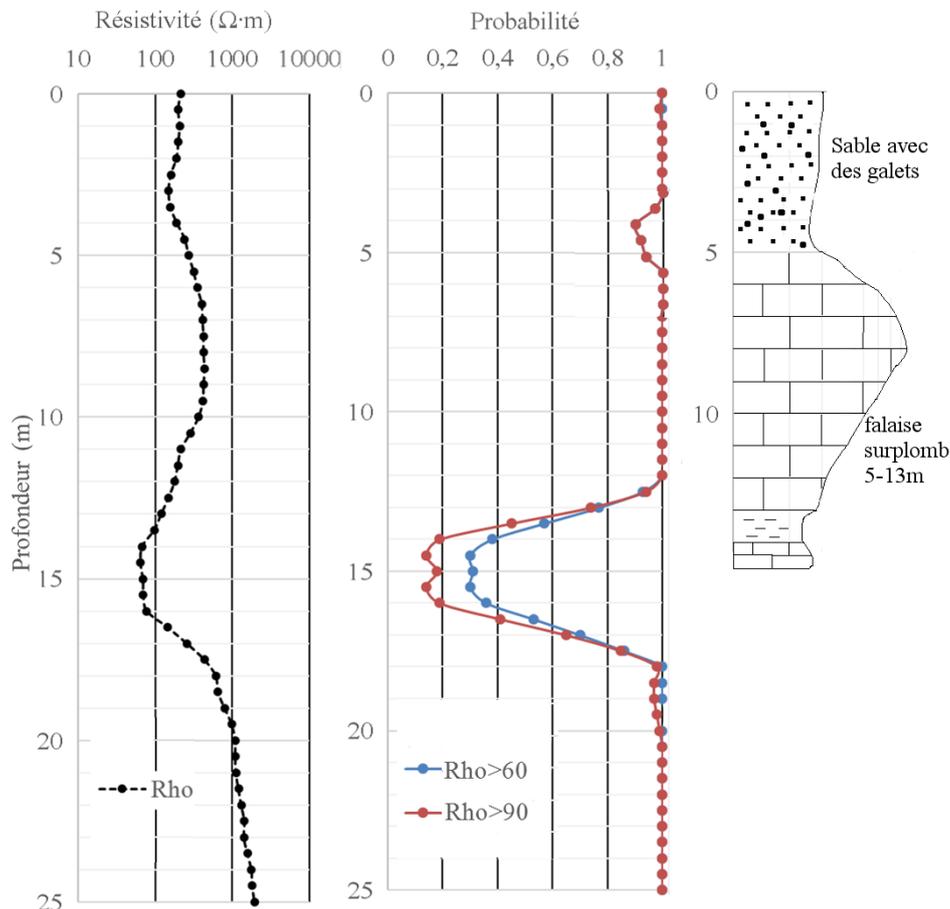


Figure 132. Données extraites des modèles géostatistiques – krigeage ordinaire (gauche) et d'indicateur (milieu) en comparaison avec la description du forage par Vouvé (1966) à droite.

On constate que la résistivité est quasi-constante avant 5 m de profondeur (autour de 197 $\Omega \cdot m$), à partir de laquelle elle commence à augmenter (jusqu'à 430 $\Omega \cdot m$) puis diminue vers 10 m et atteint une valeur minimale à 14 m (85 $\Omega \cdot m$), tandis que la probabilité du bloc d'avoir une résistivité supérieure au seuil n'est que 0,2 (pour $\rho > 90$) ou 0,3 ($\rho > 60$) entre 12 et 16 m. Les évolutions des valeurs des résistivités et des probabilités associées sont en accord avec la description du forage. De 0 à 5 m, les valeurs constantes sont cohérentes avec la description « sable avec des galets », et la baisse ponctuelle des valeurs de probabilité montre l'hétérogénéité des formations sableuses, il y a donc des possibilités d'avoir des matériaux plus conducteurs, par exemple, des argiles et des marnes. La forme dite en « surplomb » de nature calcaire se traduit par de fortes résistivités et des probabilités d'avoir des valeurs supérieures à 60 ou 90 $\Omega \cdot m$ tendant vers 1. La baisse de résistivité et des probabilités entre 12 et 16 m est cohérente avec une description d'une couche sablo-argileuse à cette profondeur. Ce forage montre donc une très bonne cohérence avec les données

existantes décrites par J. Vouvé. La méthode des indicatrices semble donner des limites plus contrastées entre calcaire et sable.

5.4.2. Le forage S6

Ce forage se trouve à proximité de la fouille Vouvé. La description de Vouvé (1967) correspondante est la suivante (Figure 133):

- 0 - 5,5 m : calcaire très fracturé
- 5,5 – 8 m : calcaire fissuré avec joints sablo-marneux
- 8 – 10,5 m : calcaire compact.

En comparant aux données extraites des modèles géostatistiques, on peut constater la présence de faibles valeurs de résistivité (autour de $57 \Omega \cdot m$) associées à de faibles valeurs de probabilité d'avoir des résistivités supérieures à $90 \Omega \cdot m$ ($60 \Omega \cdot m$) jusqu'à 5 m de profondeur. Ensuite, les trois types de données augmentent et restent quasi-stables plus en profondeur à partir de 12 m où l'on retrouve une probabilité égale à 1 soit une certitude d'avoir des valeurs de résistivité supérieures à $90 \Omega \cdot m$ ($60 \Omega \cdot m$) ; ceci est cohérent avec les valeurs de résistivité issues du modèle géostatistique. Entre 5 et 12 m, on constate une augmentation des valeurs de la résistivité et des probabilités avec toutefois de plus faibles valeurs pour le seuil à $90 \Omega \cdot m$ qu'à $60 \Omega \cdot m$.

D'après la description du forage, la partie superficielle correspond à des calcaires très fracturés, ce qui ne peut pas a priori être conducteur électriquement ; une aussi faible résistivité du calcaire ne peut s'expliquer qu'avec un remplissage en eau ou en argile des fractures. Cela est envisageable en cette période de l'année, après les pluies d'hiver mais n'est pas démontrable à ce stade de l'étude. L'augmentation à partir de 5 m de profondeur des résistivités et des probabilités se traduit par la présence des calcaires fissurés avec des joints sablo-marneux qui peuvent contenir de l'eau, puis les fortes valeurs dans la partie la plus profonde révèlent les calcaires compacts (Figure 133).

Ce forage permet de partiellement valider les modèles géostatistiques puisque l'on ne connaît pas le contenu des fissures dans les calcaires en surface. En outre, des matériaux dans les fissures pourraient disparaître ou changer de propriétés dans les caisses de forages lors de stockage de 40 ans. Néanmoins, dans la partie profonde, les modèles géostatistiques reproduisent correctement les structures géologiques.

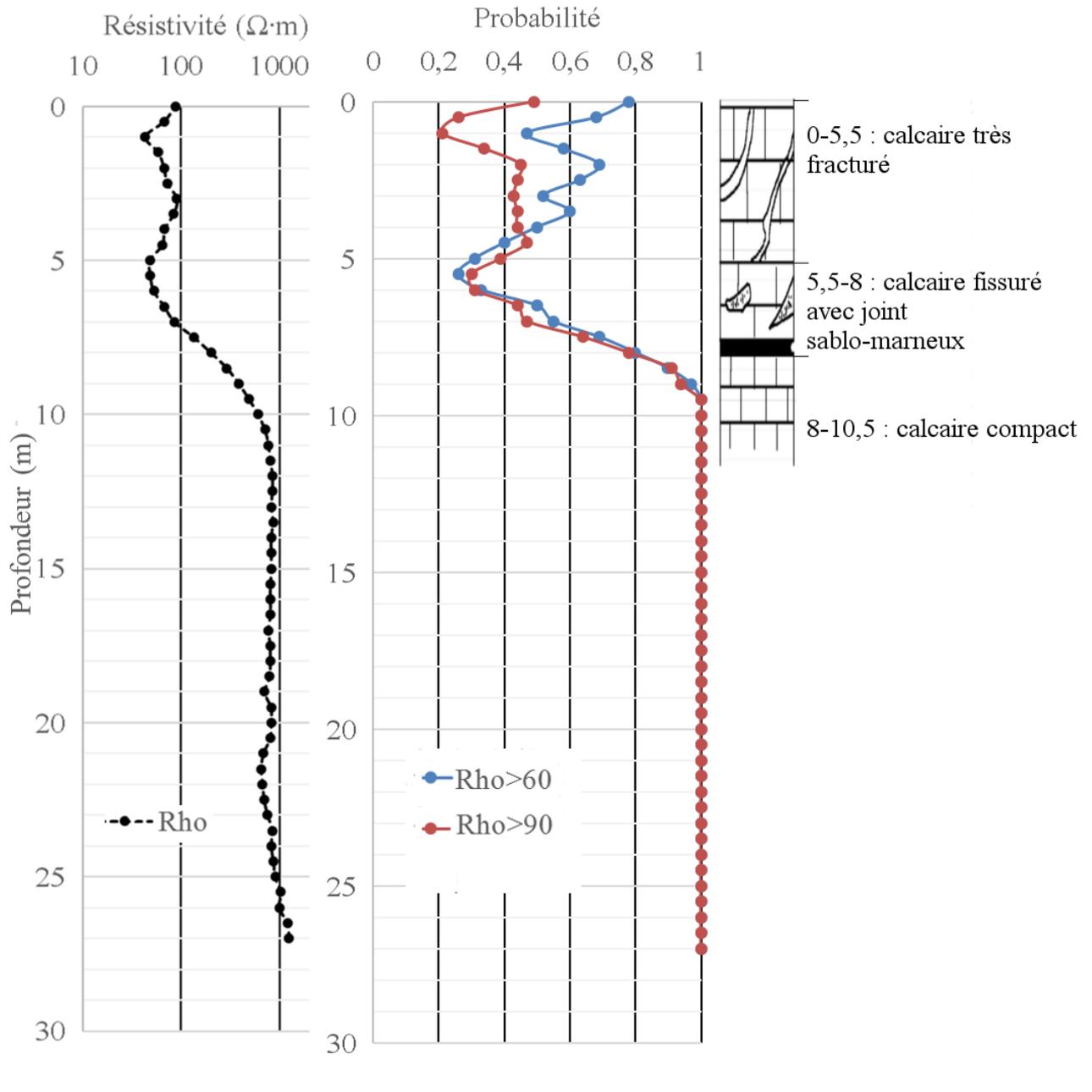


Figure 133. Données extraites des modèles géostatistiques – krigeage ordinaire (gauche) et d'indicateur (milieu) pour comparaison à la description du forage par Vouvé (1967).

5.4.3. Le forage SG

Ce forage à l'air comprimé réalisé en 2014 se trouve à proximité de la limite des calcaires et des formations sablo-argileuses. Le forage est décrit de la manière suivante (Figure 134):

- 0 - 1 m : matériel perdu, probablement des sables superficiels
- 1 – 2 m : passage calcaire fissuré
- 2 – 4,5 m : poussières de calcaire blanc jaunâtre
- 4,5 – 5,5 m : vibration de forage, probablement des calcaires en plaquette

- 5,5 -7 m : calcaire fissuré avec joint argileux
- 7,4 m : fond du forage, calcaire plus compact

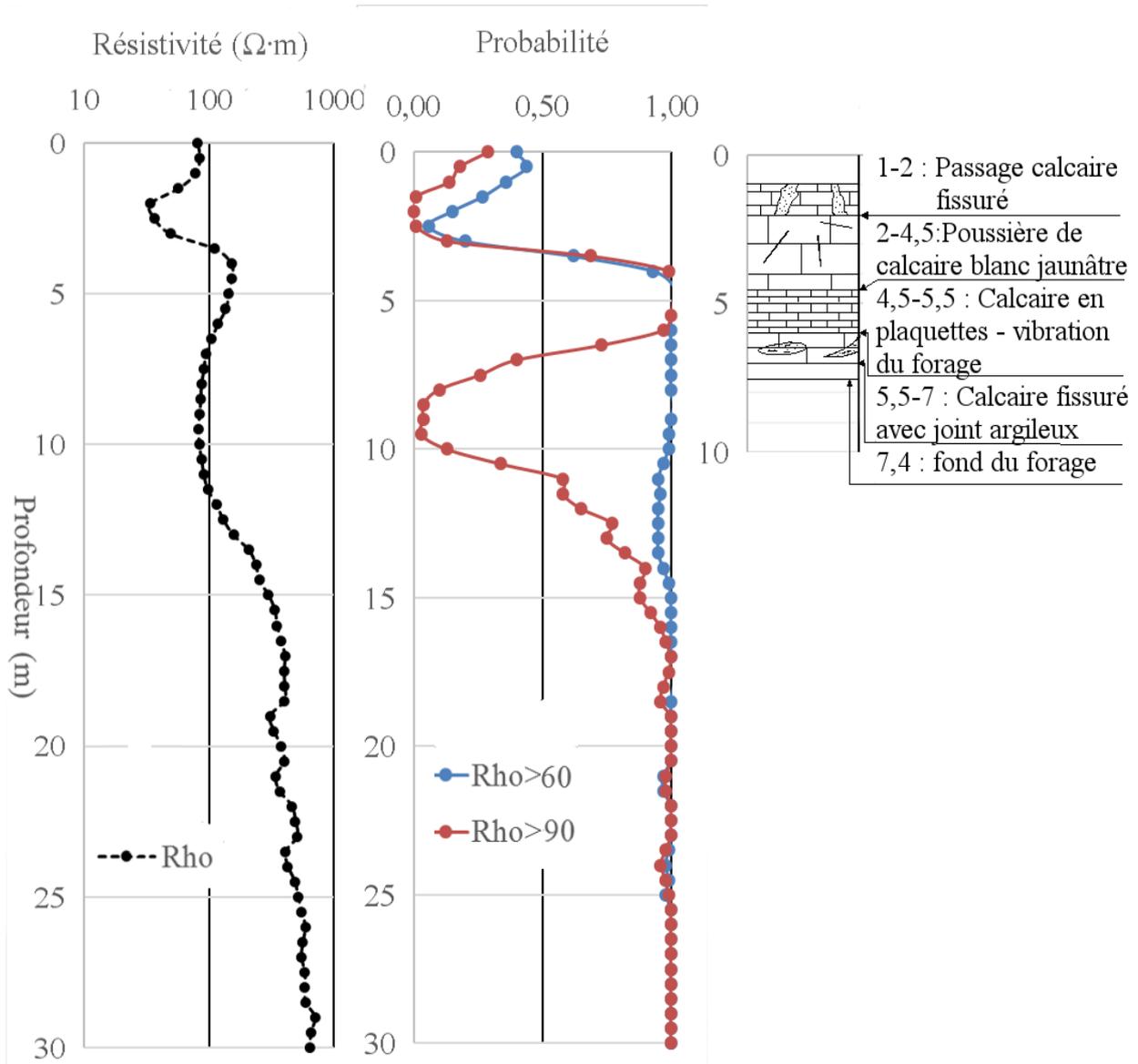


Figure 134. Données extraites des modèles géostatistiques – krigeage ordinaire (gauche) et d'indicateur (milieu) en comparaison avec la description du forage réalisé en 2014 (SG).

Le début du forage (au-delà de 2 m) est marqué par des résistivités faibles (de l'ordre de 80-100 $\Omega \cdot m$) associées à de très faibles valeurs de probabilité que la résistivité soit supérieure à 90 $\Omega \cdot m$ et même à 60 $\Omega \cdot m$; cela peut correspondre aux formations superficielles perdues lors du forage mais identifiables comme une formation d'altérites autochtones sur la carte de Bruxelles & Camus (2014) ainsi qu'au calcaire fissuré. Ensuite, on remarque une probabilité élevée (proche, voire égale à 1) et des résistivités d'environ 150 $\Omega \cdot m$ de 3 à 5,5 m, ce qui correspondrait, selon le forage, aux calcaires moins fissurés blancs jaunâtres. Au-delà de 5,5 m de profondeur, le passage à des calcaires en plaquette est marqué par une diminution de la probabilité d'avoir des valeurs supérieures à 90 $\Omega \cdot m$ tout en conservant une probabilité proche de 1 que la résistivité soit supérieure à 60 $\Omega \cdot m$ et cela jusqu'à 10 m. La description du forage donne de 5,5 à 7 m un niveau de calcaire fissuré avec joint argileux qui auraient de fait

une résistivité comprise entre 60 et 90 $\Omega\cdot\text{m}$. Finalement, les calcaires plus compacts au fond du forage sont marqués par une augmentation de résistivité et une probabilité proche de 1 (Figure 134).

Ce forage SG permet de justifier les évolutions de résistivité et de probabilité dans les modèles géostatistiques en montrant une bonne cohérence avec la description des formations géologiques.

5.4.4. Le forage pénétrométrique P7

Le forage pénétrométrique P7 se situe à l'est du site dans les formations sablo-argileuses. Il montre un nombre de coup croissant de 0 à 4 m, traduisant une augmentation de la résistance mécanique à la pointe en fonction de la profondeur dans cette partie. On peut penser que cette augmentation, avec tout de même un faible nombre de coups, correspond à une augmentation de la teneur en argile, tandis que la résistivité, dans cette partie, présente une diminution en fonction de la profondeur.

De 4 à 5 m à un niveau demandant un plus grand nombre de coup (niveau mécaniquement plus résistant) est associée une augmentation de la résistivité. L'augmentation de la résistivité perdure mais à 5 m de profondeur alors que le nombre de coup baisse brutalement, la courbe de la résistivité montre une inflexion. Au-delà la résistivité (122 $\Omega\cdot\text{m}$) et le nombre de coup (autour de 30) augmente vers 6 m. Le refus est obtenu à 7,7 m alors que la résistivité baisse légèrement (Figure 135).

L'augmentation de résistivité et de probabilité entre 4 et 6 m peuvent traduire le passage un peu difficile du pénétromètre entre 4 et 5 m. On observe ensuite des pics de résistivité et de probabilité à 6,4 m alors que le refus du pénétromètre est à 7,7 m. Ce décalage de 1,3 m (Figure 135) pourrait provenir de la grande distance dans la direction nord-sud entre les profils de mesure TRE. Un corps résistant situé en-dessous d'une couche conductrice peut provoquer des surestimations du toit de cette structure résistante (Apparao *et al.*, 1997).

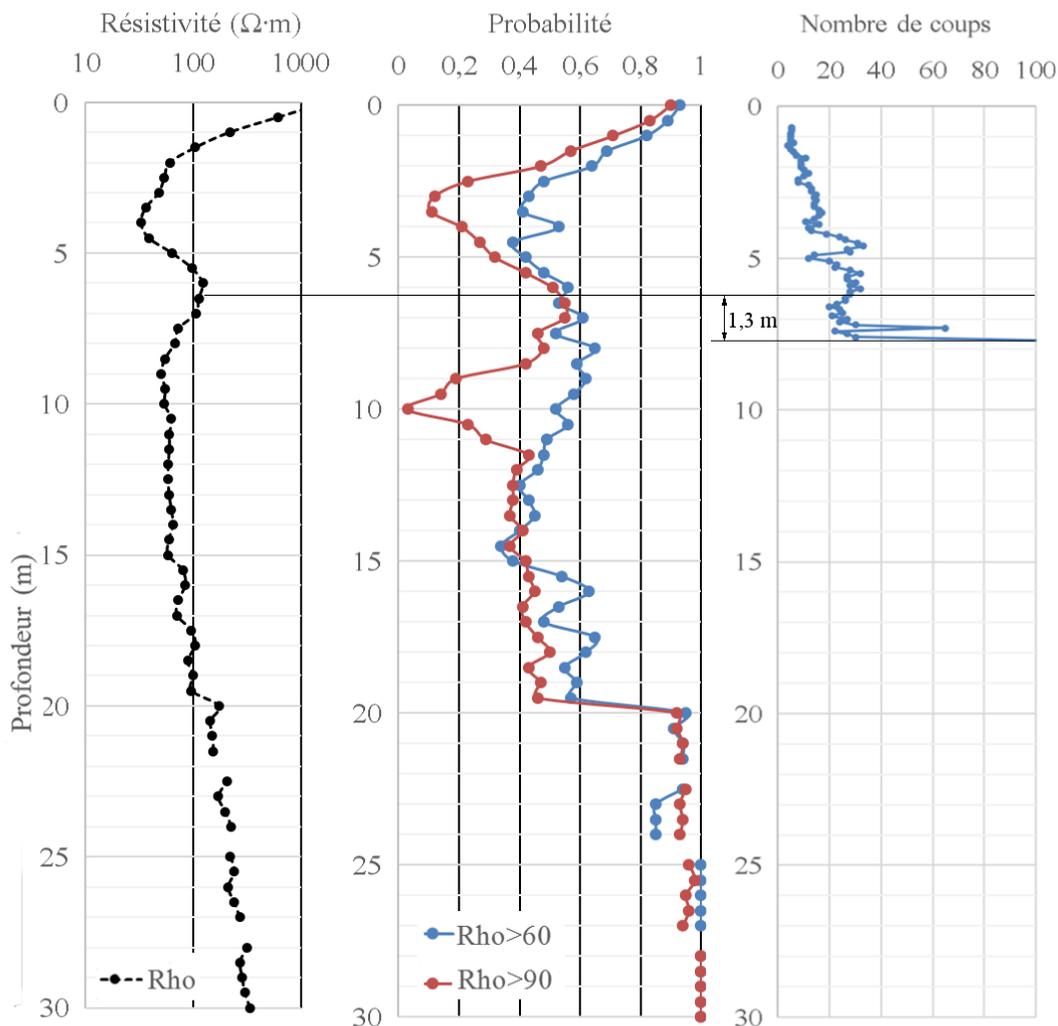


Figure 135. Données extraites des modèles géostatistiques (gauche) en comparaison avec les données du pénétromètre P7 (Lopez, 2009).

5.5. Conclusion sur la modélisation géostatistique en 3D

A l'aide des méthodes géostatistiques, on reproduit les structures intermédiaires entre les profils de TRE afin d'obtenir des modèles en 3D. Grâce aux deux méthodes de krigeage (ordinaire et indicatrice), on a réalisé quatre modèles 3D (modèle de résistivité 3D, modèles probabilistes avec trois seuils différents – 60, 90 et 275 $\Omega\cdot m$) pour analyser la forme des structures.

Le modèle de résistivité en 3D donne un point de vue général de la répartition spatiale des résistivités sur le site de Lascaux. Ce modèle permet d'identifier, tout d'abord, les limites entre les calcaires au centre du site et les formations sablo-argileuses à l'est et à l'ouest du site. Le modèle probabiliste indique les mêmes limites avec un point de vue conditionnel. La limite à l'ouest a une forme plus régulière, elle présente une direction d'environ N178° (l'orientation du plan de fracturation F1). La limite à l'est se sépare elle en deux parties : la moitié au nord marque une orientation de N145° (plan de fracturation F4) et l'autre moitié au

sud présente une direction semblable à celle à l'ouest, de N178°. Ces limites observées par le krigeage ordinaire sont cohérentes avec l'interprétation des peuplements des arbres par Perrin (2013). Les limites suivent moins précisément celle de la végétation avec le krigeage d'indicatrice. L'allure et la forme du modèle probabiliste peuvent changer en fonction du pourcentage choisi pour la visualisation.

Il est aussi possible par ces méthodes de reproduire la couche sableuse très résistante dans la partie superficielle à l'est. En comparant les modèles, une forte hétérogénéité au niveau de la couche sableuse peut être reproduite à l'aide du krigeage d'indicatrice, celle-ci est non identifiable dans le modèle issu du krigeage ordinaire. Pour confirmer la méthode la plus représentative, des tarières devraient être réalisées avec un pas serré dans cette partie du site.

Les calcaires présentent des résistivités plus élevées que les formations sablo-argileuses. Ils se trouvent principalement au centre du modèle et pour partie à l'intérieur de l'enceinte de protection. On peut séparer les calcaires en deux parties : une partie superficielle très hétérogène avec la présence des anomalies conductrices ; une deuxième partie plus résistante en profondeur, marquée par une résistivité supérieure à 275 $\Omega\cdot m$. On peut penser que les calcaires profonds constituent la zone d'infiltration, dans laquelle la grotte se développe. En outre, il y a une interface quasi-horizontale à 179 m NGF qui sépare les calcaires en subsurface et les massifs en profondeur. Puisque les résistivités dans le massif de calcaires sont élevées et peu variées, le modèle probabiliste montre quasiment la même forme du promontoire de calcaire. La cohérence entre le modèle de résistivité et le modèle probabiliste peut justifier la forme de la structure du promontoire. On peut penser qu'il s'agit de la limite entre épikarst et la zone d'infiltration du système karstique de Lascaux.

On a également observé certaines anomalies conductrices. Au droit du sas1, les anomalies conductrices semblent établir une liaison depuis le point de décharge du sas1 jusqu'au profil II du suivi temporel. Cette continuité des anomalies peut s'étendre jusqu'au profil I du suivi temporel. Cette anomalie connectée aux formations sablo-argileuses pourrait montrer la probable alimentation en eau depuis les formations sablo-argileuses à l'est du site. Les anomalies au sud du site ne semblent pas s'étendre, mais elles sont dans l'alignement avec l'extrémité du diverticule des Félines. Les discontinuités entre les anomalies peuvent être des réalités physiques du terrain, mais peuvent aussi ne pas être détectées en raison de la taille infiniment inférieure aux espacements entre les mesures de TRE.

Pour valider les modèles géostatistiques 3D, on utilise les données qui sont considérées comme exploitables acquises par Vouvé (1966 ; 1967), B. Lopez (2009) et I2M. Parmi ces données, on trouve 16 forages (15 de J. Vouvé et 1 de I2M) et 5 pénétrromètres montrant des informations totalement cohérentes avec les données extraites des modèles géostatistiques. Deux forages ne fournissent pas assez d'informations pour pouvoir les interpréter ; 3 pénétrromètres et 4 forages qui ne montrent pas de cohérence avec les modèles géostatistiques (Tableau 14 et Annexe VII). Les pénétrromètres traduisent la réponse mécanique des sols, ce qui n'est pas directement corrélable avec les réponses électriques, les non-cohérences entre les pénétrromètres et les données extraites des modèles 3D peuvent donc se produire à cause de la différence de réponses liées aux données. Les quatre forages, montrant une non-cohérence se trouvent autour de la fouille Vouvé où le terrain présente une

très forte hétérogénéité. Ces forages sont calés avec une précision de 2 m, qui peut générer un décalage entre les descriptions du forage et les données extraites du modèles 3D. De plus, ces forages ont été réalisés avant le creusement de la fouille Vouvé, alors que les mesures de TRE sont à proximité de la fouille qui était vide au moment des mesures. Les résultats autour ont forcément été influencés par l’existence de ce vide.

Sur les données retrouvées dans les archives de plus de 50 ans, comparées aux carottes encore conservées sur le site de Lascaux, et le modèle 3D, un taux de validation global de 70%, montre que la qualité de la modélisation géostatistique est très satisfaisante. Cela d’autant plus que nous savons que la taille des structures est de l’ordre de 7 m et l’espacement entre les profils de TRE est de plus de 10 m.

Tableau 14. Validation des modèles par un critère binaire (1 – validation positive ; 0 – validation négative ; ? – information manquant).

Pénétromètre LOPEZ (2009)	P1	1	Forage VOUBE (1967)	S0	?
	P2	0		S1	1
	P4	1		S2	1
	P5	0		S3	0
	P6	1		S4	0
	P7	0		S5	1
	P10	1		S6	1
	P11Ter	1		S7	0
Forage VOUBE (1966)	Sa	1		S8	1
	Sb	1		S9	1
	Sc	1		S11	1
	Sd	?		S12	1
	Sd'	1		S14	1
Forage I2M	SG	1		S16	0
				S18	1
Total		70%		S20	1

Conclusion générale

La grotte de Lascaux est l'une des plus importantes grottes ornées au monde. Elle nécessite des méthodes de préservation et de conservation optimales.

Cette surveillance des œuvres pariétales passe, entre autres connaissances, par celle de l'encaissant de la grotte. Des méthodes géophysiques spécifiques non-destructives, sont particulièrement indiquées pour déterminer la structure de l'encaissant et des possibles chemins de circulation de l'eau.

Cette thèse a eu pour but de caractériser le milieu autour de la grotte par la méthode de la TRE. La TRE a été mise en œuvre, d'une part, dans l'environnement immédiat de la grotte, considéré comme un amont hydraulique de l'émergence du sas 1, avec une stratégie de suivi temporel. D'autre part, des mesures de TRE 2D ont été mises en œuvre pour couvrir une surface importante du site, en particulier dans l'enceinte du site. Grâce à ces mesures, des modèles 3D issus des méthodes d'interpolations géostatistiques ont été créés et validés.

Le suivi temporel de TRE

Depuis le mois de juin 2012 jusqu'au mois de janvier 2014, vingt-deux campagnes de TRE ont été réalisées sur le site de Lascaux. Deux profils parallèles ont été mis en place de façon à couvrir l'amont hydraulique potentiel de la grotte. En se basant sur le modèle thermique de Lacanette *et al.* (2007), les données de résistivité ont été corrigées des effets de la température pour être toutes rapportées à une même température (12,6 °C). Des données climatiques, disponibles, ont aussi été prises en compte.

On a tout d'abord utilisé la méthode d'inversion « Time-Lapse » qui est la méthode couramment utilisée pour les études du suivi temporel (logiciel Res2Dinv[®]). Avec cette méthode, on met en évidence la différence entre les résistivités obtenues à une date donnée et celles d'un modèle de référence choisi, dans notre cas, le plus résistant électriquement (octobre 2012). Les modèles montrent une zone superficielle que l'on appelle « front d'humidité » et une zone située en-dessous de ce front et dont la variation de résistivité semble moindre. Le front superficiel montre une bonne cohérence de la variation de résistivité et des épisodes pluvieux.

L'examen des résultats, pour la partie profonde, ne donne pas entière satisfaction ; en effet, l'inversion par la méthode « Time-Lapse » telle qu'elle a été mise en œuvre et paramétrée donne des résultats qui ne concordent pas avec ceux des inversions indépendantes sans que l'on puisse l'expliquer.

C'est la raison pour laquelle on a adapté une approche statistique multidimensionnelle pour analyser les variations temporelles de résistivité : l'ACP et la CHA. Les données de résistivité interprétées sont tout d'abord pondérées par l'inverse de l'aire de la surface du bloc hôte et ensuite traitées en utilisant dans les calculs leur logarithme décimal. On a pu, en regroupant les résultats des analyses statistiques de chacun des quatre profils en sept classes maximum, proposer deux modèles géologiques synthétiques correspondant à cette classification. Pour simplifier la lecture, on ne mentionne ci-dessous lors de la description des composantes des modèles que les classes du profil I-100. L'interprétation suivante est donc

proposée :

- Les sables et les formations détritiques argileuses sont présents au sud-est du site de Lascaux. Deux domaines (classes 6 et 7) sont distingués.
 - La fine couche de sable est représentée, dans les modèles issus des inversions, par des blocs ayant de très fortes résistivités, constantes dans le temps.
 - Les formations argileuses sont identifiées d'une part au sud-est du profil en-dessous des sables et, d'autre part, sous une couche de calcaire fissuré à l'extrémité sud-est du profil. Les médianes des résistivités y sont les plus faibles et ne montrent quasiment pas de variation temporelle.
- Au sein du promontoire calcaire, cinq classes sont identifiées.
 - Une zone d'alimentation privilégiée (classe 5) qui alimente probablement le sas1, est identifiée. La classe, issue de la CHA, qui lui correspond est constituée de blocs peu résistants mais variant dans le temps, ce qui la distingue clairement de celle correspondant aux argiles. La variation de résistivité de cette zone est quasiment synchrone du changement de débit du sas 1 mais déphasée avec la pluviométrie. Des deux profils, on a constaté que, pour celui qui est le plus proche de la grotte, cette variation est aussi influencée par certains événements pluvieux intenses ou brutaux.
 - Les formations dites perméables (classe 4) sont identifiées autour de la zone de recharge. Elles sont potentiellement chargées en eau, et permettent probablement à l'eau provenant du côté sud-est du site (formations détritiques), d'alimenter la zone de recharge. Les blocs de cette partie sont légèrement plus résistants que ceux de la zone de recharge avec une variation temporelle moindre que celle de la zone de recharge.
 - En surface, les calcaires sont probablement très altérés et fissurés permettant une circulation rapide des eaux de pluie. Deux sous-parties y sont identifiées : l'une ayant une variation de résistivité plus forte pendant l'été (classe 2) et correspondant aux lieux d'implantation des chênes mettant probablement en évidence l'évapotranspiration liée à ces arbres. La deuxième (classe 1), sans arbre et ayant une résistivité qui décroît moins que la précédente en été, témoigne vraisemblablement du fait que le calcaire fissuré s'assèche moins au cours de l'été.
 - En-dessous de cette couche, des calcaires moins poreux ou moins fissurés (classe 3) que ceux de la couche superficielle forment un horizon peu perméable ou de stockage de l'eau. Ce niveau sépare presque toujours les calcaires superficiels de la couche contenant des « formations perméables ». La gamme de résistivité de cette classe est comprise entre celle des calcaires superficiels et celle de la formation perméable, et montre la variation temporelle la plus faible des calcaires.
 - Finalement, il existe des calcaires compacts, situés en partie profonde des profils (une partie des classes 1 et 2). C'est le domaine où les blocs sont les plus résistants, sans aucune variation temporelle. Il peut correspondre au début de la zone d'infiltration du système karstique de Lascaux.

La méthode développée ici permet une classification rapide du milieu, en différents domaines représentatifs du comportement hydrogéologique. De plus, cette méthode apparaît plus rapide de mise en œuvre que les méthodes traditionnelles. Ainsi le rajout d'une nouvelle mesure ne nécessite que son inversion indépendante, la correction de la température, la normalisation des résistivités ainsi obtenues pour, finalement, l'intégrer à la matrice des résistivités déjà établie à partir des données antérieures ; les calculs statistiques qui suivent étant très rapides. A contrario, l'inversion « Time Lapse » classique (Loke *et al.*, 2014) nécessite un travail beaucoup plus long et plus lourd : un ajout des données dans le fichier d'entrée et une inversion complète de toutes les données depuis le début du suivi, sans correction de la température (à titre d'exemple, une inversion complète de « Time Lapse » de vingt mesures, contenant chacune 10100 blocs nécessite une journée de calcul à l'aide de Res2Dinv®, alors qu'il faudrait une heure pour réaliser les traitements statistiques à partir des résistivités interprétées).

Une modélisation du débit est aussi effectuée afin de mettre en relation les volumes écoulés dans la grotte et la variation de résistivité de la zone de recharge. Cette modélisation a pour objectif de prédire le débit à partir de mesure de résistivité et des débits antérieurs. En se basant sur la loi d'Archie dans les milieux poreux et la théorie de la percolation, la moyenne du volume qui s'écoulera au cours des 7 jours qui succéderont à une mesure de TRE est modélisée. En comparant cette prédiction à la moyenne du volume réel, on constate que la prédiction du volume est cohérente avec les différentes périodes d'écoulement, il est aussi possible de reproduire les événements de crue. Cependant, cette modélisation, avec les données existantes à ce jour, donne des débits sous-estimés pendant les périodes de fort débit, et surestimés pendant les périodes sèches.

Modélisation géostatistique en 3D

Les méthodes d'interpolation géostatistique sont utilisées afin de créer des modèles tridimensionnels du site de Lascaux à partir des données de résistivité en 2D. Deux méthodes d'interpolation ont été utilisées : le krigeage pour le modèle de résistivité en 3D et le krigeage d'indicatrice pour le modèle probabiliste en 3D.

Au moyen du modèle de résistivité en 3D on a mis en évidence les limites du promontoire calcaire au centre du secteur d'étude et des formations détritiques sablo-argileuses situées à l'est et à l'ouest du site. La limite à l'ouest a une orientation d'environ N178°E correspondant au plan de fracturation F1 déterminé antérieurement par B. Lopez, tandis que la limite à l'est, moins claire, présente deux orientations : N145°E (plan de fracturation F4) au nord et N178°E (plan de fracturation F1) au sud. La limite entre ces deux formations est aussi cohérente avec l'observation et la cartographie de la végétation (Perrin, 2013) et tout particulièrement avec les limites entre les pins, chênes et châtaigniers.

La grotte de Lascaux se développe majoritairement en-dessous de 179 m NGF, où les blocs plus résistants sont attribués à la présence de calcaires plus compacts. Cette côte sépare des calcaires plus conducteurs probablement très altérés, des calcaires plus résistants et plus compacts. Nous interprétons cette limite comme la transition entre épikarst et zone d'infiltration. Par ailleurs, dans la partie du promontoire calcaire, on a établi numériquement des continuités entre les anomalies détectées sur les profils du suivi temporel, en seuillant les

résistivités supérieures à $90 \Omega \cdot m$. Dans ces conditions, on montre que l'alimentation vers le point de la décharge de sas1 provient partiellement des formations détritiques situées à l'est. De plus, une anomalie conductrice, identifiée à proximité de la salle des Taureaux, pourrait être à l'origine des traces d'humidité observées sur certains joints de la salle. Au sud du site, nous n'avons pas établi de connexion entre les anomalies conductrices. Néanmoins, des anomalies de petites tailles (de 4,5 à 10 m) sont probablement difficilement détectables dans la direction nord-sud, compte tenu de la résolution associée aux espacements entre les profils d'orientation est-ouest (10 m).

Les modèles probabilistes ont aussi permis d'identifier les limites du promontoire calcaire et des formations détritiques sablo-argileuses. La délimitation de la partie superficielle, comme dans le cas précédent, est globalement cohérente avec la répartition de la végétation. L'interface dans les calcaires, avec ce modèle probabiliste, est aussi identifiée à 179 m NGF, et les limites sont très similaires à celles du modèle de résistivité 3D. On constate que les calcaires compacts en profondeur ont une très forte probabilité (90%) de présenter une résistivité électrique supérieure à $275 \Omega \cdot m$. La connexion des zones d'alimentation identifiées sur les profils du suivi temporel n'est pas mise en évidence par cette méthode. Par ailleurs, l'anomalie conductrice, à proximité de la salle des Taureaux, est aussi identifiée.

Afin de s'assurer de la qualité des résultats issus des différents modèles (krigeage ordinaire et par indicatrice), les valeurs des résistivités et des probabilités sont extraites des modèles aux lieux pour lesquels on dispose des données issues des forages (anciens de J. Vouvé et celui de I2M) et des pénétrromètres de B. Lopez. Ces valeurs ont été comparées aux données géologiques et géotechniques. Tenant compte des données retrouvées dans les archives de plus de 50 ans, et après les avoir confrontées aux carottes encore conservées sur le site de Lascaux, leur comparaison au modèle 3D a conduit à un taux de validation global de 70% ; ceci, montre que la qualité de la modélisation géostatistique est très satisfaisante.

Perspectives

Sur le plan méthodologique, la méthode de la TRE a montré sa capacité à la détermination des structures dans le système karstique de Lascaux. Sur ce site, il n'y a, actuellement, pas d'électrodes installées à demeure. Des repères sont installés sur place afin d'assurer les bons repositionnements à chaque campagne de mesure. Cependant, des électrodes installées à demeure permettraient de pérenniser leur position et de gagner du temps lors de mesures. Sur le site de Lascaux, cette méthode peut être étendue sans difficultés à d'autres domaines pouvant présenter un enjeu en termes de conservation. Il reste à montrer qu'il est possible d'appliquer cette méthode à d'autres sites karstiques.

Entre les profils, certaines connexions entre des anomalies conductrices ont été trouvées par la modélisation géostatistique en 3D. Selon la méthode géostatistique, ces connexions ne sont pas toujours établies. Il serait intéressant de comparer les résultats obtenus par cette méthode géostatistique à ceux qui proviendraient d'un modèle 3D obtenu par une mesure de TRE en 3D ou de refaire des mesures avec un pas de temps plus serré.

Une des méthodes qui pourrait être testée sur ce site est la Résonance Magnétique des Protons (RMP). En effet, l'information déduite de cette méthode est directement liée à la présence d'eau dans le sous-sol. Des recherches récentes (Boucher, 2007; Girard, 2010),

mettant en œuvre la RMP, ont révélé son potentiel de la recherche de l'eau dans les systèmes karstiques.

Dans le cadre de ce travail, les résistivités interprétées obtenues après inversion sont corrigées de l'effet de la température. D'après les données des nouvelles sondes de température installées à proximité des profils du suivi, on a constaté une différence de température de la roche entre les différentes classes issues de l'analyse statistique multidimensionnelle. Il semble aujourd'hui évident que la température dans la zone d'alimentation est différente de celle des milieux environnants. Le rôle de la température devrait être étudié de façon plus approfondie.

La modélisation du débit, pourrait être améliorée par plusieurs approches. Un pas de mesure régulier permettrait d'introduire une dimension temporelle à la modélisation. La prise en compte de la pluie efficace locale donc de la quantité d'eau localement infiltrée dans le sol, aiderait à déterminer le volume minimal nécessaire à la reprise du débit après la période estivale. Une interprétation indépendante des périodes sèches/humides est nécessaire car il se peut que le lien entre la résistivité et le débit soit lié à des phénomènes physiques différents (par exemple, la théorie de la percolation). Par ailleurs, un modèle prenant en compte la fracturation pourrait aussi être testé puisque l'utilisation de la loi d'Archie ne s'applique normalement qu'à un milieu poreux faiblement argileux.

Bibliographie

Al-fares, W., Bakalowicz, M., Guérin, R., & Dukhan, M. (2002). Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Hérault, France) with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 51(2-4), 97-106.

Apparao, A., Sivarama, S., & Subrahmanya, S. (1997). Depth of detection of buried resistive targets with some electrode arrays in electrical prospecting. *Geophysical Prospecting*, 45, 365-375.

Arbel, Y., Greenbaum, N., Lange, J., & Inbar, M. (2010). Infiltration processes and flow rates in developed karst vadose zone using tracers in cave drips. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 1682-1693.

Archie, G. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Petroleum Transactions of the AIME*, 146, 54-62.

Audebert, M., Clément, R., Touze-Foltz, N., Günther, T., Moreau, S., & Duquennoi, C. (2014). Time-lapse ERT interpretation methodology for leachate injection monitoring based on multiple inversions and a clustering strategy (MICS). *Journal of Applied Geophysics*, 111, 320-333.

Aujoulat, N. (2004). *Lascaux - Le geste, l'espace et le temps* (éd. Collection « Art rupestres »). France: Seuil.

Aujoulat, N., Cleyet-Merle, J.-J., Gausson, J., Tisnerat, N., & Valladas, H. (1998). Approche chronologique de quelques sites ornés paléolithiques du Périgord par datation carbone 14 en spectrométrie de masse par accélérateur carbone 14 en spectrométrie de masse par accélérateur. *Paléo*, 10, 319-323.

Bakalowicz, M. (1979). *Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification*. Thèse Doctorale d'Etat de Sciences Naturelles, Paris: Université Paris 6.

Bakalowicz, M. (1999). *Connaissance et gestion des ressources en eau souterraines dans les régions karstiques*. Guide technique n°3, Lyon, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, 44 p.

Baker, A., & Brunson, C. (2003). Non-linearities in drip water hydrology: an example from Stump Cross caverns, Yorkshire. *Journal of Hydrology*, 277, 151-163.

Besson, A., Cousin, I., Dorigny, A., Dabas, M., & King, D. (2008). The temperature correction for the electrical resistivity measurements in undisturbed soil samples: analysis of the existing conversion models and proposal of a new model. *Soil Science*, 173, 7.

Bignot, G. (1972). *Recherches stratigraphiques sur les calcaires du Crétacé supérieur et de l'Eocène d'Istrie et des régions voisines*. (éd. Essai de révision du Liburnien), Thèse Doctorale de Science Naturelles Paris..

Blavoux, B., & Mudry, J. (1986). Influence des pluies estivales sur la qualité des réserves de l'aquifère karstique : rôle du sol et de l'épikarst dans la concentration des chlorures. *Bulletin de la Société de Géologie de France*, 8 (Tome II (4)), 667-674.

Boucher, M. (2007). Estimation des propriétés hydrodynamiques des aquifères par Résonance Magnétique des Protons dans différents contextes géologiques, de l'échantillon à l'échelle hydrogéologique. Thèse doctorale de Hydrology. Université d'Orléans.

Breuil, H. (1941). Une Altamira française : la caverne de Lascaux à Montignac (Dordogne). *Compte-rendus de l'Académie des Inscriptions et Belles Lettres*, 85-5, 347-376.

Breuil, H. (1952). *Quatre cents siècles d'art pariétal. Les cavernes ornées de l'âge de Renne*. Montignac: Centre d'Etude et de Documentation Préhistorique.

Bruxelles, L., & Camus, H. (2014). *Grotte de Lascaux - Formes et formations anciennes de surface et sub-surface, Montignac, Dordogne*. Inrap/Protée.

Campbell, R., Bower, C., & Richards, L. (1948). Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts. *Soil Science Society of America Proceedings*, 13. 66-69

Carbonel, D., Rodríguez-Tribaldos, V., Gutiérrez, F., Galve, J., Guerrero, J., Zarroca, M., Acosta, E. (2015). Investigating a damaging buried sinkhole cluster in an urban area (Zaragoza city, NE Spain) integrating multiple techniques: Geomorphological surveys, DInSAR, DEMs, GPR, ERT, and trenching. *Geomorphology*, 229, 3-16.

Carrière, S., Chalikakis, K., Sénéchal, G., Danquigny, C., & Emblanch, C. (2013). Combining electrical resistivity tomography and ground penetrating radar to study geological structuring of karst Unsaturated Zone. *Journal of Applied Geophysics*, 94, 31-41. doi:10.1016/j.jappgeo.2013.03.014

Chalikakis, K. (2006). *Application de méthodes géophysiques pour la reconnaissance et la protection de ressources en eau dans les milieux karstiques*, Thèse de doctorat, Paris: Université Paris 6.

Chalikakis K., Plagnes V., Guerin R., Bosch F., And Valois R., (2011), Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeology Journal*, 19, 6, 1169-1180. Doi: 10.1007/s10040-011-0746-x

Chambers, J., Meldrum, P., Wilkinson, P., Ward, W., Jackson, C., Matthew, B., Gunn, D. (2015). Spatial monitoring of groundwater drawdown and rebound associated with quarry dewatering using automated time-lapse electrical resistivity tomography and distribution guided clustering. *Engineering Geology*, Available online.

Chambers, J., Wilkinson, P., Uhlemann, S., Sorensen, J., Roberts, C., Newell, A., Bai, L. (2014). Derivation of lowland riparian wetland deposit architecture using geophysical image analysis and interface detection. *Water Resources Research*, 7, 50, 5886-5905.

- Charlier, J., Bertrand, C., & Mudry, J. (2012). Conceptual hydrogeological model of flow and transport of dissolved organic carbon in a small Jura karst system. *Journal of Hydrology*, 460-461, 52-64.
- Chauvet, P. (1999). *Aide-mémoire de géostatistique linéaire* (éd. réimpr 2008). Paris: Les Presses de l'École des Mines.
- Chilès, J., & Delfiner, P. (1999). Geostatistics: modeling spatial uncertainty, 2nd Édition. Wiley Series *Probability and Statistics*.
- Chrétien, M., Lataste, J., Fabre, R., & Denis, A. (2014). Electrical resistivity tomography to understand clay behavior during seasonal water content variations. *Engineering Geology*, 169, 112-123.
- Clément, R., Descloître, M., Gunther, T., & Oxarango, L. (2009). Comparaison of three arrays in time-lapse ERT : simulation of a leachate injection experiment. *ArchéoSciences, suppl*, 33, 275-278.
- Clement, R., Descloîtres, M., Günther, T., Ribolzi, O., & Legchenko, A. (2009). Influence of shallow infiltration on time-lapse ERT: Experience of advanced interpretation. *Comptes rendus Geoscience*, 341, 10-11, 886-898.
- Corwin, D., & Lesch, S. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46, 11-43.
- Cunningham, K., Carlson, J., & Hurley, N. (2004). New method for quantification of vuggy porosity from digital optical borehole images as applied to the karstic Pleistocene limestone of the Biscayne aquifer, southeastern Florida. *Journal of Applied Geophysics*, 55(1-2), 77-90.
- Dahlin, T., & Zhou, B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52, 379-398.
- Dahlin, T., & Zhou, B. (2006). Multiple gradient array measurements for multi-channel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*, 4 (2), 113-123.
- Dahlin, T., Aronsson, P., & Thörnelöf, M. (2014). Soil resistivity monitoring of an irrigation experiment. *Near Surface Geophysics*, 12, 35-43.
- Edwards, L. (1977). A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42, 120-1036.
- Ellis, R., & Oldenburg, D. (1994). Applied geophysical inversion. *Geophysical Journal International*, 116, 5-11.
- Gance, J., Sailhac, P., & Malet, J.-P. (2015). Corrections of surface fissure effect on apparent resistivity measurements. *Geophysical Journal International*, 200, 1118-1135.
- Genelle, F. (2012). Les méthodes géophysiques pour la caractérisation des couvertures

d'installation de stockage de déchets. Thèse de doctorat. Université Bordeaux 1.

Genelle, F., Sirieix, C., Riss, J., & Naudet, V. (2012). Monitoring landfill cover by electrical resistivity tomography on an experimental site. *Engineering Geology*, 145-146, 18-29.

Geneste J.-M. (2009). Les grandes étapes de la conservation de la grotte de Lascaux. In : Lascaux et la conservation en milieu souterrain. Actes du symposium international, Paris, 26 et 27 février 2009, daf 105, pp. 53-79.

Girard, J.F. (2010). Contribution à l'Hydro-Géophysique : Développements et Applications de la Résonance Magnétique Protonique et des Méthodes Electromagnétiques. Habilitation à diriger des recherches. Université de Strasbourg.

Gleason, A. (1957). Measures on the closed subspaces of a Hilbert space. *Indiana University Mathematics Journal*, 6, 885-893.

Guérin, R., Baltassat, J., Boucher, M., Chalikakis, K., Galibert, P., Girard, J., Valois, R. (2009). Geophysical characterisation of karstic networks – Application to the Ouyse system (Poumeysen, France). *Comptes Rendus Geoscience*, 341(10-11), 810-817.

Guillot, P., Feys, R., Lefavrais-Raymon, A., Platel, J., & Lefavrais-Henry, M. (1979). *Notice de la carte géologique de la France à 1/50 000 – Terrasson (N° 784)*. Orléans: BRGM.

Hayashi, M. (2004). Temperature-electrical conductivity relation of water for environmental monitoring and geophysical data inversion. *Environmental Monitoring and Assessment*, 96, 119-128.

Huijbregts, C., Davis, J., & McCullagh, M. (1975). Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. Dans *Display and Analysis of Spatial Data*. New York: John Wiley.

Isaaks, E., & Srivastava, R. (1989). *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press.

Jaksa, M. (1995). *The influence of spatial variability on the geotechnical design properties of a stiff, overconsolidated clay*, PhD Thesis, Adélaïde, University of Adelaide.

Journal, A. (1989). *Fundamentals of geostatistics in five lessons, short course in geology*. Washington, D.C.: American Geophysical Union.

Journal, A., & Huijbregts, J. (1978). *Mining geostatistics*. London: Academic Press.

Karaoulis, M., Tsourlos, P., Kim, J., & Revil, A. (2014). 4D time-lapse ERT inversion: introducing combined time and space constraints. *Near Surface Geophysics*, 12, 25-34.

Kaufmann, O., Deceuster, J., & Quinif, Y. (2012). An electrical resistivity imaging-based strategy to enable site-scale planning over covered palaeokarst features in the Tournaisis area (Belgium). *Engineering Geology*, 133-134, 49-65.

Keller, G., & Frischknecht, F. (1966). *Electrical methods in geophysical prospecting*. Oxford, UK: Pergamon Press.

Kim, J., Yi, M., Park, S., & Kim, J. (2009). 4-D inversion of DC resistivity monitoring data acquired over a dynamically changing earth model. *Journal of Applied Geophysics*, 68, 522-532.

Kozlov, B. (2012). Loi d'Archie dans les micromodèles. Thèse de doctorat géophysique. Université Pierre et Marie – Paris 6

Kunetz, G. (1966). Principles of direct current resistivity prospecting. Dans B.Trondheim (Éd.), *Principles of Direct Current Resistivity Prospecting* (pp. 70-71). Geopublication Associates.

Lacanette, D., Malaurent, P., Caltagirone, J., & Brunet, J. (2007). Étude des transferts de masse et de chaleur dans la grotte de Lascaux : Le suivi climatique et le simulateur. *Karstologia*, 50, 19-30.

Largueche, F. (2006). Estimating soil contamination with kriging interpolation method. *American Journal of Applied Sciences*, 3 (6) 1894-1898.

Lastennet, R. (1994). *Rôle de la zone non saturée dans le fonctionnement des aquifères karstiques*. (éd. Thèse Doctorale). Avignon: Université Avignon et Pays de Vaucluse.

Leroi-Gourhan, A. (1965). *Préhistoire de l'art occidental*. (éd. 1st). Paris: Mazenot.

Leroi-Gourhan, A., & Allain, A. (1979). *Lascaux inconnu, supplément à Gallia préhistoire n°XII*. Editions du CNRS.

Leroi-Gourhan, A., & Evin, J. (1979). Les datations de Lascaux. Dans *Lascaux inconnu, supplément à Gallia Préhistoire n°XII* (pp. 75-80). Paris: CNRS.

Lin, C., & Moré, J. (1999). Newton's method for large-scale bound constrained problems. *SIAM Journal on Optimization*, 9, 1100-1127.

Lin, C., Weng, R., & Keerthi, S. (2008). Trust region newton method for large-scale logistic regression. *Journal of Machine Learning Research*, 9, 627-650.

Loke, M. (2004). *Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Notice d'utilisation de Res2Dinv.

Loke, M., & Barker, R. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.

Loke, M., Acworth, I., & Dahlin, T. (2003). A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*, 34, 182-187.

Loke, M., Chambers, J., Rucker, D., Kuras, O., & Wilkinson, P. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, 95, 135-

Loke, M., Dahlin, T., & Rucker, D. (2014). Smoothness-constrained time-lapse inversion of data from 3D resistivity surveys. *Near surface geophysics*, 12, 5-24.

Lopez, B. (2009). *Les processus de transfert d'eau et de dioxyde de carbone dans l'épikarst, Aide à la conservation des grottes ornées par le développement de nouvelles méthodologies pour l'étude de l'environnement des cavités*, Bordeaux. Thèse de doctorat. Université Bordeaux 1.

Lopez, B., Lastennet, R., Malaurent, P., & Denis, A. (2008). *The recharge features in karstic context. A case study from the Lascaux cave, France*. (éd. XXXVI International Association of Hydrogeologists Congress).

Lu, J., Sun, G., McNulty, S., & Amatya, D. (2005). A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern united states. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(3), 621-633.

Ma, R., McBratney, A., Whelan, B., Minasny, B., & Short, M. (2011). Comparing temperature correction models for soil electrical conductivity measurement. *Precision Agric*, 12, 55-66.

Malaurent, P., Brunet, J., Lacanette, D., & Caltagirone, J.-P. (2006). Contribution of numerical modelling of environmental parameters to the conservation of prehistoric cave paintings: the example of Lascaux Cave. *Conservation and Management of Archaeological Sites*, 8(2), 59-76.

Mangin, A. (1975). *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. Dijon: Thèse de Doctorat, Université de Dijon, 298 p.

Matheron, G. (1978). *Estimer et choisir : essai sur la pratique des probabilités*. Fontainebleau: École nationale supérieure des mines de Paris, coll. « Les Cahiers du Centre de morphologie mathématique de Fontainebleau ».

McNeill, J. (1980). Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction. Technical note TN-6 Géonics Limited.

McNeill, J. (1990). *Use of electromagnetic methods for groundwater studies*. Society of Exploration Geophysicists Investigations 5.

Michot, D., Benderitter, Y., Dorigny, A., Nicoullaud, B., King, D., & Tabbagh, A. (2003). Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, 39, 1138-1158.

Mol, L., & Preston, P. (2010). The writing's in the wall: a review of new preliminary applications of electrical resistivity tomography within archaeology. *Archaeometry*, 6(52), 1079-1095.

Ogilvy, R., Meldrum, P., Kuras, O., Wilkinson, P., Chambers, J., Sen, M., Tsourlos, P. (2009).

Automated monitoring of coastal aquifers with electrical resistivity tomography. *Near Surface Geophysics*, 7, 367-375.

Perrin, S. (2013). Cartographie GPS de la végétation et des sols à proximité de la grotte. Référence : Lascaux nouvelle version_121119.

Perrone, A., Lapenna, V., & Piscitelli, S. (2014). Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review. *Earth-Science Reviews*, 135, 65-82.

Peyrony, D. (1949). L'art pictural de la grotte de Lascaux et celui dit : « Levantin espagnol » . Dans *Bulletin de la Société préhistorique de France*, Tome 46 (p. 117).

Plagnes, V. (1997). *Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux*. (éd. Editions BRGM n°294). Montpellier: Thèse de Doctorat, Univ. Montpellier II.

Power, C., Jason , I., Karaoulis, M., Tsourlos, P., & Giannopoulos, A. (2014). Evaluating four-dimensional time-lapse electrical resistivity tomography for monitoring DNAPL source zone remediation. *Journal of Contaminant Hydrology*, 162-163, 27-46.

Quinn, J., Tomasko, D., & Kuiper, J. (2006). Modeling complex flow in a karst aquifer. *Sedimentary Geology*, 184(3-4), 343-351.

Rooij, R., Perrochet, P., & Graham, W. (2013). From rainfall to spring discharge: Coupling conduit flow, subsurface matrix flow and surface flow in karst systems using a discrete–continuum model. *Advances in Water Resources*, 61, 29-41. Doi : 10.1016/j.advwatres.2013.08.009

Sass, O., & Viles, H. (2010). Wetting and drying of masonry walls: 2D-resistivity monitoring of driving rain experiments on historic stonework in Oxford, UK. *Journal of Applied Geophysics*, 70, 72-83.

Schoeller, H. (1965). *Etude géologique, hydrogéologique et climatologique de la grotte de Lascaux pendant le cycle 1945-1965*. Gif-sur-Yvette: Ministère de l'Education Nationale - centre de recherches hydrobiologiques Gif-sur-Yvette.

Schoeller, H. (1969). L'acide carbonique des eaux souterraines. *Bulletin Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, III, 32.

Sirieux, C., & Xu, S. (2014). *Mesures géophysiques sur le site de Lascaux (24) : détermination des limites de la zone de remplissage*. Bordeaux: I2M - Université de Bordeaux, N°2014-003.

Sirieux, C., Lastennet, R., Lataste, J., Marache, A., Lopez, B., & Malaurent, P. (2006). Caractérisation par traîné électrique de la zone de comblement épikarstique de la grotte ornée de Lascaux (France). Oujda: Colloque Maghrébin de Géophysique Appliquée.

Sirieux, C., Riss, J., Rey, F., Prétou, F., & Lastennet, R. (2014). Electrical resistivity tomography

to characterize a karstic Vauclisian spring: Fontaine d'Orbe (Pyrénées, France). *Hydrogeology Journal*, 22(4), 911-924.

Staff U.S. Salinity Laboratory. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. In L. A. Richards (Ed.), (éd. USDA agriculture handbook no. 60 (pp. 90)). Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.

Šumanovac, F., & Weisser, M. (2001). Evaluation of resistivity and seismic methods for hydrogeological mapping in karst terrains. *Journal of Applied Geophysics*, 47(1), 13-28.

Thornthwaite, C. (1948). An Approach Toward a Rational Classification of Climate. *Geograph. Rev*, 38 (1), 55-94.

Toto, E., Basri, M., Al-Hajari, S., Hafid, M., Benammi, M., & Ibenbrahim, A. (2008). Karst and saltwater intrusion mapping using electric resistivity tomography: case study at the site of Cap Rhir, Southern Morocco. *Near Surface Geophysics*, 6(5), 321-329.

Tsourlos, P., & Tsokas, G. (2011). Non-destructive Electrical Resistivity Tomography Survey at the South Walls of the Acropolis of Athens. *Archaeological Prospection*, 18, 173-186.

Turc, L. (1961). Evaluation de besoins en eau d'irrigation. *Ann. Agron*, 12, 13-49.

Valois, R. (2011). *Caractérisation structurale de morphologies karstiques superficielles et suivi temporel de l'infiltration à l'aide des méthodes électriques et sismiques*. Thèse de doctorat, Paris: Université Paris 6.

Vouvé, J. (1965). *Rapport préliminaire en vue d'une campagne de sondages aux environs immédiats de la grotte de Lascaux*. Périgueux: Ministère des Affaires Culturelles.

Vouvé, J. (1966). *Rapport du 5 septembre 1966 sur l'étude géologique des alentours immédiats des salles ensablées*. Périgueux: Ministère des Affaires Culcurelles.

Vouvé, J. (1967). *Contribution à la connaissance du contexte géologique, hydrogéologique et morphologique de la zone sud-ouest du réseau supérieur de la grotte de Lascaux*. Périgueux: Ministère des Affaires Culturelles.

Vouvé, J. (1968a). *Les possibilités d'aménagement du circuit interne pour la visite de la grotte*. Périgueux: Ministère des Affaires Culturelles.

Vouvé, J. (1968b). *Travaux préliminaires dans le cadre de l'aménagement d'un nouvel accès dans la grotte de Lascaux*. Périgueux: Ministère des Affaires Culturelles.

Vouvé, J. (1975). *Etude en hydrogéologie et paléohydrogéologie karstiques*. Bordeaux: Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1.

Wilkinson, P., Meldrum, P., Kuras, O., Chambers, J., Holyoake, S., & Ogilvy, R. (2010). High-resolution Electrical Resistivity Tomography monitoring of a tracer test in a confined aquifer. *Journal of Applied Geophysics*, 70(4), 268-276.

- Williams, P. (2008). The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. *International Journal of Speleology*, 37(1), 1-10.
- Wolke, R., & Schwetlick, H. (1988). Iteratively reweighted least squares algorithms, convergence analysis, and numerical comparisons. *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computations*, 9, 907-921.
- Xu, S., Sirieix, C., Ferrier, C., Lacanette-Puyo, D., Riss, J., & Malaurent, P. (2015). A geophysical tool for the conservation of a decorated cave – a case study for the Lascaux cave. *Archaeological Prospection, online in Wiley Online Library*.
- Xu, S., Sirieix, C., Riss, J., & Malaurent, P. (2014). How to characterize a recharge area by ERT Time-Lapse and cluster analysis – Application to Lascaux Cave. *20th European meeting of environmental and engineering geophysics*. Athens..
- Zhou, D., Arbabi, S., & Stenby, E. (1997). A percolation study of wettability effect on the electrical properties of reservoir rocks. *Transport in Porous Media*, 29, 85-98.
- Zhou, W., Beck, B., & Adams, A. (2002). Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environmental Geology*, 42(8), 922-928.
- Zhou, W., Beck, B., & Stephenson, J. (2000). Reliability of dipole-dipole electrical resistivity tomography for defining depth to bedrock in covered karst terranes. *Environmental Geology*, 39, 760-766.

Annexes

Liste des annexes

Annexe I.	Forages de J. Vouvé	195
Annexe II.	Résultats des analyses statistiques du profil I-50	236
Annexe II.A.	Composantes principales issues de l'ACP (en données centrées réduites)	236
Annexe II.B.	Matrice des saturations (<i>somme des carrés des coefficients de corrélation</i>)	237
Annexe II.C.	Répartition spatiale des blocs selon les résultats de CHA et dendrogramme associé – 5 classes pour le profil I-50	238
Annexe II.D.	Répartition spatial des blocs selon les résultats de CHA et dendrogramme associé – 7 classes pour le profil I-50	239
Annexe II.E.	Paramètres statistiques pour les résistivités de chaque classe issue de la CHA.....	240
Annexe III.	CHA pour le profil I-100.....	241
Annexe III.A.	Répartition spatiale des blocs selon les résultats de CHA et le dendrogramme associé.....	241
Annexe III.B.	Paramètres statistiques pour les résistivités de chaque classe issue de la CHA.....	242
Annexe III.C.	Volume moyen récolté dans la sas1 au cours des 18 jours précédant une mesure en fonction du volume moyen du jour de mesure	243
Annexe IV.	CHA du profil II-50	244
Annexe IV.A.	Répartition spatiale des blocs selon les résultats de CHA et le dendrogramme associé.....	244
Annexe IV.B.	Paramètres statistiques pour les résistivités de chaque classe issue de la CHA.....	245
Annexe V.	CHA du profil II-100	246
Annexe V.A.	Répartition spatiale des blocs selon les résultats de CHA et le dendrogramme associé.....	246
Annexe V.B.	Paramètres statistiques pour les résistivités de chaque classe issue de la CHA.....	247
Annexe VI.	La loi d'Archie	248
Annexe VII.	Validations des modèles géostatistiques par les données de forages et de pénétrromètres	249
Annexe VII.A.	Tableau synthétique des coordonnées des forages et la validation des modèles par un critère binaire.....	249
Annexe VII.B.	Résistivités et probabilités extraites des modèles géostatistiques pour comparaison aux données des forages ou des pénétrromètres.....	250
VII.B.1.	Forage Sa	250

VII.B.2.	Forage Sb.....	251
VII.B.3.	Forage Sc.....	252
VII.B.4.	Forage Sd.....	253
VII.B.5.	Forage Sd'.....	254
VII.B.6.	Forage SG.....	255
VII.B.7.	Forage S0.....	256
VII.B.8.	Forage S1.....	257
VII.B.9.	Forage S2.....	258
VII.B.10.	Forage S3.....	259
VII.B.11.	Forage S4.....	260
VII.B.12.	Forage S5.....	261
VII.B.13.	Forage S6.....	262
VII.B.14.	Forage S7.....	263
VII.B.15.	Forage S8.....	264
VII.B.16.	Forage S9.....	265
VII.B.17.	Forage S11.....	266
VII.B.18.	Forage S12.....	267
VII.B.19.	Forage S14.....	268
VII.B.20.	Forage S16.....	269
VII.B.21.	Forage S18.....	270
VII.B.22.	Forage S20.....	271
VII.B.23.	Pénétrromètre P1.....	272
VII.B.24.	Pénétrromètre P2.....	273
VII.B.25.	Pénétrromètre P4.....	274
VII.B.26.	Pénétrromètre P5.....	275
VII.B.27.	Pénétrromètre P6.....	276
VII.B.28.	Pénétrromètre P7.....	277
VII.B.29.	Pénétrromètre P10.....	278
VII.B.30.	Pénétrromètre P11TER.....	279

Annexe I. Forages de J. Vouvé

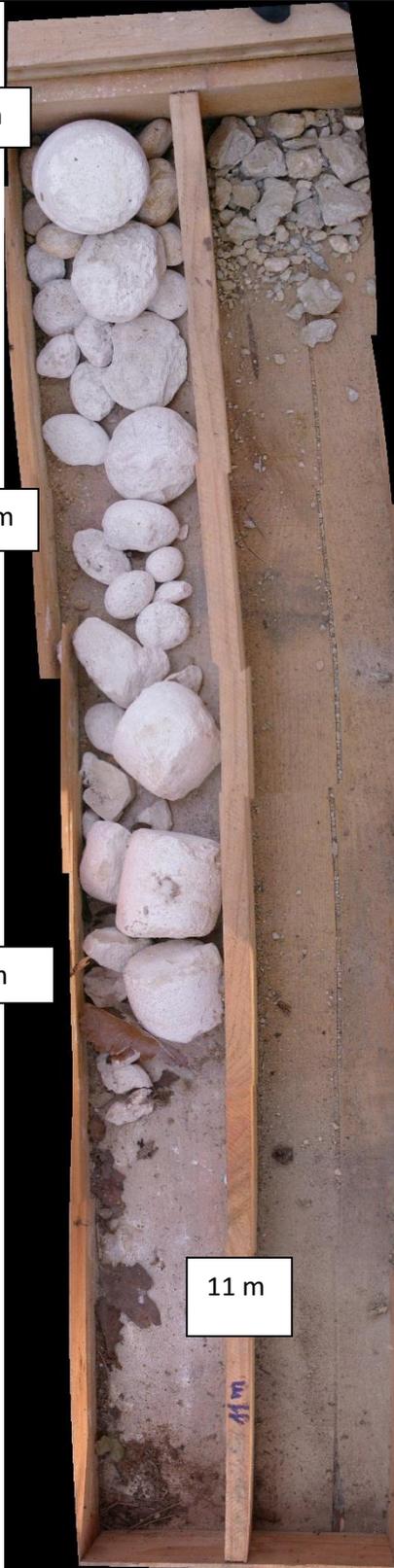
Les tableaux de cette annexe présentent les photos, les descriptions et les intitulés des forages, réalisés par J. Vouvé couvrant les années 1966/1967. Chaque page contient les informations ne concernant qu'une caisse d'un forage donné dont les carottes ont pu être distribuées sur plusieurs caisses.

Les noms des forages sont définis par comparaison des descriptions de J. Vouvé dans ses rapports et des descriptions des matériaux trouvés dans les caisses. Les photos sont combinées sous format de panorama à l'aide du logiciel Hugin®. Sur chaque photo, les profondeurs sont également indiquées d'après les repères relevés sur les caisses.

Nom lu sur caisse : S20 II	Nom supposé : S20 (CSL1032)	
Position : incertaine	Année : 1967/1966 ?	
Profondeur atteinte : 4,5m		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
	<p>0-0,05 : Terre végétale</p> <p>4,50 : calcaire compact et joints sablo-marneux</p>	<p>Aucune profondeur mentionnée sur la caisse,</p> <p>Tronçon de calcaire de petits diamètres-calcaire plus compact</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*suite de S20-I</p>

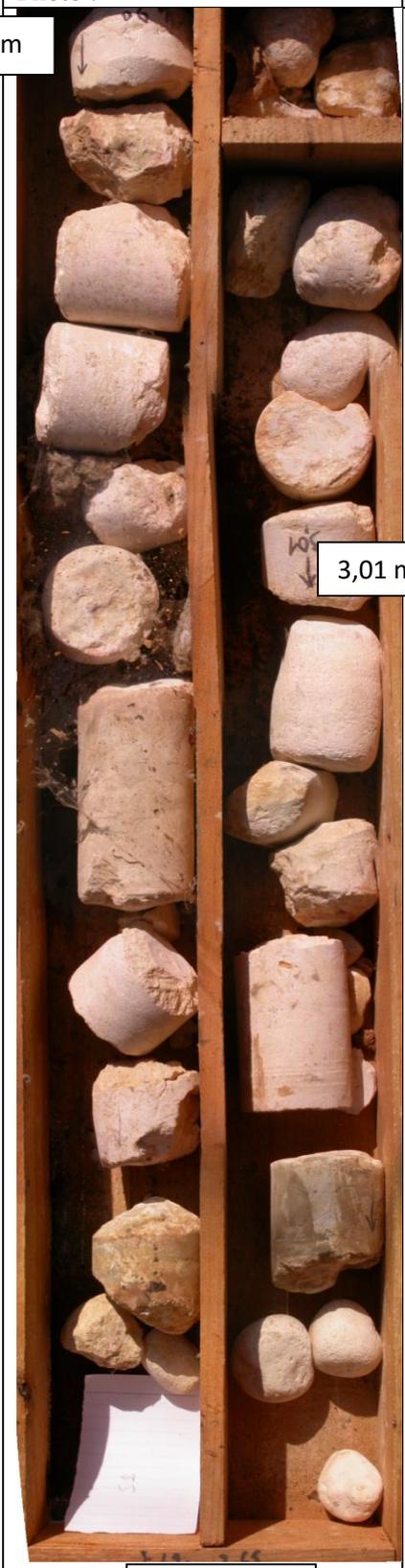
Nom lu sur caisse : S14 a	Nom supposé : S14(CSL1032)	
Position :	Année : 1967	
Profondeur atteinte : 7,9m		
Photo	Description Vouvé	Description actuelle
	<p>0-1,2m : terre végétale et argile sableuse</p> <p>1,50m : calcaire blanc compact</p> <p>1,60m : sable et calcaire en débris</p> <p>1,90m : calcaire compact blanc</p> <p>2,30m : blocs calcaire disloqués et remplissage argileux</p> <p>5,4m : blocs calcaire disloqués avec remplissage argileux</p> <p>5,6 m : calcaire compact (bloc ou épéron de la paroi ?)</p> <p>7,6m : sable calcaréo-argileux jaune avec silex</p> <p>7,61m : boyau dégagé par le Spéléo-club de Périgueux</p>	<p>Feuille au début de la casse ;</p> <p>Début inconnu, de 0 à 5,6m</p> <p>Jusqu'à 5,6m : calcaire blanc</p> <p>5,6-7,6m : même calcaire mangé avec des fragments de calcaire</p> <p>7,6-7,9m : même calcaire avec des passages sombres</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*il manque le début du forage</p> <p>*position corrigée +/- 1m</p>

Nom lu sur caisse : S A	Nom supposé : inconnu	
Position : incertaine	Année : incertaine	
Profondeur atteinte : 11,5m		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>Début de caisse : Grès avec coquille</p> <p>Après : carotte blanche, élément de forme sphérique (matériau tendre)</p> <p>A 9m : sac en plastique, matériau fin non cohérent</p> <p>9-11m : Calcaire cassé</p> <p>11-11,5 : mélangé avec dépôt noir (autre que la carotte)</p>
		<p>Commentaire *Prélèvement de calcaire avant 9m</p>

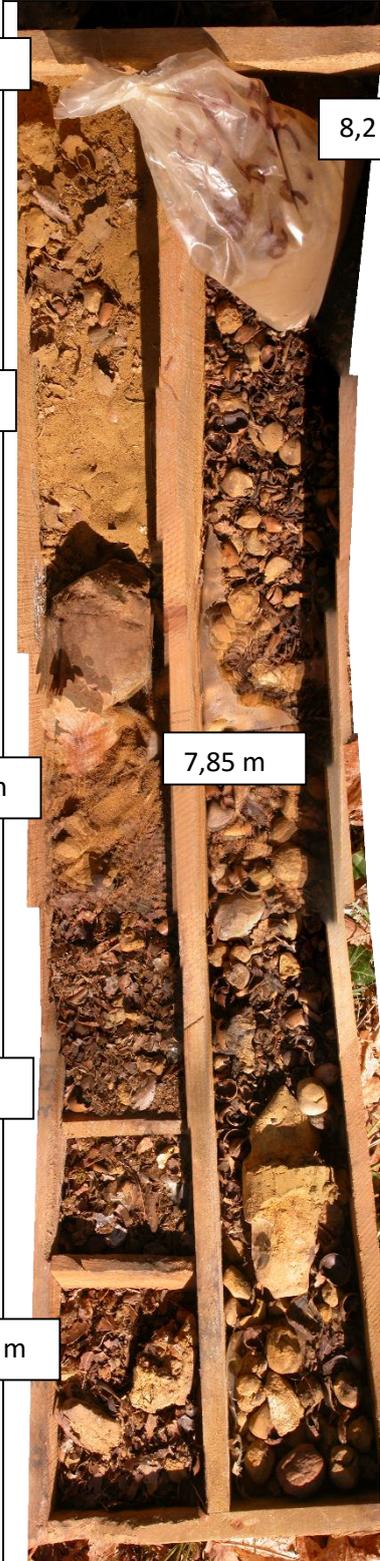
Nom lu sur caisse : S D	Nom supposé : Sd ?	
Position : sud escalier	Année : 1966	
Profondeur atteinte : 11m		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>Casse vide à 8m</p> <p>8 à 9,1m : calcaire blanc</p> <p>9,1-9,8m : calcaire blanc avec des carottes sphérique</p> <p>9,8-11m : perdu</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*pr éèvement entre 8 et 9,1m</p> <p>*position mentionné dans le rapport de 1966, au sud de l'escalier d'entrée</p>

Nom lu sur caisse : S0-I	Nom supposé : S0 (CSL1032)	
Position :	Année : 1967	
Profondeur atteinte : +7m		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
	Apparaître dans le rapport CSL1032 mais pas de description	<p>Début inconnu</p> <p>Avant 2m : calcaire avec feuilles</p> <p>2-3,8m : petit fragment calcaire jaunâtre</p> <p>3,8-5,6m : (prochain casse) : belle carotte de calcaire blanc</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*Prélèvement vers 2m, *au milieu entre 3,8-5,6m, *après 6,7m *position mentionné dans le rapport de 1967</p>

Nom lu sur caisse : S0-II	Nom supposé : S0 (CSL1032)	
Position :	Année : 1967	
Profondeur atteinte : +7m		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>3,8-5,6m : (casse précédente) : belle carotte de calcaire blanc</p> <p>5,6-5,7 : calcaire blanc</p> <p>5,7-6m : carotte diamètre diminuée</p> <p>6-7m : même diamètre, calcaire blanc</p> <p>7m à fin : deux blocs de silex</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*suite de S0-I</p> <p>*prélèvement après 6,7m</p>

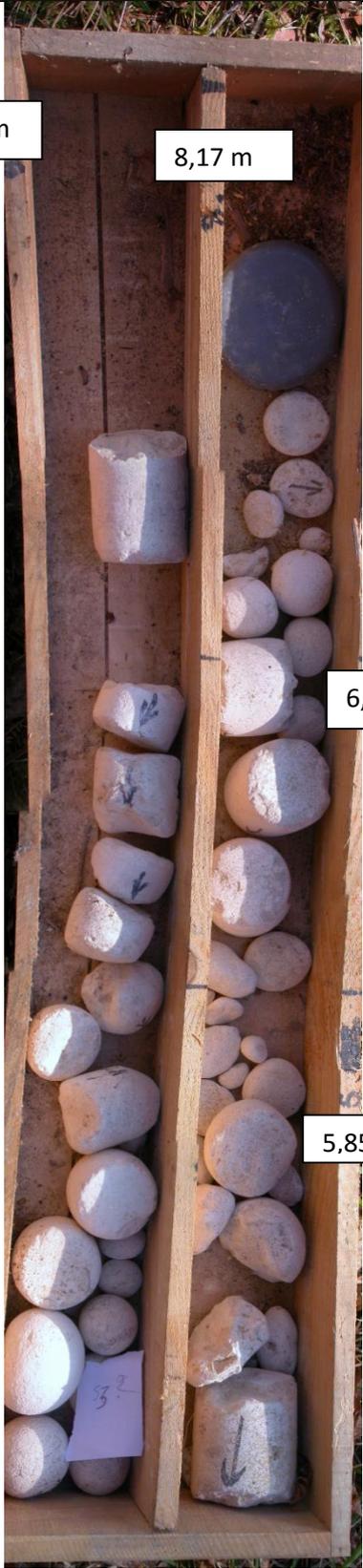
Nom lu sur caisse : S1	Nom supposé : S1 ?	
Position : ver Bellevue	Année : 1966 ?	
Profondeur atteinte : 40m ?		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>1,90 2,65-3,01 : calcaire de grand diamètre + 2 galets au début de la casse</p> <p>3,01-4,9 : même calcaire tout le long</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*Prélèvement à 3,01m</p> <p>*Position mentionné dans le rapport de 1966 vers Bellevue</p> <p>*Profondeur dans le rapport : 40m</p>

Nom lu sur caisse : S1-4	Nom supposé : S1	
Position :	Année	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		Perdu
		<p>jusqu'à 10,7 : calcaire blanc</p> <hr/> <p>Commentaire</p> <p>*Prélèvement entre 9,1 et 9,307 *suite à S1</p>

Nom lu sur caisse : S2	Nom supposé : S2	
Position : Bellevue ?	Année : 1966 ?	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>3,3m : caillot jaune avec feuille</p> <p>3,3-3,5 : feuille 3,5-3,7 feuilles</p> <p>3,7-4,7 : feuille avec des poudres argile ?</p> <p>4,7-5,65 : poudre + un bloc de silex</p> <p>5,65-7,85 : silex dans l'argile</p> <p>7,85-8,2 : feuille, à la fin, il y a un sac avec des poudres d'argile</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*Mentionné dans le rapport de 1966, placé vers Bellevue</p> <p>*Profondeur décrite : 'jusqu'à calcaire'</p> <p>*prélèvement entre 4,7-5,65m</p> <p>*si position correct, ce forage est dans la zone de remplissage</p>

Nom lu sur caisse : S2 suite	Nom supposé : S2 + S30	
Position :	Année	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>10-12,2 : suite du S2, argile sec ?</p> <p>S39 à la suite : 0-2,7 : terre et argile sablo</p> <p>2,7-4,5 : argile + feuille</p> <p>4,5-8,4 : perdu</p>
		Suite de S2

Nom lu sur caisse : S3	Nom supposé : S3	
Position : ?	Année : ?	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>0-0,8, : calcaire ?</p> <p>0,8-2,4 : calcaire + debris</p> <p>2,4- 2,8 : calcaire blanc</p> <p>2,8- 4 : carotte de calcaire de petit diamètre + un bouchon</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*pas mentionné sur le rapport de 1966 ni de 1967</p>

Nom lu sur caisse : S3 II	Nom supposé : S3	
Position :	Année	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>Jusqu'à 5,85 : calcaire blanc</p> <p>5,85-6,37 : caillots arrondi de calcaire blanc</p> <p>6,37-8,17 : calcaire blanc avec un embout</p> <p>8,17-9,7 : même calcaire</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*suite de S3</p> <p>*prélèvement de calcaire avant 5,85m</p> <p>*prélèvement un peu avant 8,17m</p>

Nom lu sur caisse : S4, S37, S38	Nom supposé : S	
Position :	Année	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		Debris de différents couleurs

Nom lu sur caisse : S6b	Nom supposé : S6(CSL1032)	
Position :	Année : 1967	
Profondeur atteinte : 10,5m		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
	0-0,3m : terre végétale et cailloutis calcaire	4,15-4,9 : carotte de calcaire blanc de grand diamètre
	5,45= calcaire blanc compact, très fracturé	4,9-5,45 : même calcaire + calcaire cassé entre deux carottes
	6,25= idem gris jaune, fossilifère	5,45-5,90 : calcaire cassé entre deux échantillons cylindriques
	6,65= blanc calcaire fissuré avec recalcification complète	5,9-6,18 : calcaire cylindrique
	7,90= idem avec quelques joints sablo-marneux	6,18-6,25 : le même calcaire
	8,0= vide,	
	8,40= calcaire,	
	8,50= vide,	
	10,50= calcaire compact jaune à rose d'écritique	
		Commentaire
	*calage avec rapport 1967	
	*	

Nom lu sur caisse : S6c	Nom supposé : S6(CSL1032)	
Position :	Année : 1967	
Profondeur atteinte : 10,5m		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
	0-0,3m : terre végétale et cailloutis calcaire	6,25-6,35 : calcaire blanc
	5,45= calcaire blanc compact, très fracturé	6,35-6,85 : calcaire blanc ; recalcification
	6,25= idem gris jaune, fossilifère	6,85-7,10 : calcaire fauve jaune
	6,65= blanc calcaire fissuré avec recalcification complète	7,10-7,55 : calcaire blanc
	7,90= idem avec quelques joints sablo-marneux	7,55-7,98 : calcaire
	8,0= vide, 8,40= calcaire, 8,50= vide,	7,98-8 : vide 8-8,4 : calcaire 8,4-8,5 : vide
	10,50= calcaire compact jaune à rose d'écritique	
		Commentaire
		*suite de S6 *prélèvement entre 6,35 et 6,85m *prélèvement entre 8 et 8,4m

Nom lu sur caisse : S6d	Nom supposé : S6(CSL1032)	
Position :	Année : 1967	
Profondeur atteinte : 10,5m		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
	<p>0-0,3m : terre végétale et cailloutis calcaire</p> <p>5,45= calcaire blanc compact, très fracturé</p> <p>6,25= idem gris jaune, fossilifère</p> <p>6,65= blanc calcaire fissuré avec recalcification complète</p> <p>7,90= idem avec quelques joints sablo-marneux</p> <p>8,0= vide,</p> <p>8,40= calcaire,</p> <p>8,50= vide,</p> <p>10,50= calcaire compact jaune à rose d'écritique</p>	<p>8,6-8,95 : beau tronçon de calcaire jaune d'écritique</p> <p>8,95- fin de 1 rang : calcaire</p> <p>10,50 : rien</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*suite de S6</p> <p>*précèdement un peu avant 8,95 et entre 8,95-9,35m</p> <p>*les échantillons retrouvés entre 8,6 et 10,5m ont pu être déplacés car J, Vouvé mentionne « vide » à 8,5m</p>

Nom lu sur caisse : S7c	Nom supposé : S7	
Position :	Année : 1967 ?	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
	0-0,4m : terre végétale argileuse	5,6-milieu de 1 rang de caisse : carotte cassée
	1,5m : calcaire blanc complet	Jusqu'à 6,8m : beau tronçon de calcaire blanc de petits diamètres
	4,10= calcaire blanc compact	6,9-7,7 : tronçon cassé en petites pièces
	8,50= idem avec quelques joints sablo-marneux	7,7-7,8 : tronçon de taille de 10cm
	8,60= vide	
	9,0 = sable argileux jaune à marron clair	Commentaire
	10,2m : sable enrobant des blocs calcaires	*On n'a pas trouvé la caisse au-dessus et en-dessous

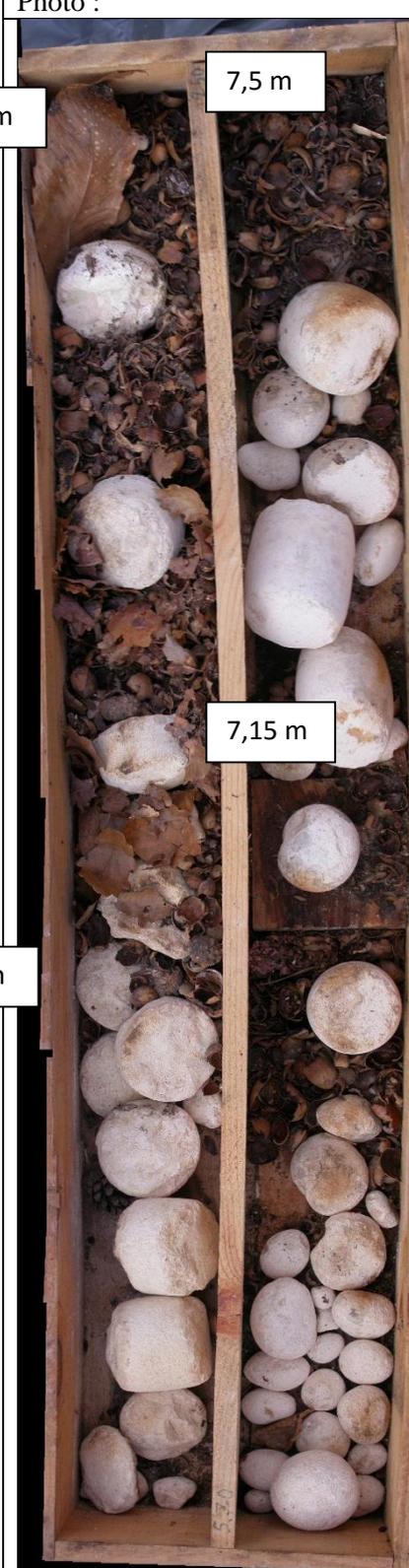
Nom lu sur caisse : S8 bis	Nom supposé : S8(CSL1032)	
Position :	Année	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
	<p>0-0,70= terre végétale argileuse sombre, caillouteuse,</p> <p>0,90= argile jaune plastique,</p> <p>1,76= silt calcaréo-siliceux blanc, farineux,</p> <p>2,40= argile sableux et petits blocs calcaire,</p> <p>3,55= argile sableux,</p> <p>5,15=calcaire blanc compact au sommet avec de nombreux joints sablo-marneux à la base</p> <p>5,80=argile et petits blocs calcaire</p> <p>7,95=calcaire compact avec joints sablo-marneux</p> <p>8,05=sable siliceux jaune</p> <p>11,45=calcaire blanc compact peu fissuré avec joints sablo-marneux</p>	<p>4,6-5,15m : calcaire</p> <p>5,15-5,8m : calcaire avec argile</p> <p>5,8-7-7,95 : tronçon de calcaire de cm</p> <p>7,95-8,2 : calcaire</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*suite du S8</p> <p>*Prédèvement entre 4,6-5,15m</p> <p>*Prédèvement entre 5,15-5,8m</p> <p>*prédèvement entre 7,95-8,2m</p>

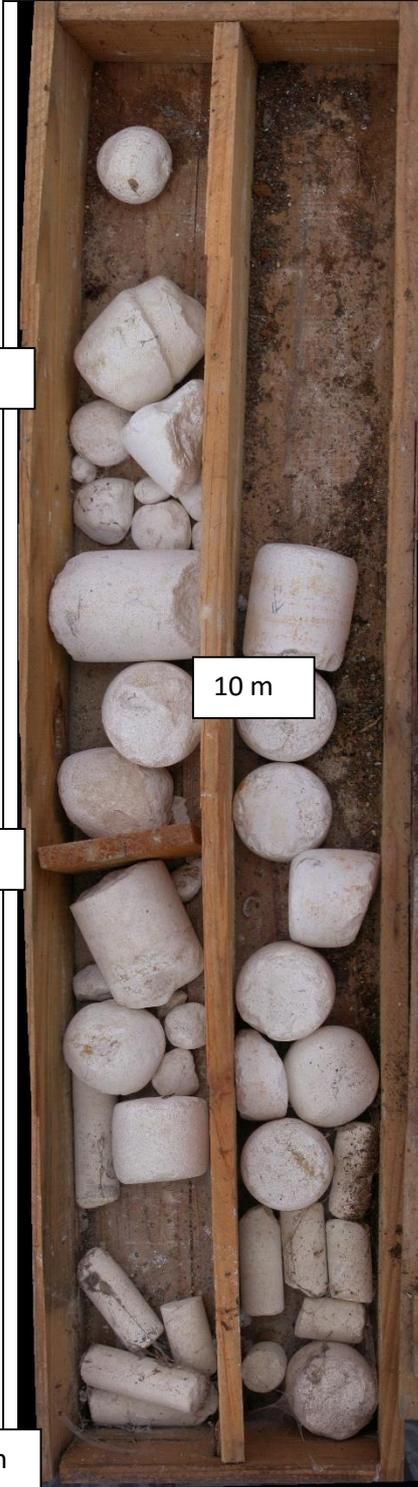
Nom lu sur caisse : S11-1		Nom supposé : S11(CSL1032)	
Position :		Année : 1967	
Profondeur atteinte : 7,61m			
Photo :		Description Vouvé	Description actuelle
		0- 0,40= terre végétale argileuse avec débris calcaire,	0-0,3 0,3-1,1 1,1-1,46
		1,50= sable argileux et petits cailloux calcaire,	1,46-1,53 1,53-1,96 1,96-2,3 : terre + argile
		7,60= sable argileux jaune avec quelques passées franchement argileuses	2,3-4,3 : crayeux blanc
		7,61= calcaire compact	4,3-5,14 : argile
			5,14-6,3 6,3-6,85 : argile
			Après : deux sac
			Commentaire
			*Prélèvement entre 1,75-1,95m *pas d'échantillon en profondeur

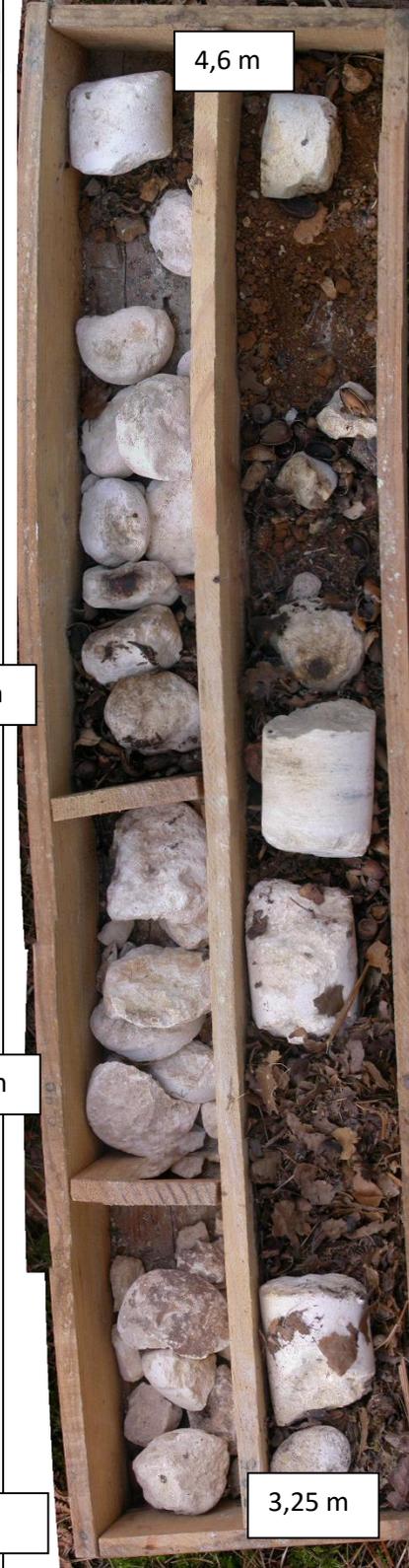
Nom lu sur caisse : S18	Nom supposé : S18	
Position :	Année : 1967 ?	
Profondeur atteinte : 1,21m		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
	0-1,2 : terre végétale argileuse au sommet argile et cailloutis calcaire à la base 1,21 : calcaire compact	Rien au début Cinq parties de débris calcaire
		Commentaire *caisse mal conservé

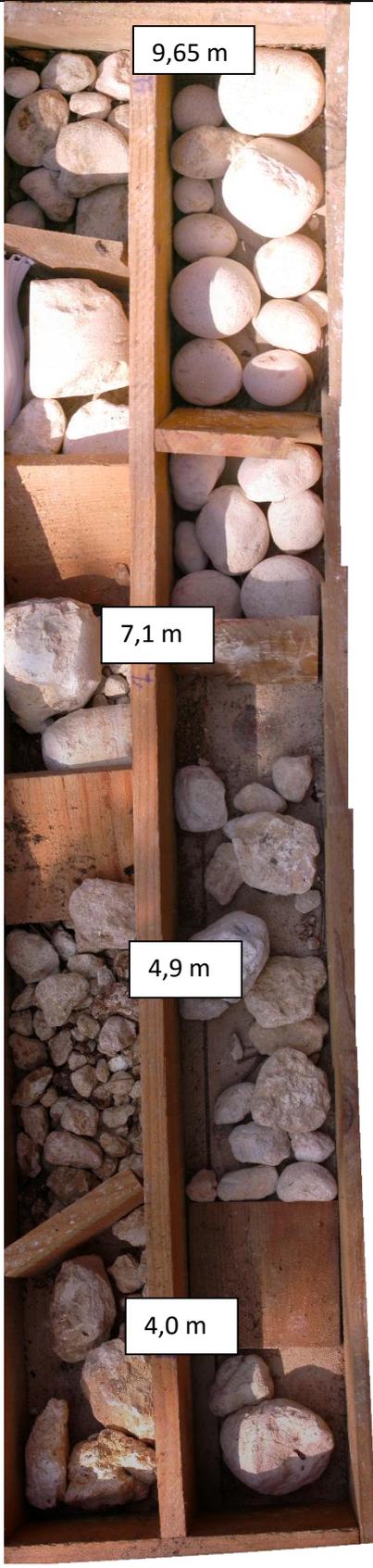
Nom lu sur caisse : Sa	Nom supposé : Sa CGL66	
Position :	Année : 1966	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
	<p>D'après la coupe dans le rapport de CGL66, ce sondage est situé à 8m du pluviomètre enregistreur,</p> <p>Une falaise présente un surplomb de 5m et sa base est à 13m,</p>	<p>0-1,20 : un tronçon de calcaire blanc</p> <p>1,20-2,07 : tronçon de même diamètre mais plus court</p> <p>2,07-3,85 : matériau non cohérent, poudre de carotte</p> <p>3,85 : blocs arrondis, galet des matériaux tendres</p> <p>3,85- fin de caisse : tronçon de même diamètre plus court</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*Décrit dans le rapport de CGL66 avec une coupe ;</p> <p>*Prélèvement entre 0-1,29m</p> <p>*Prélèvement entre 3,07-3,85m</p> <p>*Prélèvement entre 3,85-7,72m</p>

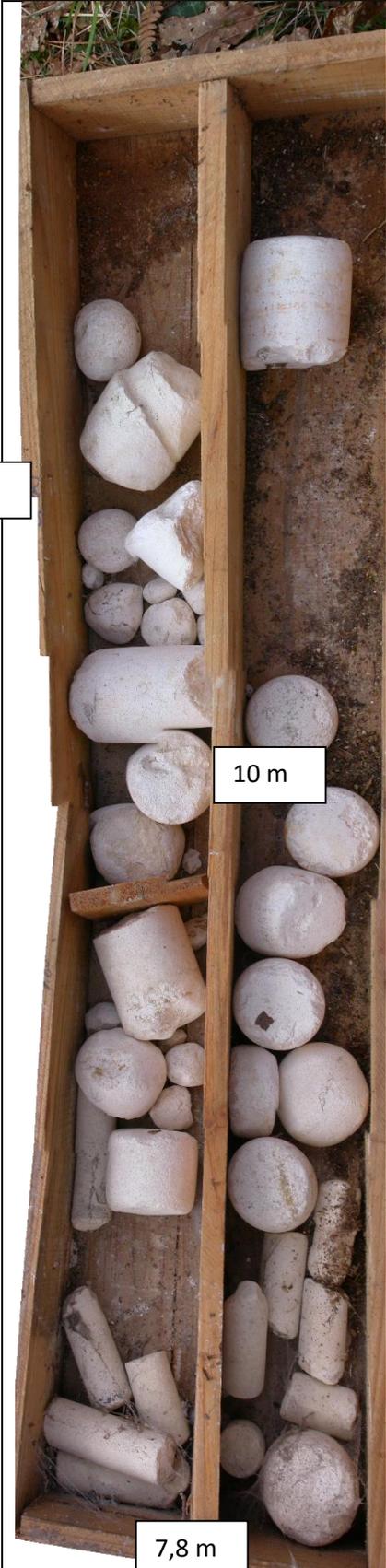
Nom lu sur caisse : Sa2	Nom supposé : Sa CGL66	
Position :	Année : 1966	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>Début à 7,27 : tronçon de bloc</p> <p>7,27-8,10 : même diamètre mais longueur moins de 5 cm</p> <p>8,10 - : tronçon même diamètre</p> <p>Partie d'1m : tronçon de calcaire de même diamètre, un côté noir</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*suite du Sa</p> <p>*Prélèvement entre 7,72 et 8,1m</p>

Nom lu sur caisse : Sb	Nom supposé : Sb CSL2213	
Position : sud escalier	Année : 1966	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>4,60-5,70 : bloc de calcaire + feuille</p> <p>5,70-7,15 : galet rond</p> <p>7,15-7,50 : carotte en tonneau</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*suite du Sb</p>

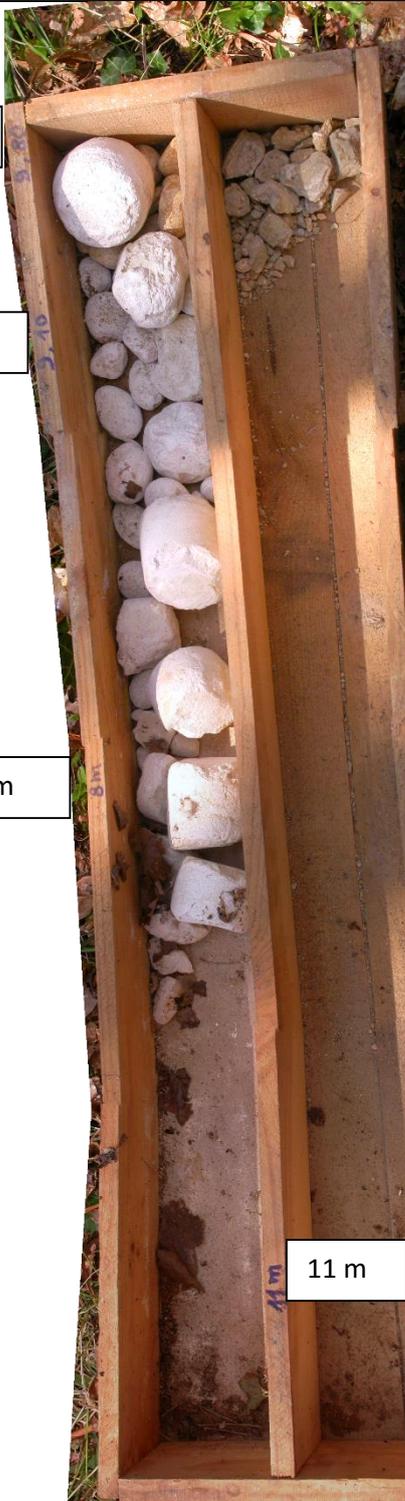
Nom lu sur caisse : Sb3	Nom supposé : Sb CSL2213	
Position :	Année : 1966	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>7,5 – 7,8 :</p> <p>7,8-8,8</p> <p>8,8-10</p> <p>Calcaire partout mais des carottes de deux diamètres</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*Suite du Sb</p>

Nom lu sur caisse : SbI	Nom supposé : Sb CSL2213	
Position :	Année : 1966	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>0-0,9 0,9-1,70 : bloc de calcaire cassé 1,7-3,2 : calcaire 3,2-3,25 3,25-4,6 : 4 tronçon de calcaire avec débris</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*1^{ère} caisse de Sb *Prélèvement entre 3,25-4,6m</p>

Nom lu sur caisse : Sc1-II	Nom supposé : Sc CSL2213	
Position :	Année : 1966	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>Début de caisse : petit bloc de calcaire</p> <p>Avant 4m : tronçon de bloc calcaire</p> <p>4-4,9 : calcaire</p> <p>4,9-7,1 : calcaire fracturé</p> <p>7,1-9,65 (?) : galets arrondis</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*Forage supposé comme Sc mentionné dans le rapport CSL2213</p> <p>*Prélèvement entre 3,3-4m</p> <p>*Prélèvement entre 4 et 4,9m</p>

Nom lu sur caisse : Sc3	Nom supposé : Sc CSL2213	
Position :	Année : 1966	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>7,5 – 7,8 : carotte de petit diamètre</p> <p>7,8- 10 : tronçon de calcaire, diamètre m élarg é</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*Suite du Sc</p>

Nom lu sur caisse : ScII	Nom supposé : Sc CSL2213	
Position :	Année : 1966	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>10,0 : début sable-argileux</p> <p>10,2 : arrêt sur calcaire²</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*suite du Sc</p> <p>*Prélèvement entre 9,65 et 10,2m</p>

Nom lu sur caisse : SD	Nom supposé : Sd CSL2213	
Position : coupe dd'	Année : 1966	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>Début -8m : vide</p> <p>8- 9,10 – 9,8 : trouçon de calcaire avec galets arrondis</p> <p>9,8 -11 – fin : vide</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*Ce forage est mentionné dans le rapport de Vouvé CSL2213-1966, Il se situe au sud de l'escalier actuel, *Prélèvement entre 8 et 9,1m</p>

Nom lu sur caisse : Sd'	Nom supposé : Sd' CSL2213	
Position :	Année : 1966	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		0-0,6 0,6-1 1-2 2-3 3-3,5 : un peu calcaire 3,5-3,9 4,10 : début sable argileux 4,1-5,8 5,8-6 6-7,3 Débris et feuilles partout
		Commentaire *Ce forage est mentionné dans le rapport de CSL2213, un peu au Nord du forage Sd, Les deux forages montre une coupe dd' *Prélèvement entre 1 et 2m *Prélèvement entre 3,5 et 3,9m Prélèvement entre 3,9 et 4,1 m (poche d'argile)

Nom lu sur caisse : Sd' 2	Nom supposé : Sd' CSL2213	
Position : coupe dd'	Année : 1966	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>7,30-10 : sable</p> <p>10-11 :</p> <p>11 – fin : galets ronds dans l'argile, calcaire cristallin</p> <p>Interprétation JR : zone d'alluvionnement dans le karst</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*Suite du Sd</p> <p>*Prélèvement entre 7,3 et 10m</p> <p>Prélèvement entre 10 et 11m</p>

Nom lu sur caisse : Sf	Nom supposé : Sf	
Position :	Année : 1966 ?	
Profondeur atteinte : 9m ?		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>Début à 3 : sac d'argile 3-4 : argile 4-5 : argile 5-6,6 : argile 6,6-7 :</p> <p>9m : tête de tarière à main</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*Ce forage apparait dans le rapport de 1966 mais pas de description,</p> <p>*Prélèvement entre 3 et 4m</p>

Nom lu sur caisse : Sg	Nom supposé : Sg ?	
Position :	Année : 1966 ?	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
	9 m	<p>5,7-6,3 : un peu de sable</p> <p>6,3-8,10 : perdu</p> <p>8,10-9 : tronçon de très petit diamètre + sac plastique cassé</p>
		<p>Commentaire</p> <p>*Pas de description dans les rapports de Vouvé</p>

Nom lu sur caisse : SG	Nom supposé : Sg ?	
Position :	Année : 1966 ?	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		Pas de profondeur indiquée tronçon de calcaire de moyenne diamètre

Nom lu sur caisse : SI	Nom supposé : Si ?	
Position :	Année : 1967 ?	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		0-0,2 : sol consolidé 0,2-0,5 : débris 0,5-1,05 : fragment et galette 1,05-1,45 -1,8 : calcaire
		Commentaire *Si est mentionné dans le rapport de 1966, situé pas loin du bâtiment des visiteurs à cette époque,

Nom lu sur caisse : Si	Nom supposé : S	
Position :	Année	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		Pas d'information utile

Nom lu sur caisse : SI3	Nom supposé : Si ?	
Position :	Année : 1966 ?	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		<p>E=10m ? 9,05-9,55 9,55- ? : beau tronçon de calcaire</p>

Nom lu sur caisse : SqII	Nom supposé : Sq	
Position :	Année	
Profondeur atteinte :		
Photo :	Description Vouvé	Description actuelle
		7,27
		8,10

Annexe II. Résultats des analyses statistiques du profil I-50

Annexe II.A. Composantes principales issues de l'ACP (en données centrées et réduites)

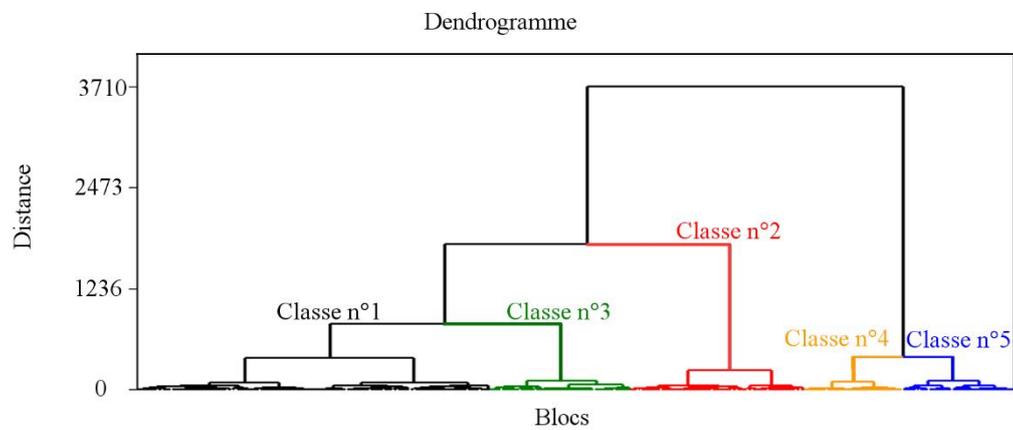
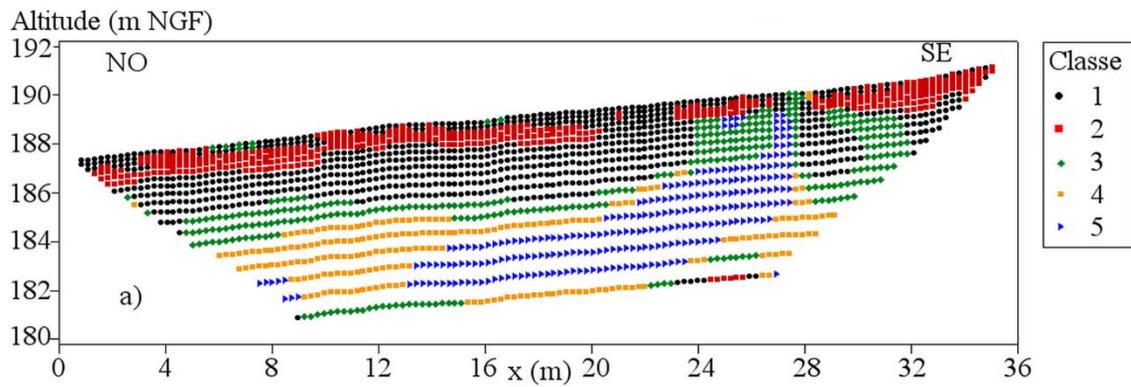
(Ces composantes sont les coefficients de corrélation des anciennes variables et des axes factoriels dans l'espace des individus)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21
06/06/2012	0.92	-0.09	0.27	0.19	-0.03	-0.18	0.07	-0.04	0.04	0.04	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.02
04/10/2012	0.95	0.23	0.16	-0.06	0.00	0.02	-0.01	0.02	-0.01	0.00	-0.01	0.00	0.04	0.02	-0.03	-0.02	0.00	-0.01	0.01	0.03	0.09
24/10/2012	0.95	0.27	-0.04	0.01	0.03	0.06	0.06	-0.05	0.08	0.02	-0.01	0.03	-0.04	-0.03	-0.01	0.02	-0.02	0.05	0.03	0.07	-0.02
29/11/2012	0.94	0.28	-0.11	0.04	0.06	0.00	0.07	-0.01	0.07	0.03	0.00	-0.03	-0.05	0.01	-0.02	0.01	0.00	-0.05	-0.05	-0.06	0.01
12/12/2012	0.92	0.24	-0.15	0.16	-0.07	-0.09	-0.10	0.01	-0.09	0.00	0.03	-0.07	-0.02	-0.03	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00
25/01/2013	0.97	-0.10	0.03	0.05	-0.08	0.02	-0.10	-0.08	0.05	-0.06	-0.04	0.00	-0.03	0.08	-0.02	0.02	-0.04	0.03	0.03	-0.04	0.00
22/02/2013	0.95	-0.14	0.07	0.12	-0.02	0.19	0.08	-0.01	-0.03	-0.04	0.11	-0.03	0.00	0.00	-0.01	-0.02	0.01	0.00	0.01	-0.01	0.00
04/03/2013	0.97	-0.14	-0.08	-0.04	0.05	0.01	-0.03	-0.01	0.02	0.06	0.01	-0.04	0.07	-0.01	-0.05	-0.04	-0.05	0.05	-0.06	0.00	-0.01
03/04/2013	0.94	-0.13	-0.03	0.15	0.20	0.02	-0.06	0.16	0.02	-0.01	-0.03	0.03	0.01	0.01	-0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
16/05/2013	0.97	-0.16	-0.08	-0.06	0.07	0.01	0.05	-0.04	-0.02	0.06	-0.04	-0.03	0.04	-0.05	0.00	0.01	-0.03	-0.04	0.08	-0.03	0.00
19/06/2013	0.96	-0.15	-0.08	-0.02	0.09	-0.08	0.11	-0.03	-0.08	-0.05	-0.03	0.04	-0.07	0.03	0.00	-0.06	-0.02	0.00	-0.01	0.02	0.01
02/07/2013	0.97	-0.13	-0.02	-0.15	0.00	-0.08	0.04	0.00	-0.03	-0.01	0.01	-0.07	-0.02	0.03	-0.05	0.08	0.07	0.03	0.00	0.01	0.00
16/07/2013	0.96	0.02	0.19	-0.07	0.07	-0.01	-0.08	-0.03	-0.06	0.05	0.06	0.07	-0.06	-0.05	0.02	0.04	-0.02	0.02	-0.01	-0.03	0.01
05/09/2013	0.95	0.20	0.15	-0.13	0.04	0.01	-0.02	0.05	-0.03	-0.06	0.00	-0.03	0.02	0.03	-0.01	0.00	-0.04	-0.05	0.00	0.02	-0.06
27/09/2013	0.96	0.22	0.02	-0.03	0.05	0.03	0.03	-0.01	-0.02	-0.04	-0.05	0.00	0.05	0.00	0.07	-0.03	0.06	0.06	0.00	-0.04	-0.02
23/10/2013	0.96	0.09	-0.18	0.00	-0.09	-0.03	0.01	-0.02	-0.03	0.03	0.06	0.11	0.07	0.06	0.00	0.03	0.01	-0.02	0.00	0.00	-0.01
13/11/2013	0.96	-0.06	-0.03	-0.06	-0.19	-0.05	0.05	0.11	0.04	-0.09	0.00	0.03	0.00	-0.08	0.00	0.01	-0.03	0.01	0.00	-0.02	0.01
28/11/2013	0.97	-0.07	0.04	-0.06	-0.13	0.03	-0.03	0.08	0.03	0.11	-0.01	0.01	-0.06	0.03	-0.01	-0.07	0.04	0.00	0.02	0.00	-0.02
16/12/2013	0.97	-0.09	-0.01	0.05	-0.04	0.08	-0.08	-0.08	-0.02	-0.04	-0.08	0.03	0.01	-0.06	-0.04	0.00	0.05	-0.05	-0.04	0.02	-0.01
10/01/2014	0.97	-0.13	-0.01	0.02	-0.10	0.08	0.03	0.02	-0.03	0.05	-0.05	-0.04	-0.01	0.02	0.09	0.05	-0.03	-0.01	-0.04	0.03	0.01
28/03/2014	0.96	-0.15	-0.08	-0.09	0.08	-0.06	-0.09	-0.04	0.10	-0.04	0.08	-0.02	0.00	0.00	0.07	-0.03	0.02	-0.03	0.00	0.02	0.01

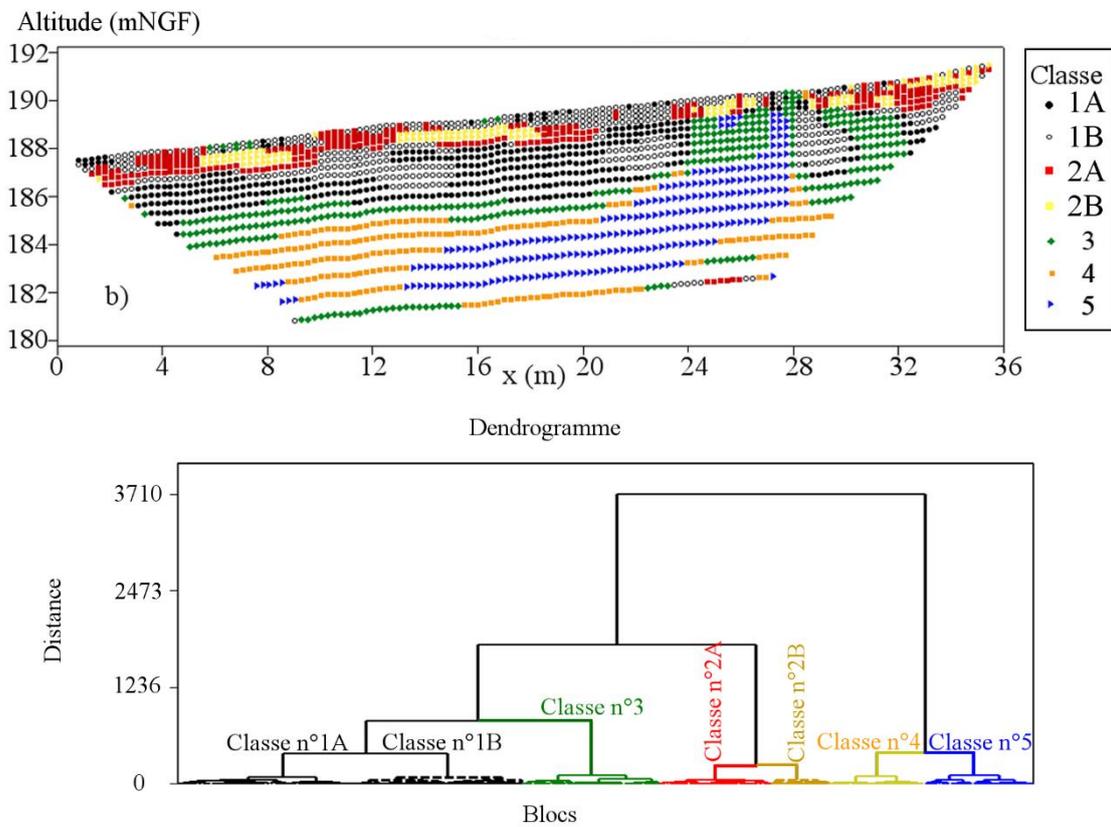
Annexe II.B. Matrice des saturations (somme des carrés des coefficients de corrélation)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21
06/06/2012	84%	85%	92%	96%	96%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
04/10/2012	90%	96%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	100%
24/10/2012	89%	97%	97%	97%	97%	97%	98%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	100%	100%	100%
29/11/2012	88%	96%	97%	97%	98%	98%	98%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	100%	100%	100%
12/12/2012	85%	91%	93%	96%	96%	97%	98%	98%	99%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
25/01/2013	94%	95%	95%	95%	96%	96%	97%	98%	98%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
22/02/2013	90%	92%	92%	94%	94%	97%	98%	98%	98%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
04/03/2013	94%	96%	97%	97%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	100%	100%	100%	100%
03/04/2013	88%	90%	90%	93%	97%	97%	97%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
16/05/2013	94%	96%	97%	97%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	100%	100%	100%
19/06/2013	92%	94%	95%	95%	96%	96%	98%	98%	98%	99%	99%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
02/07/2013	93%	95%	95%	97%	97%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%
16/07/2013	92%	92%	96%	96%	97%	97%	98%	98%	98%	98%	99%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
05/09/2013	90%	94%	96%	98%	98%	98%	98%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	100%	100%	100%	100%
27/09/2013	92%	97%	97%	97%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	100%	100%	100%	100%
23/10/2013	92%	93%	96%	96%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	98%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
13/11/2013	92%	92%	93%	93%	97%	97%	97%	98%	98%	99%	99%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
28/11/2013	94%	95%	95%	95%	97%	97%	97%	97%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
16/12/2013	95%	96%	96%	96%	96%	97%	97%	98%	98%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%
10/01/2014	94%	96%	96%	96%	97%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
28/03/2014	92%	94%	95%	96%	96%	97%	97%	97%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Annexe II.C.R épartition spatiale des blocs selon les r éultats de CHA et dendrogramme associ é– 5 classes pour le profil I-50



Annexe II.D. Répartition spatiale des blocs selon les résultats de CHA et dendrogramme associé – 7 classes pour le profil I-50



Annexe II.E. Paramètres statistiques pour les résistivités¹ de chaque classe issue de la CHA

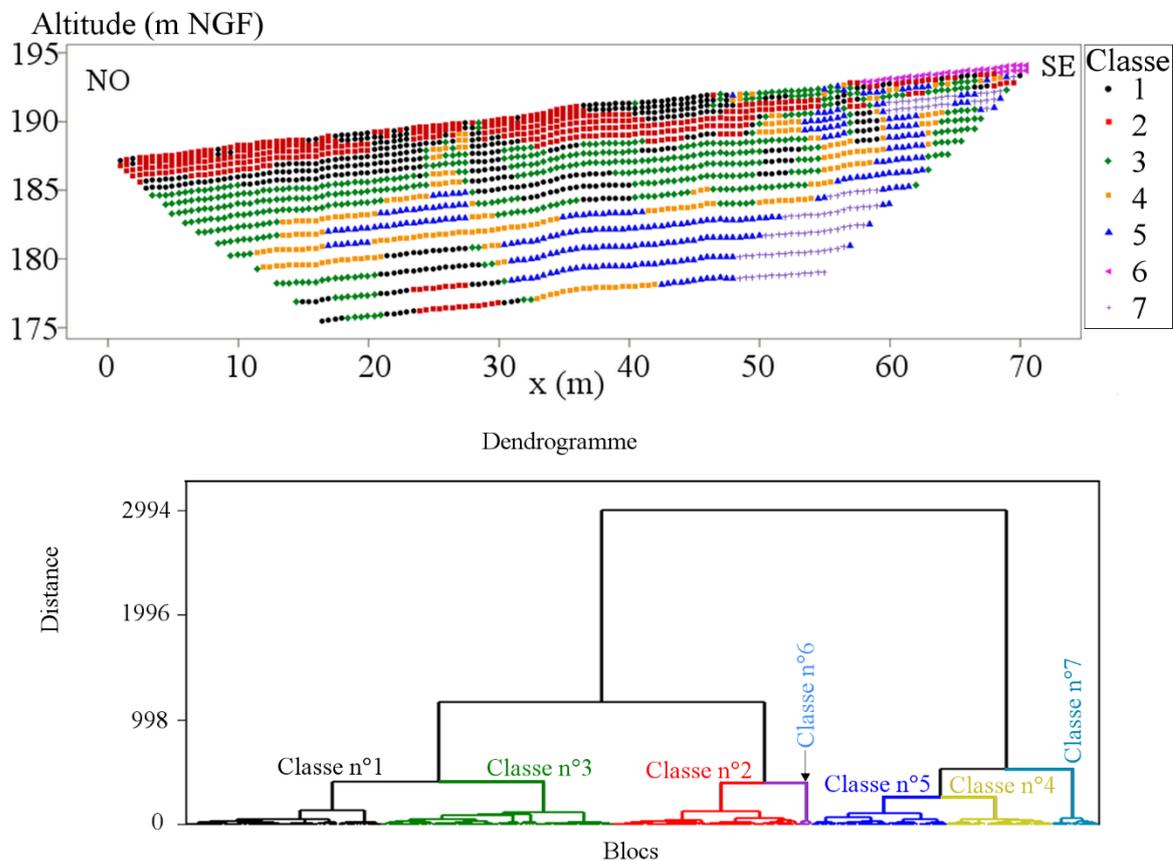
Médianes de résistivité de chaque classe en fonction de date					
Date	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
06/06/12	136	227	116	115	76
04/10/12	225	443	154	105	88
24/10/12	197	358	143	105	94
29/11/12	202	328	150	108	94
12/12/12	188	276	138	104	90
25/01/13	126	191	128	112	68
22/02/13	133	199	134	117	68
04/03/13	131	206	141	116	59
03/04/13	124	190	135	121	62
16/05/13	126	183	134	113	59
19/06/13	124	165	128	113	62
02/07/13	127	191	126	108	61
16/07/13	151	260	123	106	58
05/09/13	199	394	151	105	81
27/09/13	180	331	147	100	83
23/10/13	168	207	137	104	81
13/11/13	124	173	126	110	84
28/11/13	129	180	125	111	75
16/12/13	127	183	135	112	68
10/01/14	124	177	129	110	65
28/03/14	120	184	134	115	65
Paramètres sur l'ensemble des résistivités en fonction des classes					
Nombre	839	410	334	234	263
Max	1302	2996	697	366	226
Min	14	47	11	23	15
Ecart-type	76	164	58	33	21
Moyenne	159	268	135	119	73
Médiane	146	222	134	110	75
CV²	48%	61%	43%	27%	29%

¹ Les paramètres sont calculés à partir des résistivités, non à partir de leur logarithme.

² CV : coefficient de variation en pourcentage.

Annexe III. CHA pour le profil I-100

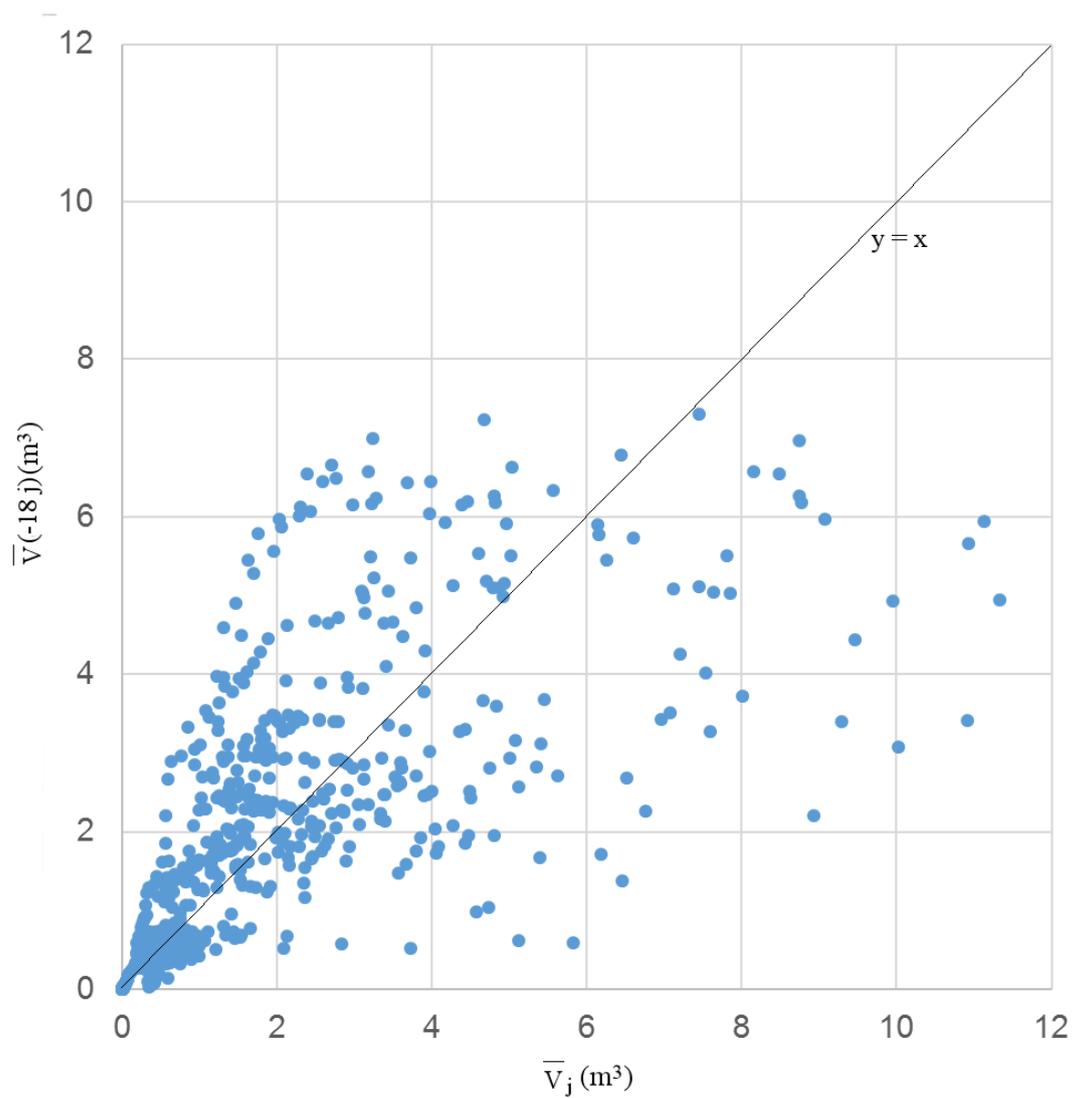
Annexe III.A. Répartition spatiale des blocs selon les résultats de CHA et le dendrogramme associé



**Annexe III.B. Paramètres statistiques pour les résistivités de
chaque classe issue de la CHA**

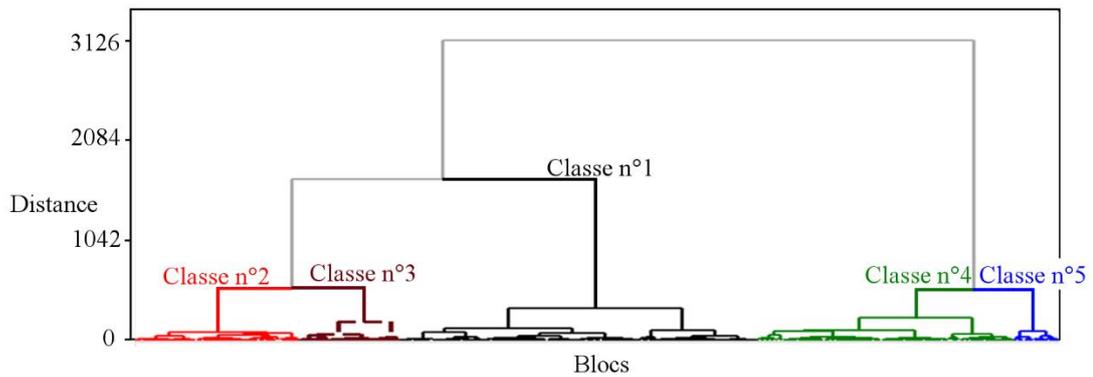
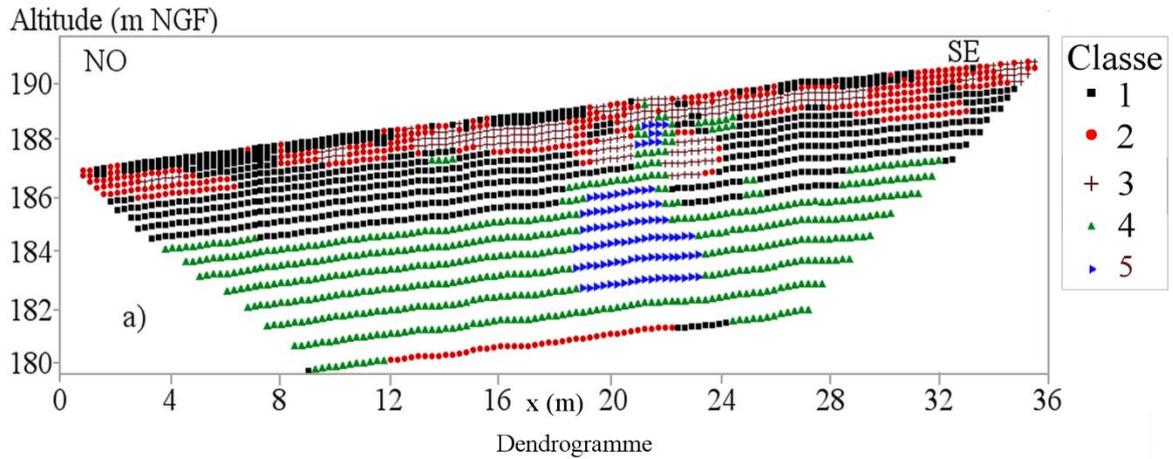
Médianes de résistivité de chaque classe en fonction de date							
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7
24/10/2012	197	294	133	114	80	1976	26
29/11/2012	202	298	131	112	76	1592	24
12/12/2012	195	268	124	110	80	1366	25
25/01/2013	141	181	126	87	40	1675	22
06/02/2013	140	175	125	85	38	1480	22
22/02/2013	122	189	120	79	44	1852	25
04/03/2013	145	198	132	88	45	2001	24
03/04/2013	142	170	126	98	54	1530	24
16/05/2013	145	170	126	96	63	2017	22
19/06/2013	137	153	119	103	71	1216	20
02/07/2013	135	174	123	90	63	2496	18
16/07/2013	149	222	124	74	66	2379	19
05/09/2013	194	322	130	101	100	2224	25
27/09/2013	172	263	126	108	92	1282	21
23/10/2013	170	210	117	106	75	931	20
13/11/2013	134	168	119	104	85	868	20
28/11/2013	135	177	120	89	38	1364	23
16/12/2013	138	182	125	95	66	1039	22
10/01/2014	128	169	118	77	40	1050	23
28/03/2014	129	161	125	85	44	1052	24
Paramètres sur l'ensemble des résistivités en fonction des classes							
Nombre	429	409	509	232	295	31	101
Max	2890	3650	4396	789	1516	12262	312
Min	13	10	8	7	1	53	1
Ecart-type	160	232	129	58	57	1155	18
Moyenne	196	269	142	100	67	1742	25
Médiane	152	198	124	97	60	1572	23
CV	82%	86%	91%	58%	85%	66%	70%

Annexe III.C. Volume moyen récolté dans la sas1 au cours des 18 jours précédant une mesure en fonction du volume moyen du jour de mesure



Annexe IV. CHA du profil II-50

Annexe IV.A. Répartition spatiale des blocs selon les résultats de CHA et le dendrogramme associé

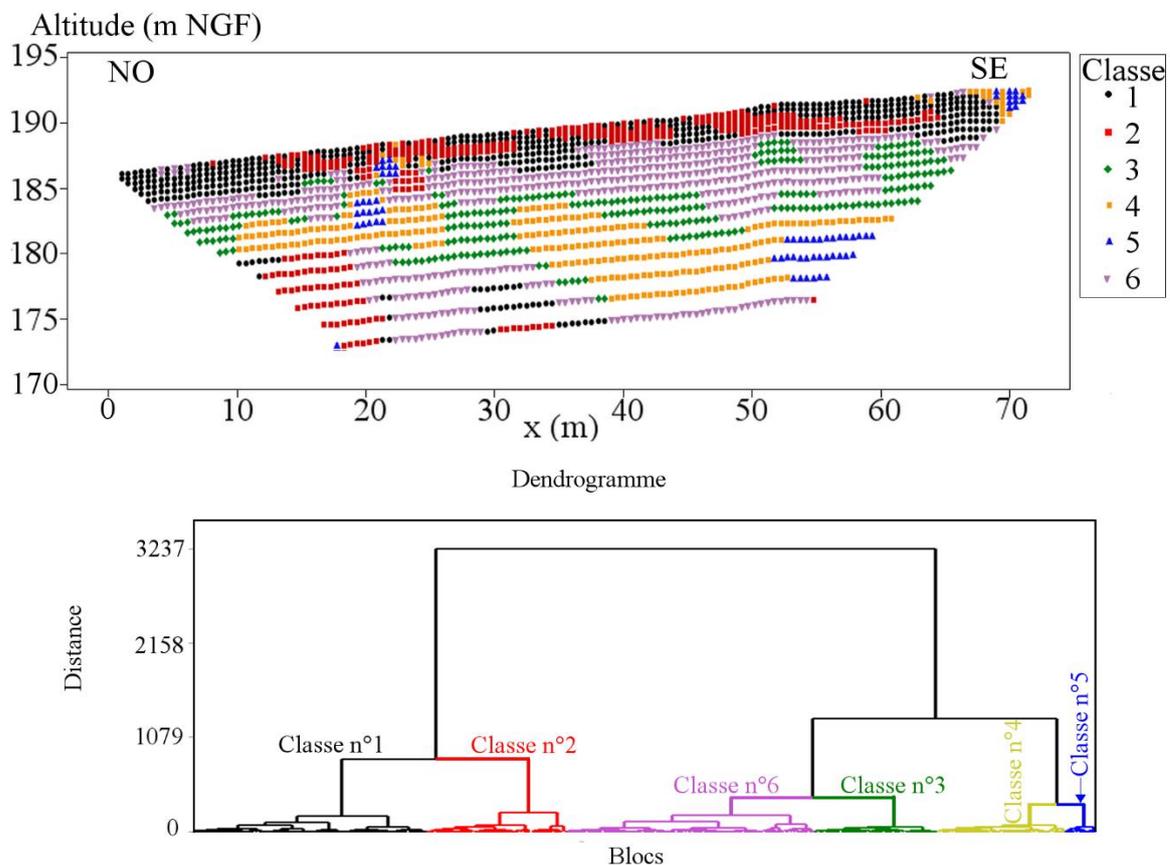


**Annexe IV.B. Paramètres statistiques pour les résistivités de
chaque classe issue de la CHA**

Médianes de résistivité de chaque classe en fonction de date					
Date	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
06/06/12	132	162	331	133	79
04/10/12	207	349	682	124	188
24/10/12	178	277	557	137	87
29/11/12	179	244	503	141	112
12/12/12	160	208	348	139	65
25/01/13	133	161	258	136	48
06/02/13	126	146	229	139	68
22/02/13	131	164	246	139	50
04/03/13	138	167	273	145	54
03/04/13	128	145	222	143	49
16/05/13	127	154	278	136	44
19/06/13	126	140	209	134	59
02/07/13	122	157	263	134	47
16/07/13	133	199	382	134	43
05/09/13	187	307	553	126	158
27/09/13	161	238	416	134	104
23/10/13	138	175	326	134	60
13/11/13	131	148	243	130	40
28/11/13	129	151	241	129	51
16/12/13	133	155	255	136	44
10/01/14	123	157	245	134	58
28/03/14	126	144	256	143	43
Paramètres sur l'ensemble des résistivités en fonction des classes					
Nombre	807	375	220	578	100
Max	2284	3517	5212	3957	1941
Min	15	17	19	4	2
Ecart-type	72	178	401	116	99
Moyenne	144	236	453	149	82
Médiane	136	173	305	135	59
CV	50%	75%	88%	78%	121%

Annexe V. CHA du profil II-100

Annexe V.A. Répartition spatiale des blocs selon les résultats de CHA et le dendrogramme associé



**Annexe V.B. Paramètres statistiques pour les résistivités de
chaque classe issue de la CHA**

Médianes de résistivité de chaque classe en fonction de date						
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
06/06/2012	144	256	149	91	29	169
24/10/2012	225	383	151	124	87	166
29/11/2012	210	385	144	130	76	158
12/12/2012	195	371	136	126	79	154
25/01/2013	141	246	139	99	39	159
06/02/2013	127	207	137	124	50	148
22/02/2013	139	258	139	106	46	166
04/03/2013	139	254	144	109	39	155
03/04/2013	125	227	144	106	41	157
16/05/2013	131	238	140	108	33	154
19/06/2013	122	217	142	105	37	148
02/07/2013	134	245	135	97	32	152
16/07/2013	165	326	138	113	39	148
05/09/2013	241	433	143	128	52	161
27/09/2013	202	368	140	128	69	152
23/10/2013	151	310	133	108	47	152
13/11/2013	128	256	129	106	43	156
28/11/2013	133	236	128	99	45	158
16/12/2013	135	258	135	119	39	154
10/01/2014	126	234	142	95	39	159
28/03/2014	126	212	141	105	37	162
Paramètres sur l'ensemble des résistivités en fonction des classes						
Nombre	537	325	286	294	69	569
Max	1683	6255	789	1497	2613	3935
Min	41	34	31	8	3	31
Ecart-type	147	494	45	66	96	181
Moyenne	193	508	145	118	58	215
Médiane	151	286	139	112	43	157
CV	76%	97%	31%	56%	165%	84%

Annexe VI. La loi d'Archie

La loi d'Archie a été formulée initialement pour établir un rapport entre la conductivité électrique d'une roche sableuse, son porosité et la saturation (Archie, 1942). Dans notre cas, elle est reformulée pour exprimer en résistivité (inverse de la conductivité) :

$$\rho_r = a \rho_w \Phi^{-m} S_w^{-n}$$

Où a est un facteur égale à 1 de manière générale,

ρ_r est la résistivité de la roche,

ρ_w est la résistivité de la saumure,

Φ est la porosité

m est l'exposant de cimentation, comprise entre 1,8 et 2,0 pour les roches sableuses

n est un exposant proche de 2

S_w est la saturation.

Zhou, et al. (1997) a introduit la saturation au seuil de percolation dans cette formule.

L'équation est donc devenue :

$$\rho_r = \frac{\rho_w}{a} \left[\frac{\Phi(S_w - S_w^{critique})}{1 - \Phi S_w^{critique}} \right]^{-n}$$

Où $S_w^{critique}$ est la saturation critique au seuil de percolation.

Annexe VII. Validations des modèles géostatistiques par les données de forages et de pénétrations

Annexe VII.A. Tableau synthétique des coordonnées des forages et la validation des modèles par un critère binaire

Forages	Emplacement théorique ³		Emplacement dans le modèle ⁴		Validation ⁵	
	Nom	E	N	E		N
Forage J. VOUBE (1966)	Sa	508189,88	306613,95	508189,25	306614,25	1
	Sb	508186,42	306618,60	508186,25	306618,75	1
	Sc	508180,06	306612,79	508180,25	306612,75	1
	Sd	508174,86	306616,28	508175,00	306616,50	?
	Sd'	508175,14	306623,26	508175,00	306623,25	1
Forage J. VOUBE (1967)	S0	508177,14	306549,48	508177,25	306549,75	?
	S1	508179,42	306556,71	508179,50	306556,50	1
	S2	508175,82	306552,89	508175,75	306552,75	1
	S3	508180,68	306548,65	508181,00	306548,25	0
	S4	508184,22	306552,53	508184,00	306552,75	0
	S5	508179,96	306552,83	508180,25	306552,75	1
	S6	508178,52	306551,33	508178,75	306551,25	1
	S7	508181,04	306555,39	508181,00	306555,75	0
	S8	508181,58	306554,50	508181,75	306554,25	1
	S9	508178,70	306552,41	508178,75	306552,75	1
	S11	508177,14	306549,48	508173,50	306602,25	1
	S12	508174,98	306550,80	508175,00	306550,50	1
	S14	508183,56	306556,53	508183,25	306556,50	1
	S16	508184,76	306556,11	508184,75	306556,50	0
	S18	508175,72	306574,13	508175,75	306574,50	1
S20	508179,19	306579,36	508179,50	306579,75	1	
Forage I2M	SG	508259,04	306590,31	508259,00	306590,25	1
Pénétration (B. LOPEZ)	P1	508252,76	306637,08	508253,00	306637,50	1
	P2	508285,92	306634,19	508286,00	306634,50	0
	P4	508255,32	306579,60	508255,25	306579,75	1
	P5	508262,49	306579,41	508262,75	306579,75	0
	P6	508273,83	306577,92	508274,00	306577,50	1
	P7	508288,68	306573,30	508289,00	306573,00	0
	P10	508262,08	306611,67	508262,00	306612,00	1
	P11Ter	508282,96	306608,81	508283,00	306609,00	1

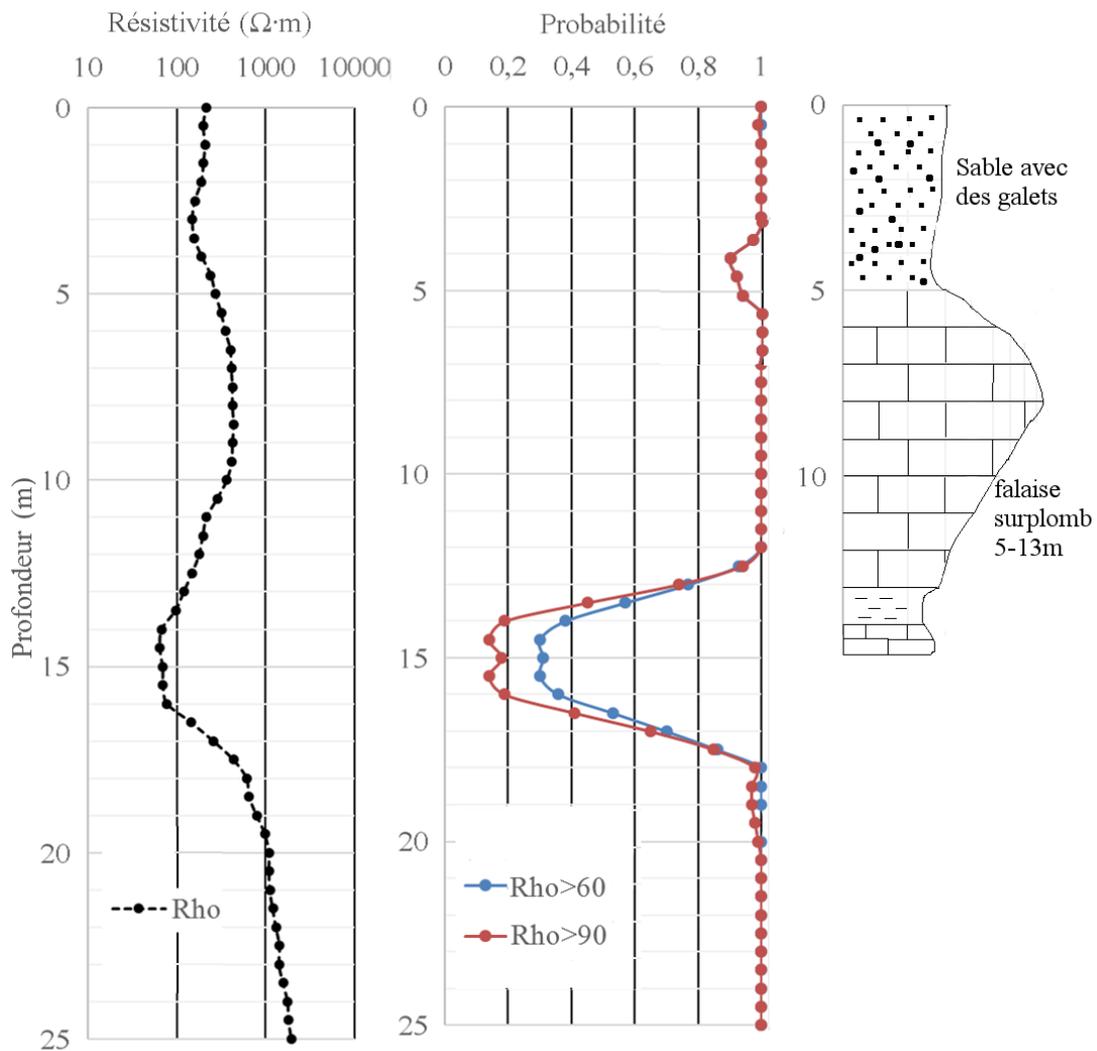
³ Coordonnées relevées (pénétrations et forage SG), ou coordonnées estimées (forage de J. Vouvé) à partir des cartes présentes dans les anciens rapports de J. Vouvé.

⁴ Coordonnées extraites des modèles géostatistiques, les plus proches des positions théoriques.

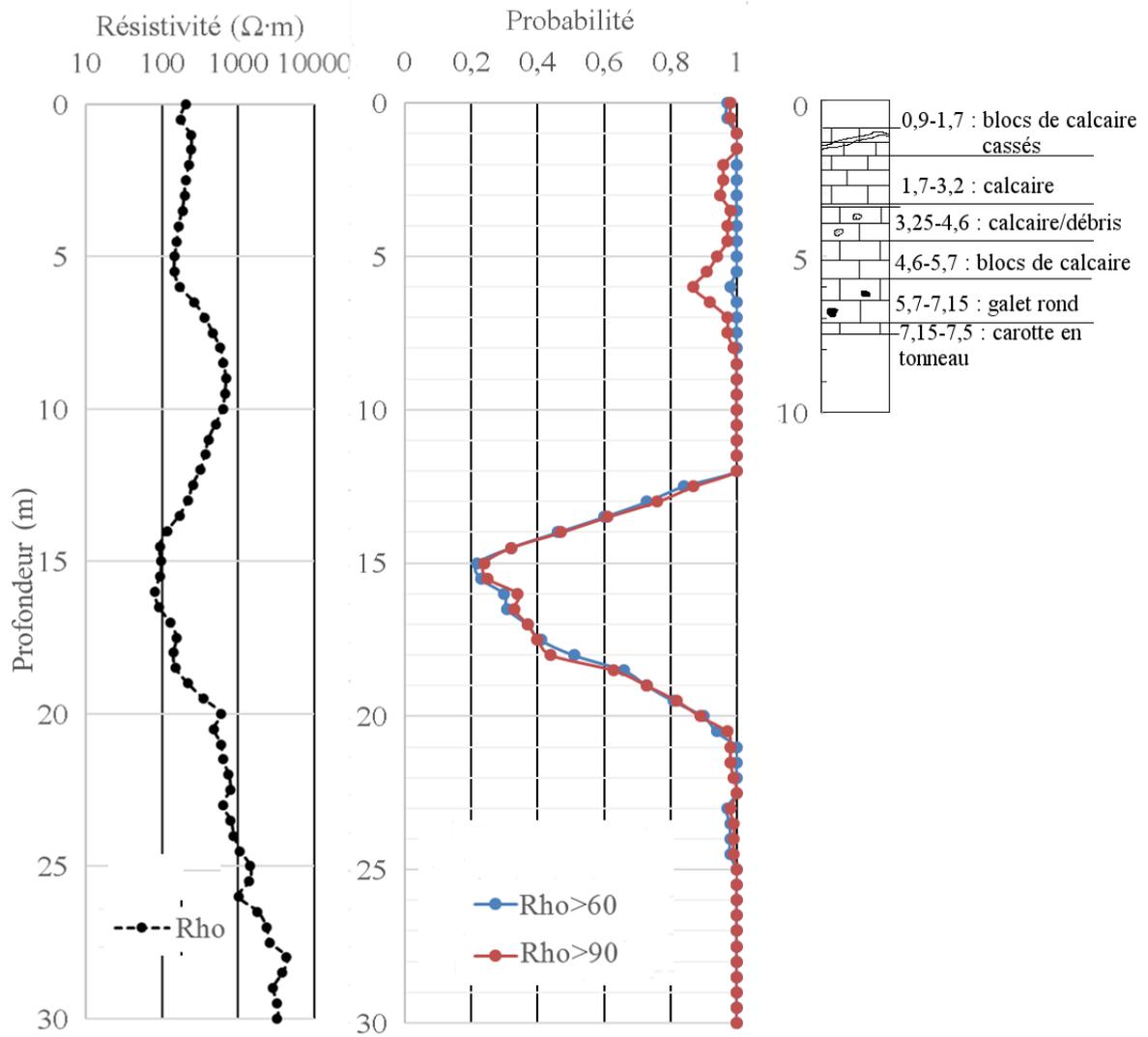
⁵ 1- Validation positive, 0- validation négative, ? – information insuffisante pour la validation

Annexe VII.B. Résistivités et probabilités extraites des modèles géostatistiques pour comparaison aux données des forages ou des pénétromètres

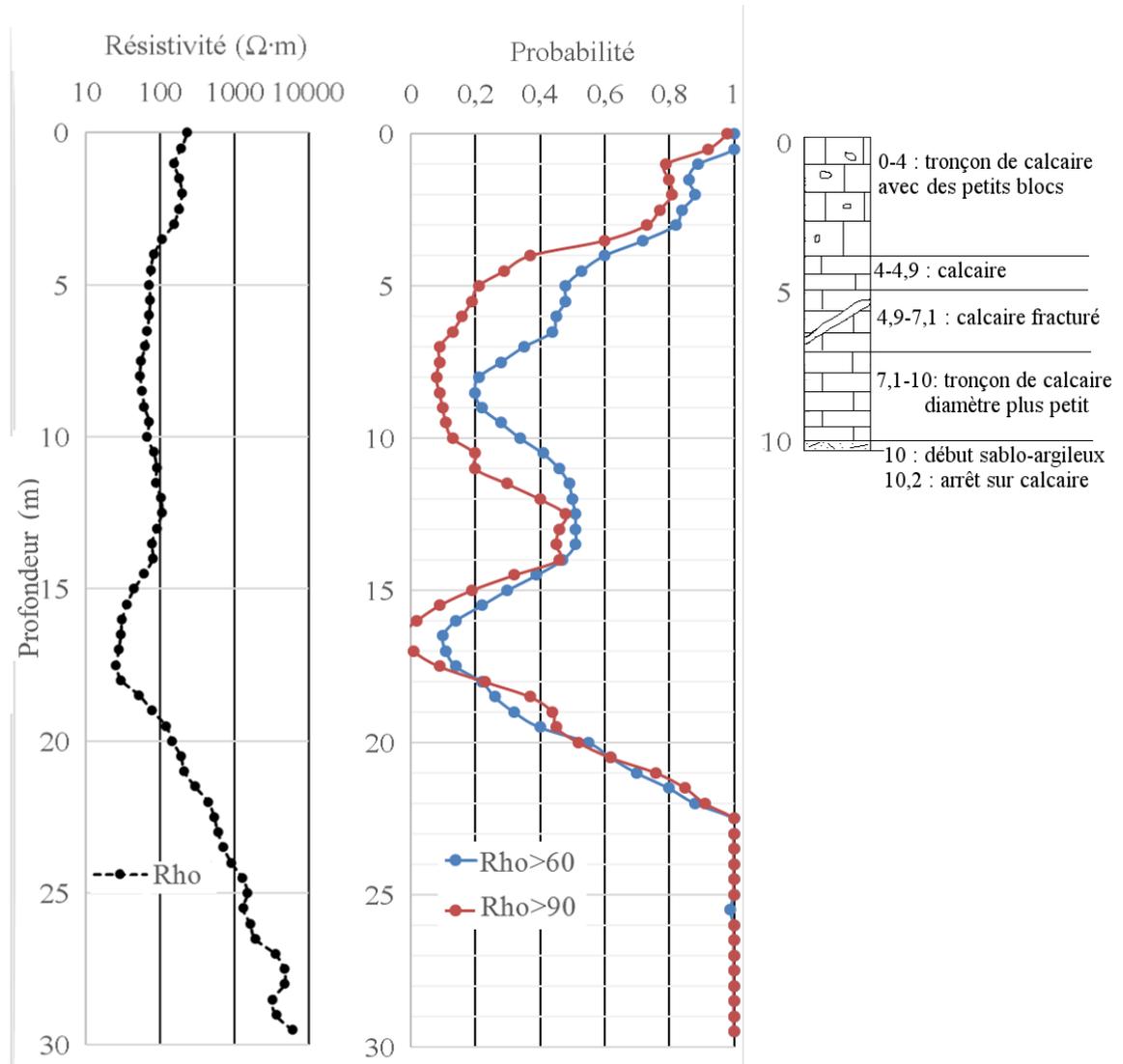
VII.B.1. Forage Sa



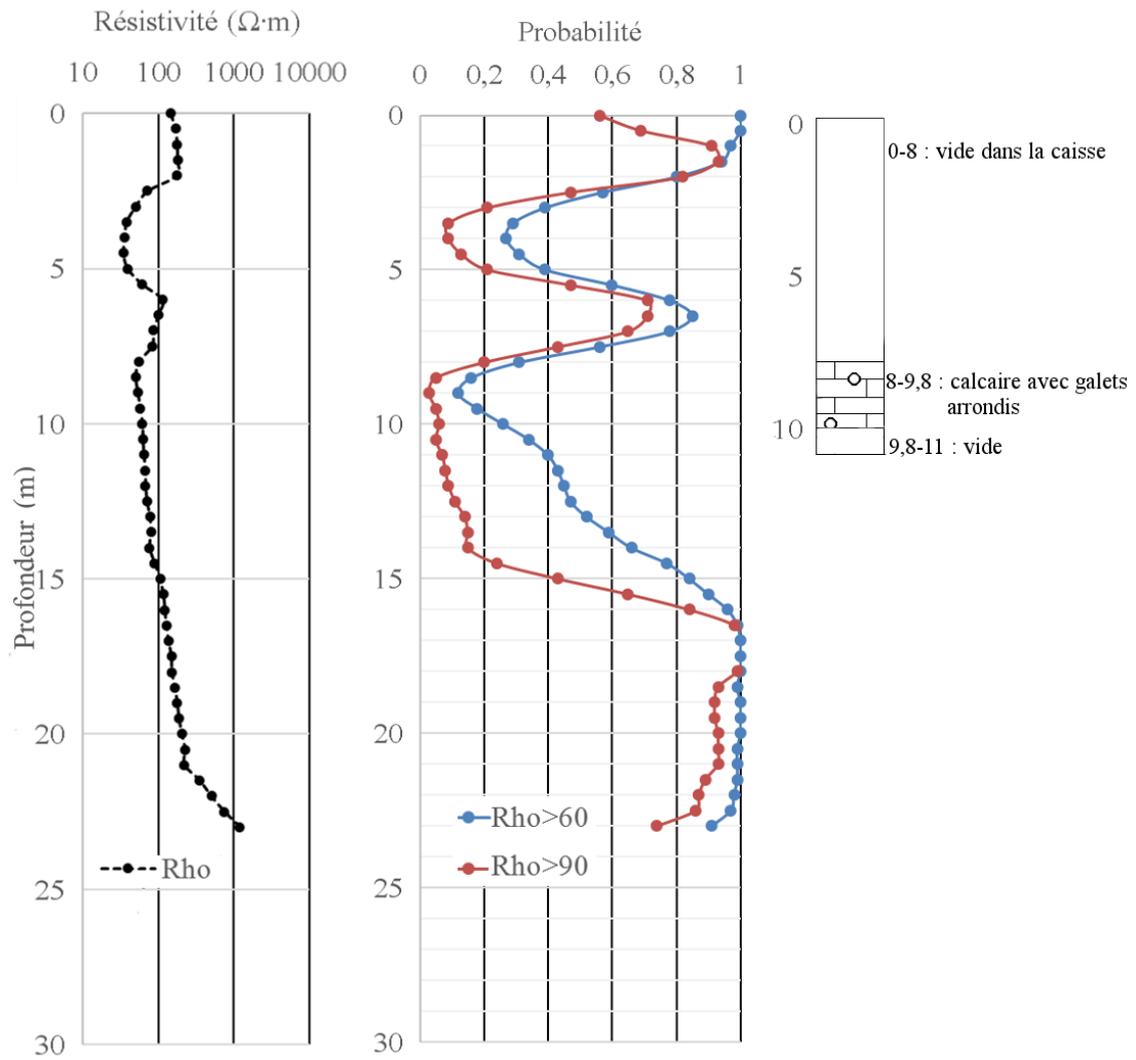
VII.B.2. Forage Sb



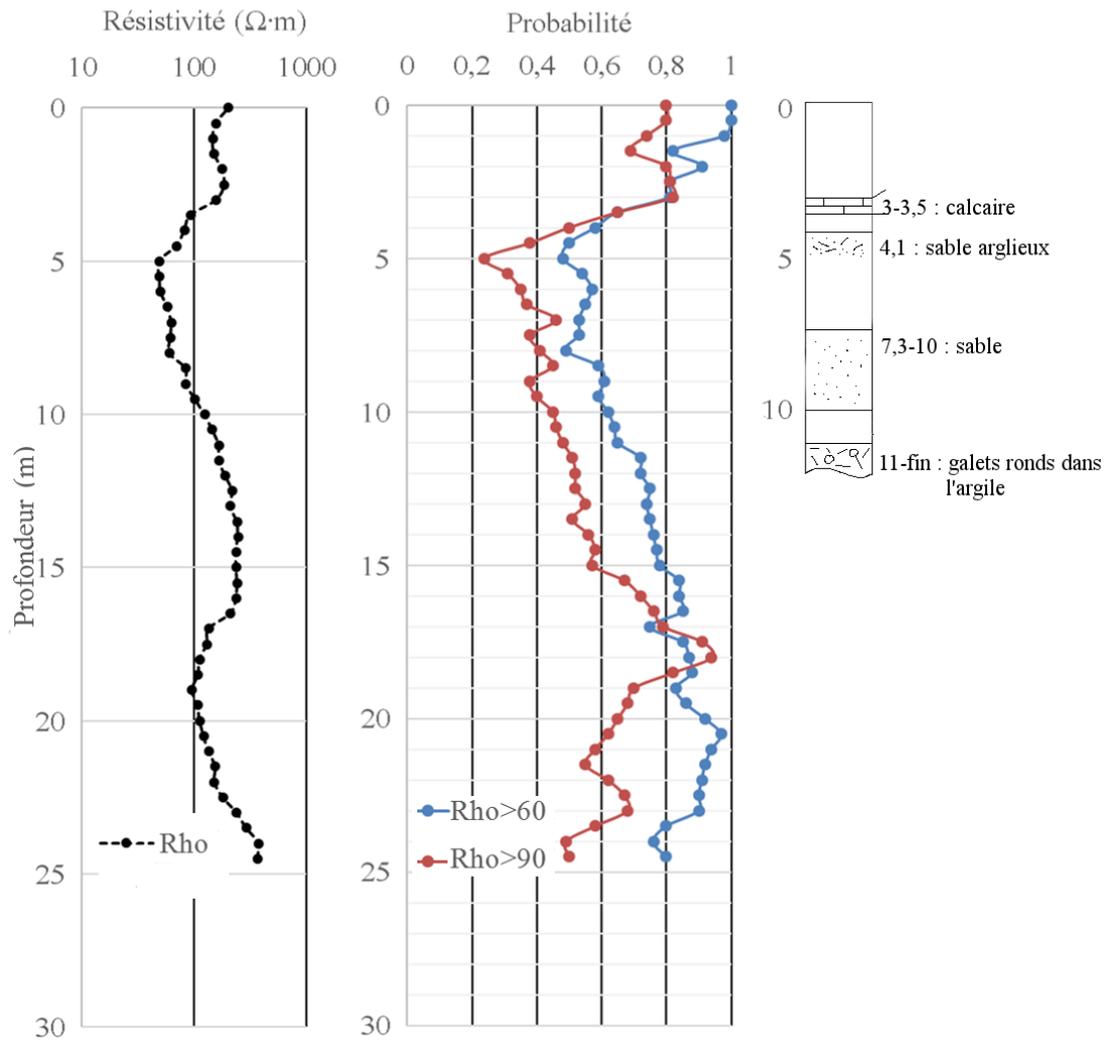
VII.B.3. Forage Sc



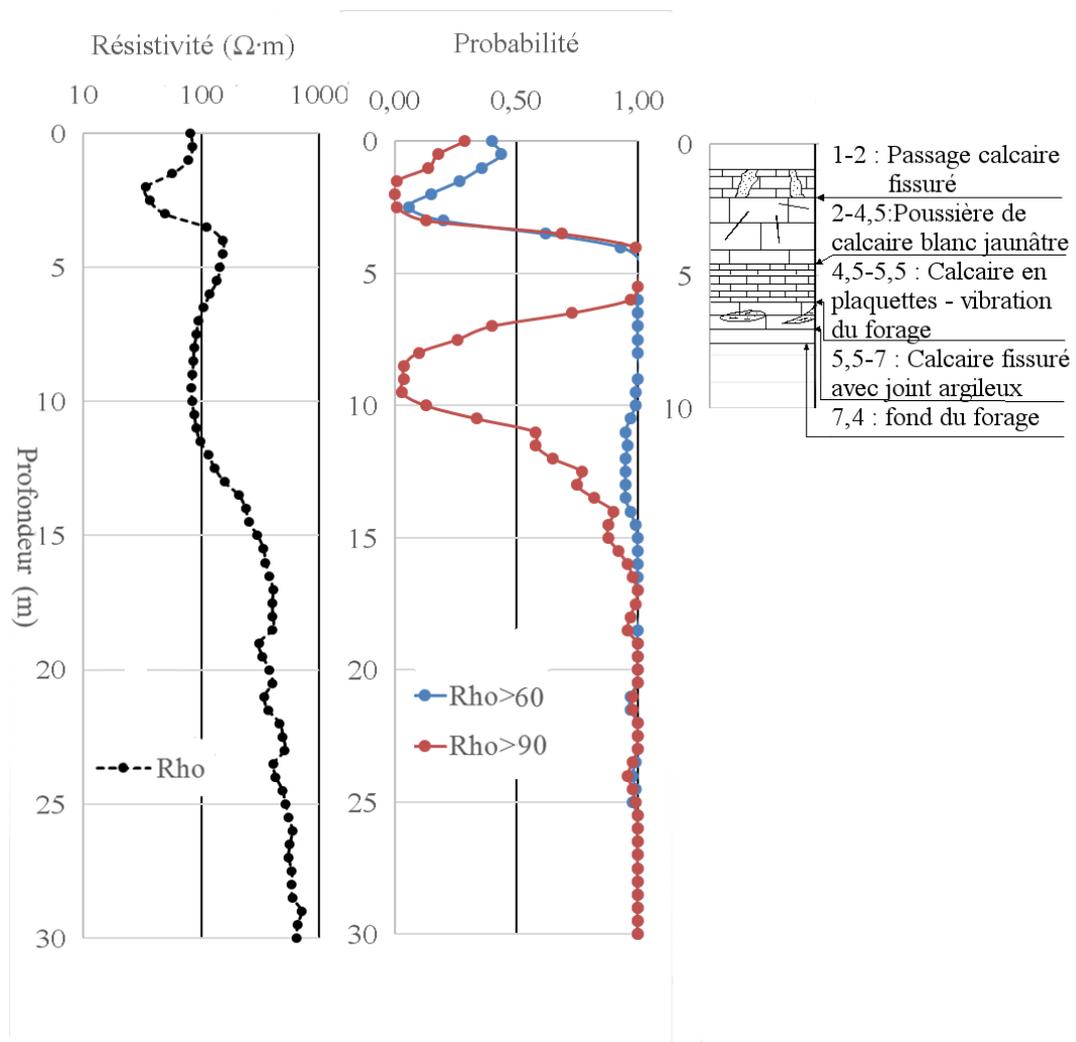
VII.B.4. Forage Sd



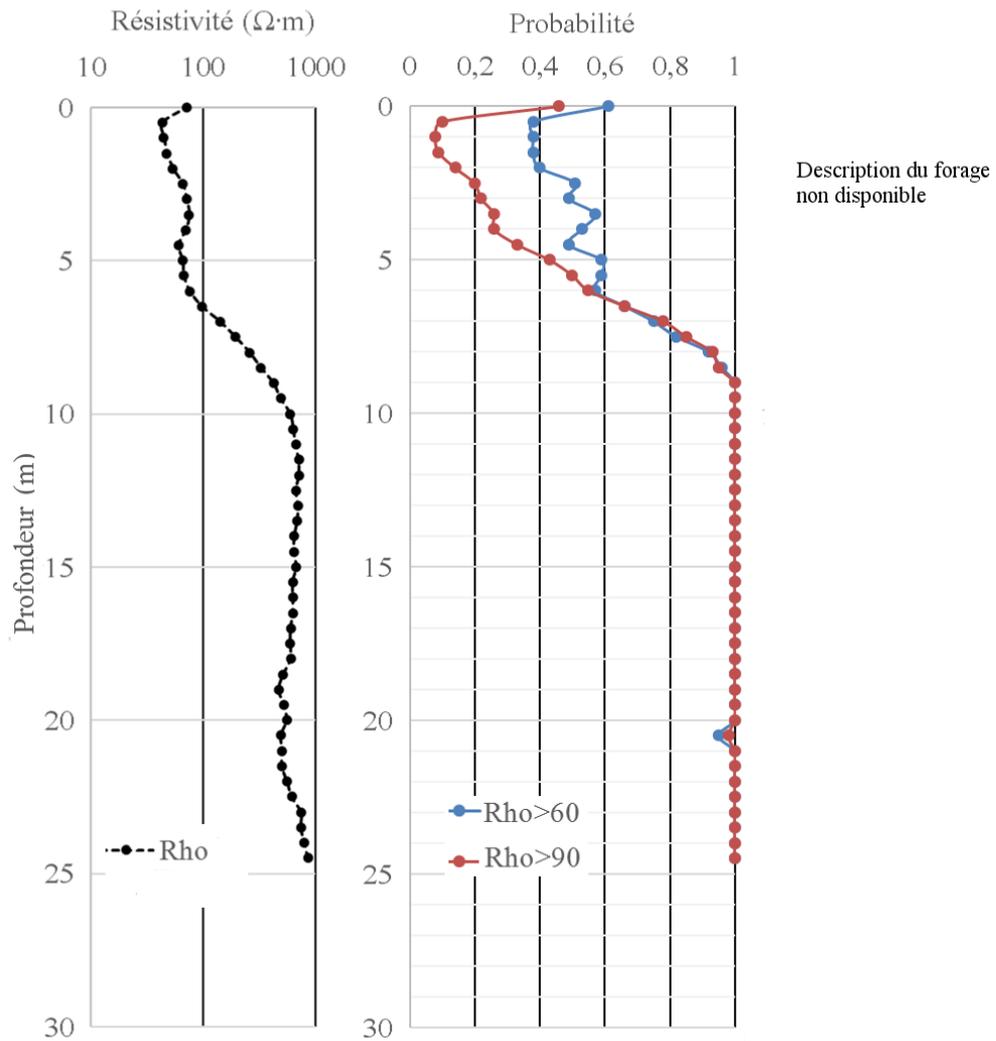
VII.B.5. Forage Sd'



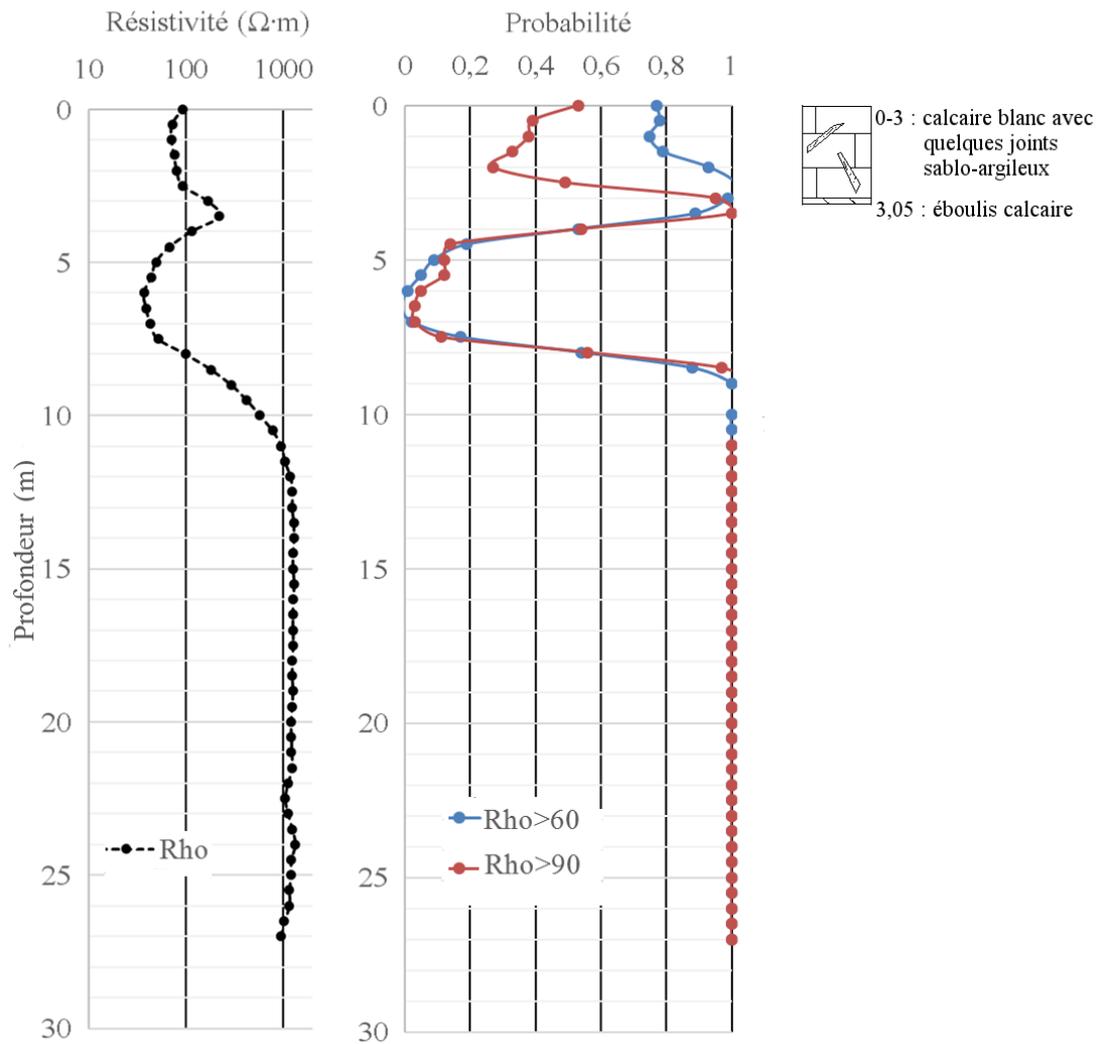
VIL.B.6. Forage SG



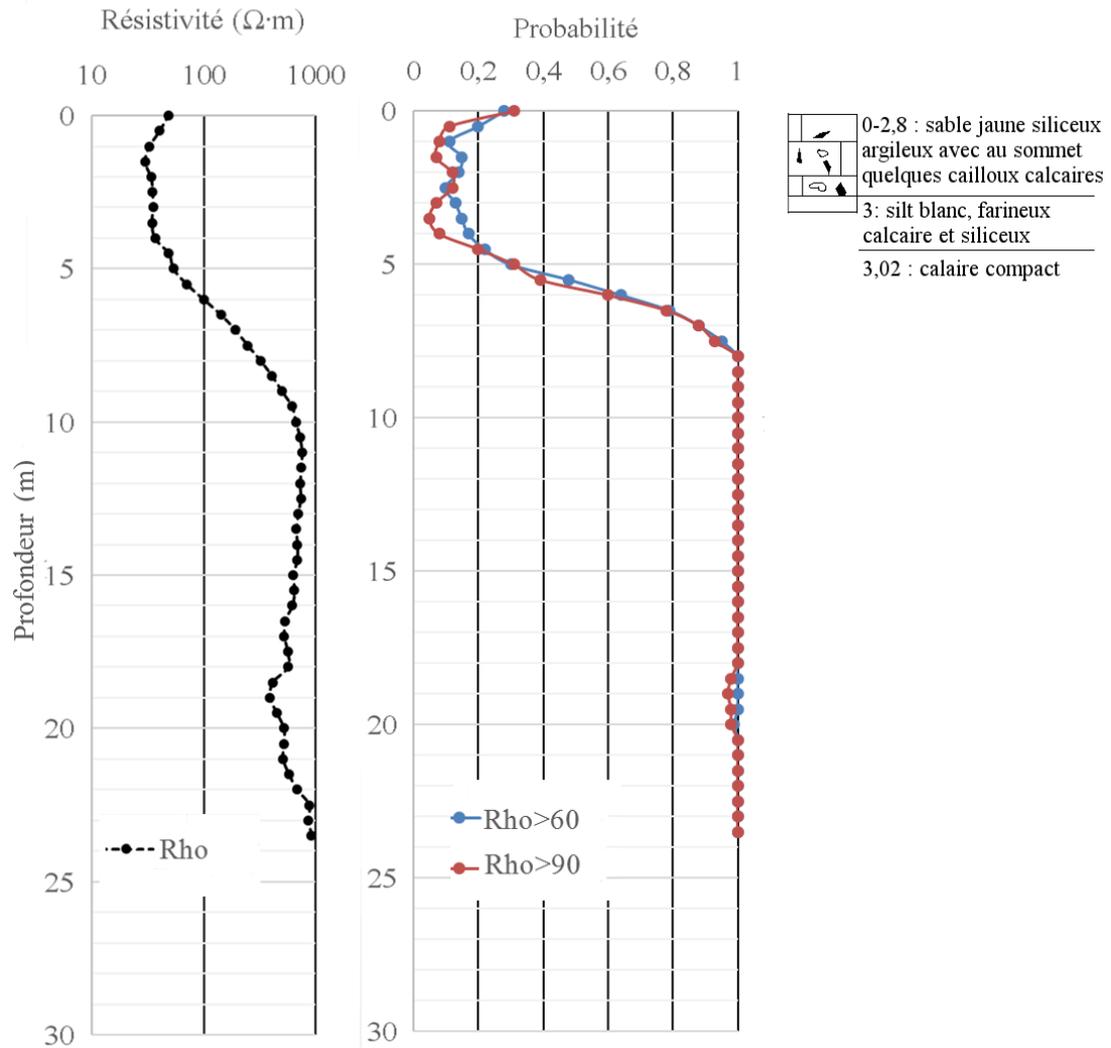
VIL.B.7. Forage S0



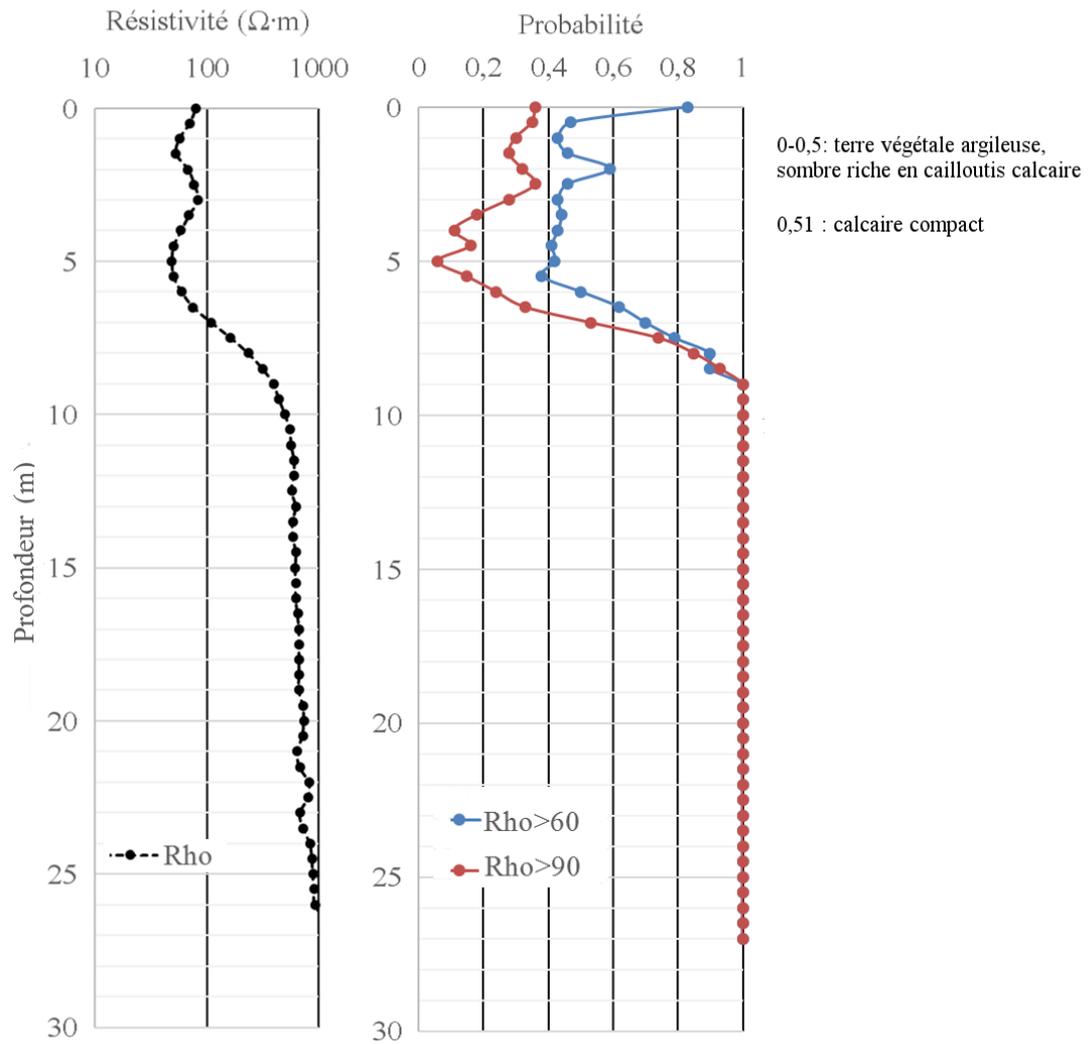
VII.B.8. Forage S1



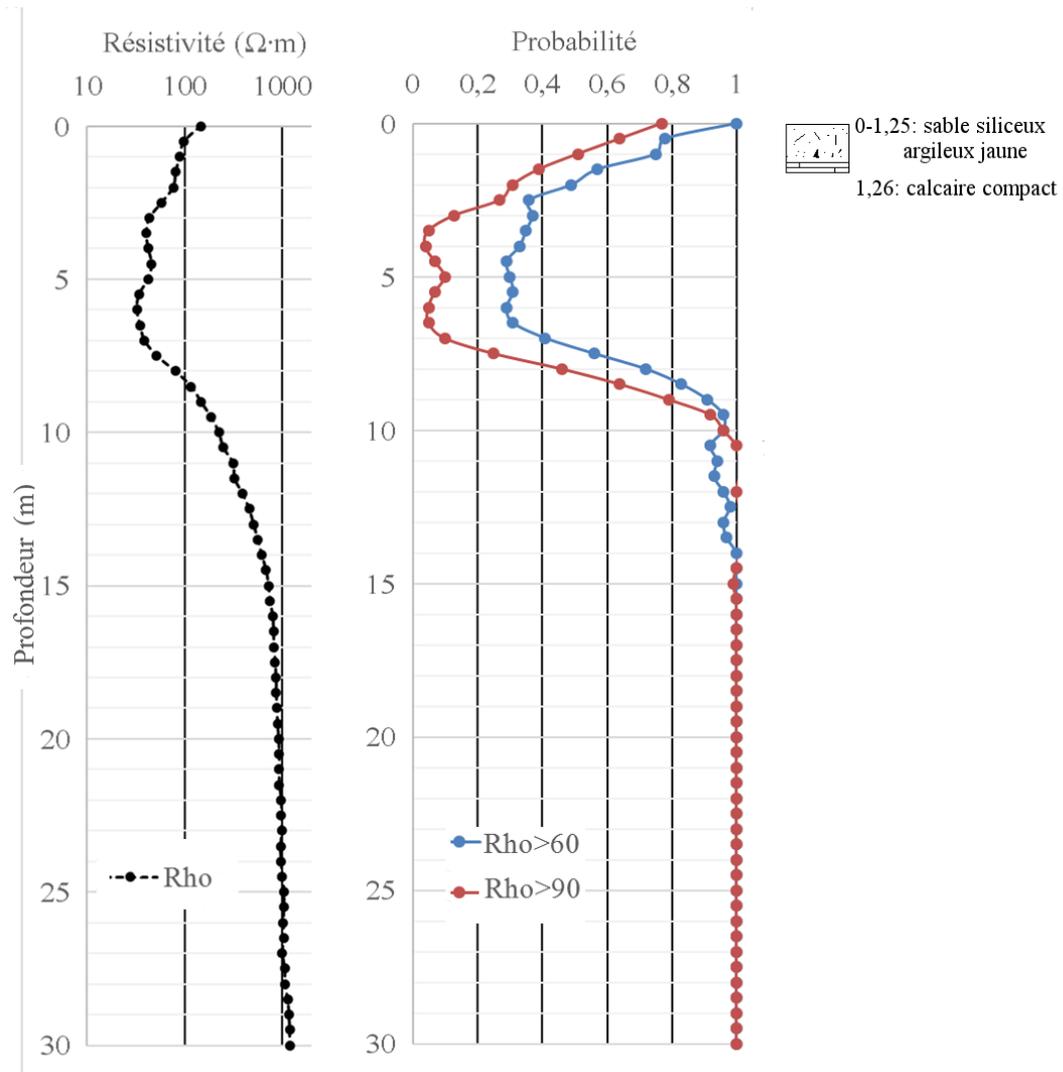
VII.B.9. Forage S2



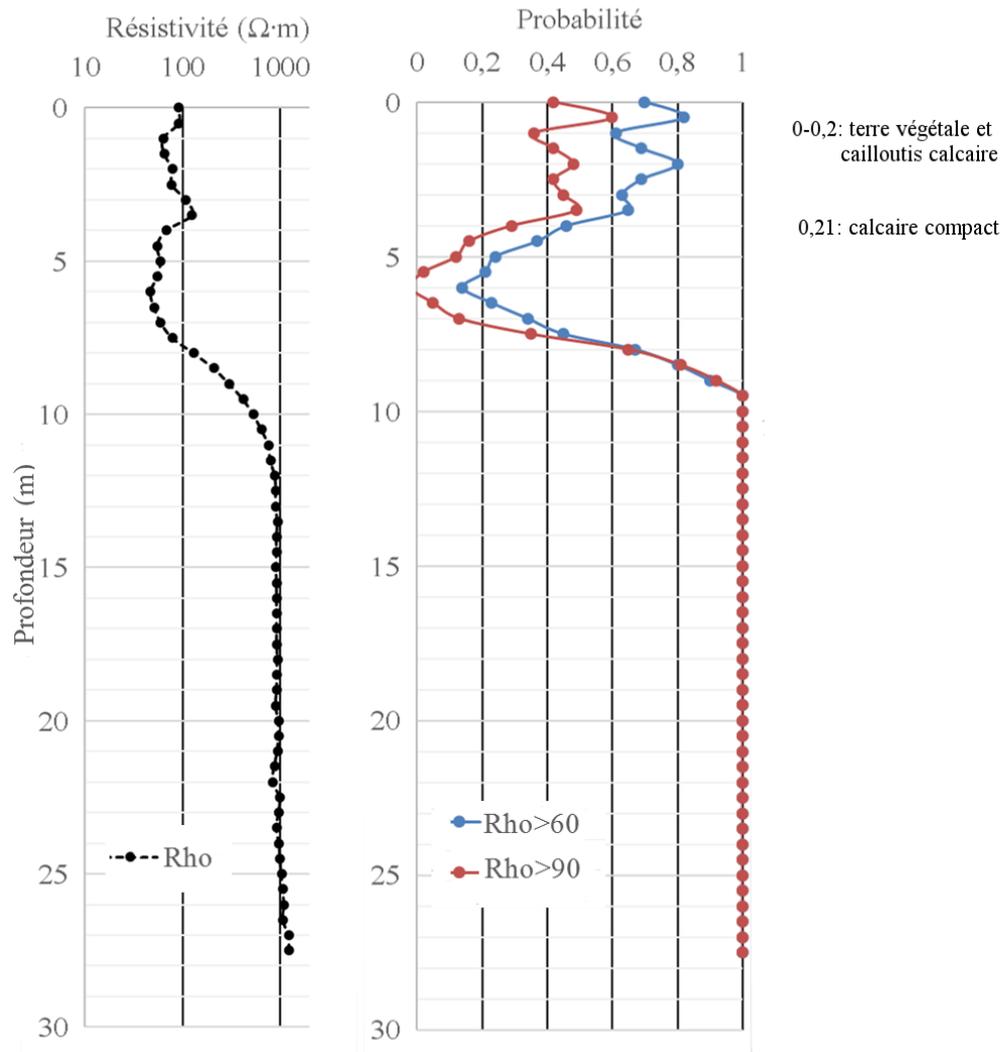
VIL.B.10. Forage S3



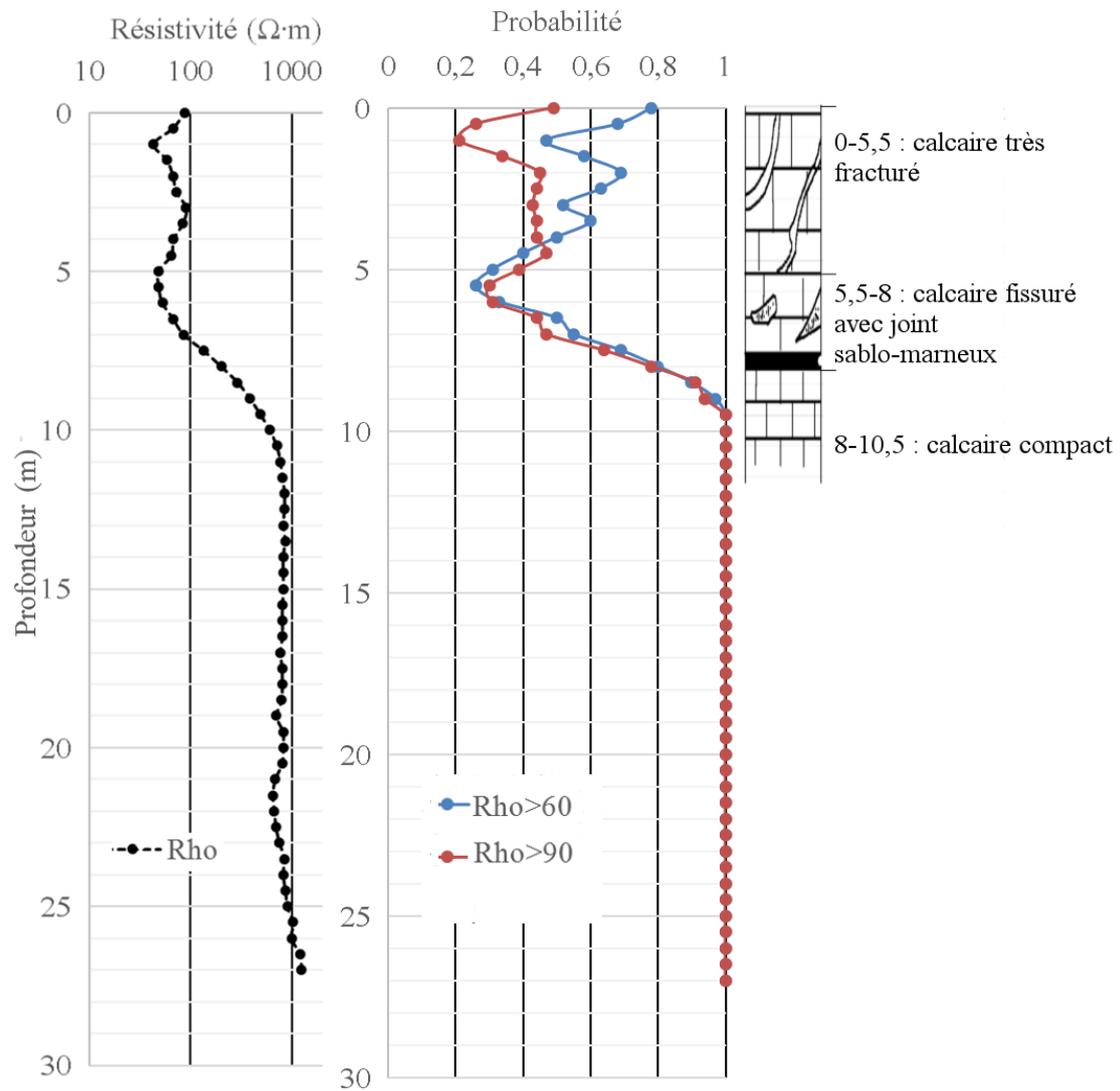
VII.B.11. Forage S4



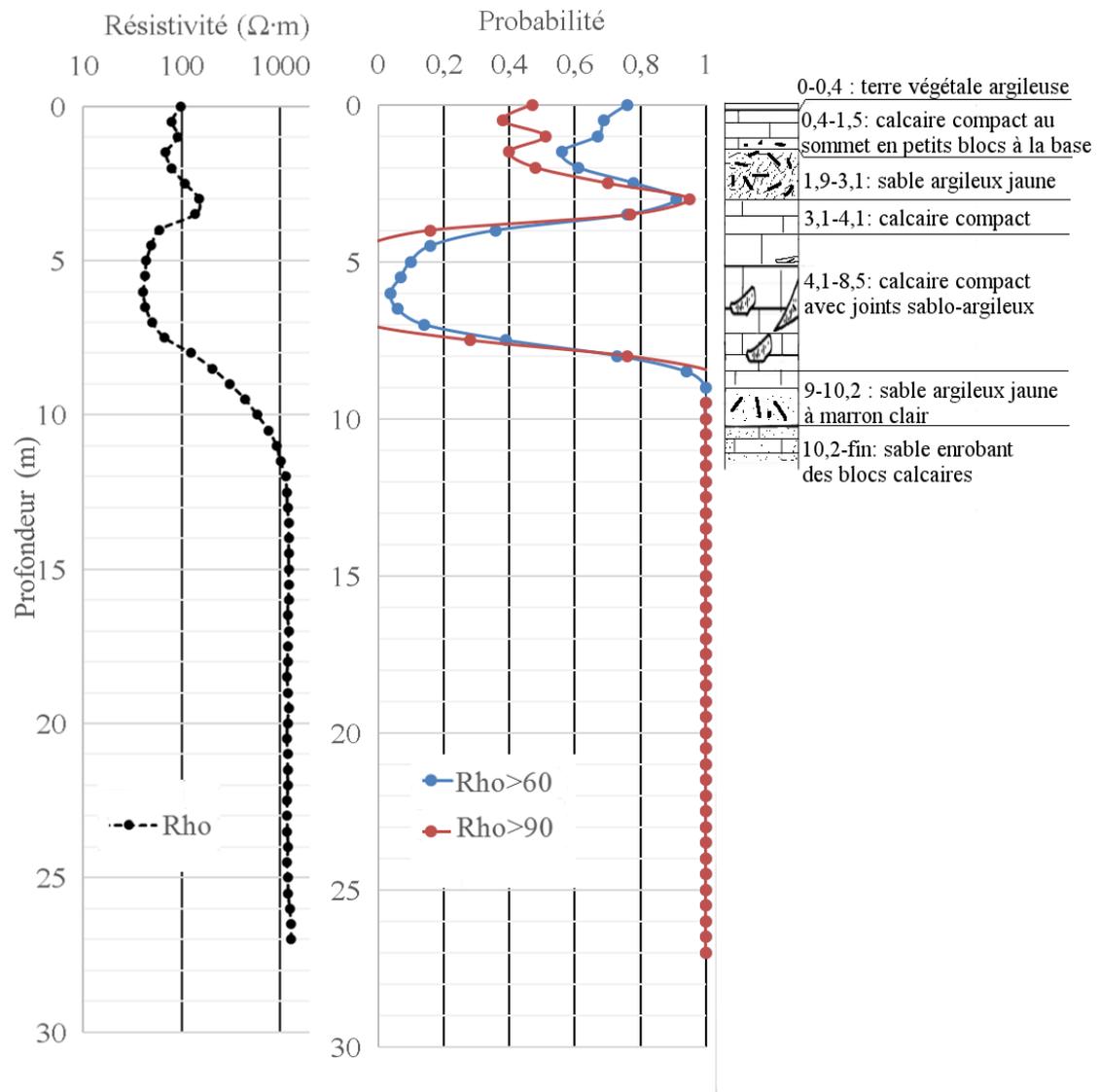
VII.B.12. Forage S5



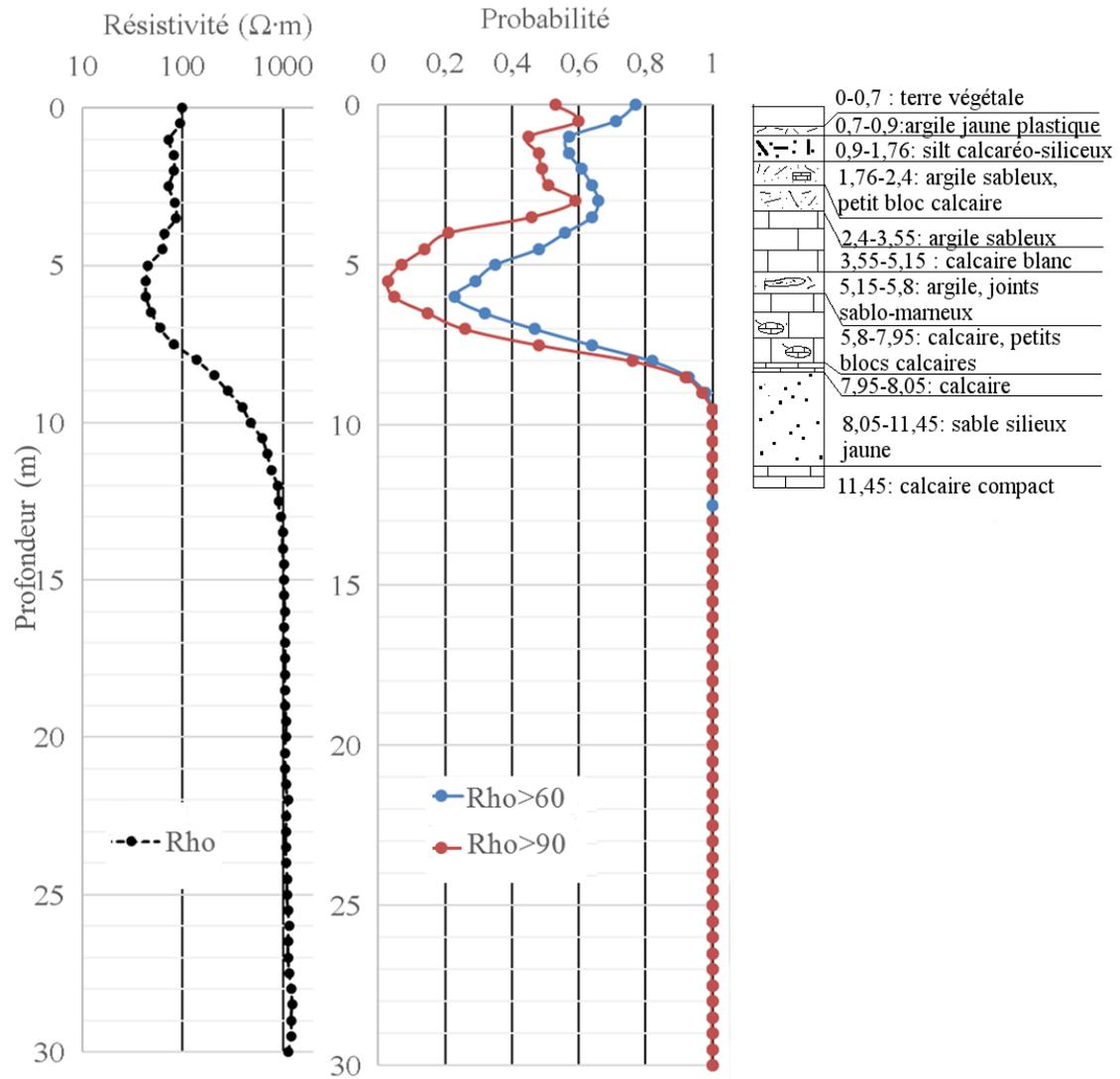
VII.B.13. Forage S6



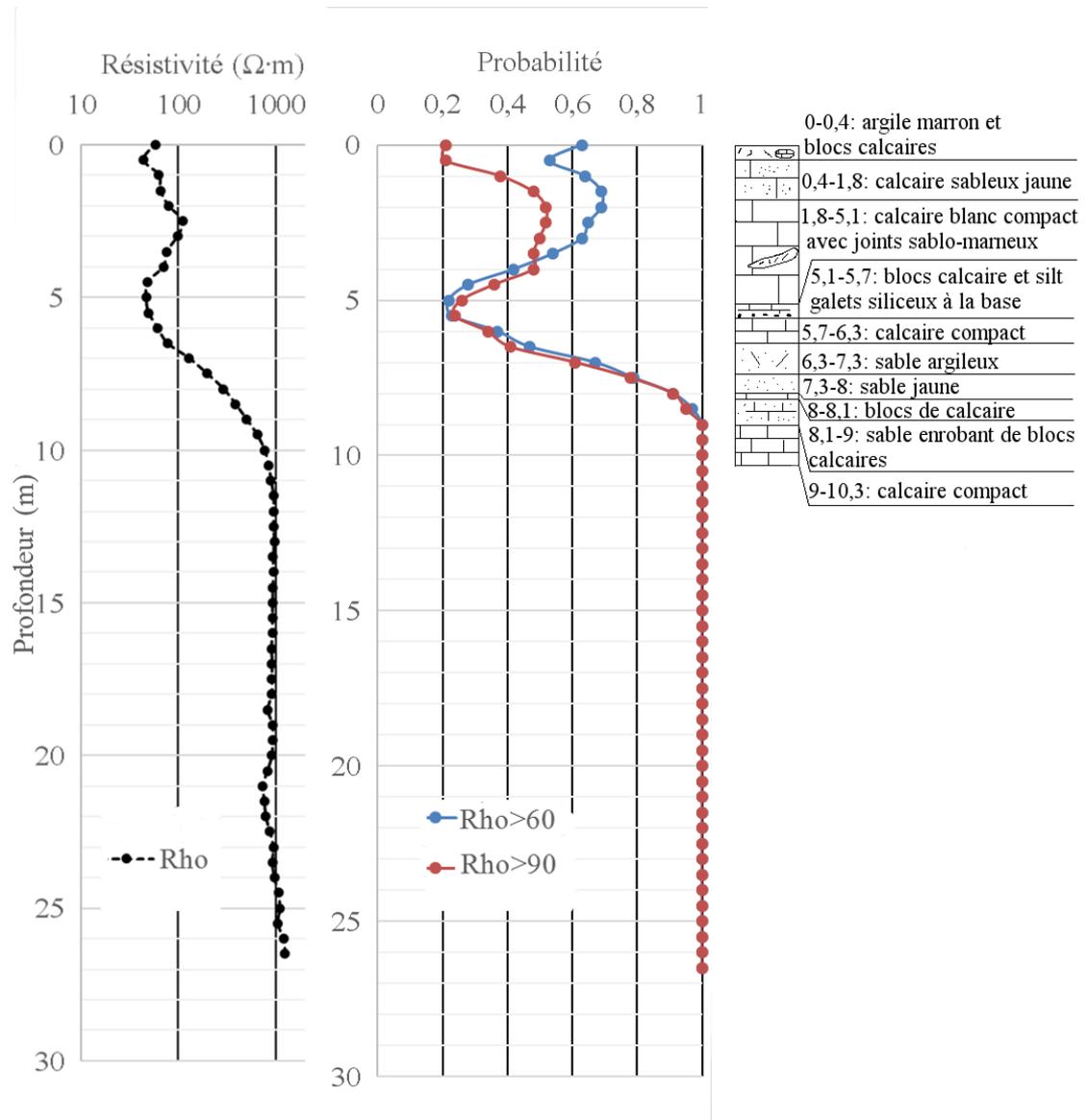
VII.B.14. Forage S7



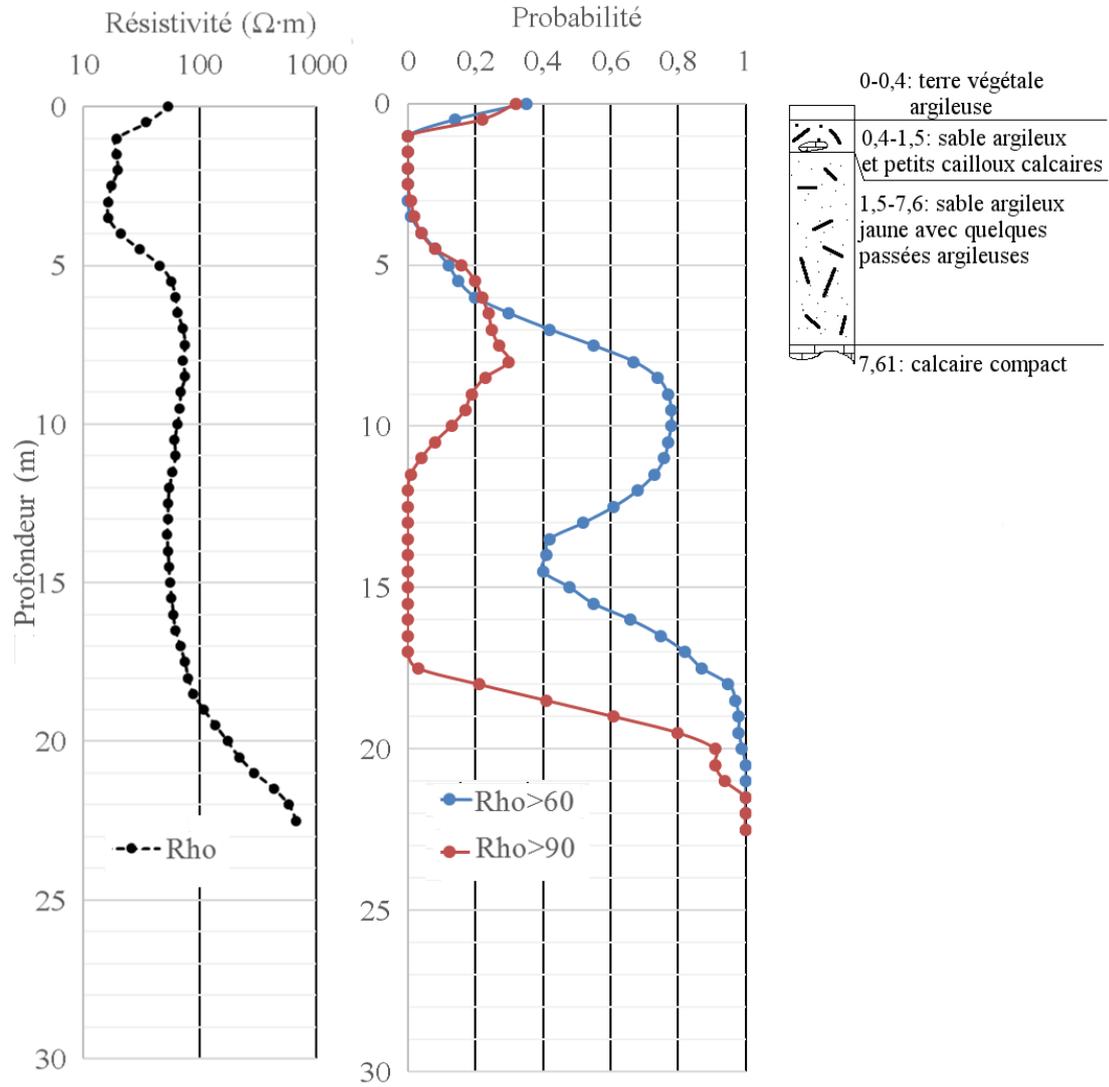
VII.B.15. Forage S8



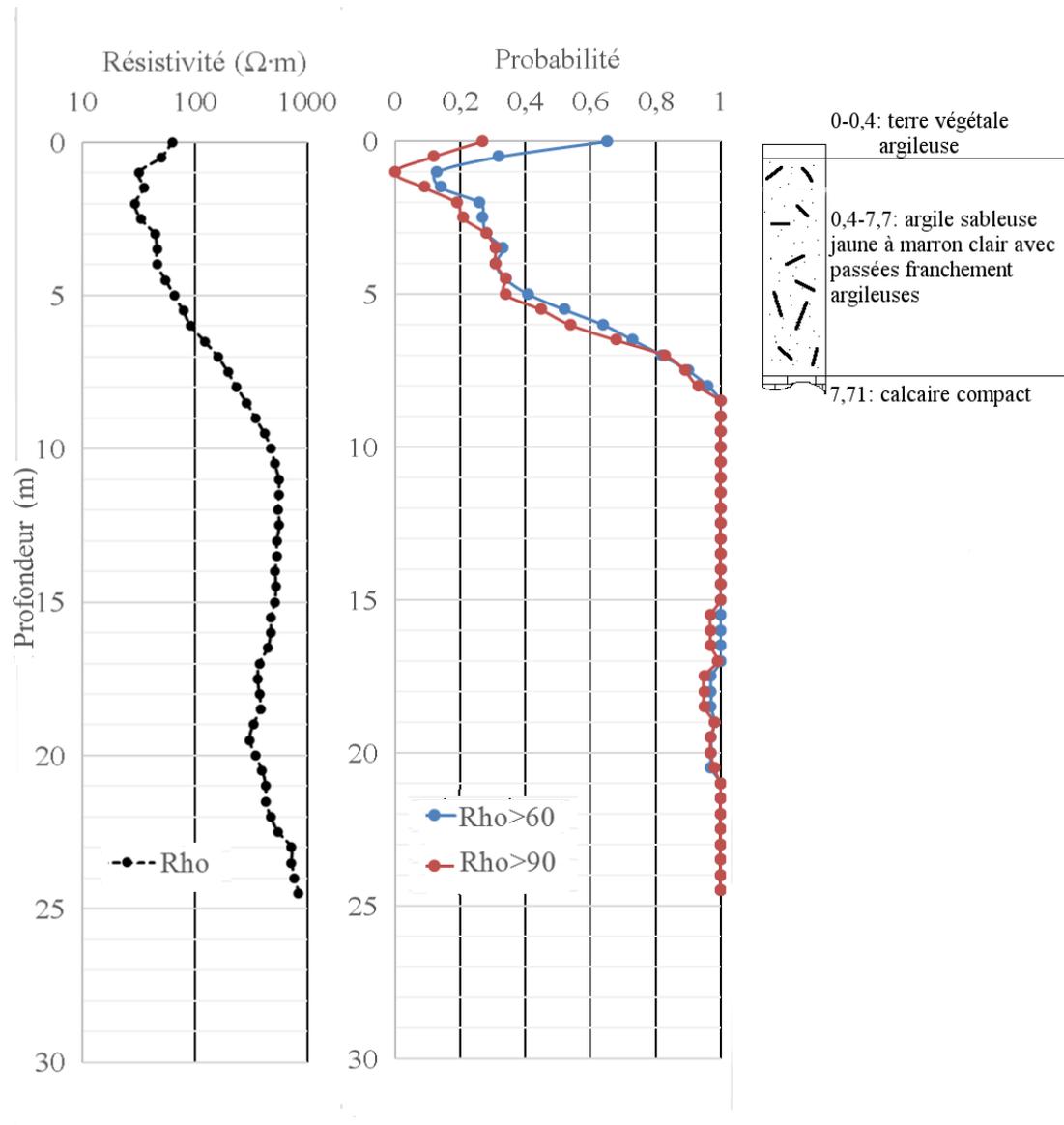
VII.B.16. Forage S9



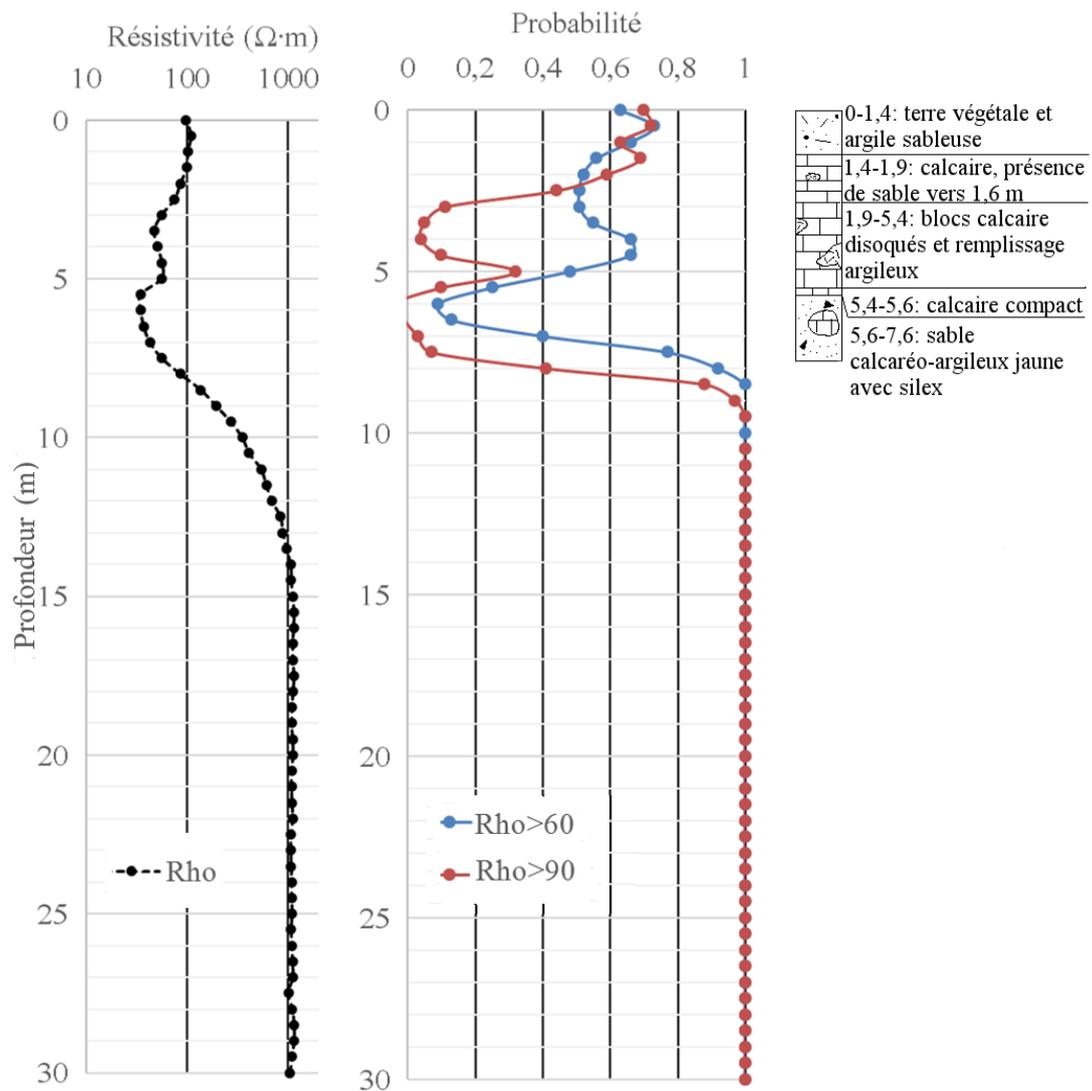
VII.B.17. Forage S11



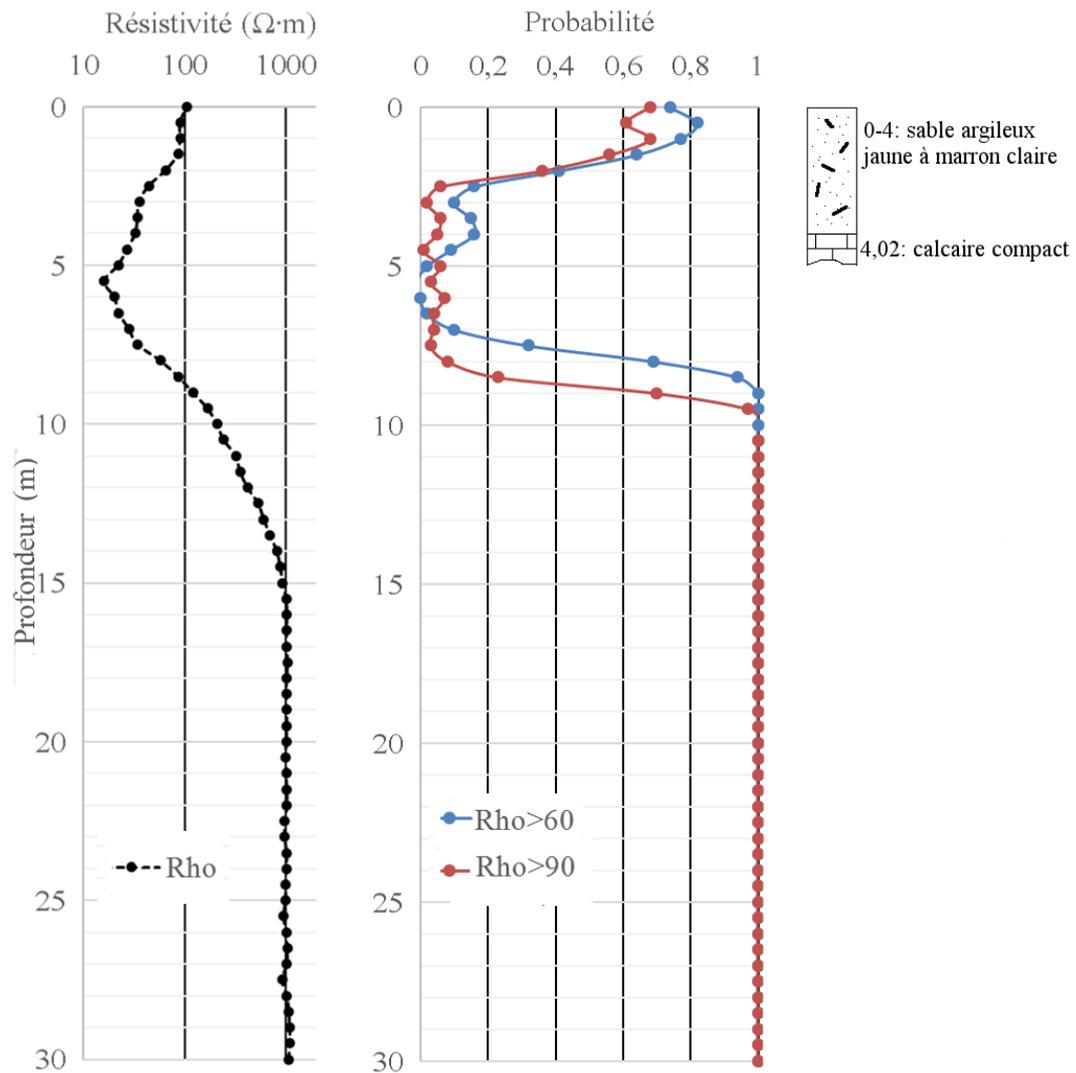
VII.B.18. Forage S12



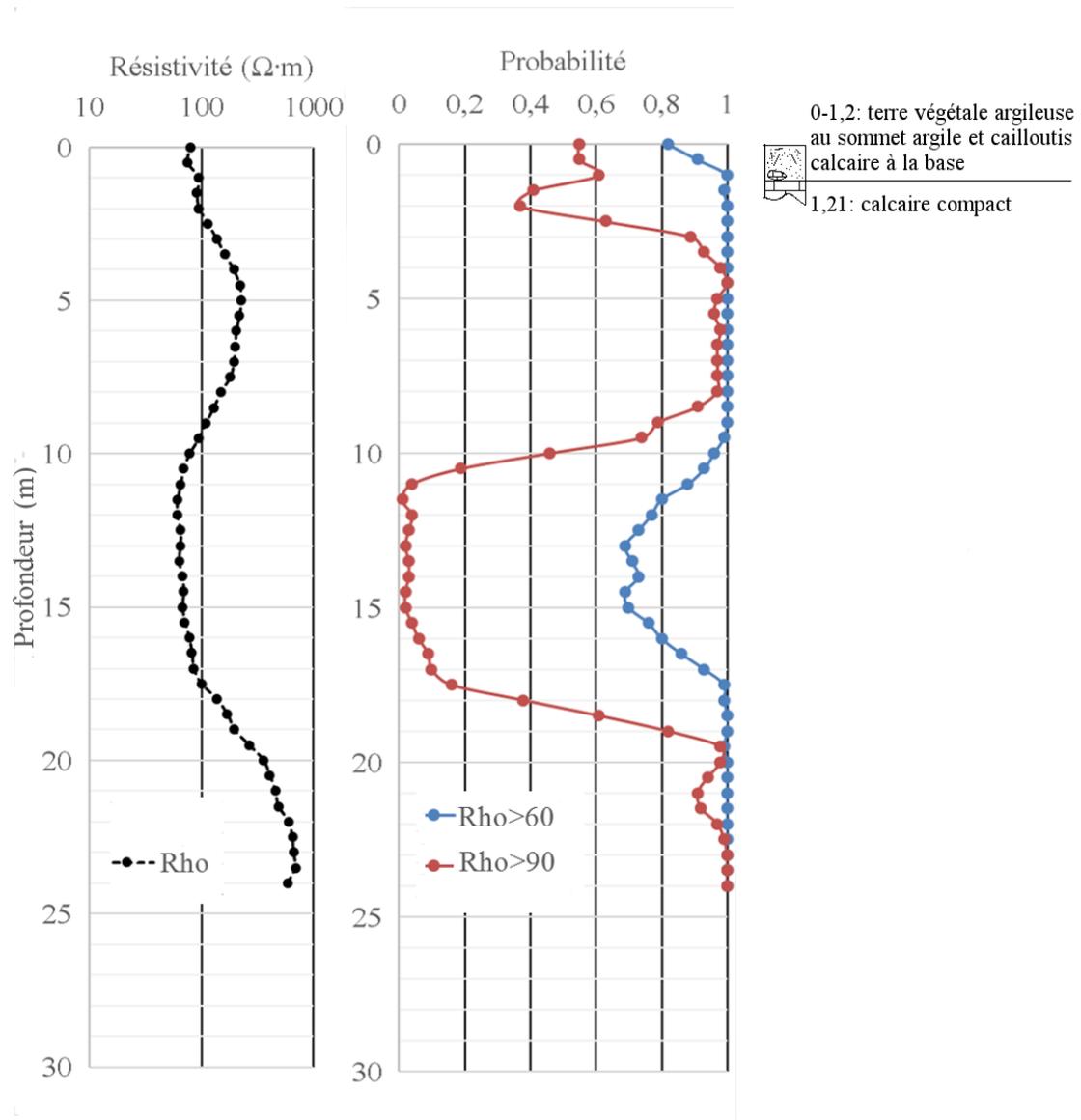
VII.B.19. Forage S14



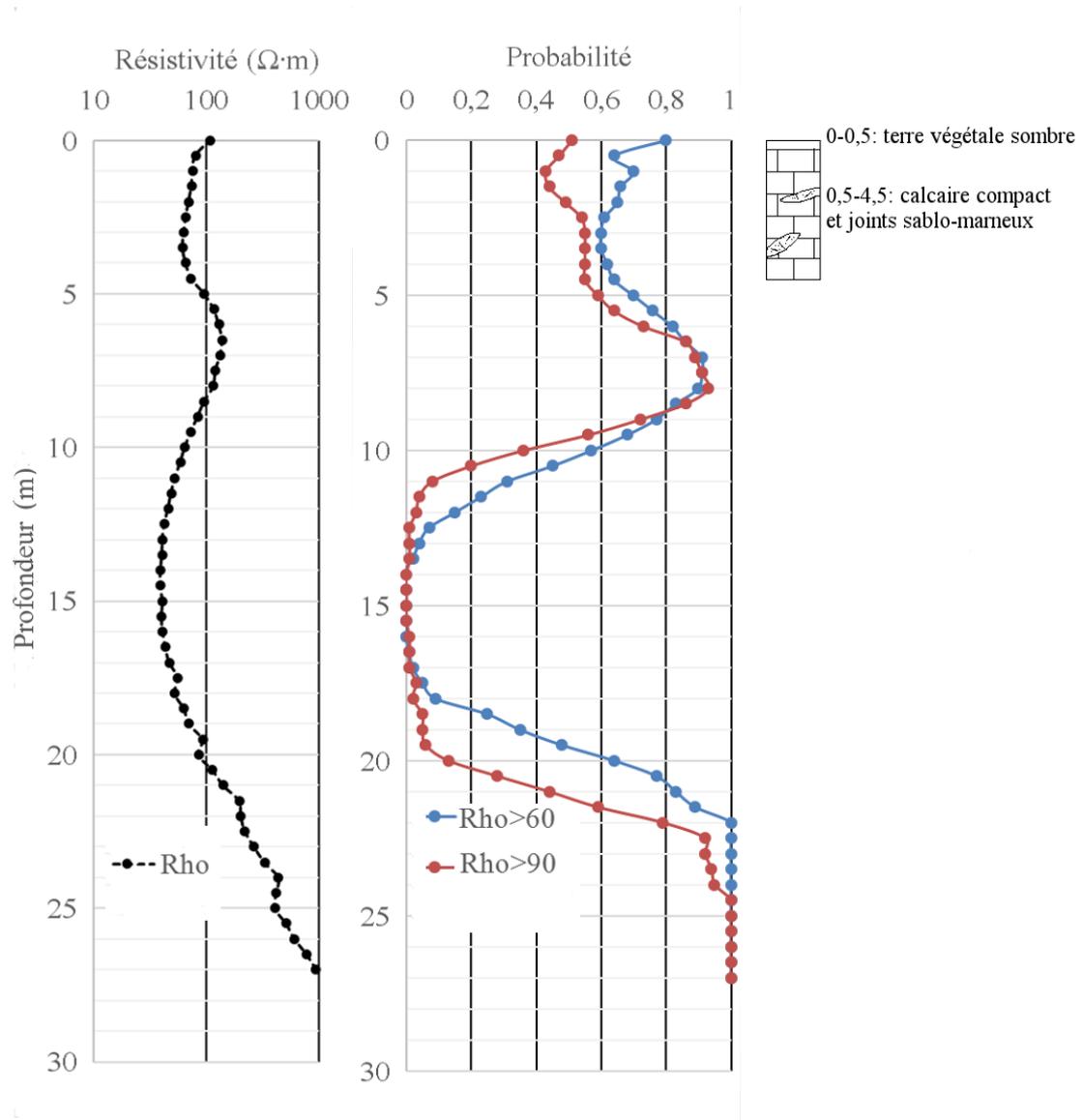
VII.B.20. Forage S16



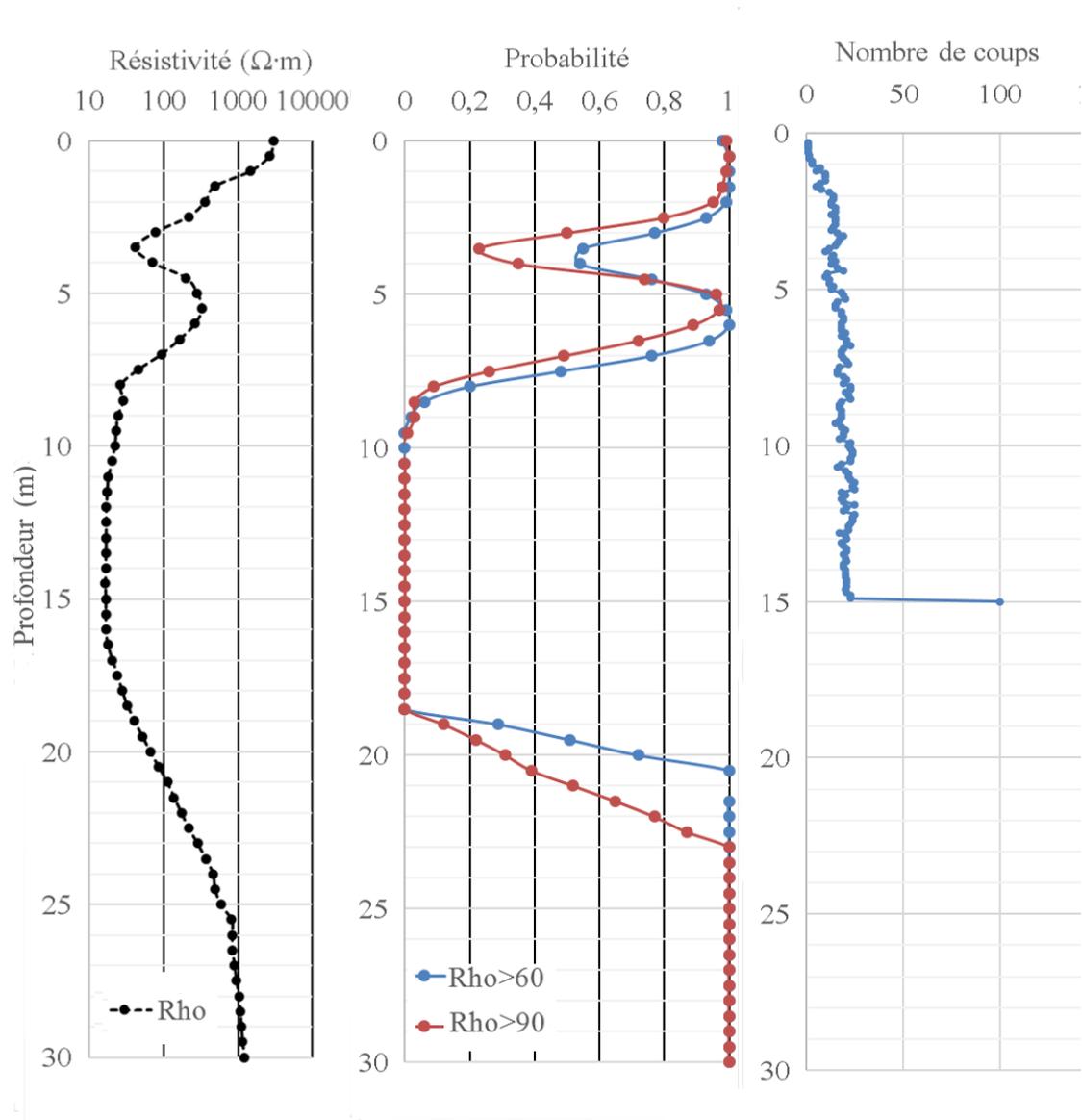
VII.B.21. Forage S18



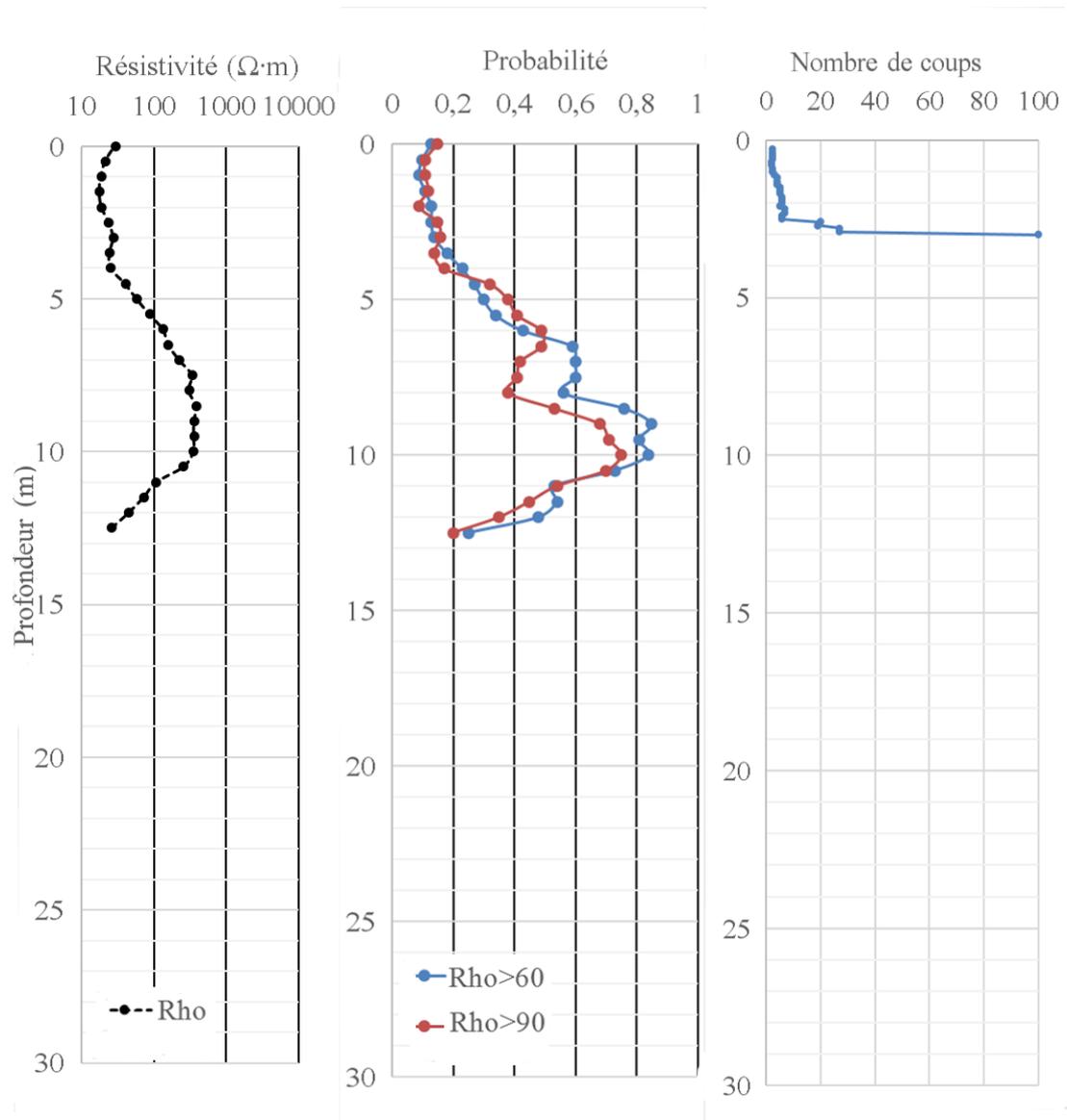
VII.B.22. Forage S20



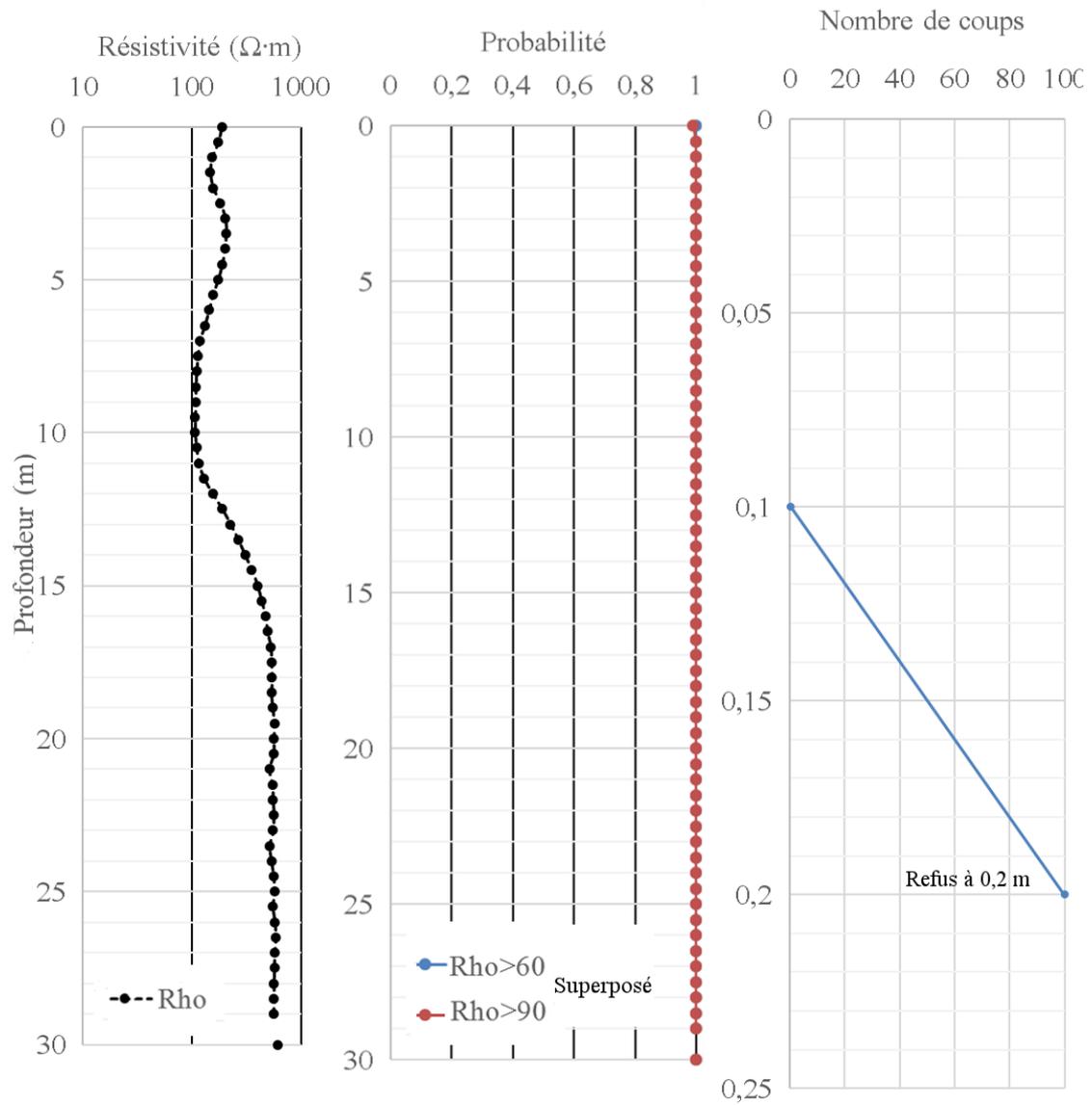
VII.B.23. P é n é t r o m è t r e P1



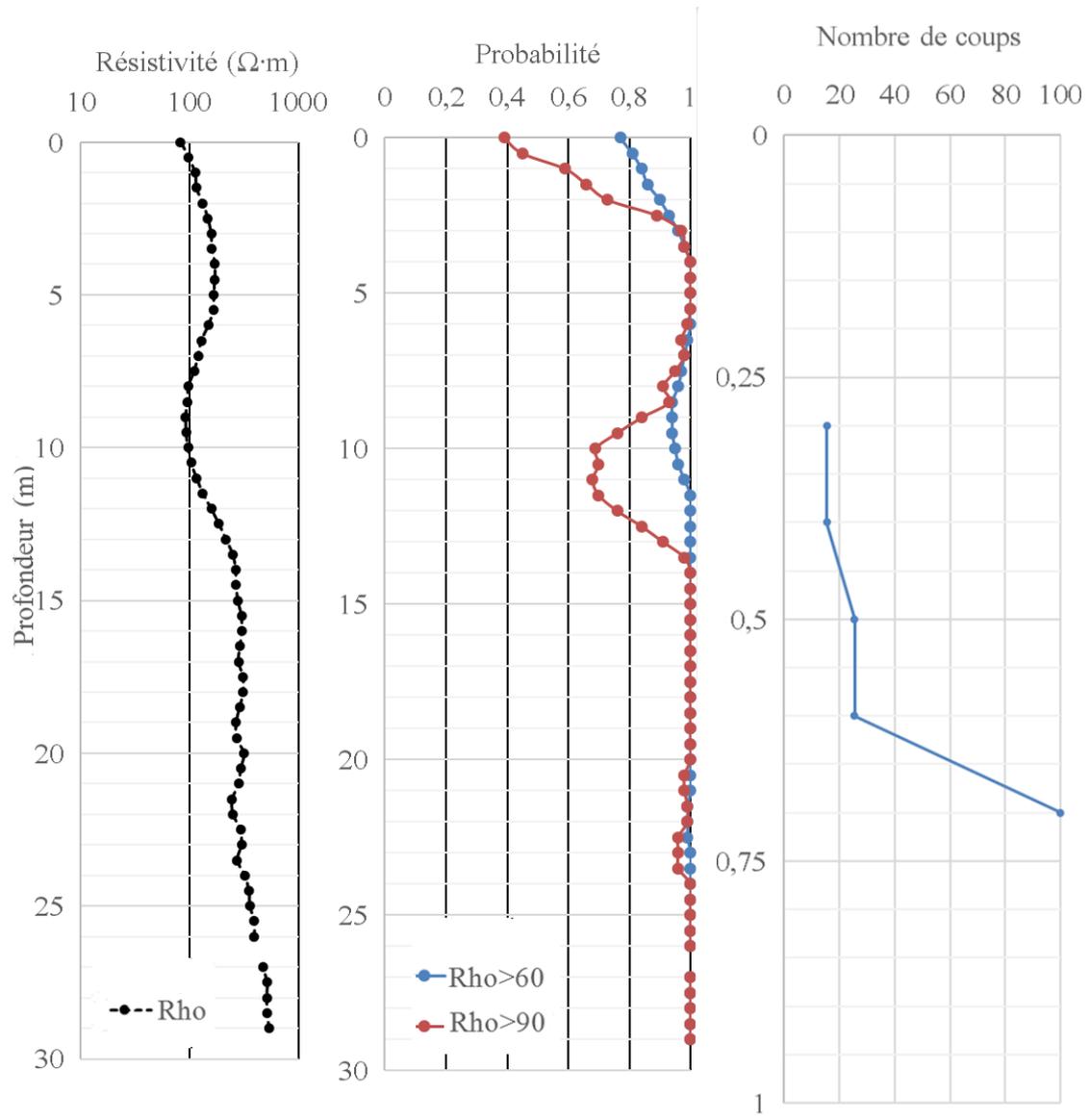
VII.B.24. P é n é t r o m è t r e P2



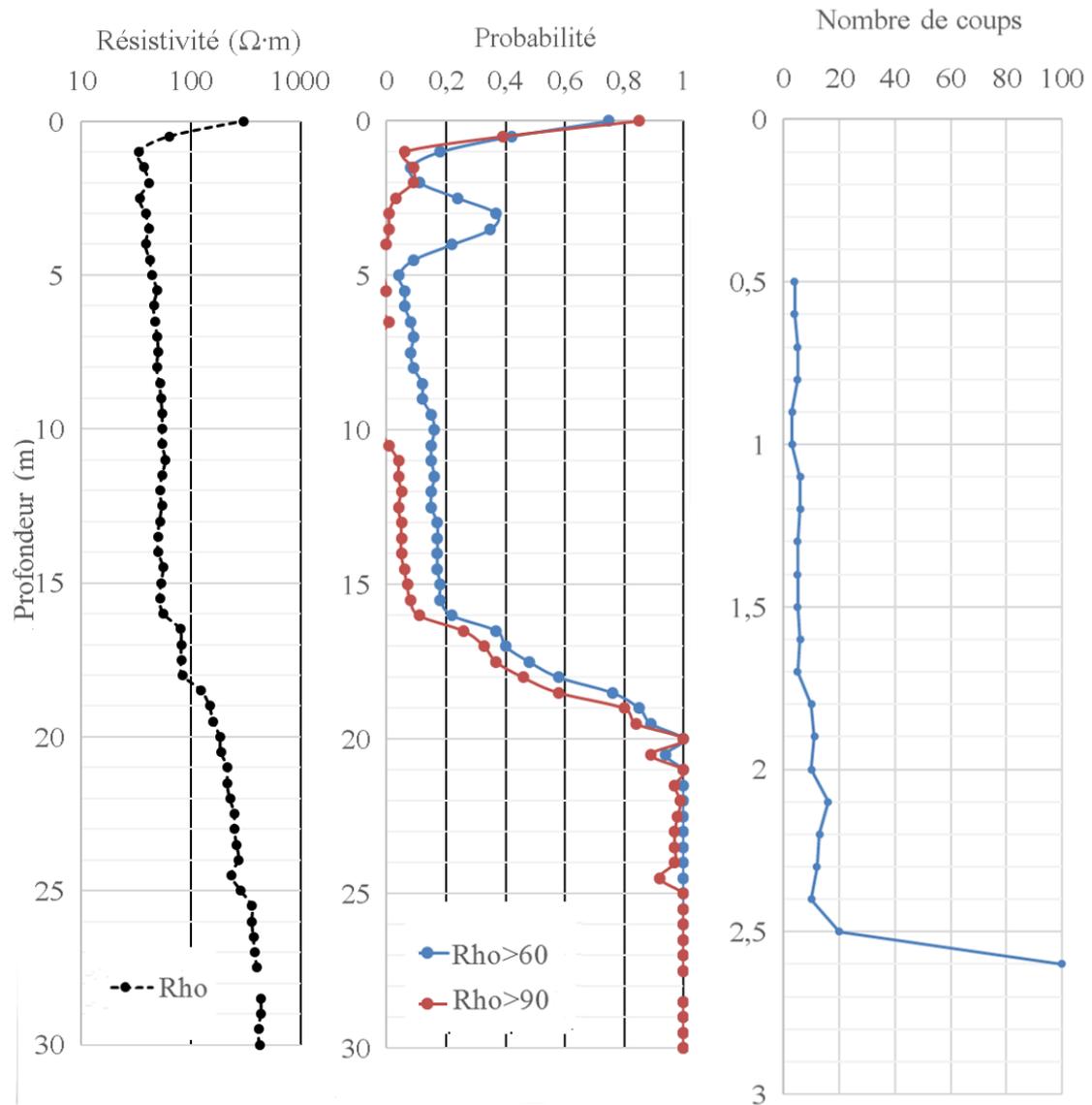
VII.B.25. P é n é t r o m è t r e P4



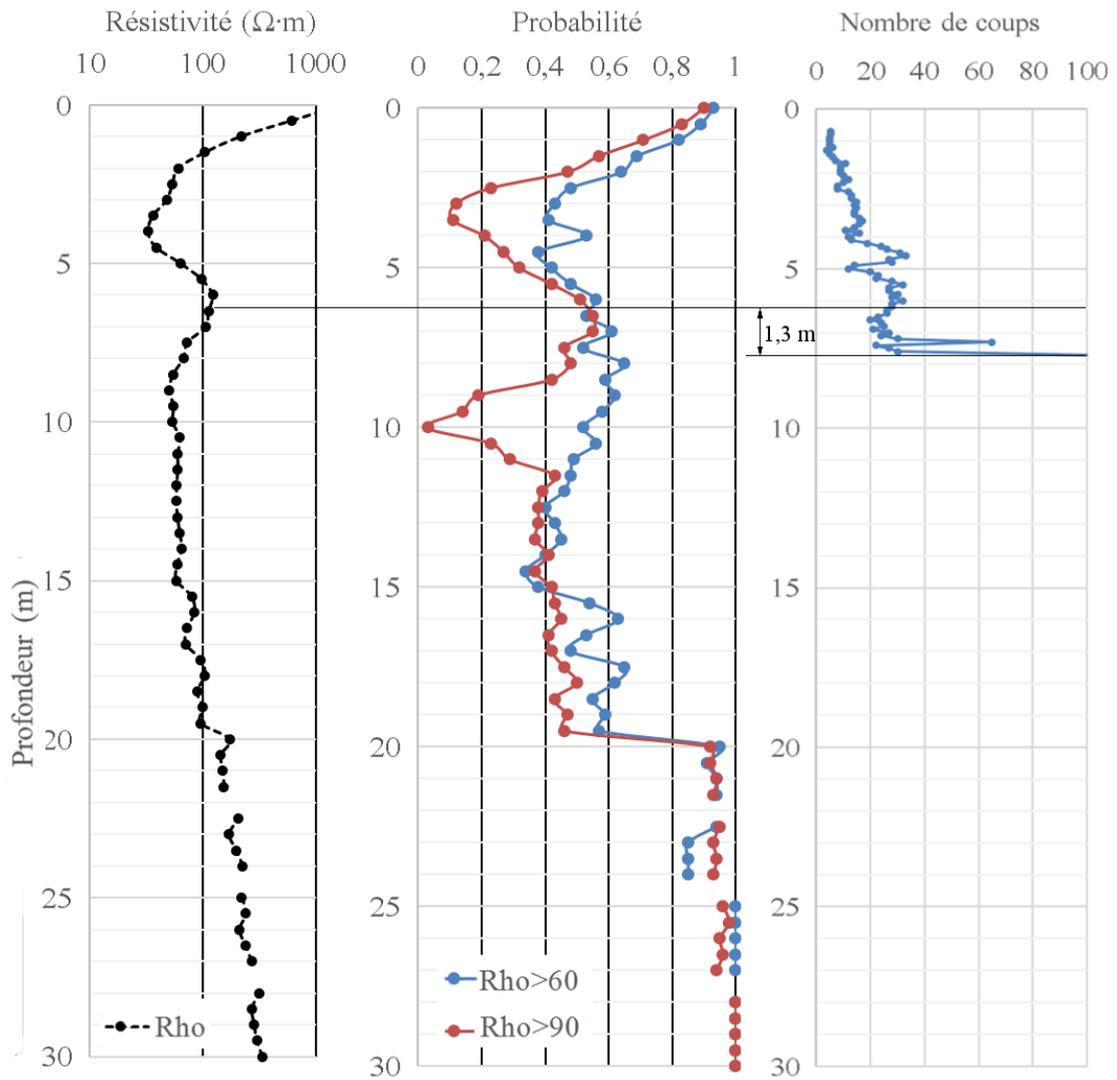
VII.B.26. P é n é t r o m è t r e P5



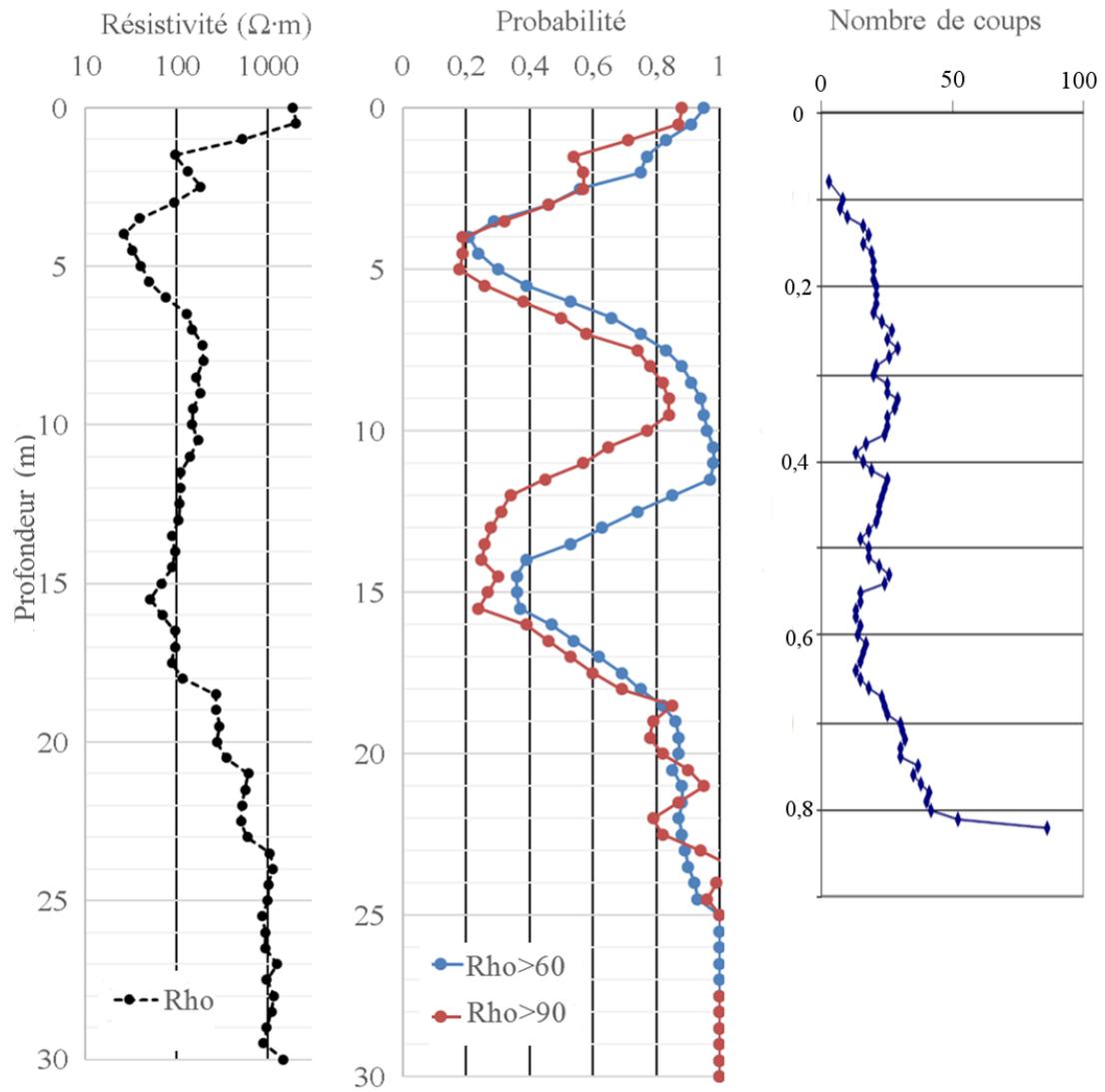
VII.B.27. P é n é t r o m è t r e P 6



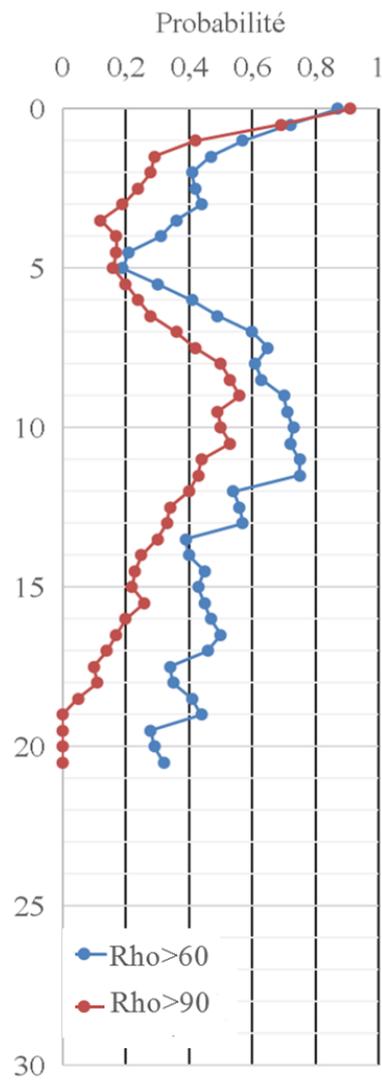
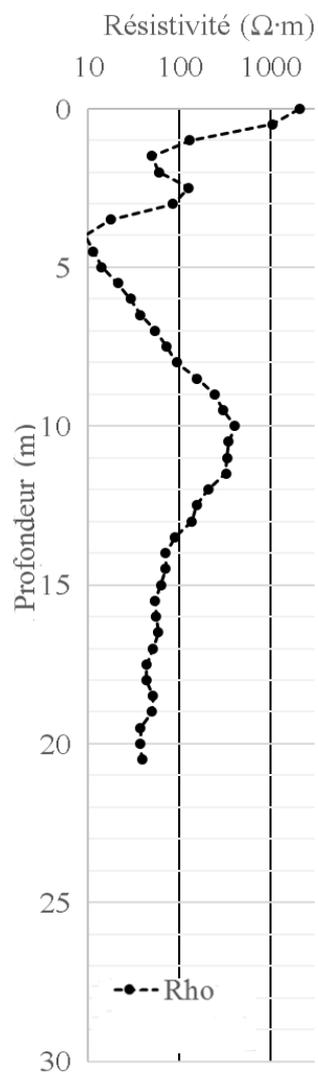
VII.B.28. P é n é t r o m è t r e P7



VII.B.29. P é n é t r o m è t r e P10



VII.B.30. P é n é t r o m è t r e P11TER



Refus à 0,27 m