

Document public

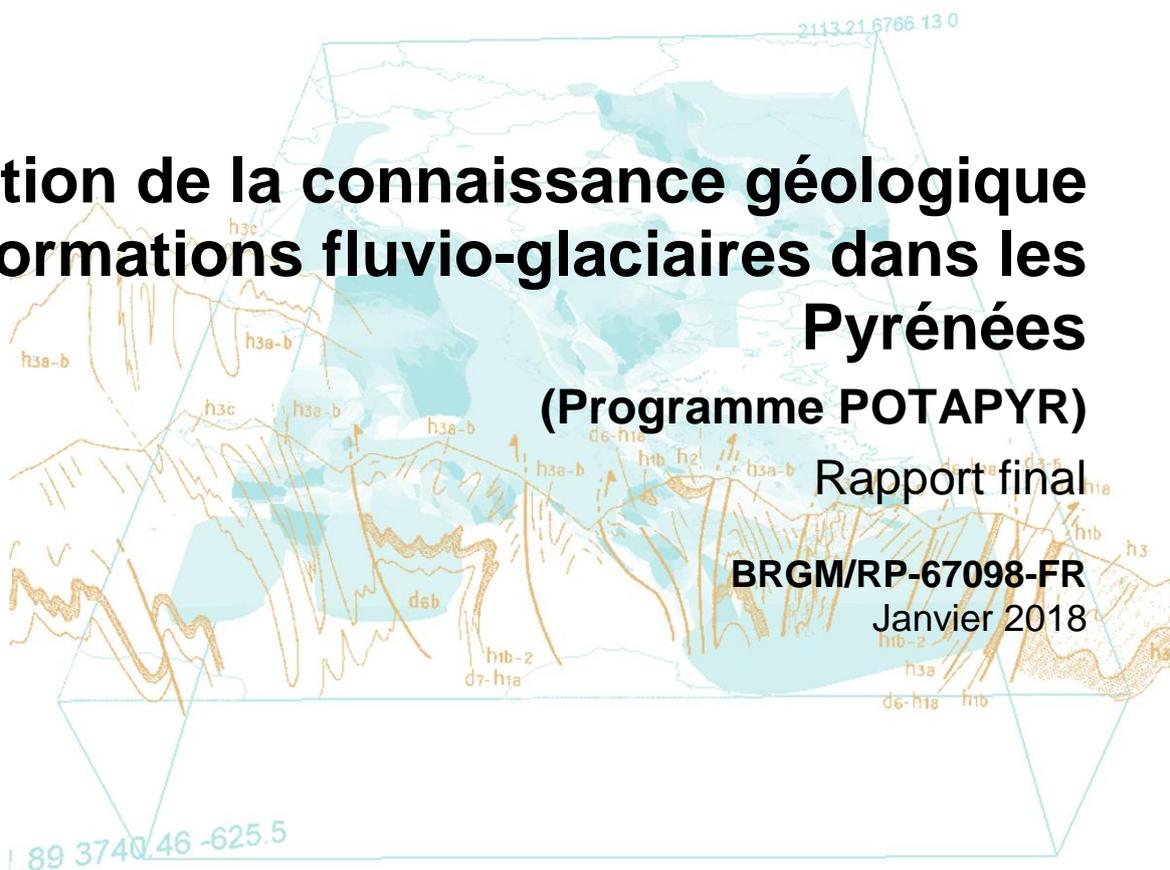


# Amélioration de la connaissance géologique des formations fluvio-glaciaires dans les Pyrénées (Programme POTAPYR)

Rapport final

BRGM/RP-67098-FR

Janvier 2018





# Amélioration de la connaissance géologique des formations fluvio-glaciaires dans les Pyrénées (Programme POTAPYR) Rapport final

**BRGM/RP-67098-FR**  
Janvier 2018

Étude réalisée dans le cadre des opérations  
de Service public du BRGM 2013-2017 (PSP13MPY22)

**B. Monod, JM. Gandolfi, M. Saplaïroles**  
Avec la collaboration de  
**B. Joseph**

**Vérificateur :**

Nom : **Gutierrez Alexis**

Fonction : Hydrogéologue

Date : 10/02/2018



**Approbateur :**

Nom : **Hau-Barras Anne-Valérie**

Fonction : Directeur régional délégué

Date : 19/02/2018



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



# Préambule

Ce préambule a pour objectif de présenter l'organisation des différents livrables réalisés dans le cadre du programme POTAPYR :

➤ **Rapport BRGM/RP-66912-FR :**

***Diagnostic des potentialités aquifères des formations géologiques de la chaîne pyrénéenne dans les départements des Hautes-Pyrénées, de la Haute-Garonne, et de l'Ariège (Programme POTAPYR)***

Il est accompagné de trois documents annexes :

- ❖ Carte hydrogéologique hors texte à l'échelle 1/200 000 des potentialités aquifères des formations de la chaîne pyrénéenne dans les départements des Hautes-Pyrénées, de Haute-Garonne et de l'Ariège
- ❖ Atlas hydrogéologique des potentialités aquifères des formations de la chaîne pyrénéenne dans les départements des Hautes-Pyrénées, de Haute-Garonne et de l'Ariège selon un découpage en 32 secteurs
- ❖ Annexes hors texte du présent rapport hydrogéologique

➤ **Rapport BRGM/RP-67178-FR**

***Amélioration de la connaissance géologique sur les profils d'altération des formations de socle dans la chaîne des Pyrénées (Programme POTAPYR)***

➤ **Rapport BRGM/RP-67098-FR (présent rapport)**

***Amélioration de la connaissance géologique des formations fluvio-glaciaires dans les Pyrénées (Programme POTAPYR)***

**Mots-clés :** Quaternaire, Glaciation, Fluvio-glaciaires, formations superficielles, sondage électrique, gravimétrie, sismique passive, aquifère, zone d'intérêt hydrogéologique, Hautes-Pyrénées, Haute-Garonne, Ariège, Pyrénées, Occitanie.

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

**Monod B., Gandolfi JM., Saplaïroles M., Joseph B.,** (2018) – Amélioration de la connaissance géologique des formations fluvio-glaciaires dans les Pyrénées. Programme POTAPYR. Rapport final BRGM/RP-67098-FR, 54 p., 18 ill., 8 ann.

## Synthèse

Dans le cadre du programme POTAPYR, et en complément du diagnostic des potentialités aquifères engagé sur l'ensemble des formations géologiques du massif des Pyrénées, il est apparu nécessaire de consacrer un volet spécifique à l'amélioration des connaissances géologiques des formations fluvio-glaciaires. En effet, à l'instar des exemples existants dans le massif des Alpes, les aquifères fluvio-glaciaires présents en zone de montagnes sont susceptibles de contenir des ressources en eau souterraine d'importance.

En l'absence de données hydrogéologiques, l'objectif recherché dans cette première approche sur les formations fluvio-glaciaires est d'apporter des éléments permettant de déterminer les secteurs les plus favorables à l'existence d'aquifères à fort potentiel hydrogéologique susceptibles d'intégrer une gestion globale des ressources en eau dans une optique de soutien des débits des grands cours d'eau du Bassin aquitain en période d'étiage.

Ce volet abordant les dépôts fluvio-glaciaires du projet POTAPYR a été principalement mené à partir d'investigations géophysiques avec l'acquisition de données gravimétriques, de sismique passive, et par sondages électriques. Elles ont été conduites dans l'optique de mieux contraindre la géométrie et la lithologie du remplissage fluvio-glaciaire des grandes vallées pyrénéennes.

Les secteurs étudiés correspondent à des zones d'élargissement de vallées, a priori plus favorables sur le plan hydrogéologique. Cette étude montre que ces élargissements sont systématiquement associés à des approfondissements du substratum sous les remplissages fluvio-glaciaires. Les profondeurs maximales interprétées atteignent près de 300 mètres pour les vallées du gave de Pau, de la Neste d'Aure et de la Garonne. Les dépôts caractérisés sont le plus souvent hétérogènes à granulométrie contrastée, allant de limons argileux peu transmissifs à des formations sensiblement plus résistantes et perméables attribuées à des blocs décimétriques à métriques, dans une matrice plus ou moins limoneuse ou sableuse. Cet ensemble de niveaux caractérise un aquifère multicouche mis en évidence dans la plupart des vallées étudiées. Il est toutefois important de noter que ces outils géophysiques présentent des limites d'utilisation propres à chacune des méthodes et ne permettent pas, ici, l'acquisition de données précises et suffisantes pour de telles profondeurs.

Le programme POTAPYR a permis de dresser la cartographie des zones fluvio-glaciaires d'intérêt hydrogéologique supposé avec 5 secteurs suspectés correspondre à des réservoirs aquifères contenant des ressources en eau, permettant à terme de mettre en place une gestion stratégique de soutien d'étiage des cours d'eau, et 5 secteurs correspondant potentiellement à des réservoirs aquifères contenant des ressources en eau intéressantes pour des enjeux locaux notamment en termes d'approvisionnement en eau potable.

Pour compléter ces premiers travaux et avancer dans la connaissance hydrogéologique de ces aquifères méconnus, il sera nécessaire d'investiguer un ou plusieurs de ces secteurs par la réalisation de forages exploratoires. Au regard des stratégies qui seront menées par les décideurs pour affronter les défis du futur en matière de gestion des ressources en eaux du Bassin Adour-Garonne, de tels investissements devront être confrontés à la réalité économique et aux potentiels bénéfiques environnementaux qui s'en dégageront.



## Sommaire

<b>1. Introduction.....</b>	<b>9</b>
1.1. CONTEXTE .....	9
1.2. OBJECTIFS .....	10
<b>2. Les formations fluvio-glaciaires dans les Pyrénées .....</b>	<b>11</b>
2.1. PRÉSENTATION ET CONDITIONS DE DÉPÔT .....	11
2.2. NATURE DES DÉPÔTS FLUVIO-GLACIAIRES ET IMPLICATIONS HYDROGÉOLOGIQUES .....	14
<b>3. Méthodologie et méthodes mise en œuvre.....</b>	<b>15</b>
3.1. APPROCHE METHODOLOGIQUE.....	15
3.2. DONNÉES GÉOPHYSIQUES.....	16
3.2.1.Sondages électriques .....	16
3.2.2.Gravimétrie .....	17
3.2.1.Sismique passive.....	20
<b>4. Epaisseur et nature des remplissages fluvio-glaciaires des vallées pyrénéennes.....</b>	<b>21</b>
4.1. L'ARIÈGE AMONT.....	21
4.1.1.Présentation géologique .....	21
4.1.2.Description et interprétation des données acquises .....	21
4.1.3.Discussion et conclusion.....	23
4.2. LA GARONNE .....	24
4.2.1.Présentation géologique .....	24
4.2.2.Description et interprétation des données acquises .....	24
4.2.1.Discussion et conclusion.....	26
4.3. LA PIQUE .....	27
4.3.1.Présentation géologique .....	27
4.3.2.Description et interprétation des données acquises .....	27
4.3.1.Discussion et conclusion.....	29
4.4. LA NESTE D'AURE .....	29
4.4.1.Présentation géologique .....	29
4.4.1.Description et interprétation des données acquises .....	31
4.4.2.Discussion et conclusion.....	32
4.5. LA NESTE ET LE CÔNE DE LANNEMEZAN .....	32
4.5.1.Présentation géologique .....	32

4.5.2. Description et interprétation des données acquises .....	32
4.5.3. Discussion et conclusion .....	33
4.6. LE GAVE DE PAU AMONT .....	34
4.6.1. Présentation géologique .....	34
4.6.1. Description et interprétation des données acquises .....	34
4.6.1. Discussion et conclusion .....	37
<b>5. Synthèse des connaissances acquises .....</b>	<b>39</b>
5.1. GÉOMÉTRIE DES VALLÉES ET ÉPAISSEUR DE REMPLISSAGE .....	39
5.2. LITHOLOGIE DES REMPLISSAGES .....	39
5.3. CARTOGRAPHIE DES ZONES FLUVIO-GLACIAIRES D'INTERET HYDROGÉOLOGIQUE .....	40
<b>6. Conclusions et perspectives .....</b>	<b>49</b>
<b>7. Bibliographie .....</b>	<b>53</b>
<b>8. Annexes .....</b>	<b>55</b>

## Liste des figures

Illustration 1 - Carte des 6 grands types de formations géologiques superficielles du secteur d'étude d'après la carte géologique régionale à 1/250 000 de Midi-Pyrénées (BRGM projet GARVEMIP, Monod et al., 2014) .....	12
Illustration 2 – Extrait de la carte d'extension des glaciers pyrénéens au Quaternaire, modifié d'après Calvet (2004).....	13
Illustration 3 – Localisation des 24 sondages électriques réalisés dans les principales vallées de la zone d'étude.....	19
Illustration 4 – Position des 201 stations gravimétriques implantées sur le terrain dans les vallées du Gave de Pau, de la Neste d'Aure et de la Garonne .....	20
Illustration 5 – Carte géologique de la vallée de l'Ariège amont extraite de la carte géologique à 1/250 000 de Midi-Pyrénées (BRGM projet GARVEMIP, Monod et al., 2014) et localisation des trois sondages électriques. Pour ne pas surcharger la figure, seuls les numéros des sondages électriques sont représentés sur la carte : 5=SE5, 6=SE6, 7=SE7 (ceci s'applique à toutes les figures de la partie 4).....	22
Illustration 6 – Description de la nature du remplissage fluvio-glaciaire du forage d'Ussat-les-bains (source ANTEA, forage référencé 10873X0044/F).....	23
Illustration 7 – Carte des dépôts de marge glaciaire dans la vallée de l'Ariège au niveau d'Ussat-les-Bains, position des forages ayant atteint le substratum et du sondage électrique SE5 (extrait et modifié de Delmas et al., 2012) .....	23
Illustration 8 – Carte géologique de la vallée de la Garonne extraite des cartes géologiques harmonisées de la Haute-Garonne et des Hautes-Pyrénées (BRGM) et localisation des trois sondages électriques. ....	25

Illustration 9 – Gauche : Carte topographique de la vallée de la Garonne montrant l'épaisseur des dépôts quaternaires (lignes d'isoprofondeur en noir) calculées à partir des données de gravimétrie pour un contraste de densité remplissage/substratum de 600 kg/m <sup>3</sup> (modifiée d'après Perrouty et al., 2015). Localisation de la coupe de droite par la ligne en tirets blancs. Droite : Coupe longitudinale de la vallée de Marignac au sud à Barbazan au nord, avec projection des sondages électriques. La ligne rouge représente la profondeur calculée pour un contraste de densité de 600 kg/m <sup>3</sup> . Les lignes verte et noire représentent la profondeur calculée pour des contrastes de densité de 500 et 400 kg/m <sup>3</sup> respectivement. La courbe noire en pointillés montre le résultat brut de l'inversion des données gravimétriques de la carte de gauche pour un contraste de densité de 600 kg/m <sup>3</sup> . Elle montre l'influence des points de mesure situés sur les bords de la vallée pour les secteur du centre de la vallée où il n'y a pas de données. ....	26
Illustration 10 – Carte géologique de la vallée de la Pique extraite de la carte géologique harmonisée de la Haute-Garonne (BRGM) et localisation du sondage électrique SE25.....	28
Illustration 11 – Carte géologique de la vallée d'Aure extraite de la carte géologique harmonisée des Hautes-Pyrénées (BRGM) et localisation des stations de mesures de sismique passive et de gravimétrie, et des sondages électriques, du forage de Saint-Lary (étoile jaune à bord noir).La ligne noire en pointillés correspond à la trace de la coupe de l'illustration 12 .....	30
Illustration 12 – Epaisseur des dépôts fluvio-glaciaires de la vallée d'Aure d'après les données de (c) sismique passive pour Vs = 590 m/s et de (f) gravimétrie pour un contraste de densité remplissage/substratum fixé à 600 kg/m <sup>3</sup> . (d) Coupe longitudinale de la vallée (profil L sur (f) et ligne en pointillés sur Illustration 11) montrant la géométrie du plancher et la structure du substratum. A : Ancizan, G : Guchan, SL : saint-Lary. L'incertitude sur les profondeurs interprétées de la gravimétrie est de 25 mètres, celle provenant de la sismique passive est donnée par les barres d'erreur pour chaque station de mesure .....	31
Illustration 13 – Carte géologique de la vallée de la Neste extraite de la carte géologique harmonisée des Hautes-Pyrénées (BRGM) et localisation des 3 sondages électriques .....	33
Illustration 14 – Carte géologique de la vallée du gave de Pau extraite de la carte géologique harmonisée des Hautes-Pyrénées (BRGM) et localisation des stations de mesures gravimétriques, des sondages électriques et de la faille de Pierrefitte en trait noir gras ..	35
Illustration 15 – Gauche : Carte topographique de la vallée du gave de Pau montrant l'épaisseur des dépôts quaternaires (isohypses en noir) calculée à partir des données de gravimétrie pour un contraste de densité remplissage/substratum de 600 kg/m <sup>3</sup> (modifiée d'après Perrouty et al., 2015). Localisation de la coupe sur la carte de gauche par la ligne en tirets blancs. Droite : Coupe longitudinale de la vallée du gave de Pau entre Pierrefitte-Nestalas et Agos-Vidalos. Les losanges noirs représentent les points de mesures le long de la coupe. La ligne rouge représente la profondeur calculée pour un contraste de densité de 600 kg/m <sup>3</sup> . Les lignes verte et noire représentent la profondeur calculée pour des contrastes de densité de 500 et 400 kg/m <sup>3</sup> respectivement. La courbe noire en pointillés montre le résultat brut de l'inversion des données gravimétriques de la carte de gauche pour un contraste de densité de 600 kg/m <sup>3</sup> . Elle montre l'influence des points de mesure situés sur les bords de la vallée pour les secteur du centre de la vallée où il n'y a pas de données. ....	36
Illustration 16 – Carte des dépôts fluvio-glaciaires s.l. des vallées pyrénéennes (fond de carte MNT au pas de 50 m) et identification des zones d'intérêt hydrogéologique. Les traits noirs correspondent aux limites des secteurs étudiés dans l'atlas hydrogéologique (BRGM/RP-66912-FR) .....	45
Illustration 17 – Carte des zones fluvio-glaciaires d'intérêt hydrogéologique présentées sur la carte hydrogéologique des Pyrénées à l'échelle 1/200 000 des potentialités aquifères des formations de la chaîne pyrénéenne dans les départements des Hautes-Pyrénées, de la Haute-Garonne et de l'Ariège (légende présentée en Illustration 18), d'après les travaux du rapport BRGM/RP-66912-FR .....	46

Illustration 18 – Légende de la carte hydrogéologique des Pyrénées à l'échelle 1/200 000 présentée en Illustration 17, d'après les travaux du rapport BRGM/RP-66912-FR..... 47

## Liste des annexes

<b>Annexe1 Liste des sondages électriques réalisés</b> .....	55
Annexe 2 Coupes géoélectriques et géologiques interprétatives des sondages électriques réalisés dans la vallée de l'Ariège amont.....	59
Annexe 3 Coupes géoélectriques et géologiques interprétatives des sondages électriques réalisés dans la vallée de la Garonne .....	67
Annexe 4 Coupes géoélectriques et géologiques interprétatives des sondages électriques réalisés dans la vallée de la Pique .....	73
Annexe 5 Coupes géoélectriques et géologiques interprétatives des sondages électriques réalisés dans la vallée de la Neste d'Aure .....	77
Annexe 6 Coupes géoélectriques et géologiques interprétatives des sondages électriques réalisés dans la vallée de la Neste et le cône de Lannemezan .....	87
Annexe 7 Coupes géoélectriques et géologiques interprétatives des sondages électriques réalisés dans la vallée du gave de Pau.....	93
Annexe 8 Rapport technique des résultats de prospection de gravimétrie et de sismique passive en vallée d'Aure et vallée de la Garonne .....	99

# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE

Le programme POTAPYR (Diagnostic des Potentialités Aquifères des formations de la chaîne pyrénéenne dans les départements des Hautes-Pyrénées, de la Haute-Garonne, et de l'Ariège, 2013-2017) a pour principal objectif d'établir une typologie des formations géologiques en termes de potentialités aquifères, et de hiérarchiser ces formations en fonction de leur intérêt hydrogéologique sur le massif des Pyrénées. Ce programme constitue une étape indispensable pour mener une réflexion cohérente de gestion des ressources en eau à l'échelle d'une chaîne de montagnes. Il s'agit notamment d'accompagner les collectivités locales en charge de l'alimentation en eau potable sur leur territoire, mais aussi de faciliter la proposition de stratégies d'envergure sur l'ensemble de la région Occitanie, voire du Bassin Adour-Garonne vis-à-vis des enjeux du futur. Un de ces principaux enjeux, intervenant dans le cadre d'une solidarité amont / aval, est de caractériser le rôle des eaux souterraines vis-à-vis du soutien d'étiage des cours d'eau.

Différentes démarches sont envisagées pour préserver, dans le futur, le débit des grands cours d'eau du Bassin prenant naissance dans le massif pyrénéen, et ainsi anticiper les impacts liés aux changements globaux (gestion optimisée des prélèvements d'eau, amélioration ou changement des pratiques agricoles, sensibilisation aux économies d'eau, mise en œuvre de projets de recharges artificielles dans les plaines, transferts d'eau interbassins, lâchers de barrages pour le soutien d'étiage, etc.).

Les aquifères fluvio-glaciaires présents en zone de montagnes sont susceptibles de contenir des ressources en eau souterraine d'importance, voire de constituer de « nouvelles » ressources en eau directement ou indirectement valorisables dans la gestion du débit des cours d'eau lorsqu'ils ne participent pas déjà à leurs écoulements. Au même titre que les autres scénarii proposés pour répondre aux défis de demain, ces aquifères constituent une potentielle solution à étudier dans une vision de gestion globale des ressources en eau.

En effet, ces aquifères présentent un réel intérêt par leur position au sein des vallées, là où réside la majorité de la population en zone de montagnes. Ils sont donc plus facilement accessibles, et proches des enjeux socio-économiques. La géométrie de ces aquifères est contrainte par la forme des vallées modelée par les glaciers pyrénéens au cours de l'histoire géologique. La nature de remplissage des réservoirs fluvio-glaciaires est constituée d'éléments à granulométrie variables potentiellement grossiers à très grossiers selon les conditions de leurs dépôts. Ce paramètre leur confère une porosité souvent élevée, constituant ainsi des aquifères à fort intérêt hydrogéologique. Ce type de configuration est en particulier reconnu dans le massif des Alpes où ce type d'aquifère se caractérise par des ouvrages présentant d'importants débits (plusieurs centaines de m<sup>3</sup>/h, soit un volume annuel pouvant dépasser quelques millions de m<sup>3</sup>). Ces aquifères sont généralement structurés en multicouches. Ils sont alimentés aussi bien directement au niveau de leur impluvium, voire en relation avec des éboulis de cônes de déjection, que latéralement et en profondeur à partir des formations encaissantes à fort potentiel aquifère (notamment de type karstique).

Dans le massif des Pyrénées ces aquifères sont très peu étudiés et faiblement exploités. Les quelques ouvrages d'eau recensés sont le plus souvent peu profonds, ne recoupant pas l'intégralité de l'aquifère et donc ne sollicitant pas sa partie la plus profonde, potentiellement plus productive. Dans le cadre du programme POTAPYR, et en complément du diagnostic des potentialités aquifères engagé sur l'ensemble des formations géologiques du massif des

Pyrénées (rapport BRGM/RP-66912-FR), il est apparu nécessaire de consacrer un module spécifique du programme à l'amélioration des connaissances géologiques des formations fluvio-glaciaires. Ces éléments doivent permettre de déterminer les secteurs les plus favorables à l'existence d'aquifères à fort potentiel hydrogéologique susceptibles d'intégrer une gestion globale des ressources en eau dans une optique de soutien des débits des grands cours d'eau du Bassin aquitain en période d'étiage.

## 1.2. OBJECTIFS

Le potentiel aquifère des formations fluvio-glaciaires dépend de nombreux paramètres (Parriaux et Nicoud, 1993). Les plus importants d'entre eux sont :

- la géométrie du réservoir avec une extension latérale contrainte par la largeur des vallées souvent encaissées dans le massif des Pyrénées, du moins dans leurs parties situées en amont. L'épaisseur des dépôts est en relation avec l'histoire géologique et en particulier avec la dynamique des glaciers influant sur leur capacité à provoquer d'importants surcreusements dans le substratum (sillons glaciaires, lacs temporaires) ;
- la porosité pouvant être plus ou moins élevée et qui structure l'organisation des écoulements au sein de l'aquifère. Elle dépend de la nature des dépôts en présence, de la granulométrie, des modes de remplissage, de l'altération des sédiments. Ces dépôts sont le plus souvent hétérogènes et les perméabilités y sont fortement contrastées, générant l'existence d'aquifères structurés en multicouches ;
- les conditions d'alimentation de ces réservoirs, alimentés principalement dans leurs parties supérieures par les précipitations s'infiltrant au niveau de leur impluvium. Ces aquifères sont le plus souvent en relation hydraulique avec les cours d'eau qui les drainent. Par ailleurs, des alimentations latérales de ces dépôts à des profondeurs plus ou moins importantes sont envisageables dans la mesure où les formations encaissantes sont considérées aquifères (notamment de type karstique).

L'évaluation du potentiel aquifère des formations fluvio-glaciaires nécessite la quantification de l'ensemble de ces paramètres. En l'absence de données bibliographiques disponibles sur le massif pyrénéen, et la quasi-absence d'ouvrages reconnaissant ces dépôts, du moins en profondeur, il n'est pas envisageable d'apporter les éléments de réponse utiles à partir d'une approche géologique ou hydrogéologique basée exclusivement sur des observations de terrain de surface.

Dans le cadre du programme POTAPYR, l'utilisation des méthodes géophysiques a été retenue pour appréhender qualitativement les secteurs présentant le plus d'intérêt sur le plan hydrogéologique à l'échelle de la zone d'étude :

- ✓ la gravimétrie et la sismique passive permettant d'interpréter la profondeur du substratum dans les vallées pyrénéennes. Ces méthodes ont été mises en œuvre à partir d'une collaboration avec l'Université Paul Sabatier (Toulouse 3),
- ✓ la géophysique électrique permettant d'interpréter la nature des formations de remplissage constituant ces dépôts.

In fine, l'objectif principal recherché dans le cadre du volet abordant les dépôts fluvio-glaciaires du programme POTAPYR est **d'acquérir des données géologiques de premier ordre permettant d'identifier des secteurs supposés à fort intérêt hydrogéologique** susceptibles d'intéresser les acteurs de l'eau et les décideurs pour leurs actions futures dans la gestion globale des ressources en eau du Bassin Adour-Garonne. Ces secteurs seront des cibles privilégiées pour engager des études hydrogéologiques complémentaires permettant de quantifier les ressources en eau existantes.

## 2. Les formations fluvio-glaciaires dans les Pyrénées

### 2.1. PRÉSENTATION ET CONDITIONS DE DÉPÔT

La zone d'étude comprend 24 % de formations superficielles déposées pendant le Quaternaire (2,5 millions d'années à nos jours), couvrant une surface de 1803 km<sup>2</sup> (Illustration 1).

Ces formations peuvent être regroupées en six grands types :

- les dépôts fluviaux,
- les dépôts fluvio-glaciaires, liés à la double activité des processus glaciaires et fluviaux,
- les dépôts glaciaires, principalement constitués par les moraines,
- les dépôts de pente, colluvions et éboulis,
- les remplissages karstiques et les tourbières,
- les dépôts de cône de déjection, incluant le cône de Lannemezan.

La présente étude vise plus particulièrement les formations déposées dans le fond des grandes vallées pyrénéennes, composées principalement de formations fluvio-glaciaires associées à des dépôts glaciaires et fluviaux d'après les cartes géologiques à 1/50 000 du BRGM. La position des dépôts en fond de vallée apparaissant plus intéressante que la nature des dépôts, ces trois types ont été rassemblés dans une même catégorie fluvio-glaciaire. Le terme de formations fluvio-glaciaires au sens large est donc employé dans le présent rapport.

Les formations fluvio-glaciaires se déposent surtout à l'extrémité des zones d'extensions glaciaires majeures mais aussi au front de zones de stationnement glaciaire prolongé ou en amont des verrous glaciaires.

Ainsi dans les Pyrénées ces formations sont présentes dans les vallées glaciaires intramontagneuses, au front de la zone englacée que constitue la zone axiale et en amont des verrous, mais également en aval des verrous dans les vallées glaciaires les plus grandes telles que le gave de Pau, la Garonne et l'Ariège (Illustration 2).

L'illustration 2 présente l'extension maximale würmienne (entre 10 000 et 90 000 ans environ) des dépôts glaciaires des Pyrénées. A cette époque, la haute chaîne est recouverte par une zone englacée quasi continue pouvant aller jusqu'au développement d'une calotte glaciaire de plateau dans le Luchonnais et sur le massif de l'Aston (vallée de l'Ariège). Des glaciers de vallées, alimentés en amont par cette zone englacée, s'engouffrent dans les vallées principales et fluent jusqu'au piémont dans les vallées de l'Ariège, de la Garonne, du gave de Pau. Dans les vallées de l'Adour, de la Neste, du Salat au contraire les glaciers de vallées n'atteignent pas le piémont.

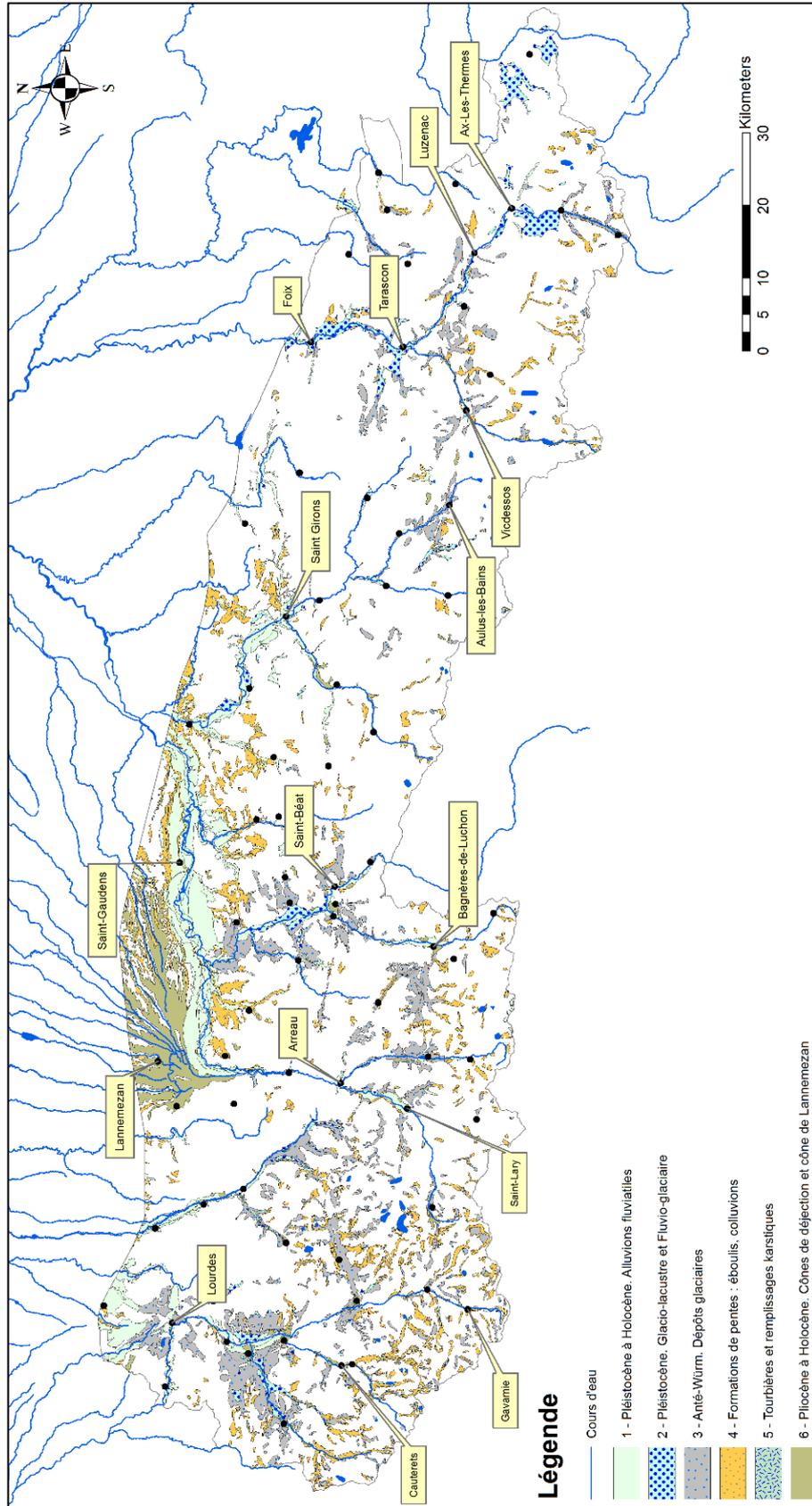


Illustration 1 - Carte des 6 grands types de formations géologiques superficielles du secteur d'étude d'après la carte géologique régionale à 1/250 000 de Midi-Pyrénées (BRGM projet GARVEMIP, Monod et al., 2014)

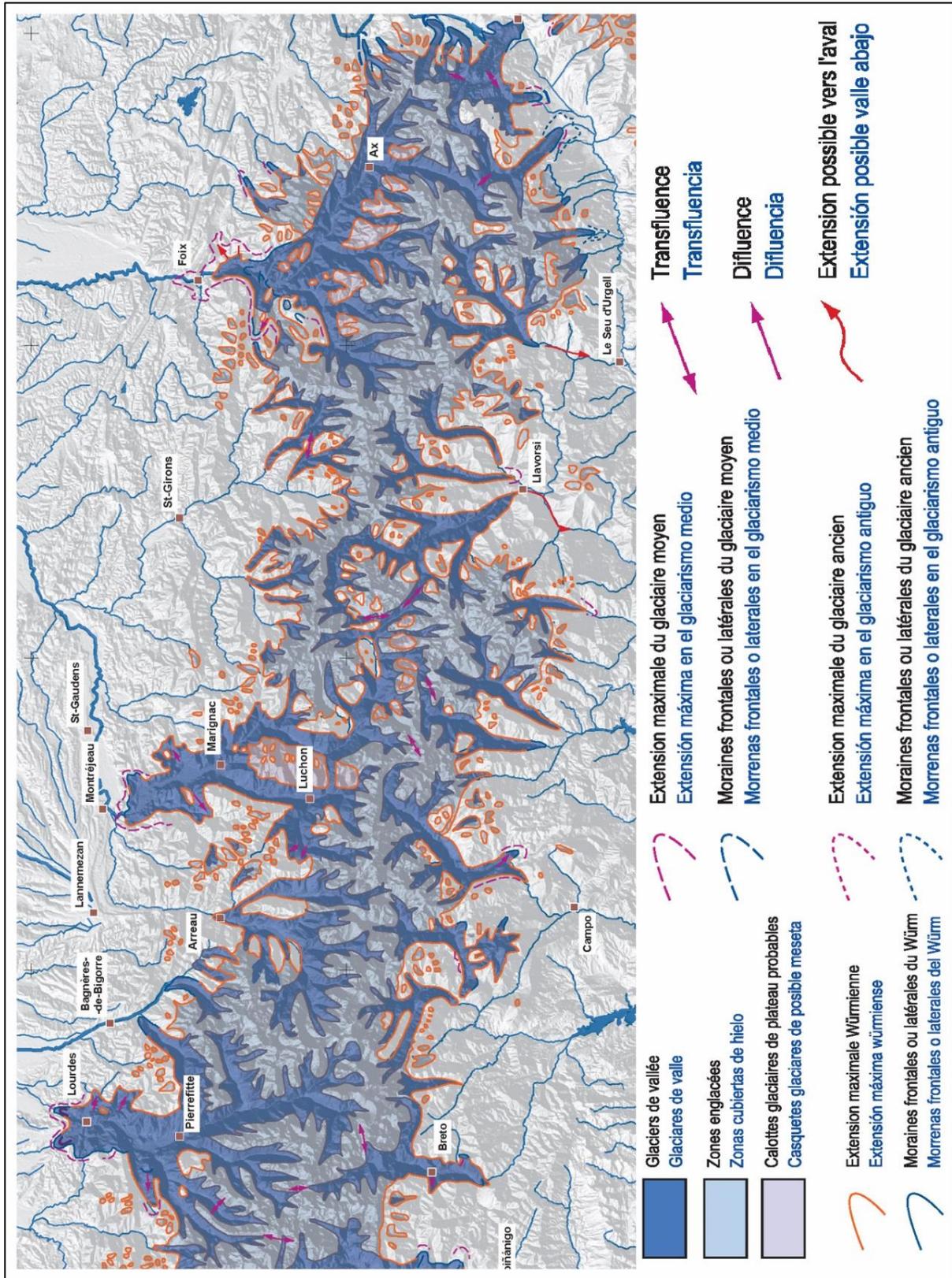


Illustration 2 – Extrait de la carte d'extension des glaciers pyrénéens au Quaternaire, modifié d'après Calvet (2004)

## 2.2. NATURE DES DÉPÔTS FLUVIO-GLACIAIRES ET IMPLICATIONS HYDROGÉOLOGIQUES

Les formations fluvio-glaciaires sont composées de matériaux transportés par les rivières et les torrents glaciaires se déposant en un vaste épandage. La structure sédimentaire se rapproche de celle des dépôts fluviaux, avec une stratification dominée par les chenaux à lits entrecroisés. Les sédiments de la classe des graviers sont particulièrement bien triés. La morphoscopie «glaciaire» des galets se retrouve en tête d'épandage et disparaît progressivement vers l'aval, en même temps que diminue la granulométrie.

Des variations rapides de faciès des dépôts fluvio-glaciaires à l'échelle kilométrique (variations observées en l'espace de quelques dizaines ou centaines de mètres) s'expliquent par des phénomènes de chenalisation et l'existence de lacs temporaires pendant les interstades glaciaires (Blavoux et al., 2006). Les variations de granulométrie et donc de perméabilité sont très importantes à l'échelle du mètre, traduisant les conditions de mise en place des dépôts fluvio-glaciaires avec des écoulements turbulents en bordure de langues glaciaires et des zones de deltas au débouché dans les lacs.

En termes de fonctionnement hydrogéologique, le matériel fluvio-glaciaire constitue un ensemble aquifère structuré en multicouches liés à l'alternance de niveaux plus ou moins perméables. Dans leur partie supérieure, la nappe est libre et ces aquifères sont susceptibles d'être en relation hydraulique directe avec les cours d'eau favorisant très grandement leur potentiel. Leur alimentation est assurée par l'infiltration directe des précipitations, en particulier en aval des vallées où l'extension latérale des dépôts devient plus importante. En amont des vallées, ces matériels fluvio-glaciaires sont le plus souvent associés à des éboulis de cônes de déjection. Ces types de configuration géomorphologique particulière favorisent grandement les infiltrations d'eau à partir de la surface. Ils sont ainsi propices à développer localement des aquifères à fort potentiel (Amelot et al., 2003). En profondeur, l'alimentation de ces aquifères peut s'opérer latéralement par des eaux issues des formations aquifères encaissantes (notamment de type karstique) et/ou verticalement par la drainance privilégiée des niveaux fluvio-glaciaires supérieurs structurés en multicouches.

Non reconnue dans les Pyrénées, la présence en profondeur de dépôts à éléments grossiers, potentiellement à très forte transmissivité et mis en place au niveau d'axes surcreusés, tels que les sillons glaciaires, constitue la configuration idéale à l'existence de réservoirs aquifères à très forts potentiels. Ce contexte hydrogéologique favorable peut s'avérer extrêmement intéressant dans la mesure où ces aquifères sont bien alimentés, donc disposant de ressources renouvelables importantes.

En effet, en reprenant des exemples du massif des Alpes du nord, et notamment du Bas Chablais et du bassin lémanique, il s'avère que les secteurs les plus aquifères soient placés à la base du remplissage et correspondent aux axes des anciennes zones de circulation et d'alluvionnement liées aux grandes périodes de retrait glaciaire. C'est le cas par exemple des vallées de l'Arve et de la Menoge où les structures aquifères les plus productives sont constituées par les sillons de surcreusement remplis d'alluvions graveleuses à très fortes transmissivités permettant l'exploitation de forages à des débits de plusieurs centaines de m<sup>3</sup>/h, représentant un volume annuel de plusieurs millions de m<sup>3</sup> (Blavoux et al., 2006).

## 3. Méthodologie et méthodes mise en œuvre

### 3.1. APPROCHE METHODOLOGIQUE

La zone d'étude couvre une superficie de près de 8 000 km<sup>2</sup>. L'objectif du travail est d'identifier des secteurs où les aquifères fluvio-glaciaires sont susceptibles de présenter un intérêt hydrogéologique d'importance à cette échelle. Ainsi, l'approche méthodologique mise en œuvre a été la suivante :

- **Identification, parmi l'ensemble des formations superficielles en présence, de grandes extensions de formations fluvio-glaciaires au sein des principales vallées.** Ce travail a été mené à partir des éléments renseignés dans les cartes géologiques à 1/50 000 sachant que leurs cartographies mais aussi les indications sur la nature des dépôts, la lithologie et la taille des clasts composant le remplissage sont principalement établies à partir d'observations de surface. L'âge relatif des formations a été attribué sur la base d'arguments morphologiques et de quelques mesures d'âges absolus. Ainsi, les informations géologiques sont lacunaires en profondeur et ce malgré les données recensées dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) dans laquelle très peu d'ouvrages en fond de vallées traversent l'épaisseur totale des dépôts jusqu'au substratum. Ce manque d'informations a conduit à rassembler sous le terme « fluvio-glaciaires » l'ensemble des formations superficielles susceptibles d'intégrer des dépôts glaciaires et fluviaux, depuis la surface jusqu'à la base, même si ces formations ont été cartographiées comme des dépôts fluviaux ou lacustres sur les cartes géologiques.
- **Compilation des données existantes sur les zones d'affleurement de dépôts « fluvio-glaciaires »** (informations géologiques et hydrogéologiques disponibles, ouvrages en présence, études ponctuelles, etc.), notamment identification de la nature du substratum à la base des dépôts dans l'optique de mieux caler les interprétations des données géophysiques.
- **Sélection des grandes vallées et de secteurs « cibles » pour les investigations géophysiques.** Concernant la réalisation des travaux de géophysique électrique, la sélection des sites a consisté à trouver un compromis entre l'intérêt hydrogéologique identifié pour le site avec les critères logistiques d'accessibilité (longueur des profils géophysiques contrainte par l'espace disponible sur le terrain, présence de conduites enterrées, etc.) et d'autorisation pour la réalisation de ces travaux géophysiques.
- **Mise en œuvre des travaux géophysiques sur les vallées et sites sélectionnés** dans l'optique d'acquérir des informations géologiques en profondeur sur la géométrie et la nature des remplissages des dépôts en présence. Ainsi le choix des méthodes géophysiques s'est porté sur :
  - des campagnes d'acquisition gravimétrique permettant d'interpréter la profondeur de l'interface entre les dépôts de remplissage et le substratum rocheux sur des surfaces de plusieurs kilomètres carrés dans trois grandes vallées. Ces campagnes ont été couplées, dans une vallée, avec l'utilisation de la sismique passive qui permet également d'interpréter la profondeur de cette interface,

- des campagnes de sondages électriques permettant de dresser des coupes géo-électriques afin de mieux appréhender la nature lithologique du remplissage mais aussi la structuration de ces dépôts. La facilité de mise en œuvre de la géophysique électrique a permis de réaliser 24 sondages électriques dans des contextes géomorphologiques différents (vallées encaissées et étroites ou élargies, en amont ou en aval, au niveau de verrous glaciaires, etc.).

## 3.2. DONNÉES GÉOPHYSIQUES

### 3.2.1. Sondages électriques

La géophysique électrique est basée sur la mesure de la résistivité des roches (ou son inverse la conductivité électrique) par la réalisation de sondages électriques. Elle s'appuie sur la propriété des formations à conduire le courant électrique.

Les objectifs de cette prospection géophysique sont de :

- caractériser le toit et le mur des formations en présence au droit du sondage électrique, et notamment la profondeur du substratum. Cette dernière information est considérée, dans le cas présent et au regard des longueurs de ligne utilisées sur le terrain, comme relativement acceptable pour des profondeurs n'excédant pas une centaine de mètres. Elle reste cependant approximative en l'absence de sondage géologique permettant de caler l'interprétation des horizons géo-électriques par le principe d'équivalence propre à la méthode géophysique employée,
- déterminer la nature de remplissage des dépôts, en termes de granulométrie et lithologie. Par exemple, la présence d'horizons contenant des éléments grossiers résistants de type blocs de grandes dimensions potentiellement de grande porosité, à contrario la présence de formations conductrices argileuses de faible porosité,
- caractériser l'homogénéité ou l'hétérogénéité des dépôts en profondeur au droit du sondage électrique. Cette information permet de déterminer si ces formations constituent ou non un aquifère multicouche, et donc de mieux appréhender le type d'écoulement qui s'y opère.

Le principe de la mesure du sondage électrique consiste à injecter du courant dans le sous-sol à partir de deux électrodes A et B (circuit d'émission du courant) et à mesurer le potentiel induit entre deux électrodes M et N. Le sondage électrique permet ainsi d'évaluer une résistivité apparente en ohm-m des formations en place à la verticale d'un point. Une succession de mesures est ainsi effectuée en augmentant la distance entre les deux électrodes d'émission, donc la profondeur d'investigation. La courbe résultante permet, par modélisation, d'interpréter la coupe géo-électrique (en résistivité vraie) des différents horizons en présence, et d'en déduire la nature géologique qui sera d'autant plus précise qu'il existe des informations géologiques de calage.

Les investigations ont été effectuées à l'aide d'un résistivimètre Elrec-T selon une configuration géométrique de type Schlumberger. Au total, 24 sondages électriques ont été réalisés par le BRGM sur l'ensemble de la zone d'étude au niveau des vallées du gave de Pau, de la Neste d'Aure, de la Garonne, et de l'Ariège.

La localisation de ces sondages est fournie sur la carte en Illustration 3. Leur implantation plus précise est présentée par vallée investiguée dans le chapitre 4. Le tableau récapitulatif des sondages électriques est présenté en annexe 1. Les coupes géo-électriques et géologiques interprétatives sont présentées par vallée investiguée dans les annexes 2 à 7.

### 3.2.2. Gravimétrie

La prospection gravimétrique est basée sur la mesure de l'accélération de la pesanteur ou de ses variations dans le champ de gravité terrestre. En effet, ce paramètre n'est pas constant sur la surface de la terre. Après avoir appliqué aux valeurs brutes mesurées un certain nombre de corrections liées aux autres corps célestes, à la rotation et à la forme de la terre, il est ainsi possible de faire ressortir les anomalies imputables aux seules variations de la densité du sous-sol, paramètre propre à chaque roche.

Etant donné le contraste de densité entre les formations quaternaires et le substratum, la mesure de la gravimétrie est une méthode pertinente pour interpréter l'épaisseur des dépôts et donc la géométrie de la vallée en profondeur. 201 stations gravimétriques ont été implantées sur le terrain et mesurées en gravimétrie et au GPS différentiel. Les mesures ont été réalisées dans les vallées du gave de Pau, de la Neste d'Aure et de la Garonne pour interpréter l'épaisseur des dépôts du remplissage fluvio-glaciaire (Illustration 4). La vallée de l'Ariège a été écartée en raison de l'hétérogénéité de la taille des éléments qui composent le remplissage fluvio-glaciaire, allant du sable jusqu'aux blocs plurimétriques, jugée trop importante pour permettre une interprétation des données de géophysiques.

Ce travail a fait l'objet d'une collaboration avec l'Université Paul Sabatier (Toulouse 3) :

- dans le cadre du stage de Master 2 de Bérangé Moussirou Moussirou. Son stage faisant suite au stage de Stéphane Perrouy sur la même thématique dans la vallée du gave de Pau. Le projet a permis de réaliser 44 nouvelles mesures dans cette vallée et 35 dans la vallée de la Garonne. Les résultats ont été valorisés dans une publication aux Comptes rendus Géosciences (Perrouy et al., 2015).
- dans le cadre d'une collaboration scientifique avec le laboratoire Géosciences Environnement Toulouse qui souhaitait, au vu des résultats satisfaisants de l'acquisition gravimétrique, coupler cette méthode avec une acquisition de sismique passive (cf. partie suivante). Au vu de l'intérêt pour le projet, la vallée d'Aure, où 87 stations de mesures ont été acquises, a été retenue. 25 nouvelles stations ont également été acquises dans la vallée de la Garonne afin de densifier les mesures pour mieux contraindre les interprétations. Cette collaboration a fait l'objet d'un rapport technique consignant le déroulement des missions de terrain, les résultats et interprétations en termes d'épaisseurs de sédiments quaternaires. Le rapport décrivant plus amplement les méthodes utilisées, les résultats obtenus et les incertitudes sur l'interprétation des profondeurs est disponible en annexe 8.

L'interprétation du signal gravimétrique en profondeur dépend du contraste de densité entre le substratum et les dépôts de remplissage. Celui-ci ne pouvant être calculé sur la zone par manque de données, il est déterminé d'après des données de bibliographie et les connaissances géologiques locales. Ainsi, il est fixé à  $0,6 \text{ g.cm}^{-3}$  pour les vallées de la Garonne, du gave de Pau et de la Neste d'Aure (Perrouy et al., 2015 et annexe 8). Ce contraste est cohérent avec les résultats de la méthode de sismique passive et des sondages électriques mais ne respecte pas la description de la coupe géologique du forage de Saint-Lary-Soulan (10834X0051/F).

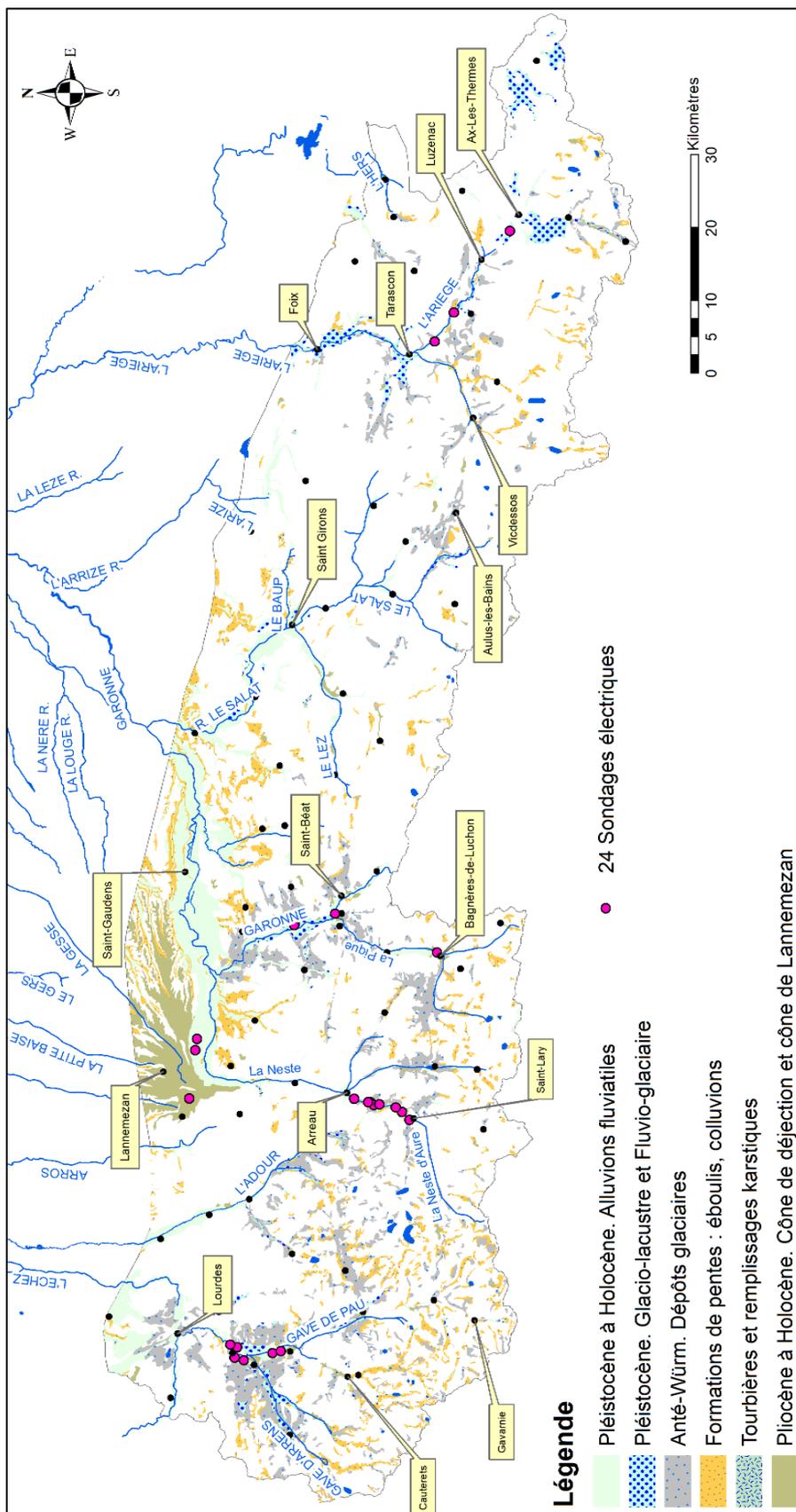
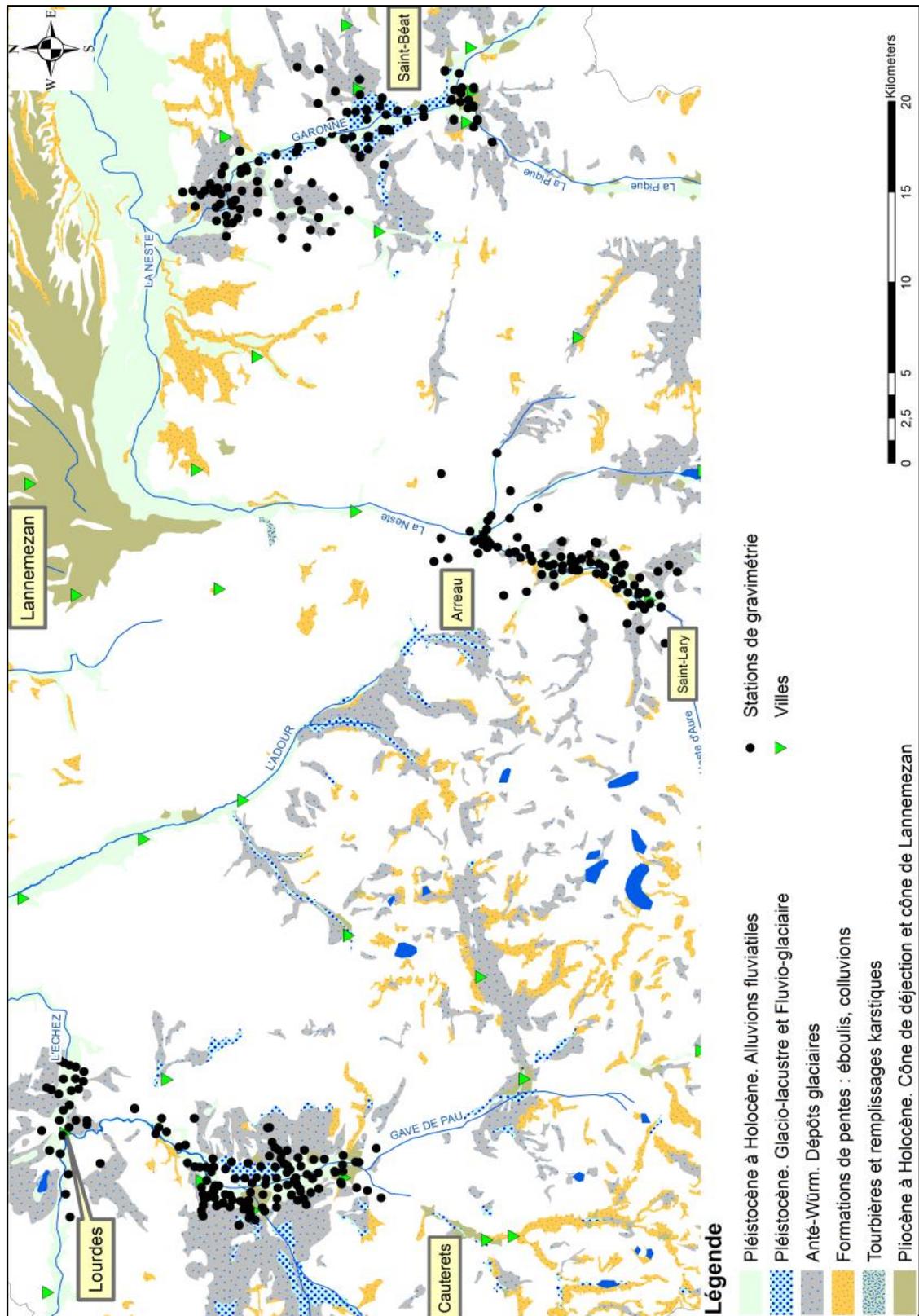


Illustration 3 – Localisation des 24 sondages électriques réalisés dans les principales vallées de la zone d'étude



*Illustration 4 – Position des 201 stations gravimétriques implantées sur le terrain dans les vallées du Gave de Pau, de la Neste d'Aure et de la Garonne*

L'influence du contraste de densité entre le substratum et les dépôts de remplissage est majeure sur l'interprétation des profondeurs. Par exemple, pour la vallée de la Neste d'Aure, un contraste de  $0,6 \text{ g.cm}^{-3}$  se traduit par une profondeur maximum du substratum à 300 – 350 mètres sous la surface, alors qu'il dépasserait 400 mètres pour un contraste de  $0,2 \text{ g.cm}^{-3}$ , valeur déterminée par calage de la profondeur substratum/remplissage dans le forage de Saint-Lary (Annexe 8). Les valeurs de profondeur du toit du substratum fourni dans ce rapport à partir des données de gravimétrie sont donc des valeurs minimums par rapport à celles qu'on obtiendrait avec des contrastes plus faibles.

### **3.2.1. Sismique passive**

Dans la vallée d'Aure, la collaboration avec le laboratoire Géosciences Environnement Toulouse a également fait l'objet d'une acquisition de données de bruit de fond sismique qui a pour base l'étude du temps de propagation et l'amortissement des ondes acoustiques émises par un ébranlement. Ce temps dépend de la nature et de la disposition des formations géologiques en présence. La méthode de sismique passive, qui permet des reconnaissances faciles à mettre en œuvre et efficaces, a été largement utilisée ces vingt dernières années (cf. revue de littérature de Mucciarelli et Gallipoli 2001). Elle se base sur des phénomènes de résonance sismique dus au piégeage d'ondes, par exemple dans le cas d'un remplissage sédimentaire de faible impédance sismique reposant sur un substratum rocheux. Dans certaines conditions, la fréquence de résonance  $f_0$  de la couche superficielle peut être extraite des enregistrements du bruit de fond sismique, en calculant le ratio spectral entre les vibrations horizontales et verticales (HVSr), (Nakamura 1989; Lachet et Bard 1994).

Il est ainsi possible d'interpréter l'épaisseur de la couche superficielle, en l'occurrence les dépôts fluvio-glaciaires d'une vallée. L'interprétation de la profondeur dépendra de la contrainte sur la vitesse des ondes de cisaillement  $V_s$ , obtenu grâce à la description lithologique du forage de Saint-Lary,  $V_s = 590 \text{ m.s}^{-1}$ . Afin de faciliter la lecture du rapport, la méthode et les incertitudes sont détaillées dans l'annexe 8.

## 4. Epaisseur et nature des remplissages fluvio-glaciaires des vallées pyrénéennes

Sont présentés dans cette partie, pour chaque vallée étudiée, les résultats des mesures géophysiques et les interprétations proposées. Les données et l'interprétation associée des sondages électriques ont été placées en annexes 2 à 7.

### 4.1. L'ARIÈGE AMONT

Le tronçon de la vallée de l'Ariège en amont d'Ax-les-Thermes est encaissé dans les gneiss de l'Aston et de l'Hospitalet et suit une direction sud-nord. D'une largeur maximale de 900 mètres, la vallée est remplie de sédiments fluvio-glaciaires et glaciaires sur une épaisseur d'une trentaine de mètres d'après la coupe géologique du forage d'eau potable des Goutils (10941X0025/F) au niveau de l'Hospitalet Près l'Andorre. Afin de compléter ces données existantes, le tronçon de vallée situé en aval d'Ax-les-Thermes jusqu'à Tarascon-sur-Ariège a été investigué plus particulièrement.

#### 4.1.1. Présentation géologique

La vallée de l'Ariège selon un axe compris entre Tarascon-sur-Ariège en aval et Ax-les-Thermes en amont présente une forme évasée sans toutefois avoir la morphologie typique des vallées glaciaires. La vallée a pourtant hébergé un des plus grands glaciers de vallées composites des Pyrénées, formé par des glaces venant des vallées de l'Oriège, du Najar, de l'Aston, de Vicdessos (Delmas et al., 2012). La topographie actuelle de la vallée montre un élargissement au niveau de ces zones de confluences bien que ceux-ci soient peu visibles sur la carte géologique (Illustration 5).

D'un point de vue géologique, l'Ariège incise les gneiss de l'Aston (en rose sur la carte) et le granite d'Ax au sud, les schistes et calcaires du Paléozoïque (KE1, o5-6) au niveau de Luzeanc, les marnes et les calcaires du Crétacé inférieur (n1-4, n5) en amont de Tarascon-sur-Ariège (Illustration 5). Entre les calcaires mésozoïques et paléozoïques, l'Ariège coupe le tracé de la faille nord-pyrénéenne. La vallée est remplie de dépôts fluvio-glaciaires (FG) datés du Würm (Delmas, 2009).

#### 4.1.2. Description et interprétation des données acquises

La forte hétérogénéité granulométrique et de lithologie des dépôts glaciaires décrite dans la vallée de l'Ariège avec des blocs fréquemment métriques voire pluri-métriques (Delmas 2009) doit se retrouver dans les dépôts fluvio-glaciaires de fond de vallée. Cette hétérogénéité rend difficile l'estimation du contraste de densité entre le substratum et le remplissage. Aussi, ce secteur est donc peu propice à l'interprétation de données gravimétriques acquises. Pour cette raison la vallée de l'Ariège a uniquement fait l'objet d'une campagne d'acquisition de sondages électriques.

Les sondages électriques (SE) ont été implantés :

- dans une partie de la vallée encaissée dans les calcaires barrémiens (SE5),
- en aval de la confluence avec l'Aston (SE6), proche de la faille nord-pyrénéenne,
- en aval de la confluence avec le Najar (SE7), sur les gneiss de l'Aston.



1087 3X 0044		
PROF	LITHO	DESCRIPTION
10		alluvions fluvio-glaciaires, blocs et argile sableuse, éléments anguleux 200mm
20		
30		
40		grave sableuse grise, elts arrondis 0/80 mm avec roches siliceuses et metamorph., elts schisteux a partir de 50 m
50		
60		
70		
80		
90		sable et graviers fins 0/3 mm, Qtz et roches métamorphiques (schistes)
100		
110		
120		

Illustration 6 – Description de la nature du remplissage fluvio-glaciaire du forage d’Ussat-les-bains (source ANTEA, forage référencé 10873X0044/F)

Le substratum calcaire est atteint à 125 mètres de profondeur dans l’interprétation du sondage SE5. Cette profondeur est du même ordre de grandeur que celle observée dans le forage d’Ussat-les-Bains (10873X0044/F) situé à 750 mètres en aval (Illustration 7). Il faut toutefois mentionner que la profondeur du substratum peut varier sur de courtes distances, comme le prouve un second forage situé à environ 200 mètres au sud-est du premier (10873X0043/F) où le substratum a été foré à 68 mètres de profondeur (Illustration 7). L’interprétation des sondages SE6 et SE7 reste incertaine quant à la profondeur du substratum, d’où les deux hypothèses présentées sur l’Annexe 2. En effet, celui-ci est interprété vers 50 ou 80 mètres de profondeur sur chacun des sondages, mais il pourrait ne pas avoir été atteint, soit une profondeur supérieure à 80 mètres. Cette hypothèse serait cohérente avec un approfondissement du substratum dans une zone d’élargissement de la vallée comme observé dans les autres vallées (gave de Pau, Neste d’Aure, Garonne).

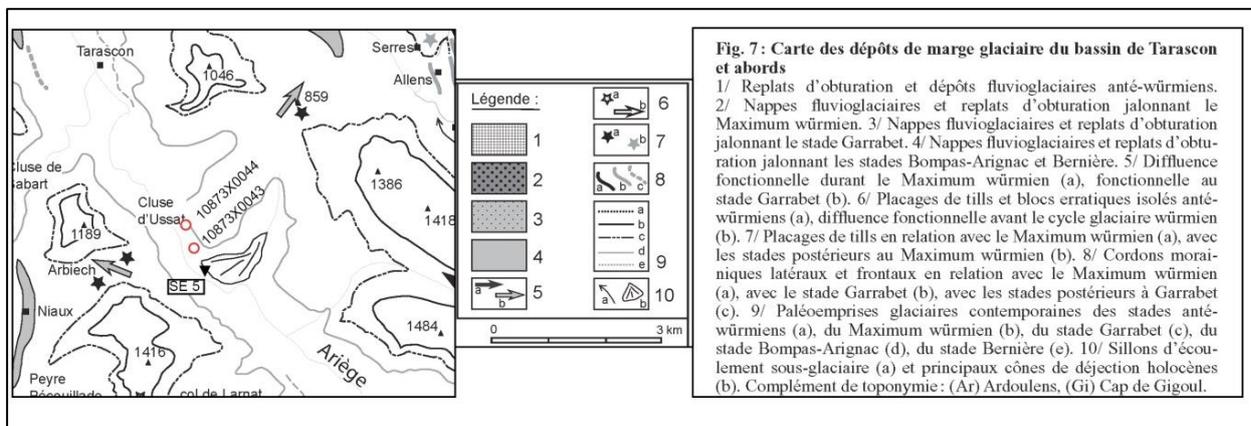


Illustration 7 – Carte des dépôts de marge glaciaire dans la vallée de l’Ariège au niveau d’Ussat-les-Bains, position des forages ayant atteint le substratum et du sondage électrique SE5 (extrait et modifié de Delmas et al., 2012)

#### 4.1.3. Discussion et conclusion

Dans les trois secteurs étudiés par sondages électriques, le remplissage quaternaire de la vallée est homogène et présente une granulométrie grossière sur les 30 premiers mètres. En-dessous, le remplissage serait plus fin, composé de sables plus ou moins argileux (SE6 et SE7) ou d’argiles (SE5) jusqu’au substratum. L’épaisseur totale des dépôts atteint 125 mètres dans le secteur encaissé du sondage SE5 où la vallée est étroite (environ 500 mètres de largeur).

Elle pourrait être supérieure en amont, en particulier dans les zones d'élargissement qui dépassent le kilomètre de large, où sont situés les sondages SE6 et SE7. Ces approfondissements seraient le résultat de l'érosion glaciaire au niveau de zone de confluence entre le glacier de la vallée de l'Ariège et ses affluents.

## **4.2. LA GARONNE**

Entre la confluence avec la Pique au sud et Barbazan au nord, la vallée de la Garonne présente une morphologie glaciaire typique de vallée en auge. Elle présente trois secteurs d'élargissement, du sud vers le nord, au niveau de Marignac, de Frontignan-de-Comminges, de Barbazan (Illustration 8). Ces secteurs correspondent aux zones de confluence de la vallée de la Garonne avec les vallées de ses affluents actuels.

### **4.2.1. Présentation géologique**

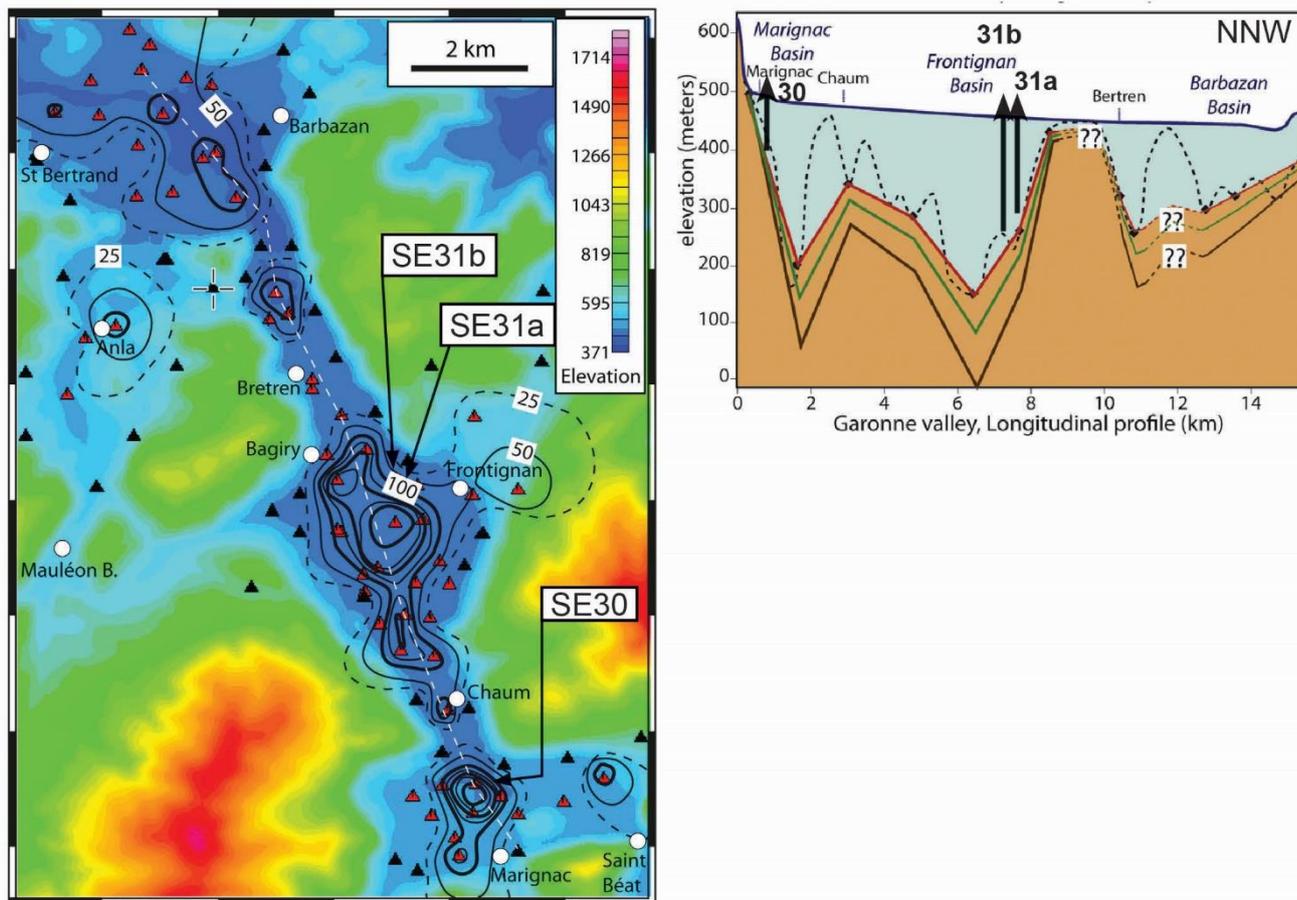
D'un point de vue géologique, la vallée incise la zone nord-pyrénéenne, immédiatement au nord de la faille nord-pyrénéenne (FNP) dans la zone de confluence Pique/Garonne (Illustration 8). Entre Marignac et Frontignan-de-Comminges, elle est encaissée dans les terrains cristallins (en rose sur la carte) et la couverture paléozoïque schisteuse (o1-6, d1-4) du massif de la Barousse. Au nord de Frontignan-de-Comminges et jusqu'à Barbazan, elle traverse les terrains carbonatés du Jurassique au Crétacé inférieur (I1-2, j6, n1-4), puis les marnes noires de la limite Crétacé inférieur/Crétacé supérieur (n5cM). La vallée est remplie par des alluvions fluvio-glaciaires (Fgz, Fgy) attribuées à la période tardi à postglaciaire (Ternet et al., 1982). Des moraines attribuées au Würm tardif (Gy), pendant un stade de stationnement d'un grand glacier (Barrère et al., 1984), affleurent sur les bords de la vallée dans les zones d'élargissement.

### **4.2.2. Description et interprétation des données acquises**

L'étude gravimétrique menée dans la vallée permet d'interpréter la profondeur du contact entre le substratum et les dépôts quaternaires, donc la forme du plancher de la vallée et l'épaisseur des dépôts de remplissage (Illustration 9). Les zones d'élargissement de Marignac et Frontignan-de-Comminges (Illustration 8), faisant toutes deux plus de 3 kilomètres de large, apparaissent comme étant également des zones d'approfondissement où le remplissage atteindrait près de 300 mètres d'épaisseur. Entre ces secteurs, la vallée se rétrécit à 1 kilomètre de large et les alluvions auraient une épaisseur de l'ordre d'une centaine de mètres. Un troisième approfondissement de près de 200 mètres de profondeur s'observe au nord de Bertren. Il s'agit du bassin de Barbazan séparé du bassin de Frontignan par un « haut fond » du substratum où les dépôts ne dépasseraient pas 30 mètres d'épaisseur (Illustration 9).

L'implantation des sondages électriques a été choisie dans les zones d'élargissement de Marignac (SE30) et Frontignan-de-Comminges (SE31a, SE31b, Illustration 8). Dans l'élargissement de Marignac (SE30), la nature des dépôts, interprétée d'après les données de sondage électrique, est majoritairement sableuse (Annexe 3). Un niveau de sables et graviers à galets est présent entre 1,5 et 2,6 mètres de profondeur, et un niveau de sables et graviers est interprété entre 37 et 47 mètres de profondeur. Les sables deviendraient plus argileux à partir de 47 mètres de profondeur jusqu'au substratum, interprété à 95 mètres de profondeur. Toutefois à cette profondeur, la limite d'acquisition de la méthode électrique est atteinte et les résultats sont peu contraints. Dans l'élargissement de Frontignan-de-Comminges (SE31a, SE31b), le remplissage est sablo-limoneux jusqu'à environ 30 mètres de profondeur, avec un niveau à graviers et galets entre 1,4 et 3,1 mètres de profondeur (Annexe 3). Un niveau très conducteur est présent à partir de 30 mètres de profondeur dans les sondages SE31a et SE31b. Il est interprété comme correspondant à des argiles appartenant au substratum altéré.





*Illustration 9 – Gauche : Carte topographique de la vallée de la Garonne montrant l'épaisseur des dépôts quaternaires (lignes d'isoprofondeur en noir) calculées à partir des données de gravimétrie pour un contraste de densité remplissage/substratum de 600 kg/m<sup>3</sup> (modifiée d'après Perrouty et al., 2015). Localisation de la coupe de droite par la ligne en tirets blancs. Droite : Coupe longitudinale de la vallée de Marignac au sud à Barbazan au nord, avec projection des sondages électriques. La ligne rouge représente la profondeur calculée pour un contraste de densité de 600 kg/m<sup>3</sup>. Les lignes verte et noire représentent la profondeur calculée pour des contrastes de densité de 500 et 400 kg/m<sup>3</sup> respectivement. La courbe noire en pointillés montre le résultat brut de l'inversion des données gravimétriques de la carte de gauche pour un contraste de densité de 600 kg/m<sup>3</sup>. Elle montre l'influence des points de mesure situés sur les bords de la vallée pour les secteur du centre de la vallée où il n'y a pas de données.*

#### 4.2.1. Discussion et conclusion

La nature du remplissage est interprétée comme étant principalement sableuse et donc plus grossière dans l'élargissement de Marignac que dans celui de Frontignan-de-Comminges où elle est sablo-limoneuse. La nature du remplissage est donc interprétée comme étant plus fine dans la vallée de la Garonne que dans celle de l'Ariège.

La profondeur du substratum interprétée d'après les données de gravimétrie est cohérente avec les résultats ponctuels des sondages de prospection électrique (Illustration 9 et Annexe 3). Les deux méthodes géophysiques se complètent et fournissent des résultats cohérents. La gravimétrie apporte ici des contraintes décisives étant donné que les approfondissements dépassent les profondeurs atteignables en prospection électrique.

Il existe une relation systématique entre élargissement et approfondissement dans la vallée de la Garonne. Ainsi, trois bassins peuvent être identifiés, correspondant à des zones élargies où entre 150 et près de 300 mètres d'épaisseur de sédiments fluvio-glaciaires se sont accumulés. Il s'agit, du nord au sud, des bassins de Barbazan, Frontignan, Marignac, qui sont séparés par des zones de haut fond corrélées en surface à des rétrécissements de la vallée où les dépôts atteignent entre 30 et 100 mètres d'épaisseur.

Les approfondissements correspondent à des zones de confluence des rivières actuelles héritées de la confluence des glaciers lors du dernier maximum glaciaire (Calvet, 2004). Ils montrent donc le pouvoir érosif des glaciers au niveau d'une zone de confluence des glaces. Les zones de haut fond de substratum correspondent à des verrous glaciaires. La position des élargissements/approfondissements de la vallée ne semble pas être contrôlée par la lithologie du substratum puisqu'ils sont placés sur des lithologies très différentes : sur des granites à Marignac, des schistes et des calcaires à Frontignan-de-Comminges, des calcaires et des marnes à Barbazan.

En revanche, le rôle de la fracturation tectonique apparaît déterminant puisque les bassins sont placés, à Marignac sur la faille nord-pyrénéenne et à Frontignan-de-Comminges sur le contact tectonique (impliquant du Trias salifère) entre le massif de la Barousse et la couverture mésozoïque. Ainsi, une deuxième cause peut être avancée pour expliquer les approfondissements : la tectonique. Il peut être avancé que les secteurs faillés sont les plus faciles à éroder ou que les failles pourraient être responsables de la création d'escarpements dans le fond de la vallée avant la mise en place des glaciers, localisant ainsi les zones de confluence.

### **4.3. LA PIQUE**

#### **4.3.1. Présentation géologique**

La vallée de la Pique, orientée nord-sud, est encaissée dans les terrains schisteux de l'Ordovicien (O1-6Cc) et pélisteux du Dévonien (d1-4). Elle s'élargit sur une dizaine de kilomètres de long entre Cier-de-Luchon au nord et Luchon (ou Bagnères-de-Luchon) au sud (Illustration 10). La ville de Luchon se place à la confluence entre la Pique et l'One qui était une confluence de glaciers de vallées au dernier maximum glaciaire (Calvet, 2004). La vallée est remplie par des alluvions fluvio-glaciaires ou fluvio-lacustres (Fz) attribuées à la période postglaciaire soit l'Holocène (Clin et al., 1986). Cartographiquement, l'élargissement de la vallée qui conditionne le dépôt des alluvions peut être corrélé avec le tracé d'une faille traversant la vallée de la Pique de l'ouest vers l'est au sud de Luchon (Illustration 10). Cet accident prolonge la faille de Soulan observée dans la vallée d'Aure (cf. § 4.4).

#### **4.3.2. Description et interprétation des données acquises**

Les alluvions sont épaisses de 35 mètres sur la bordure de la vallée, d'après la description de plusieurs forages au nord de Bagnères-de-Luchon (dont celui portant la référence 10843X0085/F), et de plus de 80 mètres dans le centre de la vallée en amont de Luchon, d'après la description du forage portant la référence 10843X0097/F (Illustration 10). Le sondage électrique SE25, implanté au niveau de la confluence entre la Pique et l'One, est en cohérence avec cette profondeur du substratum dans le centre de la vallée. Celui-ci serait atteint à 76 mètres de profondeur (Annexe 4). La profondeur du plancher de la vallée de la Pique semble donc homogène en amont et au niveau de la confluence avec l'One.

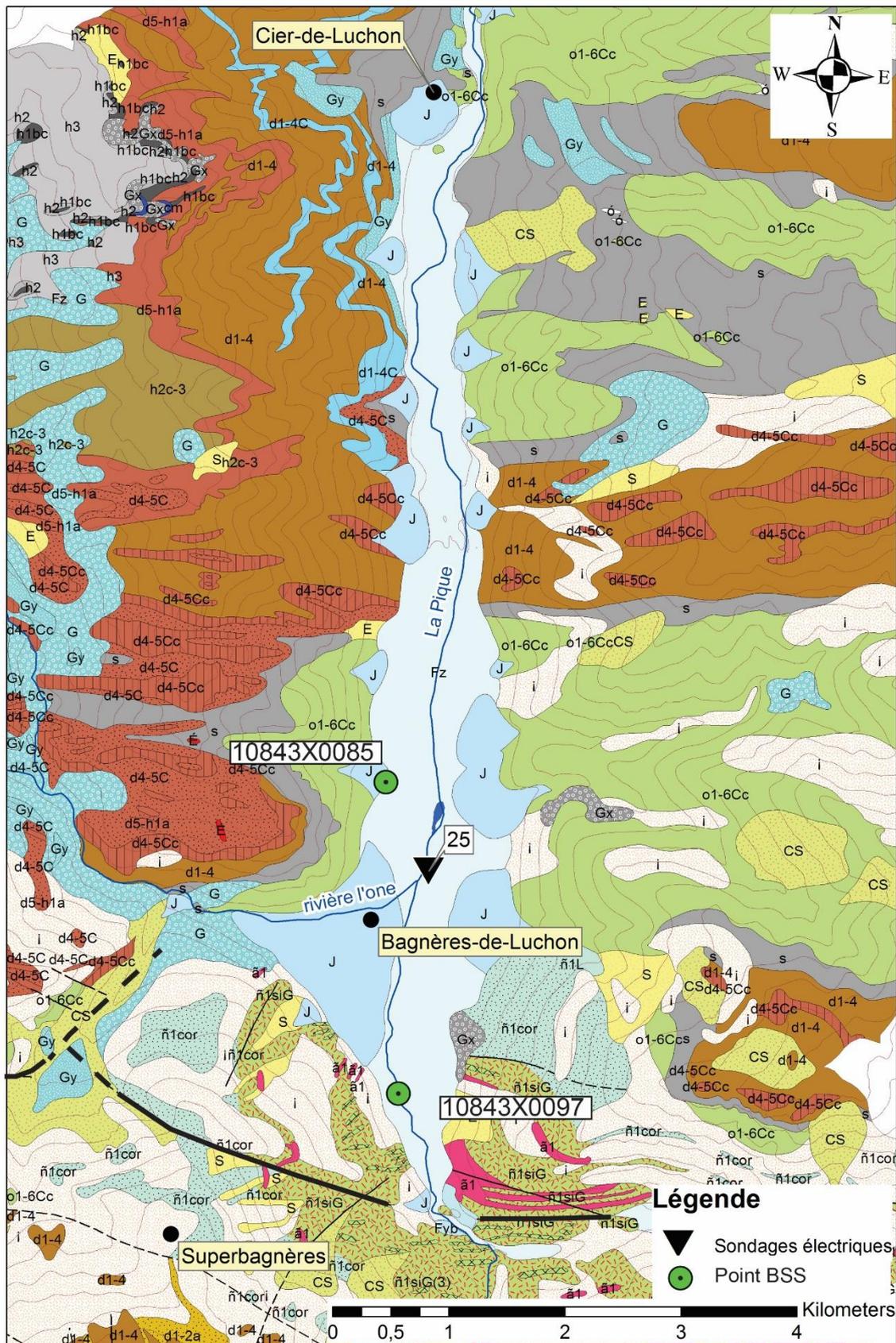


Illustration 10 – Carte géologique de la vallée de la Pique extraite de la carte géologique harmonisée de la Haute-Garonne (BRGM) et localisation du sondage électrique SE25

Le remplissage de la vallée serait principalement sableux avec des niveaux à graviers et galets dans les six premiers mètres. Un niveau conducteur d'argile est atteint entre 11 et 17 mètres. En-dessous, le remplissage est composé de sables jusqu'au substratum. Le niveau d'eau interprété à 3,5 mètres de profondeur est en accord avec les données recensées en BSS.

#### **4.3.1. Discussion et conclusion**

Le sondage électrique réalisé dans la partie amont de la vallée de la Pique permet de donner un ordre de grandeur de la profondeur du substratum, qui est cohérent avec les données de sondages bancarisés en BSS. Les formations fluvio-glaciaires de la vallée de la Pique peuvent atteindre environ 80 mètres de profondeur dans le centre de la vallée, à la confluence avec l'One et en amont. La nature du remplissage serait plutôt fine, composée principalement de sables, plus ou moins graveleux ou limoneux d'après les interprétations des sondages électriques. Cette description s'accorde avec une sédimentation postglaciaire d'âge Holocène. L'élargissement de la vallée semble être contrôlé par des structures tectoniques d'orientation N110°, définissant un bassin. Il correspond à une profondeur du substratum à 80 mètres qui semble constante depuis l'amont jusqu'à la confluence avec l'One. Il faudrait ici acquérir plus de données géophysiques ou réaliser des sondages afin de déterminer si la confluence glaciaire a généré ou non un surcreusement par rapport aux parties amont et aval de la vallée.

### **4.4. LA NESTE D'AURE**

#### **4.4.1. Présentation géologique**

La vallée d'Aure amont présente une morphologie de vallée encaissée dans des terrains paléozoïques avec quelques placages morainiques accrochés sur les versants. En aval de Saint-Lary-Soulan et jusqu'à Ancizan sa morphologie change pour une morphologie glaciaire en auge typique. Au nord d'Ancizan, la vallée est de nouveau étroite et encaissée avant de s'élargir à nouveau au niveau de la confluence avec le Louron à Arreau (Illustration 11).

D'un point de vue géologique, la vallée incise les séries de quartzites et pélites gréseuses du Dévonien (d5-6S) au niveau de Saint-Lary-Soulan et les terrains plissés calcaro-pélimitiques du Carbonifère (h2-3, h3a-b) vers le nord (Illustration 11). Ces deux séries sont séparées par une faille majeure orientée parallèlement à l'axe de la chaîne, connue sous le nom de « faille de Soulan ». Cette faille, très redressée en surface, est un chevauchement à vergence sud participant à l'empilement des nappes de la zone axiale lors de l'orogénèse pyrénéenne (Autran et Garcia-Sansegundo, 1996). Au nord d'Ancizan, la vallée traverse des calcaires dévono-carbonifères (d6-h1a) affectés par le métamorphisme de contact lié à la mise en place du granite de Bordères-Louron (massif circonscrit de couleur rouge au niveau de Lançon et Ilhan sur l'illustration 11). Des vestiges de moraines (Gy) du stade principal de retrait (Würm) affleurent sur les bords de la vallée au niveau des confluences de rivières actuelles. Le secteur de morphologie glaciaire de la vallée est nommé « bassin de Saint-Lary » (Ternet et al., 1996) et possède un remplissage quaternaire composé d'alluvions fluvio-glaciaires et fluviatiles (Fy) attribuées au Würm (Ternet et al., 1995).

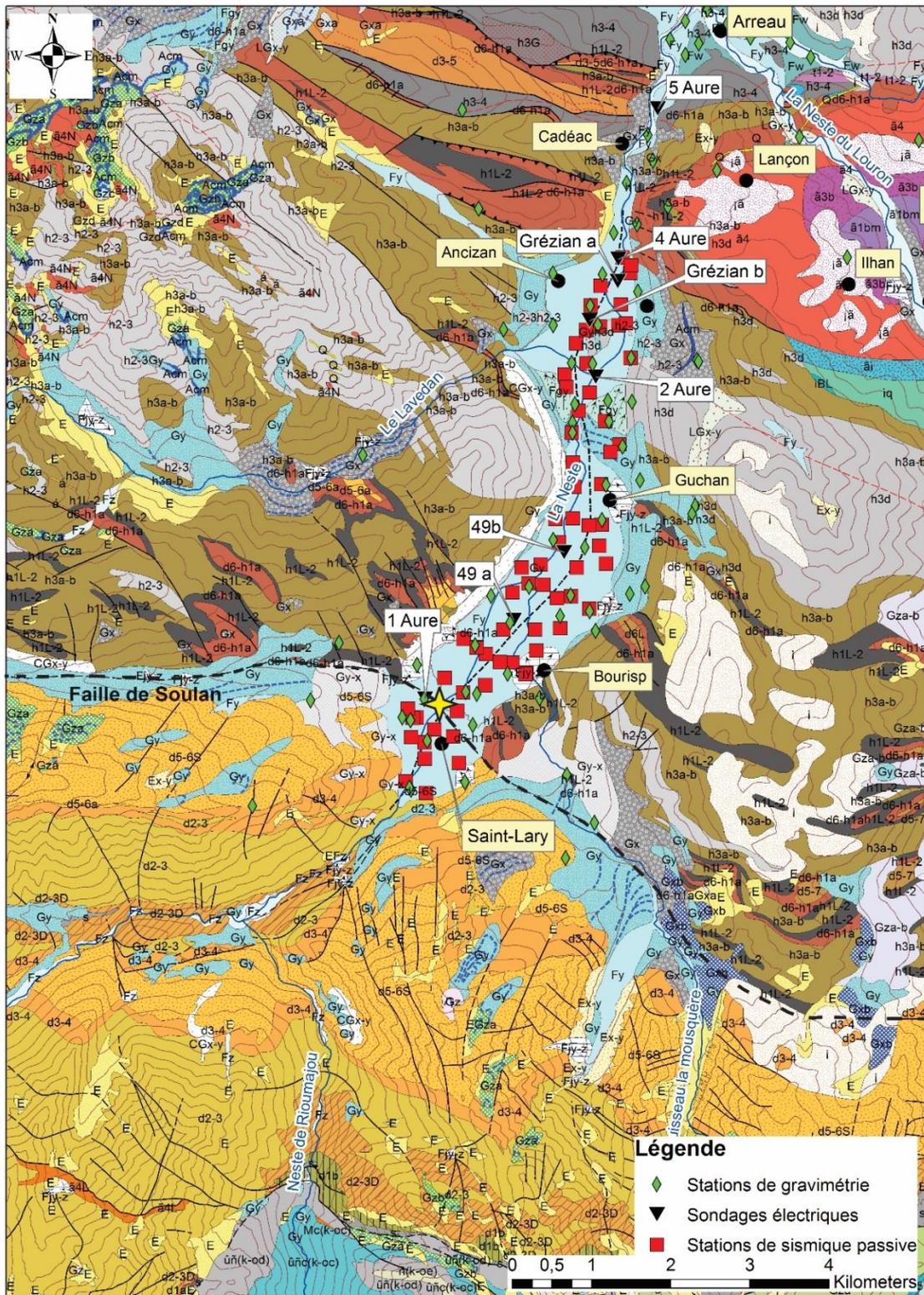


Illustration 11 – Carte géologique de la vallée d’Aure extraite de la carte géologique harmonisée des Hautes-Pyrénées (BRGM) et localisation des stations de mesures de sismique passive et de gravimétrie, et des sondages électriques, du forage de Saint-Lary (étoile jaune à bord noir). La ligne noire en pointillés correspond à la trace de la coupe de l’Illustration 12

#### 4.4.1. Description et interprétation des données acquises

Les données de gravimétrie et de sismique passive permettent d'interpréter une profondeur moyenne du plancher de la vallée autour de 150 mètres sous la surface, remontant à 50 mètres au nord à partir de Grézian vers Cadéac (Illustration 12). Deux approfondissements du plancher de la vallée (ou fosses) sont mis en évidence, le plus important au nord de Saint-Lary-Soulan pouvant atteindre plus de 300 mètres localement et le second entre Bourisp et Guchan atteignant 200 mètres. Les interprétations de profondeur du substratum sont calées sur la coupe géologique du sondage de Saint-Lary (10834X0051/F) et sont en accord avec les interprétations des sondages électriques.

Le sondage SE1, directement au sud de l'accident de Soulan, montre un remplissage plutôt grossier de sables, graviers et blocs jusqu'à 50 mètres de profondeur, devenant plus argileux jusqu'à 120 mètres où le contact avec le substratum est identifié (Annexe 5). Les sondages SE49a et SE49b sont placés au niveau de l'approfondissement de Bourisp/Guchan. Ils montrent un remplissage plutôt grossier jusqu'à 20 mètres de profondeur, puis se poursuivant par des dépôts plus fins de sables limoneux jusqu'au substratum. Dans le secteur de Grézian, où affleure un pointement de substratum carbonifère émoussé, les dépôts sont grossiers jusqu'à 80 m (SE2 Aure) ou 36 m (SEGrézian b) puis plus argileux en dessous jusqu'au substratum. Au nord, les sondages électriques SEGrézian-a et SE4Aure montrent un remplissage plus fin de sables limoneux jusqu'à 40 m environ, suivi d'argiles plus ou moins sableuses. Le remplissage est de même type au nord de Cadéac (SE5Aure) à dominante de sables limoneux avec une passée plus grossière entre 8 et 18 mètres de profondeur et un substratum interprété à 90 mètres.

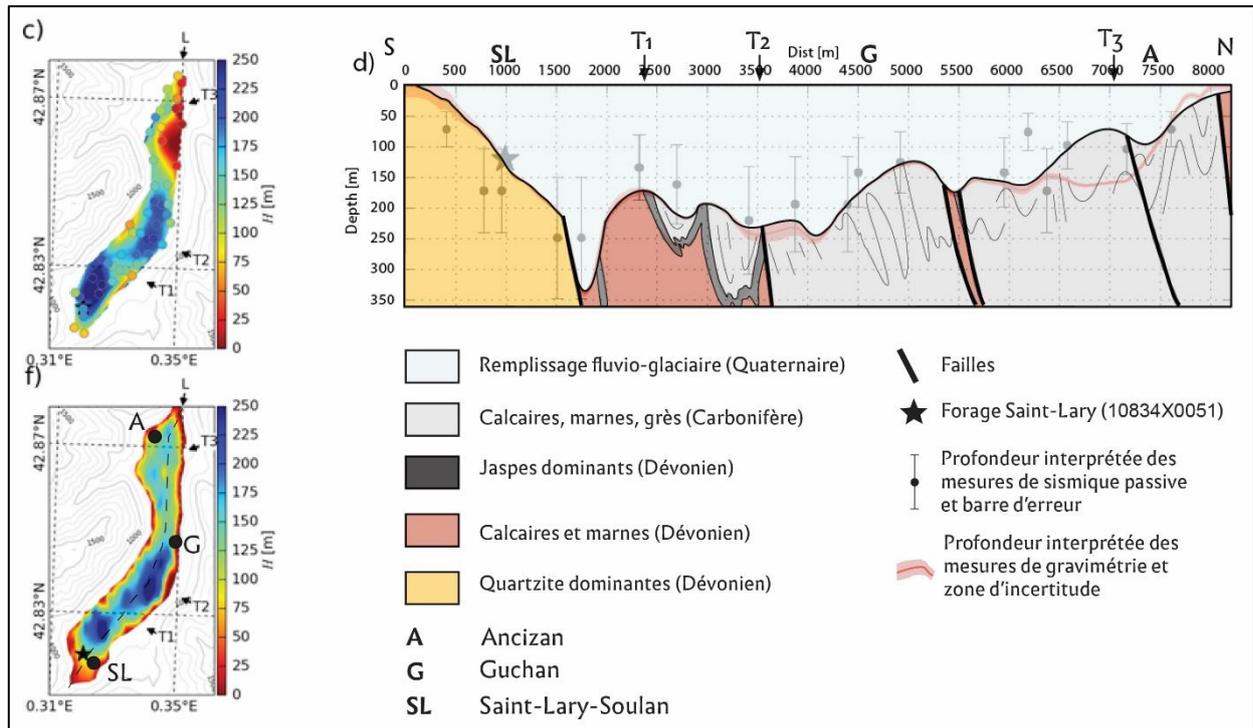


Illustration 12 – Épaisseur des dépôts fluvio-glaciaires de la vallée d'Aure d'après les données de (c) sismique passive pour  $V_s = 590$  m/s et de (f) gravimétrie pour un contraste de densité remplissage/substratum fixé à  $600$  kg/m<sup>3</sup>. (d) Coupe longitudinale de la vallée (profil L sur (f) et ligne en pointillés sur Illustration 11) montrant la géométrie du plancher et la structure du substratum. A : Ancizan, G : Guchan, SL : saint-Lary. L'incertitude sur les profondeurs interprétées de la gravimétrie est de 25 mètres, celle provenant de la sismique passive est donnée par les barres d'erreur pour chaque station de mesure

Les deux approfondissements du plancher de la vallée au sud peuvent être corrélés avec, d'une part les zones de confluences des rivières actuelles, qui correspondent aux confluences des langues glaciaires anciennes, et d'autre part avec la structure des terrains en particulier l'accident de Soulan. Le relèvement du plancher au nord s'accorde avec le rétrécissement de la vallée entre Grézian et Cadéac où les terrains du Dévonien, très redressés, sont affectés par le métamorphisme de contact du massif granitique de Bordères-Louron. Ce rétrécissement a d'ailleurs empêché l'avancée du glacier qui n'a pas dépassé Arreau (Ternet et al., 1995). D'autres arguments tels que la non confluence du glacier du Lavedan avec le glacier d'Aure sont en faveur d'une activité glaciaire plus faible que dans d'autres vallées. Les raisons invoquées parlent d'un abri climatique généré par le massif de l'Arbizon ayant empêché la formation d'une forte épaisseur de glace (Ternet et al., 1995). Cette faible activité glaciaire se retrouve dans la granulométrie plus fine des dépôts de remplissage du nord de la vallée.

#### **4.4.2. Discussion et conclusion**

Les interprétations de la profondeur du plancher de la vallée de la Neste d'Aure obtenues à partir de la gravimétrie, de la sismique passive et des sondages électriques sont cohérentes et complémentaires. En effet, les méthodes de gravimétrie et de sismique passive permettent d'interpréter la géométrie en profondeur du contact entre le remplissage et le substratum, les sondages électriques apportant ponctuellement des informations sur la nature du remplissage. L'incertitude sur les données de sismique passive varie de 50 à 200 m en fonction des points de mesures (Illustration 12), celle sur les données de gravimétrie est de 25 m pour un contraste de densité de  $600 \text{ kg/m}^3$ , mais elle peut dépasser 200 m si l'on considère un autre contraste de densité (cf. Illustration 9, Illustration 15 et Annexe 8).

La profondeur du plancher de la vallée de la Neste d'Aure décroît du sud vers le nord. Dans la partie sud, entre Saint-Lary et Guchan, elle atteint entre 250 et 300 mètres au niveau de deux fosses séparées par un haut-fond. Au nord de la vallée à partir de Grézian, elle se réduit à 50 mètres en amont du verrou de Cadéac.

Les interprétations sont en accord avec l'histoire glaciaire de la vallée. En effet, l'activité glaciaire décroît du sud de la vallée vers le nord. Ceci permet d'expliquer le surcreusement méridional et la granulométrie des dépôts plus grossière au sud qu'au nord. Toutefois, l'activité glaciaire n'est pas l'unique cause de l'élargissement et du surcreusement de la vallée. En effet, la faille de Soulan limite au sud l'élargissement de la vallée d'une part et l'approfondissement maximal d'autre part. La localisation (voire la formation) du bassin de Saint-Lary est donc probablement tectonique. Ceci implique un rejeu de la faille de Soulan en faille normale pendant la phase post-orogénique pyrénéenne (depuis 20 Ma environ).

### **4.5. LA NESTE ET LE CÔNE DE LANNEMEZAN**

#### **4.5.1. Présentation géologique**

Le cours aval de la Neste bifurque brusquement vers l'est au sud du cône de Lannemezan (Illustration 13). La rivière incise le cône par un cortège de terrasses étagées (Paris et al., 1975).

#### **4.5.2. Description et interprétation des données acquises**

Deux sondages électriques (SE45W et SE45E) ont été réalisés sur les terrasses alluviales anciennes de la Neste en amont de la confluence avec la Garonne (Illustration 13). Cette terrasse attribuée au Mindel est composée de galets, graviers, sables, argiles, provenant des Pyrénées au sud (Paris et al., 1975). Les sondages permettent d'interpréter un remplissage

grossier composé principalement de graviers, galets et sables jusqu'à 8 mètres de profondeur pour SE45W suivi d'un niveau très faiblement résistant jusqu'à 98 mètres, interprété comme correspondant au flysch noir altéré très argileux, couronnant le flysch noir sain. Sur le sondage SE45E en revanche, les dépôts fluviatiles grossiers atteignent 14 mètres de profondeur et surmontent des argiles sableuses également alluviales atteignant 50 mètres, profondeur à laquelle le substratum constitué par le flysch noir est atteint.

Le sondage SE48 est positionné sur le cône de Lannemezan exposant des dépôts alluviaux du Quaternaire ancien composés d'argiles rubéfiées et de galets siliceux surmontant des dépôts torrentiels de cône attribués au Pontico-Pliocène et composés d'argiles à lentilles de galets (Paris et al., 1975). L'interprétation du sondage électrique décrit des sables argileux à graviers et galets sur 45 mètres de profondeur, suivis par des argiles jusqu'à 145 mètres (Annexe 6). Le substratum n'est pas atteint. Cette interprétation est en accord avec la description du forage de Lannemezan 1 (10541X0006/LNZ1) qui décrit 15 mètres d'alluvions suivies de 190 mètres d'argiles, sables et galets, de la formation de Lannemezan (Mio-Pliocène), surmontant le substratum formé par des brèches du flysch noir.

### 4.5.3. Discussion et conclusion

Les données de sondages électriques montrent clairement que la composition très argileuse des dépôts du cône de Lannemezan est différente de celle des terrasses alluviales de la Neste. Les alluvions anciennes de la Neste sont grossières dans les premiers mètres de profondeur. Leur épaisseur n'est pas bien contrainte, variant de 8 à 50 mètres d'épaisseur. Elles reposent sur un substratum argileux de flysch noir qui affleure au niveau du talus entre les basses terrasses et les terrasses anciennes.

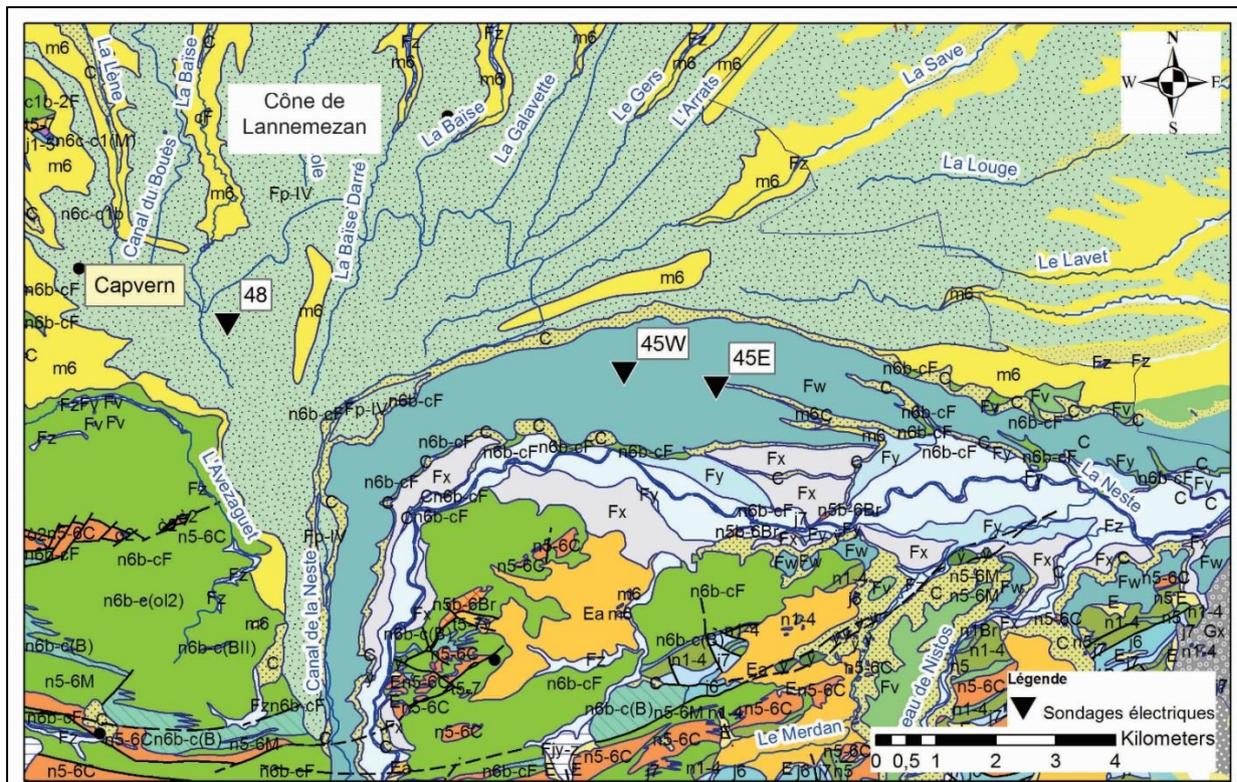


Illustration 13 – Carte géologique de la vallée de la Neste extraite de la carte géologique harmonisée des Hautes-Pyrénées (BRGM) et localisation des 3 sondages électriques

## 4.6. LE GAVE DE PAU AMONT

### 4.6.1. Présentation géologique

La vallée du gave de Pau présente une morphologie en auge typique d'une vallée glaciaire, large de plus d'un kilomètre et longue de près de 8 kilomètres entre Pierrefitte-Nestalas et Vidalos, définissant le bassin d'Argelès (Ternet et al., 1980). La vallée se rétrécit au nord de Vidalos avant de s'élargir de nouveau dans les environs de Lourdes (Illustration 14). Le gave de Pau s'écoulant du sud vers le nord est rejoint par le gave de Cauterets à Pierrefitte-Nestalas, puis par le gave d'Azun à Argelès-Gazost et bifurque soudainement vers l'ouest au niveau de Lourdes. Ces confluences datent au moins de la dernière période d'extension glaciaire maximale où des glaciers de vallées se rejoignaient (Illustration 2).

D'un point de vue géologique du sud vers le nord, la vallée s'ouvre à Pierrefitte-Nestalas dans les schistes noirs carburés et ampélites du Silurien (s) au niveau de la faille de Pierrefitte, faille normale à pendage nord (Lacan, 2008). La rivière incise ensuite vers le nord les calcaires de la Dalle, les pélites et grès du Dévonien inférieur (dPG) jusqu'à Vidalos (Illustration 14). Le rétrécissement de Vidalos se positionne sur le tracé de la faille nord-pyrénéenne. Au niveau de Lourdes, le gave incise les calcaires urgoniens (n5-6C) et les flyschs albiens (n6b-c1b). Durant la période d'extension glaciaire maximale la vallée du gave de Pau et ses affluents étaient remplis par des glaciers qui atteignaient la ville de Lourdes, où un lac s'étendait (Alimen, 1964), comme en témoignent les dépôts morainiques (Gy, Gx) qui jalonnent les bords des vallées. A cet endroit la morphologie très ouverte est le résultat de l'érosion de cinq langues glaciaires qui divergeaient durant le dernier maximum glaciaire, atteignant jusqu'à 5 kilomètres en aval de la ville. Le fond de la vallée est aujourd'hui rempli de dépôts fluvio-glaciaires et fluviatiles (Fz, Fy).

### 4.6.1. Description et interprétation des données acquises

Les données de gravimétrie suggèrent que le plancher de la vallée du gave de Pau s'approfondit rapidement à plus de 100 mètres au nord de Pierrefitte-Nestalas (Illustration 15). L'approfondissement maximal atteint 250 mètres de profondeur sur une zone de près de 4 kilomètres de long entre Adast et Argelès-Gazost. Au nord d'Argelès-Gazost, le plancher remonte légèrement à 150 mètres de profondeur jusqu'à Vidalos. Il remonte à environ 80 mètres de profondeur au nord de Vidalos, à part dans le petit bassin d'Agos où il atteint plus de 100 mètres de profondeur. Dans le secteur de Lourdes, les données de gravimétrie bien que peu nombreuses, suggèrent que le plancher ne dépasse pas 80 mètres de profondeur.

Les données de profondeur du substratum, issues des sondages électriques, sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus par la gravimétrie (Illustration 15). Les données de sondages électriques indiquent que la nature du remplissage est plutôt sableuse avec des niveaux plus ou moins limoneux et des passées riches en graviers et galets pouvant atteindre 8 mètres d'épaisseur. Le sondage SE39 montre des horizons de remplissage les plus grossiers sur presque 40 mètres d'épaisseur. Les sondages SE1, SE39, SE2, SE3, montrent qu'un horizon argileux recouvrirait systématiquement le substratum au début du remplissage.

Au niveau de Lourdes, les données issues du microzonage sismique de la ville - sondages géologiques, sondages géotechniques, investigations géophysiques H/V et SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) - montrent que les dépôts remplissant la vallée au droit du centre-ville s'approfondissent jusqu'à 40 mètres de profondeur (Bernardie et al., 2006, rapport BRGM/RP-53846-FR). Ces résultats sont en accord avec les données de gravimétrie acquises dans la zone (Illustration 15), bien que celles-ci soient trop peu nombreuses pour être interprétées convenablement en raison de la nature très hétérogène du substratum.

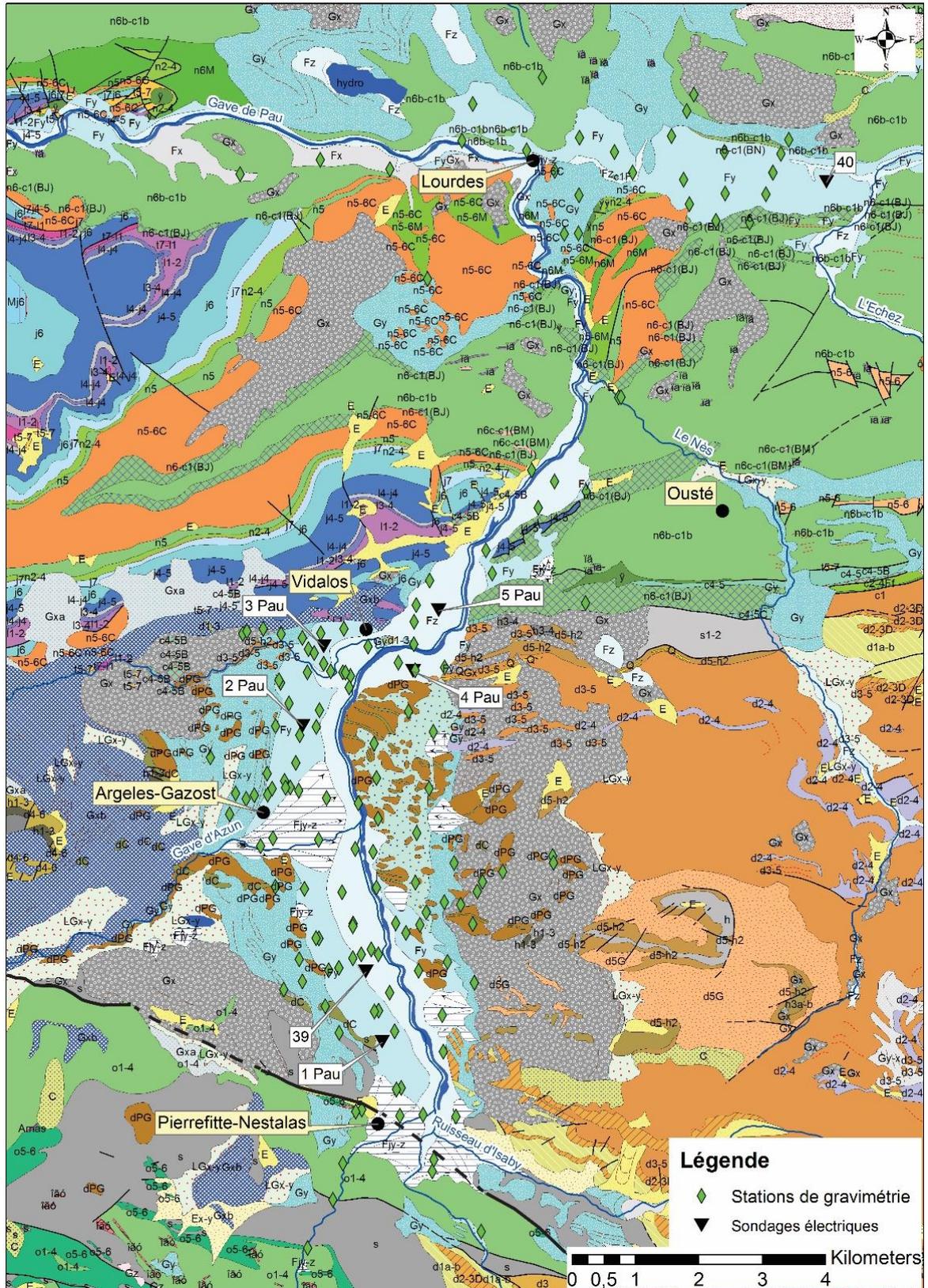


Illustration 14 – Carte géologique de la vallée du gave de Pau extraite de la carte géologique harmonisée des Hautes-Pyrénées (BRGM) et localisation des stations de mesures gravimétriques, des sondages électriques et de la faille de Pierrefitte en trait noir gras

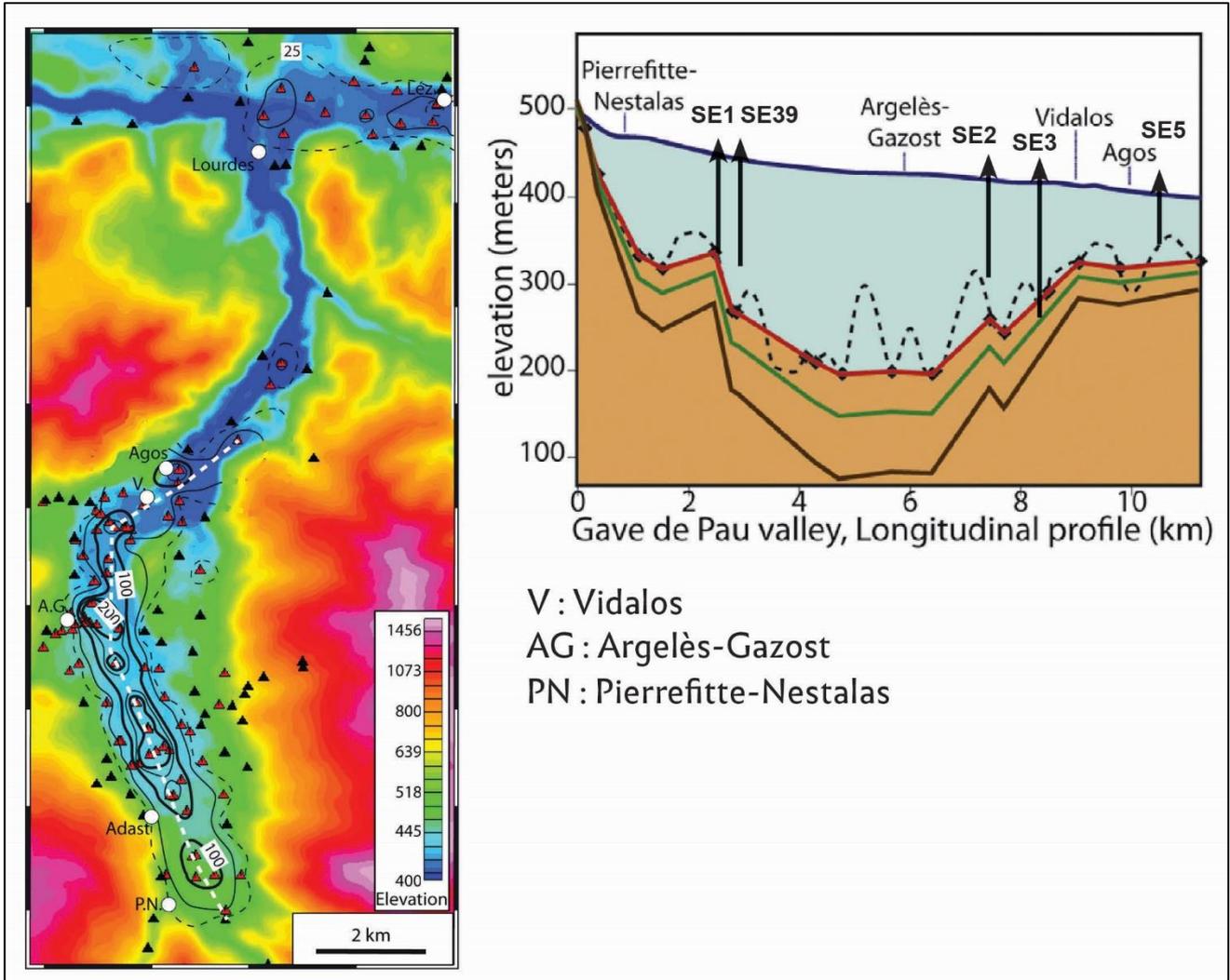


Illustration 15 – Gauche : Carte topographique de la vallée du gave de Pau montrant l'épaisseur des dépôts quaternaires (isohypses en noir) calculée à partir des données de gravimétrie pour un contraste de densité remplissage/substratum de  $600 \text{ kg/m}^3$  (modifiée d'après Perrouty et al., 2015). Localisation de la coupe sur la carte de gauche par la ligne en tirets blancs. Droite : Coupe longitudinale de la vallée du gave de Pau entre Pierrefitte-Nestalas et Agos-Vidalos. Les losanges noirs représentent les points de mesures le long de la coupe. La ligne rouge représente la profondeur calculée pour un contraste de densité de  $600 \text{ kg/m}^3$ . Les lignes verte et noire représentent la profondeur calculée pour des contrastes de densité de  $500$  et  $400 \text{ kg/m}^3$  respectivement. La courbe noire en pointillés montre le résultat brut de l'inversion des données gravimétriques de la carte de gauche pour un contraste de densité de  $600 \text{ kg/m}^3$ . Elle montre l'influence des points de mesure situés sur les bords de la vallée pour les secteur du centre de la vallée où il n'y a pas de données.

#### **4.6.1. Discussion et conclusion**

Les données de géophysique acquises dans la vallée du gave de Pau montrent des résultats convergents. Ils permettent de proposer un approfondissement de la vallée du gave de Pau jusqu'à 250 mètres de profondeur, dans le bassin d'Argelès, large de plus d'un kilomètre et long de près de 8 kilomètres entre Pierrefitte-Nestalas et Vidalos (Illustration 15). Les éléments du remplissage seraient plus grossiers dans la partie sud du bassin d'Argelès.

L'approfondissement du plancher de la vallée est corrélé avec les zones de confluences des rivières actuelles, qui correspondent aux confluences des langues glaciaires anciennes. La bordure méridionale du bassin d'Argelès est contrôlée par la faille normale de Pierrefitte. Ainsi le surcreusement observé serait lié à l'activité glaciaire et son emplacement dans la vallée contrôlé par la tectonique.



## 5. Synthèse des connaissances acquises

### 5.1. GÉOMÉTRIE DES VALLÉES ET ÉPAISSEUR DE REMPLISSAGE

Dans la majorité des vallées étudiées, les secteurs où la vallée s'élargit sont systématiquement corrélés à un approfondissement du toit du substratum, formant des bassins intra-montagneux comblés d'alluvions fluvio-glaciaires. L'étude géophysique de l'épaisseur de ces dépôts de l'Ariège, de la Garonne, de la Neste d'Aure, et du gave de Pau, montre que celle-ci peut atteindre plus de 300 mètres dans les zones d'élargissement. Le volume des dépôts dans ces bassins est donc important ; ce qui représente une information de premier ordre pour appréhender leur potentiel aquifère.

Les élargissements sont placés à la confluence des rivières secondaires actuelles avec la rivière principale. Ces confluences existaient déjà aux époques glaciaires où des glaciers se rejoignaient. L'érosion glaciaire est donc responsable de l'élargissement et en partie responsable du surcreusement des vallées. En partie, car la terminaison méridionale de tous ces bassins intra-montagneux s'arrête sur des failles majeures telles que la faille nord-pyrénéenne ou la faille de Soulan (Autran et Garcia-Sanseguno, 1996), dont certaines réputées actives comme la faille de Pierrefitte (Lacan, 2008 ; Lacan et Ortuño, 2012). Un contrôle tectonique du surcreusement est donc vraisemblable. Ce contrôle peut se limiter à contraindre les zones de surcreusement des glaciers en créant un escarpement dans la vallée, ou une zone de faiblesse moins résistante à l'érosion, mais pourrait également intervenir de façon active durant le Quaternaire (Lacan, 2008).

L'épaisseur des dépôts quaternaires augmente des bordures vers le centre des vallées. Elle varie également dans l'axe du bassin en suivant un profil en long de la vallée. Des fosses d'approfondissement séparées par des hauts-fonds de substratum sont ainsi observées en vallée d'Aure ou de la Garonne. Cette géométrie peut être parfois reliée aux verrous glaciaires, comme c'est le cas dans les vallées de la Garonne ou du gave de Pau, mais pas toujours, comme en témoigne celle de la vallée d'Aure. Cette étude ne permet pas de définir les origines de telles géométries. Toutefois, des pistes d'explications peuvent être proposées ici, avec des facteurs impliqués comme la dynamique érosive lors du fluage d'un glacier ainsi que la dureté du substratum offrant plus ou moins de résistance à cette érosion.

### 5.2. LITHOLOGIE DES REMPLISSAGES

L'absence de données géologiques en profondeur et les limites d'utilisation propres à la méthode géophysique par sondages électriques ne permettent pas de préciser la nature des dépôts fluvio-glaciaires pour les parties les plus profondes. En effet, le principe d'équivalence propre à la méthode géophysique par sondages électriques utilisée ne permet pas (ou difficilement) de mettre en évidence, par exemple, des dépôts grossiers et résistants sous une épaisse couverture de matériaux plus conducteurs. Ces niveaux sont pourtant les plus favorables à constituer des aquifères à forte porosité et à potentiel très élevé à l'instar de ceux observés dans le massif des Alpes.

Les campagnes de sondages électriques ont cependant permis de mettre en évidence, sur les premières dizaines de mètres, des dépôts hétérogènes à granulométrie contrastées. Les interprétations des coupes géo-électriques proposent en effet des dépôts, allant de formations conductrices attribuées à des limons argileux peu transmissifs, à des formations sensiblement plus résistantes attribuées à des blocs décimétriques à métriques dans une matrice plus ou moins limoneuse ou sableuse. Cet ensemble de niveaux caractérise un aquifère multicouche

mis en évidence pour des profondeurs relativement faibles dans la plupart des vallées étudiées. Ce caractère multicouche apparaît sensiblement plus marqué dans les vallées de l'Ariège amont (au moins sur une trentaine de mètres) et de la Neste d'Aure (jusqu'à 80 m).

La méthode géophysique par sondage électrique (1D) n'a également pas permis de mettre en évidence des phénomènes de chenalisation dans les dépôts en profondeur (au niveau de sillons glaciaires par exemple), ces objets étant considérés de trop faibles dimensions et généralement trop profonds pour être identifiés par la méthode utilisée. Ces chenalisations constituent cependant des aquifères à fort potentiel dans la mesure où ils disposent de ressources renouvelables importantes.

### 5.3. CARTOGRAPHIE DES ZONES FLUVIO-GLACIAIRES D'INTERET HYDROGÉOLOGIQUE

La carte des Illustration 16 et Illustration 17 représente la localisation des secteurs d'intérêts hydrogéologiques identifiés parmi les dépôts fluvio-glaciaires cartographiés sur la zone d'étude. La définition de ces zones d'intérêt est issue du croisement des critères suivants, sachant que la totalité de ces configurations n'est pas nécessairement identifiée sur chacune d'elle :

- ✓ existence d'une zone d'élargissement de vallée ou d'une extension latérale importante de dépôts fluvio-glaciaires à l'affleurement,
- ✓ mise en évidence d'une épaisseur importante des dépôts fluvio-glaciaires à partir de mesures géophysiques et/ou de données de forages existants,
- ✓ reconnaissance de matériaux de remplissage fluvio-glaciaire à fort potentiel aquifère (porosité élevée) à partir de mesures géophysiques et/ou de données de forages existants,
- ✓ existence supposée d'un contexte privilégié de recharge de l'aquifère fluvio-glaciaire. Outre l'infiltration directe des précipitations sur son impluvium, il s'agit de configurations pressenties où, par exemple, les formations du substratum contribuent à l'alimentation de l'aquifère fluvio-glaciaire. Ce type de configuration est en particulier attendu en présence de nature de substratum correspondant à des calcaires karstifiés mais peut s'étendre à d'autres formations géologiques aquifères encaissantes.

Deux catégories de zones d'intérêt sont distinguées au sein de cette carte en fonction de l'état actuel des connaissances :

1. **Dépôts fluvio-glaciaires à fort intérêt hydrogéologique**, représentés en rouge sur la carte (Illustration 16 et Illustration 17). Ces zones sont suspectées correspondre à des réservoirs aquifères contenant des ressources en eau permettant de contribuer à une gestion stratégique de soutien d'étiage des cours d'eau.

Cinq zones fluvio-glaciaires à fort intérêt hydrogéologique sont identifiées. Il s'agit des vallées du **gave de Pau** entre Pierrefitte-Nestlas et Vidalos, de la **Neste d'Aure** en aval de Saint-Lary-Soulan, de la **Garonne** d'une part entre Marignac et Frontignan et d'autre part au niveau de Barbazan et de l'**Ariège** entre Les Cabanes et Tarascon-sur-Ariège :

❖ **Secteur FG01 – Vallée Gave de Pau entre Pierrefitte-Nestalas et Vidalos**

Le secteur FG01 a fait l'objet de deux types d'investigations géophysiques à savoir des prospections gravimétriques et des sondages électriques. Les résultats obtenus (détaillés dans le chapitre 4) ont mis en évidence un **fort approfondissement** de la vallée atteignant jusqu'à 250 mètres de profondeur dans le bassin d'Argelès.

La nature de remplissage globalement homogène sur le secteur est principalement sablo-graveleuse. Il s'agirait ainsi d'un aquifère à porosité d'interstice de bonne perméabilité. Par ailleurs, il semblerait que la zone comprise entre Argelès-Gazost et Pierrefitte-Nestalas concerne un remplissage plus grossier de meilleure perméabilité.

❖ **Secteur FG02 – Vallée Neste d'Aure en aval de Saint-Lary-Soulan**

Le secteur FG02 a fait l'objet de trois types d'investigations géophysiques à savoir des prospections gravimétriques, de sismiques passives et des sondages électriques. Les résultats obtenus (détaillés dans le chapitre 4) indiquent de grandes épaisseurs de dépôts en particulier entre Saint-Lary et Guchan avec la mise en évidence de 2 approfondissements du plancher de la vallée séparées par un haut-fond (Illustration 12). Le plus important est situé au nord de Saint-Lary, pouvant atteindre plus de 300 m localement et le second situé entre Bourisp et Guchan atteignant 250 mètres.

La nature de remplissage se distingue du sud vers le nord de la vallée entre Saint-Lary et Grézian. La partie sud est ainsi définie globalement à éléments plus grossiers constituée de dépôts de sables, graviers et blocs en surface (entre 20 et 80 m d'épaisseur) devenant nettement plus argileux en profondeur. Le remplissage de la partie nord apparaît plus fin avec des sables limoneux sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Ces différentes informations semblent retranscrire la présence d'aquifères à porosité d'interstice à caractère multicouche.

Parmi les rares forages d'eau recensés sur la zone d'étude, celui du Bernet (10834X0030/F) implanté dans le secteur FG02 au sein des dépôts fluvio-glaciaires sur la commune de Vielle-Aure (65) corrobore cet intérêt hydrogéologique. Ce forage à usage d'eau potable de seulement 17 m de profondeur, recoupe très partiellement les alluvions fluvio-glaciaires composées ici de galets et graviers emballés dans une matrice sableuse. L'épaisseur totale de l'aquifère, reconnue par forage (forage thermal 10844X0051/F), est de l'ordre de 120 m, sachant que le substratum est constitué de schistes paléozoïques peu à pas aquifères. Les paramètres hydrodynamiques obtenus en pompage (à un débit de 85 m<sup>3</sup>/h) sur les ouvrages du secteur (Trochu M., 2012) témoignent d'un aquifère à nappe libre productif avec des transmissivités comprises entre 5.10<sup>-1</sup> et 5. 10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s, un coefficient d'emmagasinement de 1 à 3% et une perméabilité d'environ 5.10<sup>-3</sup> m/s. L'alimentation de cet aquifère s'opère pour une grande part directement par infiltration des précipitations et pour une moindre part par la rivière Neste d'Aure en fonction des variations de son niveau.

❖ **Secteur FG03 – Vallée Garonne entre Marignac et Frontignan**

Le secteur FG03 a fait l'objet de deux types d'investigations géophysiques à savoir des prospections gravimétriques et des sondages électriques. Les résultats obtenus (détaillés dans le chapitre 4) ont mis en évidence un très **important approfondissement** de la vallée parfaitement corrélé avec son élargissement (**extension latérale des dépôts dépassant 3 km**). En effet, deux bassins ont été identifiés atteignant plus de 300 mètres d'épaisseur de dépôts fluvio-glaciaires au niveau

de Marignac et de Frontignan séparés par une zone de haut fond corrélée en surface avec un rétrécissement de la vallée (Illustration 9).

La nature du remplissage est considérée relativement homogène sur les 100 premiers mètres. Elle serait principalement composée de sables et graviers devenant plus grossiers en profondeur dans le secteur de Marignac. Le secteur de Frontignan-de-Comminges est constitué de dépôts plus fins, de nature sablo-limoneuse.

A noter cependant que les approfondissements du secteur dépassant les profondeurs atteignables en prospection électrique, et en l'absence d'ouvrages recoupant le substratum et donc de coupes géologiques, il n'est actuellement pas possible de caractériser la nature du remplissage en profondeur et particulièrement l'existence ou non d'éléments grossiers.

#### ❖ **Secteur FG04 – Vallée Garonne au niveau de Barbazan**

Le secteur FG04 a uniquement fait l'objet de prospections gravimétriques mettant en évidence une zone d'approfondissement, toutefois de moindre importance en comparaison des bassins du secteur FG03. Ce surcreusement est compris entre 100 et 200 mètres de profondeur au niveau de Barbazan.

Située dans la continuité du bassin de Frontignan-de-Comminges (séparé par un haut fond du substratum), la nature du remplissage doit probablement être similaire à celle reconnue à ce niveau, à savoir relativement homogène sur plusieurs dizaines de mètres et constituée de dépôts fins sablo-limoneux.

Malgré ce faible niveau de connaissance, ce secteur présente un intérêt hydrogéologique en raison de la nature de l'encaissant de ce réservoir fluvio-glaciaire constitué des calcaires karstifiés du massif de Sauveterre-de-Comminges en rive droite, susceptibles de contribuer latéralement à son alimentation (Illustration 17 et Illustration 18).

#### ❖ **Secteur FG05 – Vallée Ariège entre Les Cabanes et Tarascon-sur-Ariège**

Le secteur FG05 a fait l'objet de reconnaissances à partir de 2 sondages électriques complétées par les descriptions géologiques d'un forage recoupant le substratum au niveau d'Ussat-les-Bains. L'épaisseur totale des dépôts atteint 125 m dans la partie étroite de la vallée laissant supposer (par similarité avec les autres vallées investiguées) un approfondissement plus conséquent dans les zones d'élargissement telle que la confluence de l'Ariège avec le Vicdessos en amont de Tarascon-sur-Ariège.

Le remplissage reconnu apparaît homogène et présente une granulométrie très grossière sur les 30 premiers mètres. Plus en profondeur, les dépôts semblent correspondre à un multicouche de niveaux plus fins sablo-argileux ou argileux.

Outre ces éléments géométriques et lithologiques intéressants, ce secteur présente un intérêt hydrogéologique marqué en raison de la nature du substratum correspondant ici à des calcaires karstifiés des systèmes de Niaux-Lombrives-Sabart en rive gauche et du massif de Quié-Sinsat en rive droite susceptibles de contribuer latéralement à l'alimentation du réservoir fluvio-glaciaire (Illustration 17 et Illustration 18).

2. **Dépôts fluvio-glaciaires à intérêt hydrogéologique local**, représentés en bleu sur la carte (Illustration 16 et Illustration 17). Ces zones correspondent à des réservoirs aquifères contenant des ressources en eau intéressantes pour des enjeux locaux notamment en termes d’approvisionnement en eau potable.

Cinq zones fluvio-glaciaires à intérêt hydrogéologique local sont identifiées. Il s’agit des vallées du **gave de Pau** au niveau de Lourdes, de la **Pique** en aval de Luchon, de l’**Ariège amont** d’une part au niveau de l’Hospitalet Près l’Andorre et d’autre part en aval d’Ax-les-Thermes et de l’**Ariège aval** en amont de Foix :

❖ **Secteur FG06 – Vallée du gave de Pau au niveau de Lourdes**

Ce secteur d’intérêt est révélé par le contexte des **forages du Tydos** (n° BSS 10058X0041/F et 10528X0143/F) à usage d’eau potable localisés sur la commune de Lourdes (Oller, 2011). Les ouvrages les plus productifs captent une nappe captive contenue au sein de graviers et sables fins remplissant un chenal fossile sur environ 20 mètres d’épaisseur. Des niveaux argileux et de tourbes assurent une couverture imperméable sur 10 m d’épaisseur. D’autres ouvrages moins productifs, localisés sur les versants du ruisseau du Tydos, captent une nappe libre contenue au sein des sables fins et argileux. Ces dépôts se situent au-dessus des argiles compactes. Ce système aquifère est singulier avec un axe drainant en charge (le chenal fossile) séparant deux zones perméables en rive droite et en rive gauche de la vallée du Tydos constituées d’alluvions sablo-argileuses plus ou moins grossières. Les débits de pompage des 2 ouvrages encore en exploitation sont très importants (respectivement de plus de 140 m<sup>3</sup>/h et 200 m<sup>3</sup>/h). Les caractéristiques hydrodynamiques de cette nappe captive fournissent des valeurs de transmissivité de 4.10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s, avec une perméabilité d’environ 5.10<sup>-3</sup> m/s, et un coefficient d’emmagasinement compris entre 3.10<sup>-4</sup> et 5.10<sup>-3</sup>.

Cette configuration particulière témoigne de l’intérêt hydrogéologique de ces chenaux formés au cours d’épisodes de débâcle, constitués de sables et graviers parsemés de gros blocs sur des épaisseurs importantes.

❖ **Secteur FG07 – Vallée de la Pique en aval de Luchon**

Ce secteur est caractérisé à partir des résultats d’un sondage électrique corrélé avec les données de forages recensés en BSS. Il apparaît ainsi que les formations fluvio-glaciaires du secteur atteignent environ 80 m de profondeur depuis l’amont jusqu’à la confluence avec l’One, ce qui correspond à un surcreusement modéré au vu de la largeur de la vallée (environ 1 km).

Le remplissage de la vallée est de type multicouche avec une nature générale relativement fine, composé de sables plus ou moins graveleux ou limoneux, intercalé de niveaux argileux. Ces données retranscrivent un aquifère à porosité d’interstices probablement caractérisé par des valeurs de transmissivité élevées.

❖ **Secteur FG08 – Vallée de l’Ariège en amont de Foix**

Ce secteur d’intérêt, situé en amont du verrou glaciaire de la cluse de Foix est révélé par le contexte de l’ancien **puits d’eau potable de Layroule** (10753X0038/P) sur la commune de Foix, aujourd’hui abandonné en raison d’une contamination au tétrachloroéthylène. Cet ouvrage est foncé à plus de 30 mètres sans atteindre le substratum. En effet, les alluvions actuelles d’origine fluviale sont emboîtées dans des dépôts fluvio-glaciaires plus anciens. Les investigations effectuées (forage de

piézomètres et panneaux électriques) pour déterminer la source et le panache de pollution ont permis d'améliorer la connaissance géologique, notamment la profondeur du substratum à proximité de cet ouvrage. Le substratum serait constitué par les marnes noires de l'Albien et atteindrait localement jusqu'à 45 m de profondeur.

Ces alluvions renferment une nappe en connexion hydraulique avec l'Ariège permettant de fournir d'importants débits (productivité de l'ouvrage de l'ordre de 75 m<sup>3</sup>/h). Par ailleurs, une alimentation du réservoir fluvio-glaciaire par l'aquifère carbonaté du Pech de Foix est suspectée.

❖ **Secteur FG09 – Vallée de l'Ariège en aval d'Ax-les-Thermes**

Ce secteur, présentant une zone d'élargissement d'environ 1 km de large, est caractérisé à partir des résultats d'un sondage électrique. Il apparaît ainsi que les formations fluvio-glaciaires du secteur dépasseraient 50 m de profondeur.

Le remplissage de la vallée présente une granulométrie très grossière sur les 30 premiers mètres devenant plus fine en profondeur, composé de sables plus ou moins argileux ou de niveaux argileux. Ces données retranscrivent un aquifère à porosité d'interstices probablement caractérisé par des valeurs de transmissivité élevées.

❖ **Secteur FG10 – Vallée de l'Ariège au niveau de l'Hospitalet-Près-l'Andorre**

Ce secteur d'intérêt est révélé par le contexte particulier des **captages des Goutils** situés dans la partie amont de la vallée de l'Ariège au niveau de l'Hospitalet-près-l'Andorre. Malgré la présence d'une vallée glaciaire étroite où l'épaisseur des dépôts atteint seulement une trentaine de mètres, l'aquifère fluvio-glaciaire se révèle sur ce secteur particulièrement intéressant (Mangin, 2007). En effet, le cumul des débits des différentes sources captées est estimé à environ 100 l/s et le forage (10941X0025/F) est exploité à un débit de 35 m<sup>3</sup>/h. L'ensemble de ces ouvrages concerne un exemple d'aquifère d'altitude particulièrement productif, alimenté par des venues d'eau d'origines variées. L'alimentation s'opère directement par l'infiltration des précipitations au sein des alluvions fluvio-glaciaires recouvrant le fond de la vallée, mais aussi via des venues d'eau issues des cônes d'éboulis tapissant les flancs abrupts de la vallée, et probablement aussi par des apports en eau des fissures et fractures des gneiss de l'Hospitalet constituant l'encaissant (estimation de 25% du débit). Les réserves en eau ont été estimées autour de 2 millions de m<sup>3</sup>.

A noter également que dans une logique de priorisation nécessaire dans ce type d'investigations à une échelle de travail aussi vaste, toutes les vallées n'ont pu être investiguées et étudiées. Toutefois, à partir de l'expérience et des résultats obtenus dans le présent projet, il apparaît que les vallées du Salat (en aval de Saint-Girons), de la Neste du Louron (en aval de Loudenvielle) et de l'Adour (en aval de Campan) semblent présenter des configurations géologiques, morphologiques et hydrogéologiques également propices à l'existence de fort potentiel aquifère. Ces secteurs pourront dans le futur faire l'objet de reconnaissances géophysiques adaptées permettant de quantifier les ressources en eau existantes.

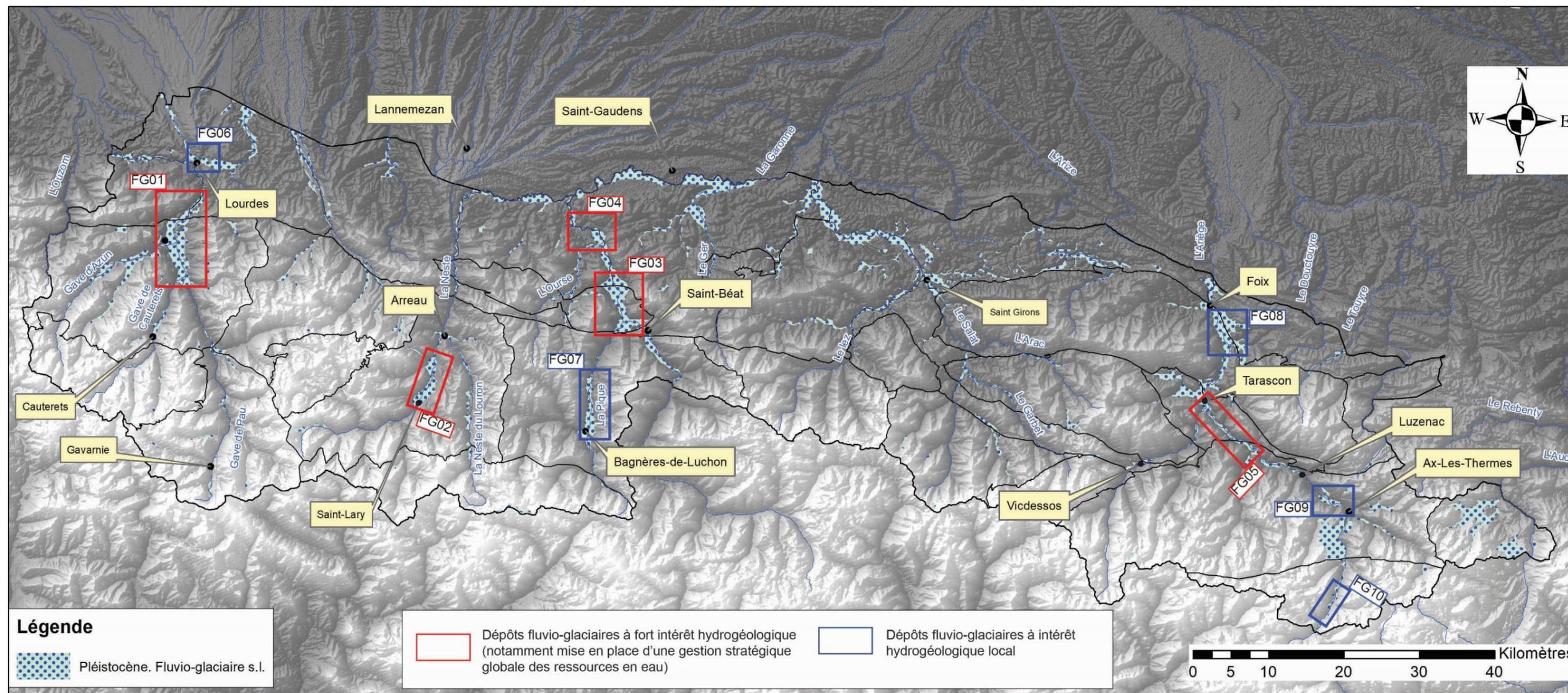


Illustration 16 – Carte des dépôts fluvio-glaciaires s.l. des vallées pyrénéennes (fond de carte MNT au pas de 50 m) et identification des zones d'intérêt hydrogéologique. Les traits noirs correspondent aux limites des secteurs étudiés dans l'atlas hydrogéologique (BRGM/RP-66912-FR)

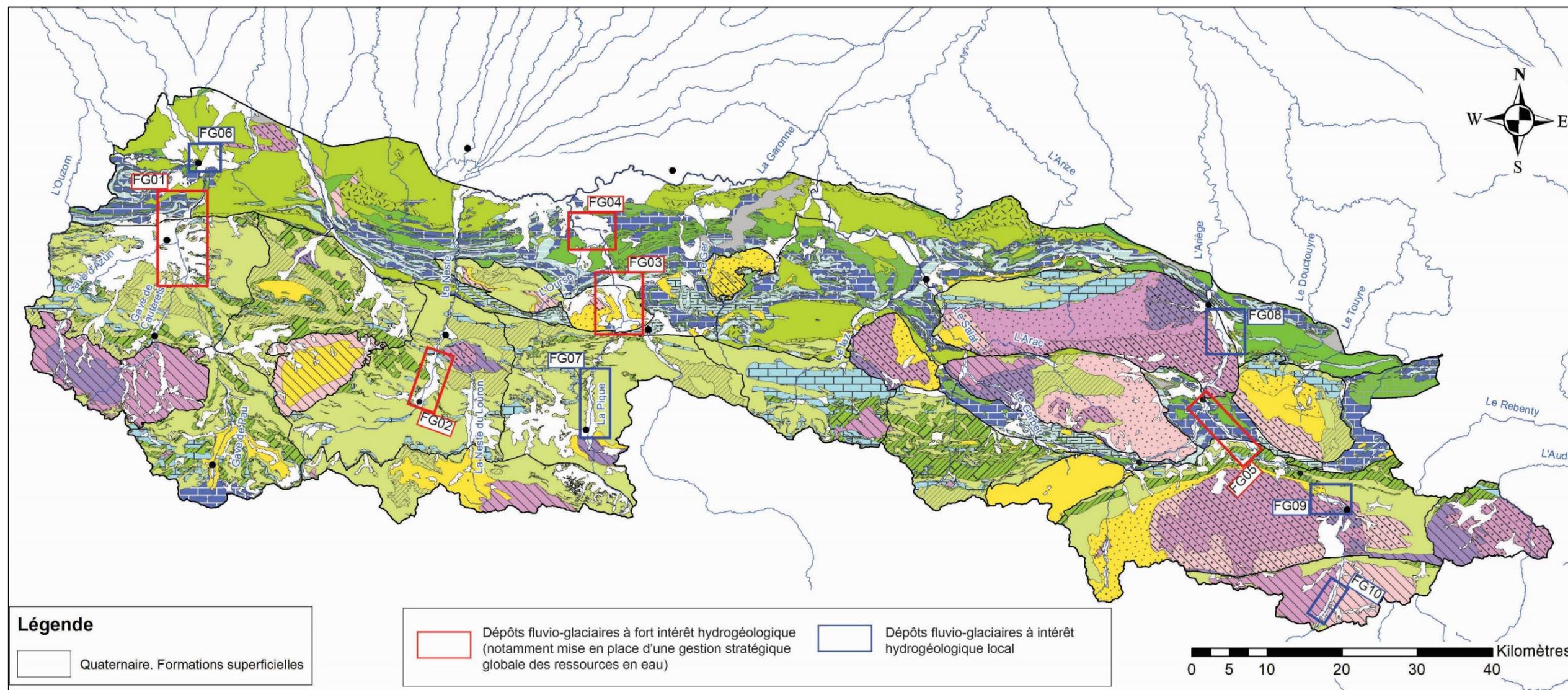


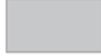
Illustration 17 – Carte des zones fluvio-glaciaires d'intérêt hydrogéologique présentées sur la carte hydrogéologique des Pyrénées à l'échelle 1/200 000 des potentialités aquifères des formations de la chaîne pyrénéenne dans les départements des Hautes-Pyrénées, de la Haute-Garonne et de l'Ariège (légende présentée en Illustration 18), d'après les travaux du rapport BRGM/RP-66912-FR

## LÉGENDE

### FORMATIONS SUPERFICIELLES

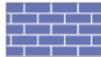
 Formations à intérêt hydrogéologique dont le potentiel aquifère est étroitement lié à leur nature lithologique, et leur puissance (fluvio-glaciaires, glaciaires, alluvions, et autres formations superficielles localement associées). Aquifère tampon vis à vis des aquifères encaissants, rôle de retardateur et/ou de régulateur des écoulements

### FORMATIONS TERTIAIRES INDIFFÉRENCIÉES

 Formations tertiaires indifférenciées (non traitées dans le cadre du programme POTAPYR)

### FORMATIONS CARBONATÉES ET DÉTRITIQUES DU MÉSOZOÏQUE

#### Potentialités aquifères

 Formations carbonatées karstifiées ou potentiellement karstifiées (calcaire massif majoritaire) à fort potentiel de karstification. Drainage bien organisé avec généralement un exutoire principal. Réserve plus ou moins forte et étroitement liée au développement du karst noyé. Débits élevés et très variables selon les saisons. Réponse impulsionnelle aux précipitations très rapide - **AQUIFÈRE**

 Formations plus ou moins carbonatées karstifiées ou potentiellement karstifiées, ou fissurées (*grès, calcaire dolomitique, dolomie [D], marbre [M]*), à moyen potentiel de karstification. Drainage peu organisé à exutoires souvent multiples. Réserve généralement forte. Débits assez élevés et relativement stable en période d'étiage. Réponse impulsionnelle aux précipitations assez élevée et contrastée - **AQUIFÈRE**

 Formations détritiques (de type flysch) globalement peu perméables. Circulations majoritairement dans la frange d'altération, les plans de schistosité, les diaclases, et joints de stratification. Débits faibles à très faibles - **PEU AQUIFÈRE**

 Formations très peu perméables considérées comme peu à pas aquifères (marnes majoritaires). Très faible potentiel de karstification. Elles favorisent le ruissellement. Écoulement local de faible débit dans la frange d'altération en relation avec les formations de recouvrement - **NON AQUIFÈRE**

### FORMATIONS CARBONATÉES ET DÉTRITIQUES DU PALÉOZOÏQUE

#### Potentialités aquifères

 Formations carbonatées massives karstifiées ou potentiellement karstifiées, intensément déformées (schistosité, métamorphisme, plissements). Organisation du karst peu à pas connue. Drainage pressenti faiblement organisé. Réserve supposée forte. Débits localement élevés à l'étiage, souvent en relation avec des placages morainiques - **AQUIFÈRE**

 Alternance de formations carbonatées plus ou moins épaisses, karstifiées ou potentiellement karstifiées, avec des formations peu perméables (pélites, calcschistes) dans un contexte intensément déformé. Aquifères compartimentés d'extension limitée. Débits moyennement élevés, étroitement liés à la nature de l'impluvium (système binaire) - **MOYENNEMENT AQUIFÈRE**

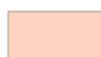
 Formations majoritairement détritiques, globalement très peu perméables (pélites, schistes indifférenciés majoritaires) dans un contexte intensément déformé, considérées comme peu à pas aquifères. Localement, écoulements dans la frange d'altération, les plans de schistosité, ou les diaclases, donnant naissance à des sources de versant de faible débit - **NON AQUIFÈRE**

### FORMATIONS DE SOCLE

#### Potentialités aquifères spécifiques

 Formations à fort potentiel aquifère

 Formations à moyen potentiel aquifère

 Formations à faible potentiel aquifère

 Formations peu à pas aquifère

#### Pondération lithologique et tectonique des potentialités aquifères

 Formations bréchiqes au sein des flyschs, de faible extension, relativement perméables. Localement rôle de drain vis à vis de l'impluvium et/ou des formations encaissantes. Débits faibles, ponctuellement moyennement élevés - **PEU À MOYENNEMENT AQUIFÈRE**

 Calcaires argileux ou marneux à relativement faible potentiel de karstification. Aquifère d'extension limitée à exutoires multiples généralement de faible débit - **PEU AQUIFÈRE**

#### Pondération lithologique et tectonique des potentialités aquifères

 Formations majoritairement détritiques, soumis à une intense fissuration d'origine tectonique (quartzites, schistes gréseux). Fonctionnement aquifère non connu, lié essentiellement à la fissuration d'origine tectonique souvent en relation avec des placages morainiques. Gamme de débits contrastée étroitement liée à la densité de la fracturation - **PEU À MOYENNEMENT AQUIFÈRE**

#### Type d'aquifère

 Aquifère composite, avec préservation du profil d'altération (altérites et fissurations issues de l'altération et/ou de la tectonique). Développement probable du profil d'altération en profondeur. Débits susceptibles d'être élevés pour des formations de socle

 Aquifère d'altérites dont le potentiel est étroitement lié à la nature plus ou moins perméable des altérites. Altérites souvent remaniées sur les pentes avec les formations superficielles ou les placages morainiques. Développement du profil d'altération en profondeur peu probable. Favorise le potentiel d'infiltration sur les zones de replat. Nombreuse sources de versant le plus souvent de faibles débits

 Aquifère principalement fissuré (fissuration issue de l'altération et/ou de la tectonique), préservation partielle du profil d'altération et/ou aquifère tectonique à forte perméabilité de fissures. Débits variables étroitement liés à la densité de la fracturation

 Formations très peu perméables favorisant le ruissellement. Profil d'altération non préservé ou très peu développé. Fracturation d'origine tectonique de faible perméabilité de fissures

Illustration 18 – Légende de la carte hydrogéologique des Pyrénées à l'échelle 1/200 000 présentée en Illustration 17, d'après les travaux du rapport BRGM/RP-66912-FR



## 6. Conclusions et perspectives

Le volet abordant les dépôts fluvio-glaciaires du projet POTAPYR a été principalement mené à partir d'études géophysiques conduites dans l'optique de mieux contraindre la géométrie et la lithologie du remplissage fluvio-glaciaire des vallées pyrénéennes. Le principal objectif était de localiser les vallées et les secteurs les plus intéressants sur le plan hydrogéologique.

Parmi les différentes méthodes mises en œuvre, les données de gravimétrie et de sismique passive ont permis d'imager la profondeur de l'interface substratum/remplissage fluvio-glaciaire pour les vallées du gave de Pau, de la Neste d'Aure, et de la Garonne. Les données ponctuelles de la géophysique par sondages électriques ont permis de mieux caractériser la nature des remplissages de ces dépôts ainsi que les successions lithologiques en présence. Ces sondages ont été effectués dans ces mêmes vallées, mais également dans celles de la Neste, de la Pique et de l'Ariège.

Ces différentes investigations entreprises sur la zone d'étude ont apporté de réelles avancées dans la connaissance géologique des principales vallées. Il est toutefois important de noter que ces outils géophysiques présentent des limites d'utilisation propres à chacune des méthodes et engendrent donc des incertitudes plus ou moins fortes dans les résultats qui en sont issus. Ainsi les épaisseurs totales de dépôts, estimées à partir des données gravimétriques, sont fortement dépendantes du choix du contraste de densité qui peut modifier d'un tiers la valeur interprétée. D'autre part, la nature des remplissages en profondeur qui dérive de l'interprétation des sondages électriques ne peut être établie au-delà d'une centaine de mètres. Il n'est notamment pas possible de mettre en évidence la présence d'éléments grossiers et perméables en profondeur sous un fort recouvrement de nature plus argileuse et moins perméable du fait de la conductivité élevée de ces niveaux.

Les secteurs étudiés correspondent à des zones d'élargissement de vallées, a priori plus favorables sur le plan hydrogéologique. Cette étude montre que ces élargissements sont systématiquement associés à des approfondissements du substratum sous les remplissages fluvio-glaciaires. Les profondeurs maximales interprétées atteignent près de 300 mètres pour les vallées du gave de Pau, de la Neste d'Aure et de la Garonne. Concernant la vallée de l'Ariège, la profondeur maximale documentée (données de forage) est de 125 mètres, laissant supposer des épaisseurs de dépôts plus importantes au niveau des zones d'élargissement.

Les dépôts caractérisés sont le plus souvent hétérogènes à granulométrie contrastée, allant de limons argileux peu transmissifs à des formations sensiblement plus résistantes et perméables attribuées à des blocs décimétriques à métriques, dans une matrice plus ou moins limoneuse ou sableuse. Cet ensemble de niveaux caractérise un aquifère multicouche mis en évidence pour des profondeurs relativement faibles dans la plupart des vallées étudiées. Ce caractère multicouche apparaît sensiblement plus marqué dans les vallées de la Neste d'Aure et de l'Ariège.

En effet, selon Blavoux et al., (2006), les variations rapides de faciès des dépôts fluvio-glaciaires à l'échelle kilométrique (variations observées en l'espace de quelques dizaines ou centaines de mètres) s'expliquent par des phénomènes de chenalisation et l'existence de lacs temporaires pendant les interstades glaciaires. A l'échelle du mètre, au sein des horizons aquifères, les variations de granulométrie et donc de perméabilité sont très importantes, traduisant les conditions de mise en place des dépôts fluvio-glaciaires avec des écoulements turbulents en bordure de langues glaciaires et des zones de deltas au débouché dans les lacs.

En termes de fonctionnement hydrogéologique, le matériel fluvio-glaciaire constitue un ensemble aquifère structuré en multicouches liés à l'alternance de niveaux plus ou moins perméables. Dans leur partie supérieure, la nappe est libre et ces aquifères sont susceptibles d'être en relation hydraulique directe avec les cours d'eau favorisant très grandement leur potentiel. Leur alimentation est assurée par l'infiltration directe des précipitations, en particulier en aval des vallées où l'extension latérale des dépôts devient plus importante. En amont des vallées, ces matériels fluvio-glaciaires sont le plus souvent en contact, voire remaniés dans leur partie supérieure, avec des éboulis de cônes de déjection. Ces types de configuration géomorphologique particulière favorisent grandement les infiltrations d'eau à partir de la surface. Ils sont ainsi propices à développer localement des aquifères à fort potentiel (exemple des captages des Goutils au niveau de l'Hospitalet-Près-l'Andorre dans la vallée de l'Ariège).

Sur la zone d'étude, quelques ouvrages implantés dans les dépôts fluvio-glaciaires pour les besoins d'enjeux locaux présentent des débits élevés pouvant dépasser 100 m<sup>3</sup>/h, en ne recoupant que très partiellement l'aquifère fluvio-glaciaire (exemples des forages d'eau potable de Lourdes, de Vielle-Aure, de Foix).

Non reconnue dans les Pyrénées, la présence en profondeur de dépôts à éléments grossiers, potentiellement à très forte transmissivité et mis en place au niveau des axes sur-creusés (sillons glaciaires), constitue la configuration idéale à l'existence de réservoirs aquifères à très forts potentiels. Ce contexte hydrogéologique d'intérêt peut s'avérer extrêmement intéressant dans la mesure où ces aquifères sont bien alimentés, donc disposant de ressources renouvelables importantes. L'alimentation de ces aquifères peut s'opérer latéralement par des eaux issues des formations aquifères encaissantes (notamment de type karstique) et/ou verticalement par la drainance privilégiée des niveaux fluvio-glaciaires supérieurs structurés en multicouches.

En effet, en reprenant des exemples du massif des Alpes du nord, et notamment du Bas Chablais et du bassin lémanique, il s'avère que les secteurs les plus aquifères correspondent aux axes des zones de circulation et d'alluvionnement liées aux grandes périodes de retrait glaciaire. C'est le cas par exemple des vallées de l'Arve et de la Menoge où les structures aquifères les plus productives sont constituées par les sillons de surcreusement remplis d'alluvions graveleuses à très fortes transmissivités permettant l'exploitation de forages à des débits de plusieurs centaines de m<sup>3</sup>/h, représentant un volume annuel de plusieurs millions de m<sup>3</sup> (Blavoux et al., 2006).

En prenant comme guide les exemples cités pour les Alpes, le présent programme a permis de mettre en évidence, dans les Pyrénées, l'existence de secteurs aux caractéristiques géomorphologiques similaires. Au regard des volumes d'eau susceptibles d'être sollicités (à titre d'exemple un seul ouvrage de 400 m<sup>3</sup>/h représenterait un volume annuel de plus de 3,5 Mm<sup>3</sup>) **ces aquifères fluvio-glaciaires pyrénéens pourraient intégrer une gestion globale des ressources en eau dans une optique de soutien des débits des grands cours d'eau du Bassin aquitain en période d'étiage.**

Le programme POTAPYR a permis de déterminer sur la zone d'étude les secteurs les plus favorables à l'existence d'aquifères à fort potentiel hydrogéologique. Pour compléter ces premiers travaux et avancer dans la connaissance hydrogéologique de ces aquifères méconnus, **il est nécessaire d'investiguer un ou plusieurs de ces secteurs par la réalisation de forages exploratoires.**

La profondeur prévisionnelle de ce type d'ouvrage est comprise entre 150 et 300 m selon les vallées investiguées. Leur réalisation est complexe au vu de la nature hétérogène des matériaux en place et nécessite des techniques de foration spécifiques et adaptées à chaque

contexte géologique identifié. La complétion des ouvrages peut, dans certains cas, être délicate avec la mise en place potentielle de drains horizontaux. D'autre part, ces forages exploratoires seraient à considérer comme de véritables ateliers scientifiques. Ainsi, lors de la foration un suivi géologique et hydrogéologique en continu doit être envisagé avec l'acquisition de données scientifiques complémentaires (diagraphies, analyses granulométriques, pompages d'essai, analyses chimiques et isotopiques, etc.) nécessaires à la détermination du potentiel aquifère, voire à la définition des modalités d'exploitation. Il est également important de noter que la configuration géomorphologique des vallées pyrénéennes, souvent étroites et encaissées, nécessitera probablement l'utilisation d'outils adaptés et de technologies innovantes pour optimiser l'implantation de ces forages exploratoires.

**Malgré ces contraintes techniques, et au regard des stratégies qui seront menées par les décideurs pour affronter les défis du futur en matière de gestion des ressources en eaux du Bassin Adour-Garonne, ces éléments techniques et ces investissements devront être confrontés à la réalité économique et aux potentiels bénéfiques environnementaux qui s'en dégageront.**



## 7. Bibliographie

- Alimen H., 1964. Le Quaternaire des Pyrénées de la Bigorre. Mem., carte geol., France, Paris, imp. Nat., 394 p.
- Amelot F., Delannoy J.J., Nicoud G., 2003. L'édification des cônes de déjection en zone de montagne : intérêts paléoenvironnemental et hydrogéologique, contribution typologique. In : Quaternaire, vol. 14, n°4, 2003. pp. 253-263.
- Autran A., Garcia-Sanseguno J., 1996. Tectonique hercynienne – carte structurale (moitié occidentale). In Barnolas A., Chiron JC. : Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées. Edition BRGM – ITGE, vol. 1.
- Barrère, P., Bouquet, C., Debroas, E.-J., Pélissonnier, H., Peybernès, B., Soulé, J.-C., Souquet, P., Ternet, Y., 1984. Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Arreau. BRGM Orléans.
- Bernardie S., Delpont G., Dominique P., le Roy S., Negulescu C., Roulle A., 2006. Microzonage sismique de Lourdes. BRGM/RP-53846-FR, 234 p., 86 fig., 35 tabl., 12 pl.
- Blavoux B., Nicoud G., Olive P., Siwertz E., 2006. Aquifères et Eaux souterraines en France. Tome 2. Chapitre X Alpes. p 605-610
- Calvet, M., 2004. The Quaternary glaciation of the Pyrenees. In: Ehlers, J., Gibbard, P.L. (Eds.), Quaternary Glaciations—Extent and Chronology, Part I: Europe. Elsevier, Amsterdam, pp. 119–128.
- Clin M., Lelong F., Poty B., de la Roche h., Fauré J., Macaudière J., Pélissonnier H., Kleinsmiede JW., Blanquart P., Rio Aragües LM., Valero J., 1986. Carte géol. France (1/50 000), feuille Bagnères-de-Luchon (1084). Orléans : BRGM.
- Delmas M., 2009. Chronologie et impact géomorphologique des glaciations quaternaires dans l'Est des Pyrénées. Thèse de Doctorat, Univ. Paris 1, 529 p.
- Delmas M., Calvet M., Gunnel Y., Braucher R., Bourlès D., 2012. Les glaciations quaternaires dans les Pyrénées ariégeoises : approche historiographique, données paléogéographiques et chronologiques nouvelles. Quaternaire 23, (1), p. 61-85.
- Lacan P., 2008. Activité sismotectonique plio-quaternaire de l'Ouest des Pyrénées. Thèse de Doctorat, Univ. Pau et des Pays de l'Adour, 283 p.
- Lacan P., Otruño M., 2012. Active tectonics of the Pyrenees: A review. Journal of Iberian Geology 38 (1) 2012: 9-30
- Lachet C., Bard P. Y., 1994. Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique. Journal of Physics of the Earth, 42(5), 377-397.
- Mangin A., 2007. Commune d'Ax-les-Thermes. Avis de l'hydrogéologue agréé en matière d'hygiène publique concernant la protection sanitaire des captages et du forage des Goutils.
- Monod B., et le groupe de travail GARVEMIP (2014) – Carte géologique numérique à 1/250 000 de la région Midi-Pyrénées. Notice technique. BRGM/RP-63650-FR, 160 p., 23 fig., 1 pl. hors-texte

Mucciarelli M., Gallipoli M. R., 2001. A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 42(3-4), 255-266.

Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1).

Oller G., 2011. Avis hydrogéologique sur la protection sanitaire des forages du Tydos (SPAC et F1ter) à Lourdes (Hautes-Pyrénées).

Paris JP., Vernet R., Bixel F., Icole M., Choukroune P., Pyolle J., 1975. Carte géol. France (1/50 000), feuille Montréjeau (1054). Orléans : BRGM. Notice explicative par JP. Paris, M. Icole, A. Tegye, C. Monciardini, P. Andreieff, M. Collignon, 1975, 25 p.

Parriaux A., Nicoud G., 1993. De la montagne à la mer, les formations glaciaires et l'eau souterraine. Exemple du contexte Nord-alpin occidental. In : *Quaternaire*, vol. 4, n°2-3, 1993. pp. 61-67.

Perrouty S., Moussirou B., Martinod J., Bonvalot S., Carretier S., Gabalda G., Monod B., Hérail G., Regard V., Remy D., 2015. Geometry of two glacial valleys in the northern Pyrenees estimated using gravity data. *C. R. Geoscience* 347, pp. 13-23.

Ternet Y., Barrère P., Bois JP., Debon F., Godechot Y., Mirouse R., Nicolaï A., Reyx J., Villanova M., 1980. Carte géol. France (1/50 000), feuille Argelès-Gazost (1070). Orléans : BRGM.

Ternet Y., Barrère P., Taillefer F., Souquet P., Peybernès B., et al., 1982. Carte géol. France (1/50 000), feuille Arreau (1072). Orléans : BRGM.

Ternet Y., Barrère P., Debros EJ., 1995. Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Campan (1071). Orléans : BRGM, 117 p.

Ternet Y., Barrère P., Dalles S., Debon F., Debros EJ., François JM., Pouget P., 1996. Carte géol. France (1/50 000), feuille Campan (1071). Orléans : BRGM.

Trochu M., 2012. Avis sanitaire sur le forage du Bernet. Commune de Vielle Aure. Département des Hautes-Pyrénées.

## **8. Annexes**

### **Annexe1**

#### **Liste des sondages électriques réalisés**



Amélioration de la connaissance géologique des formations fluvio-glaciaires dans les Pyrénées

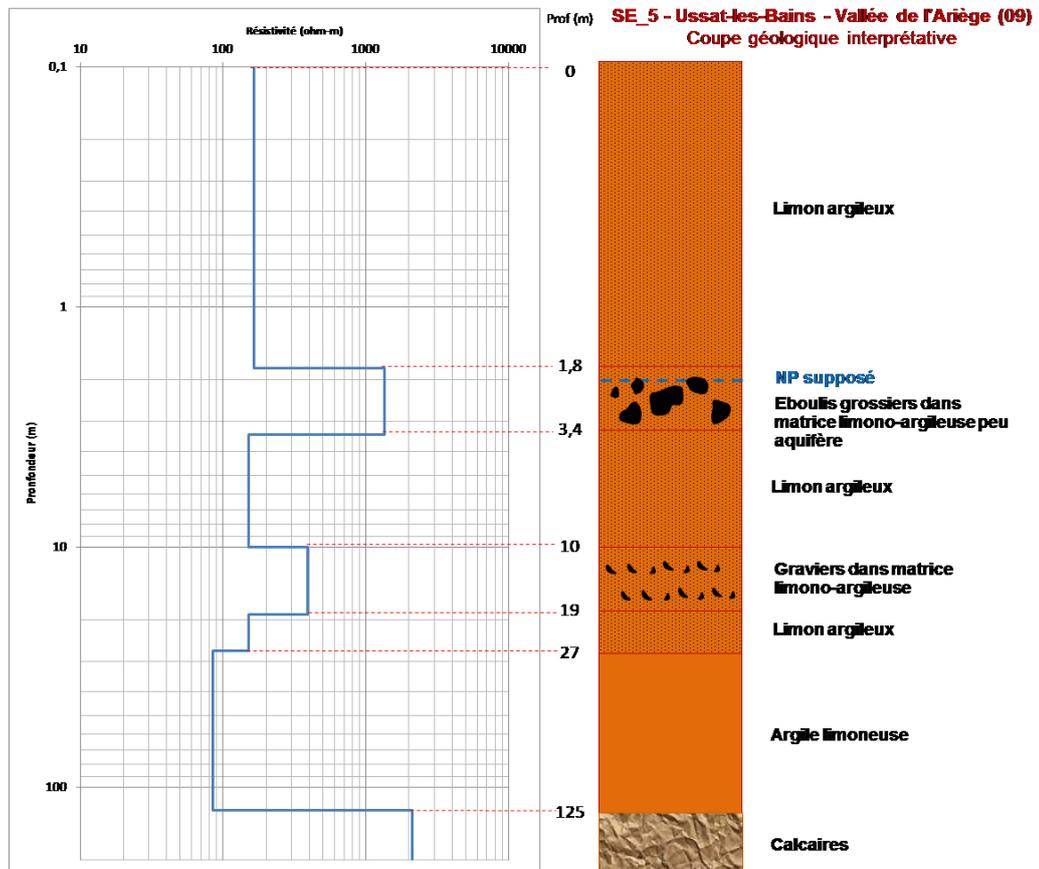
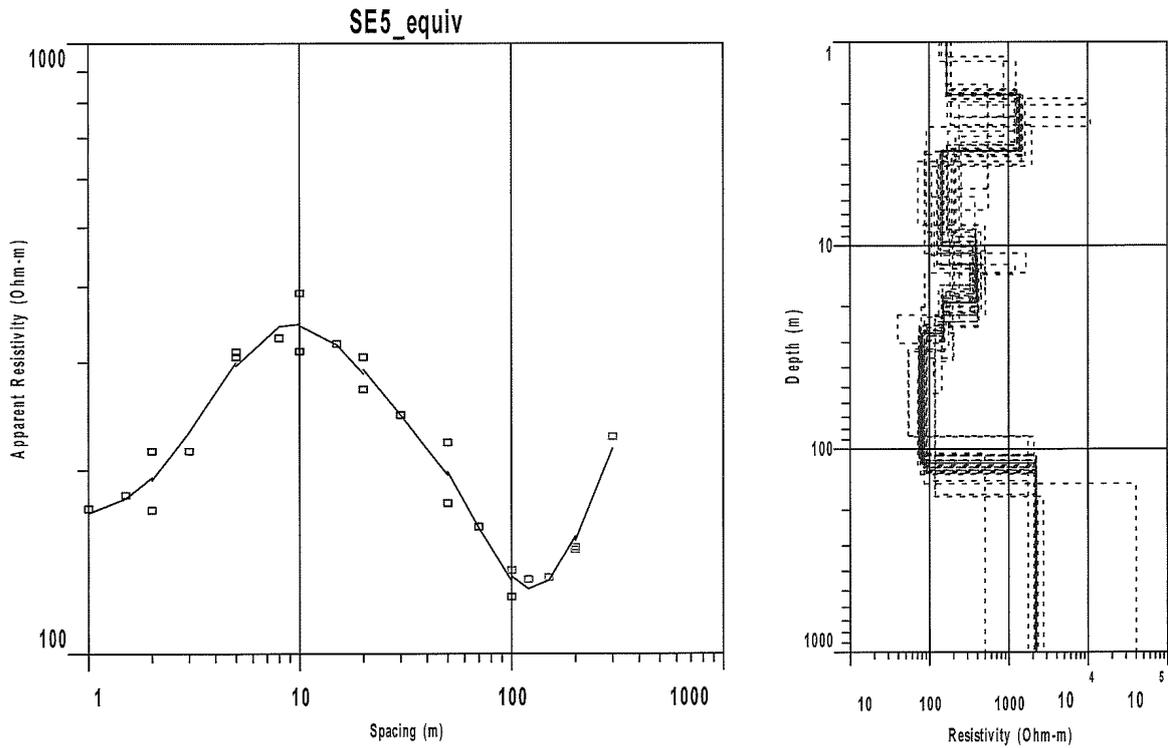
SE n°	Date	Dpt	Commune	Vallée	Latitude WGS84	Longitude WGS84	Z (m)
25	16/05/2014	31	Montauban de Luchon	Pique	42,797517	0,602450	622
30	15/05/2014	31	Marignac	Confluence Pique/Garonne	42,923417	0,662483	478
26	15/05/2014	31	Fos	Garonne	42,869033	0,738667	552
31a	20/05/2014	31	Ore	Garonne	42,972483	0,645067	463
31b	20/05/2014	31	Ore	Garonne	42,972850	0,641367	467
17	16/05/2014	31	Garin	Labach-Neste d'Oo	42,806733	0,507567	1163
29	15/05/2014	31	Genos	Arriou-Sec - Ger	42,999283	0,677850	527
5	19/05/2014	9	Ormolac-Ussat-les-bains	Ariège	42,818450	1,625833	497
6	19/05/2014	9	Aulos	Ariège	42,795833	1,674950	519
7	19/05/2014	9	Savignac-Les-Ormeaux	Ariège	42,728667	1,812200	674
39	13/05/2014	65	Adast	Gave de Pau	42,981350	-0,078200	436
4 Pau	25/06/2014	65	Boô-Silhen	Gave de Pau	43,024556	-0,071333	410
5 Pau	23/06/2014	65	Agos-Vidalos	Gave de Pau	43,033361	-0,066889	403
1 Pau	23/06/2014	65	Pierrefite	Gave de Pau	42,971417	-0,074556	449
2 Pau	24/06/2014	65	Ayzac-Ost	Gave de Pau	43,016083	-0,092278	423
3 Pau	24/06/2014	65	Ayzac-Ost	Gave de Pau	43,027556	-0,088833	399
40	21/05/2014	65	Lezignan	Confluence Graves-Gave de Pau	43,096722	0,004861	411
49 a	22/05/2014	65	Guchan	Aure	42,834033	0,333633	785
49b	22/05/2014	65	Bourisp	Aure	42,842000	0,341067	773
Grézian a	23/05/2014	65	Grézian	Aure	42,873183	0,347917	741
Grézian b	23/05/2014	65	Guchan	Aure	42,868617	0,343800	756
1 Aure	16/06/2014	65	Vignec	Aure	42,824700	0,320360	456
2 Aure	17/06/2014	65	Bazus-Aure	Aure	42,862180	0,345030	736
4 Aure	18/06/2014	65	Ancizan	Aure	42,875740	0,347900	718
5 Aure	17/06/2014	65	Cadéac-Les-Bains	Aure	42,893100	0,353200	699
45a	14/05/2014	65	Tuzaguet	Aure	43,089139	0,425972	546
45b	14/05/2014	65	Tuzaguet	Aure	43,087417	0,444944	532
41	21/05/2014	65	Adé	Confluence Mate/Montané	43,129000	-0,030083	438
48	12/05/2014	65	Capvern	Cone de Lannemezan	43,094533	0,344317	629

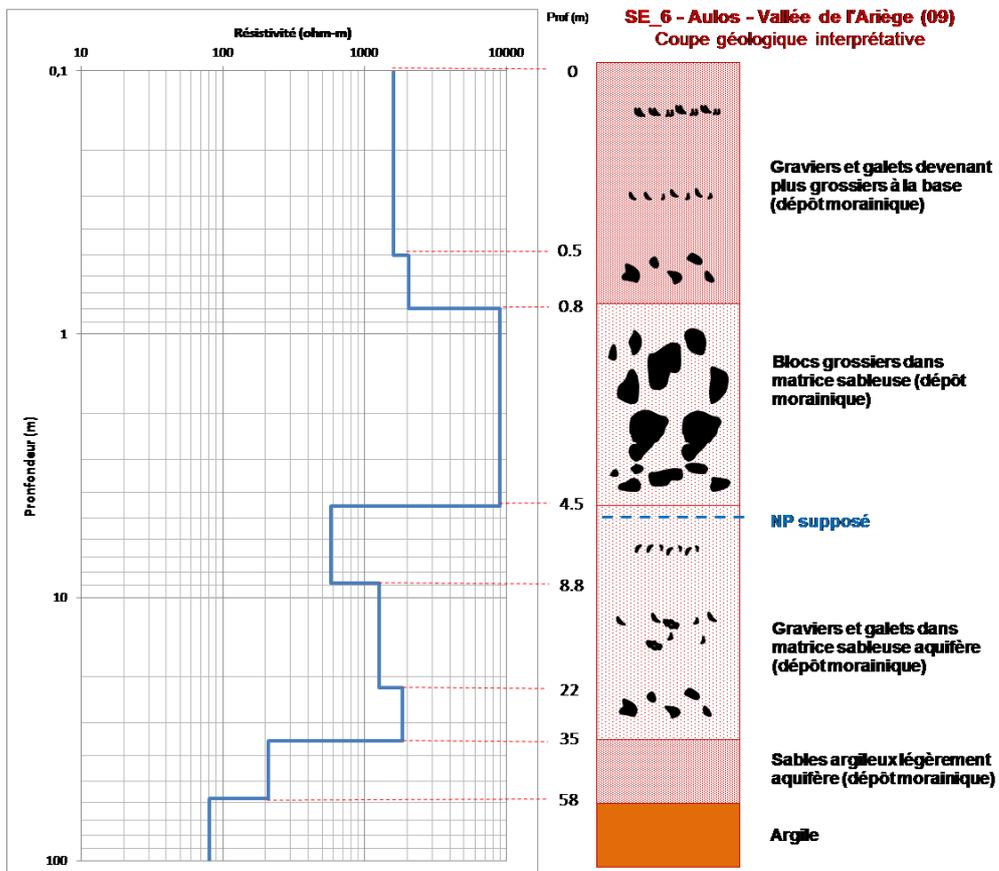
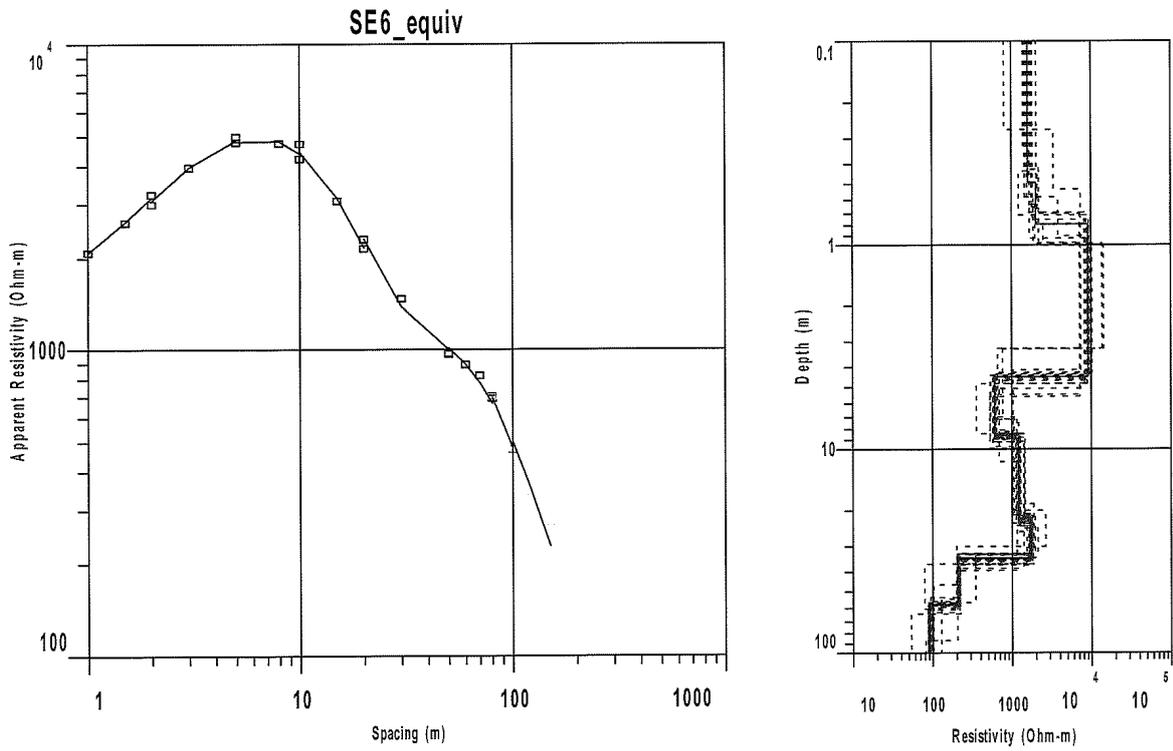


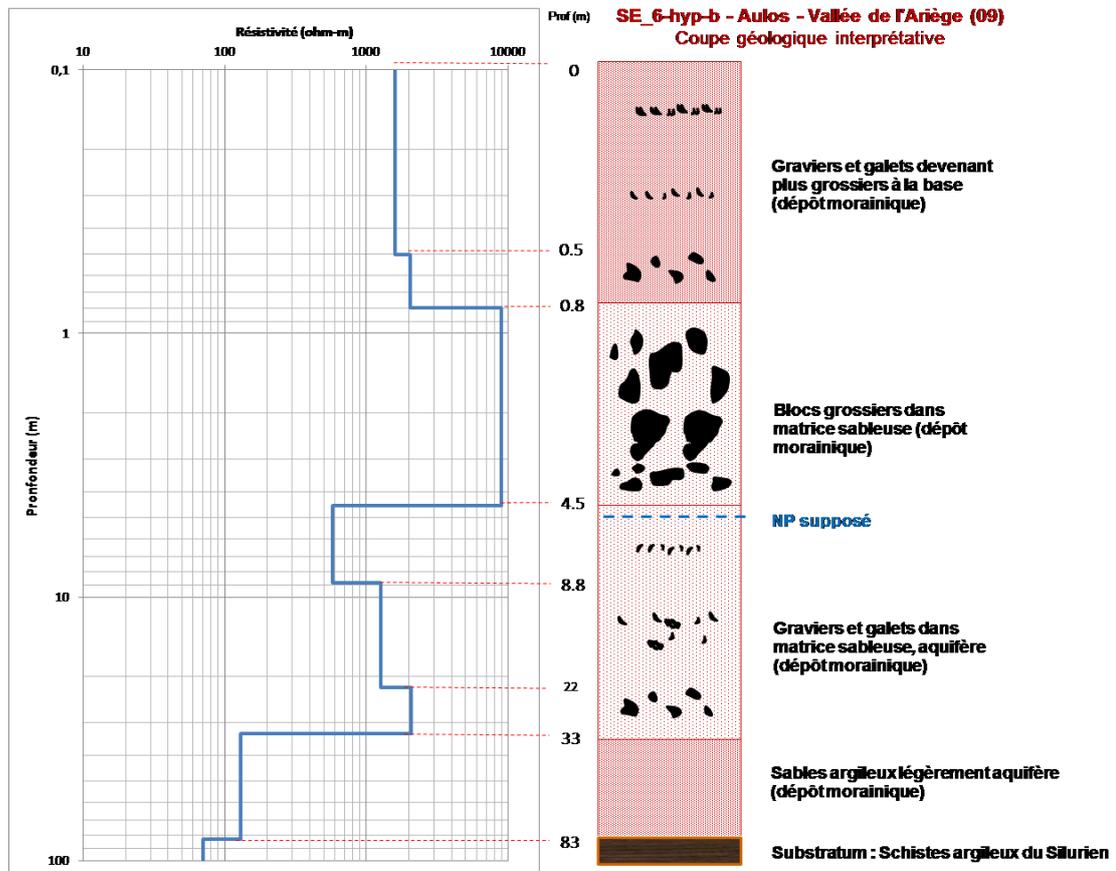
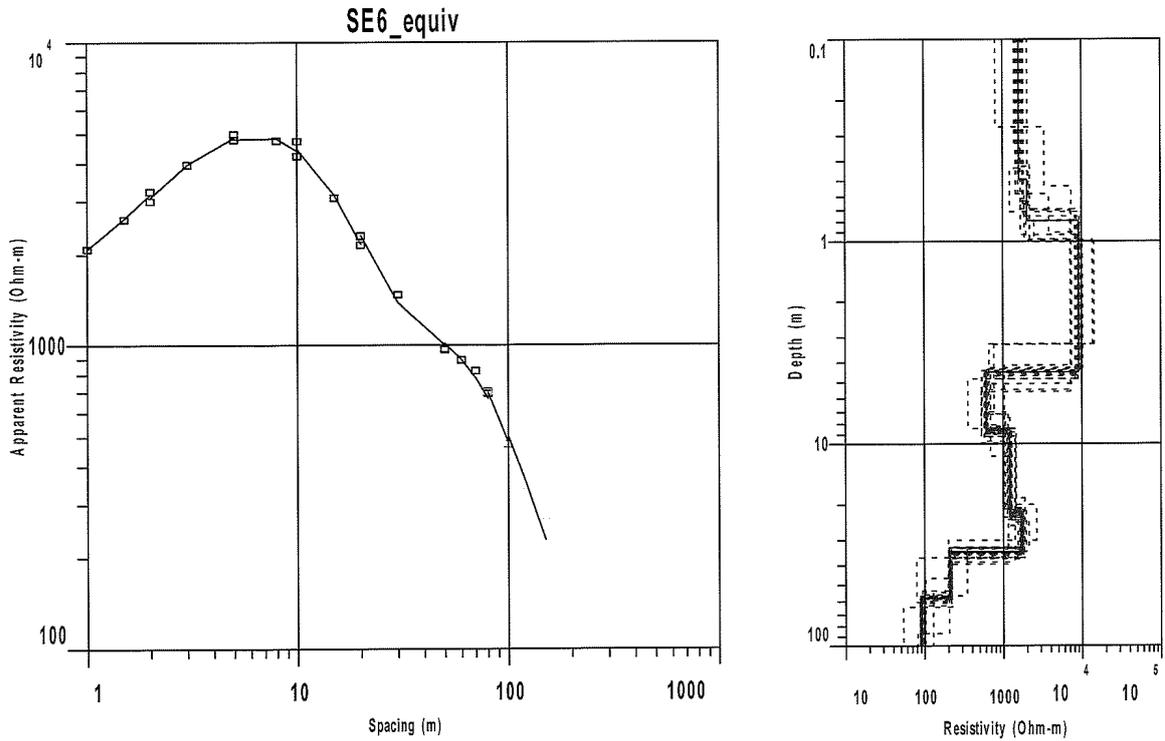
## **Annexe 2**

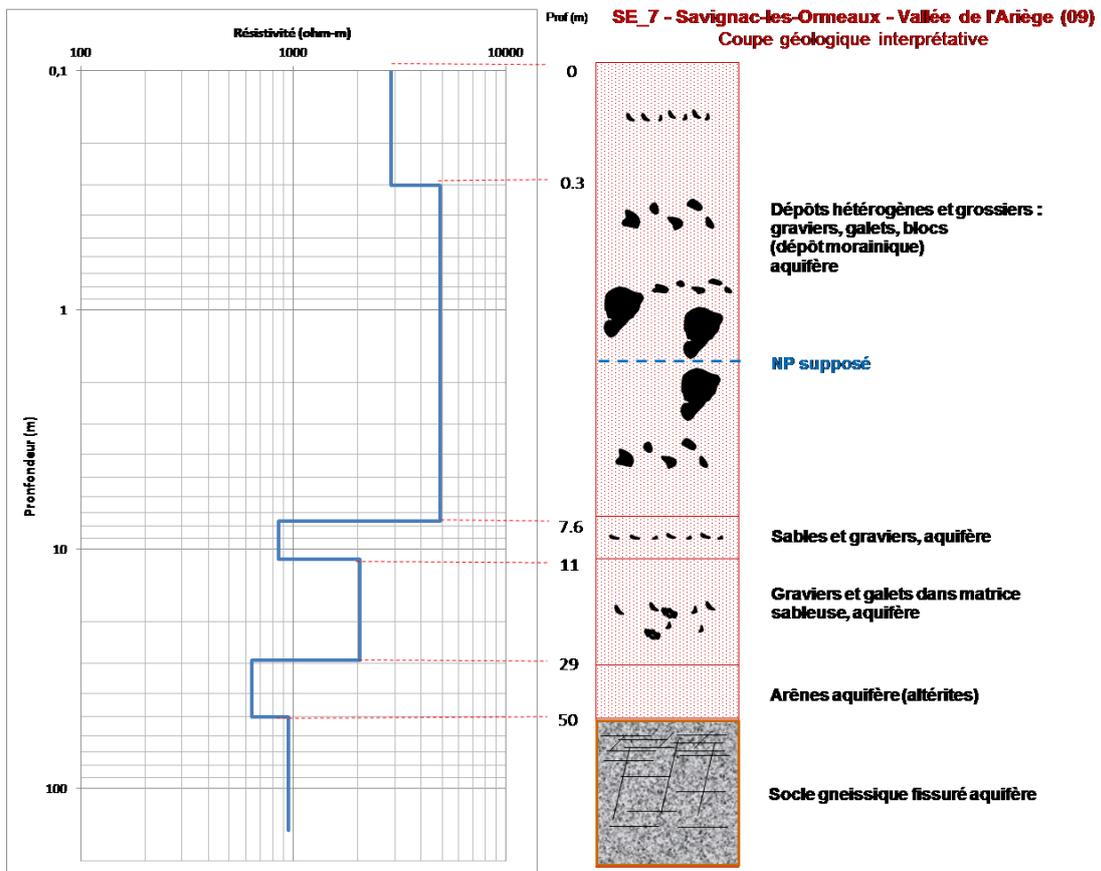
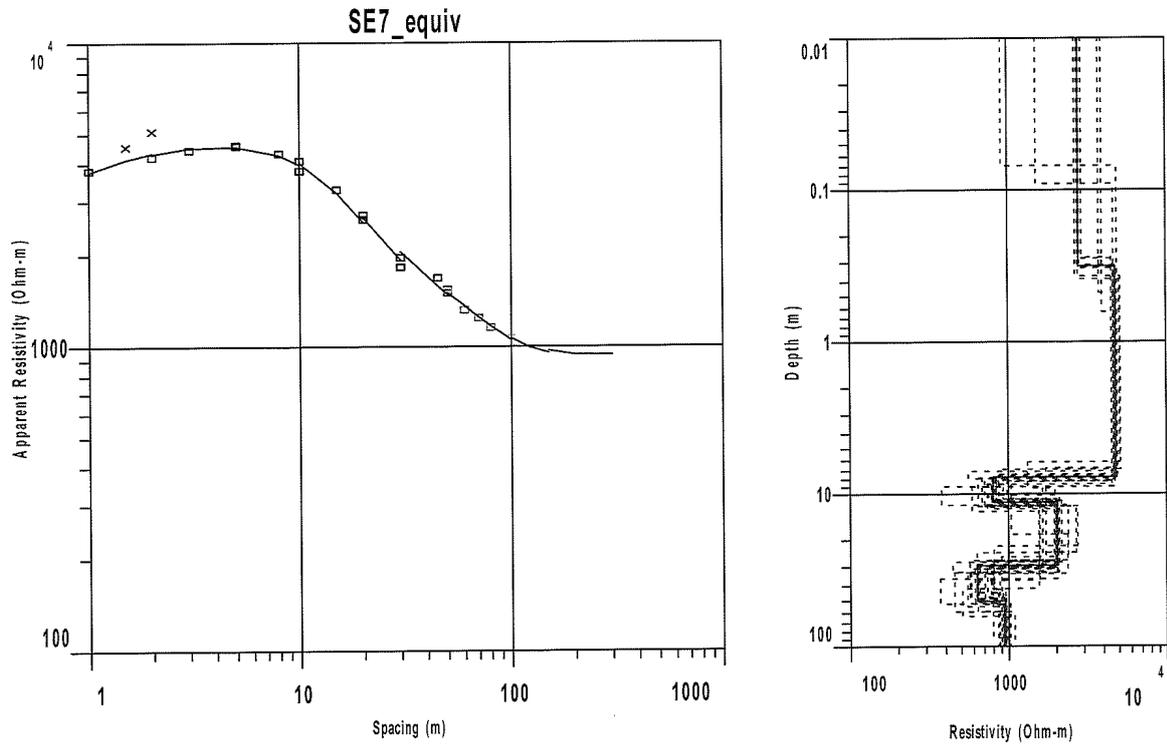
# **Coupes géoélectriques et géologiques interprétatives des sondages électriques réalisés dans la vallée de l'Ariège amont**

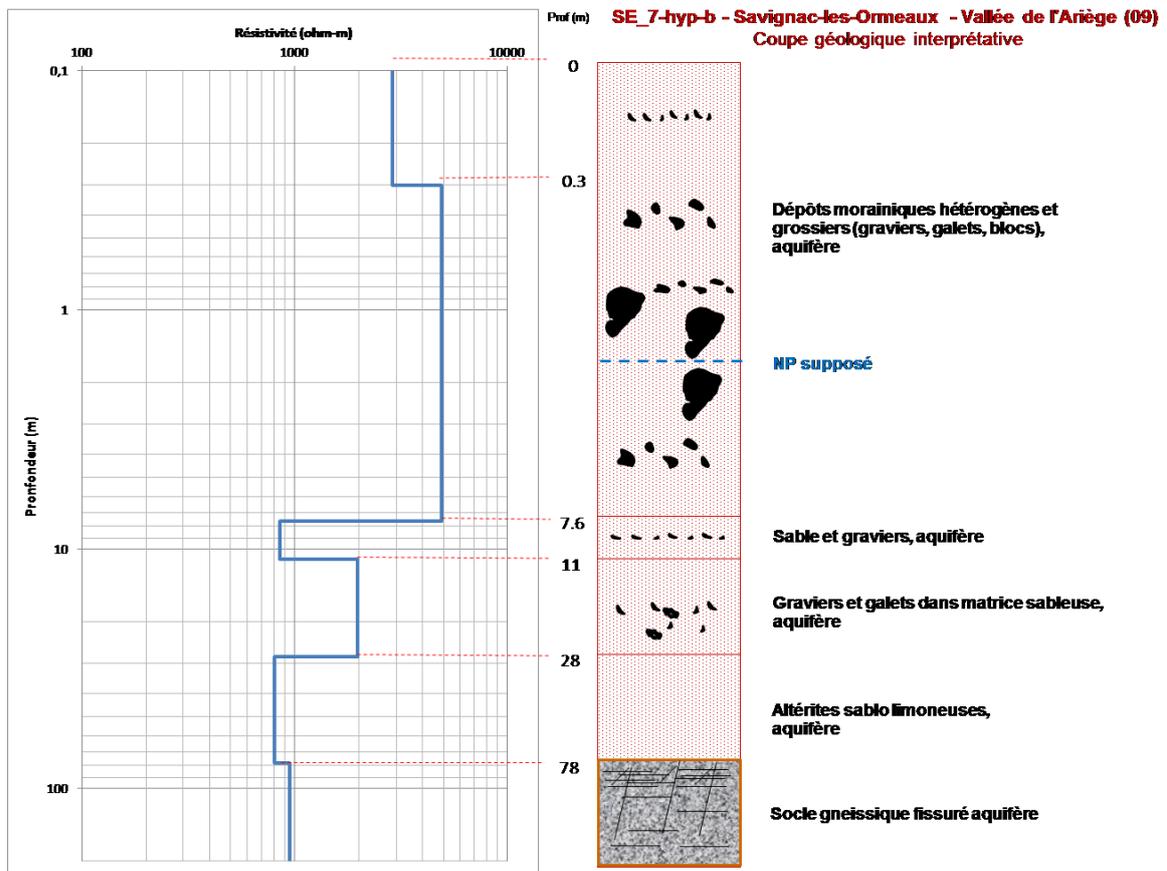
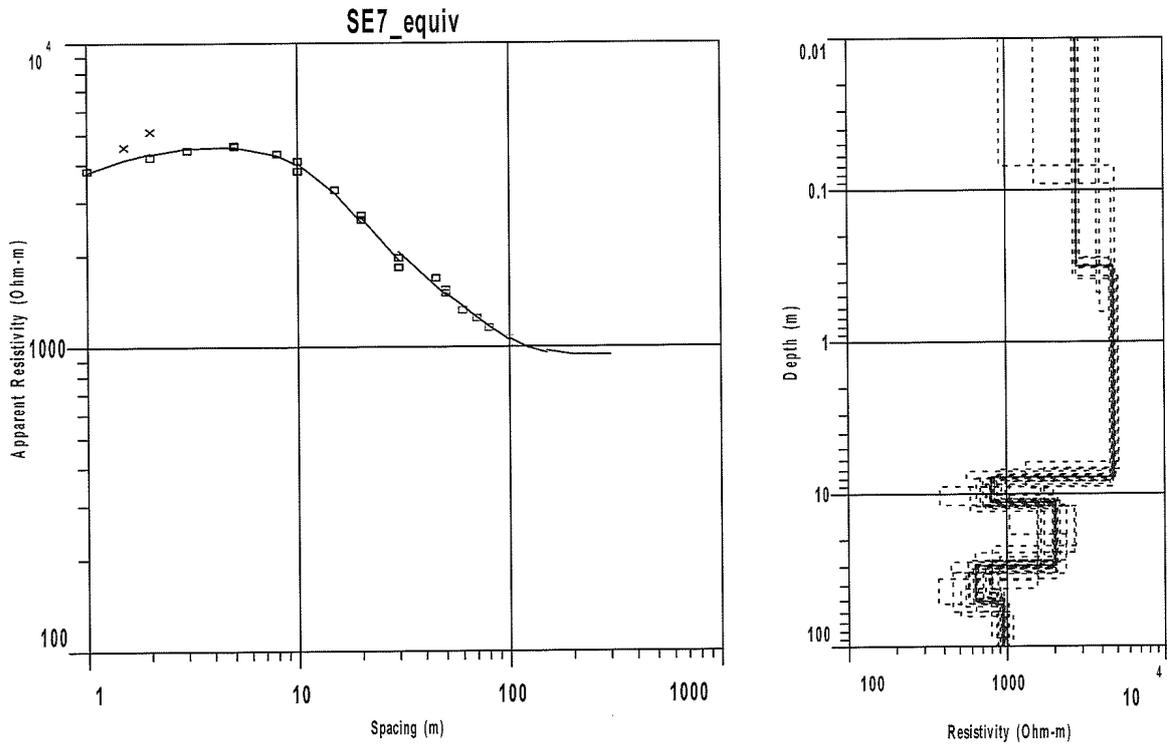










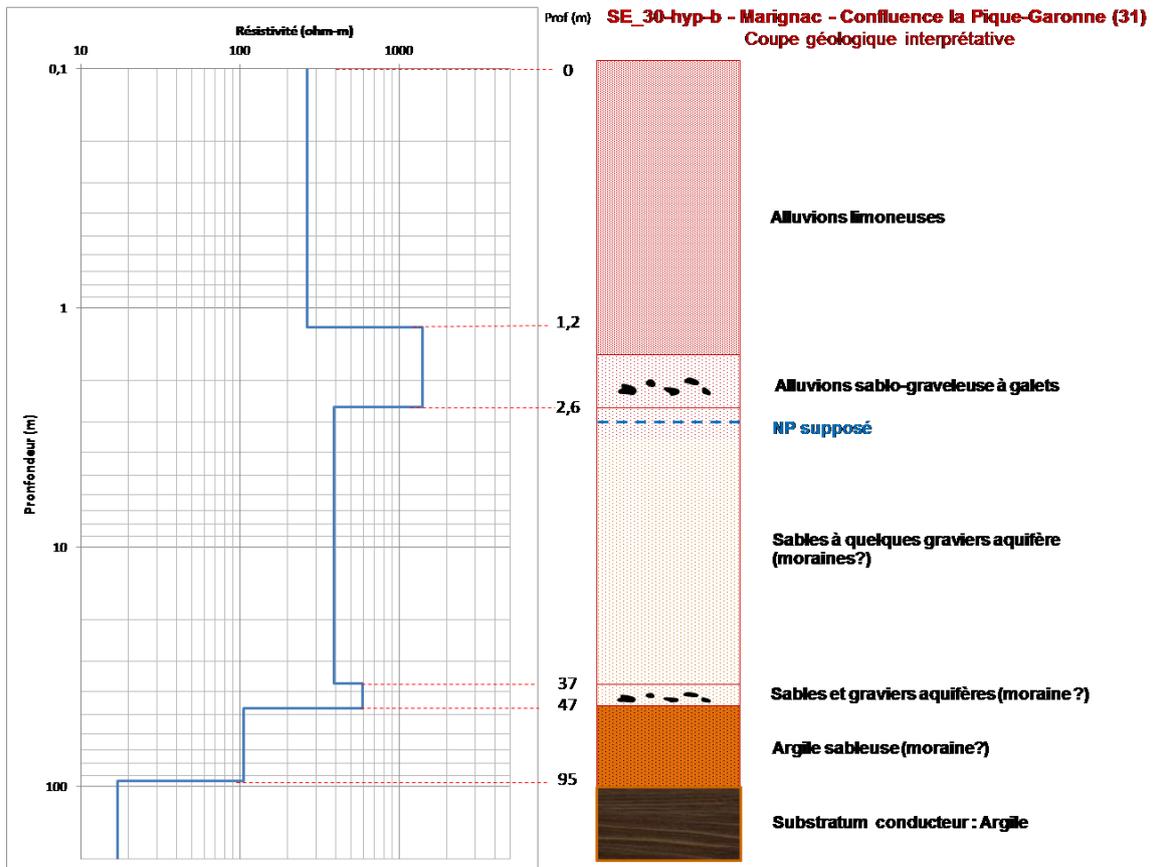
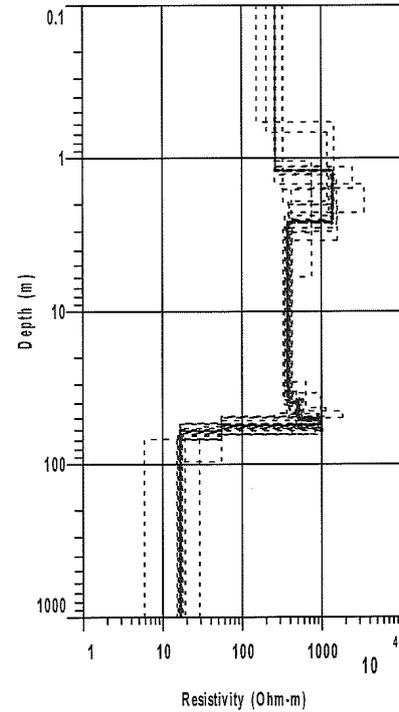
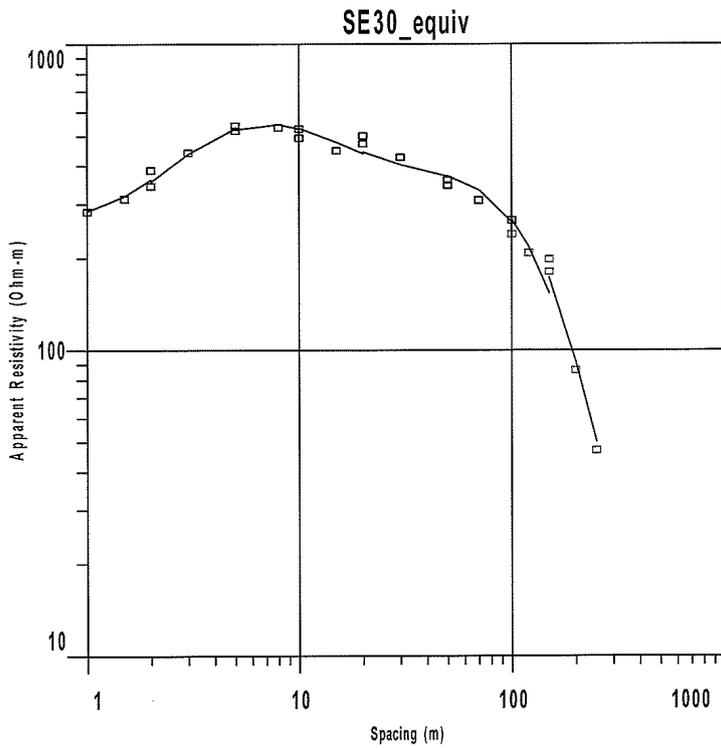


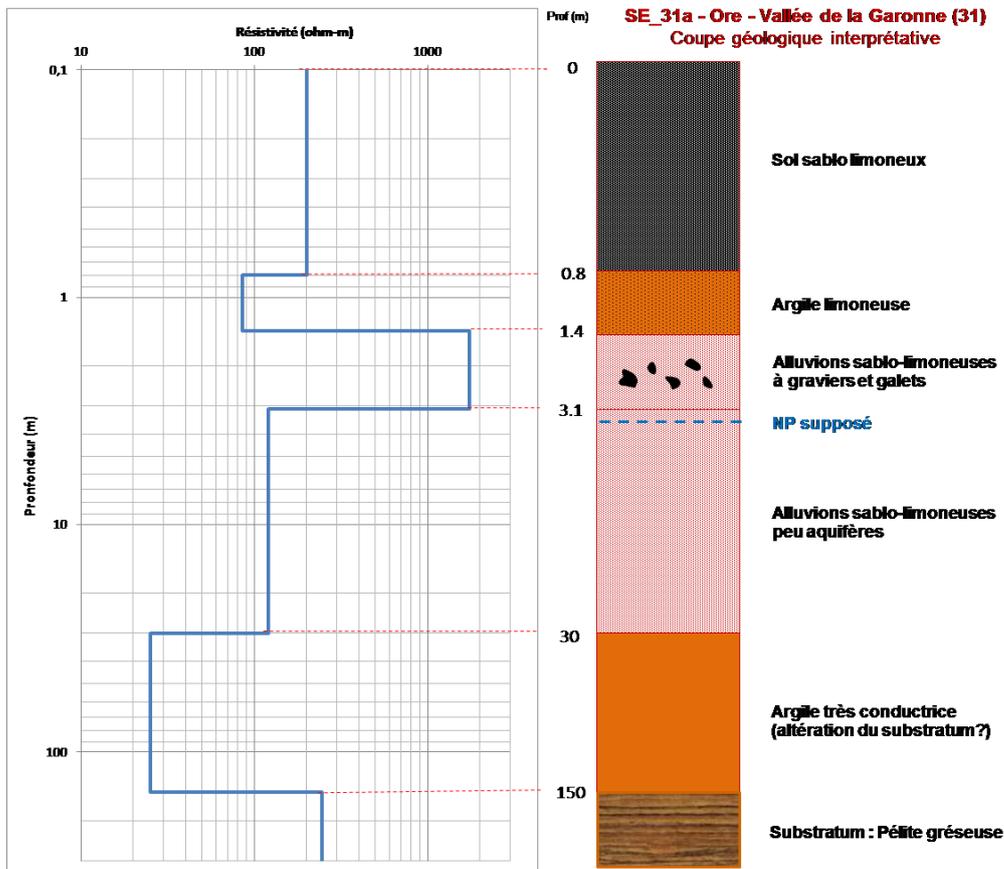
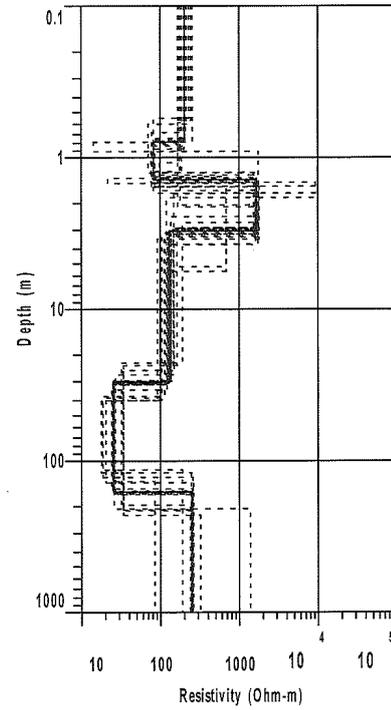
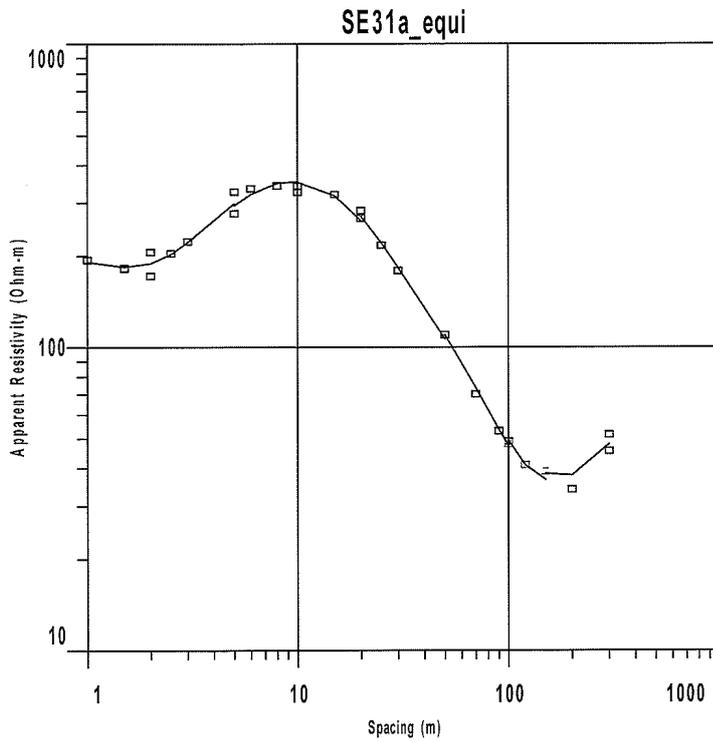


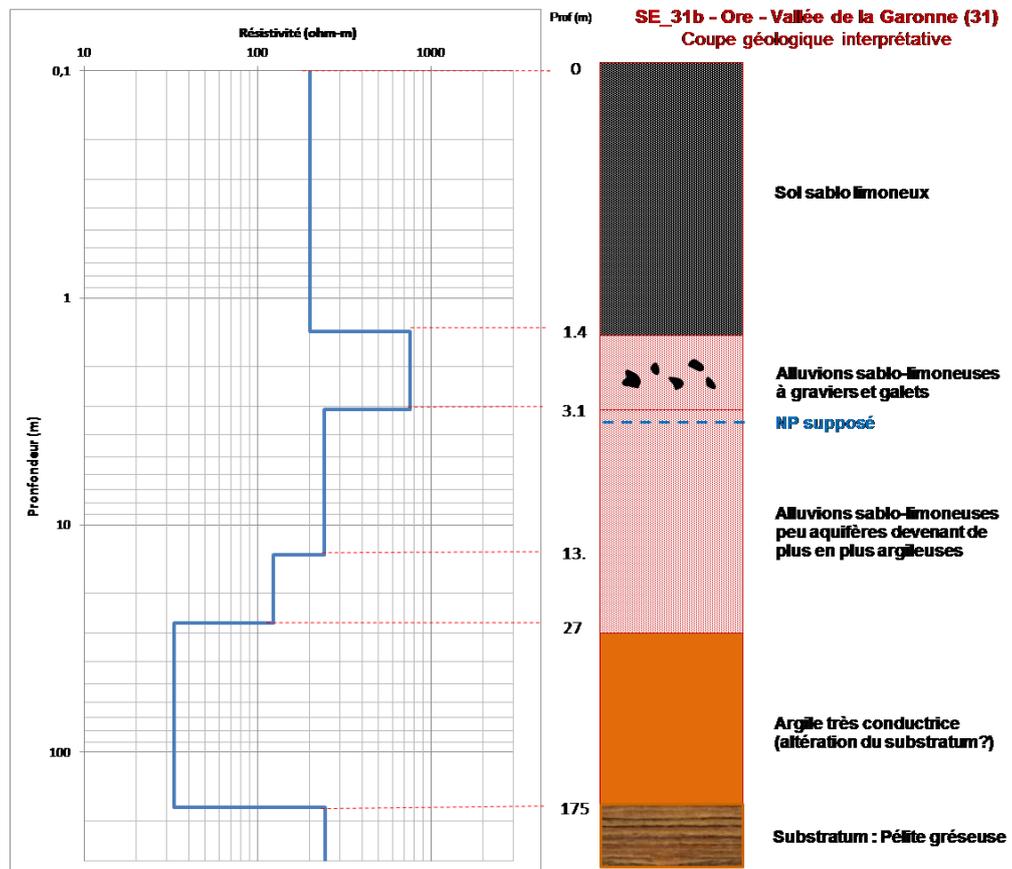
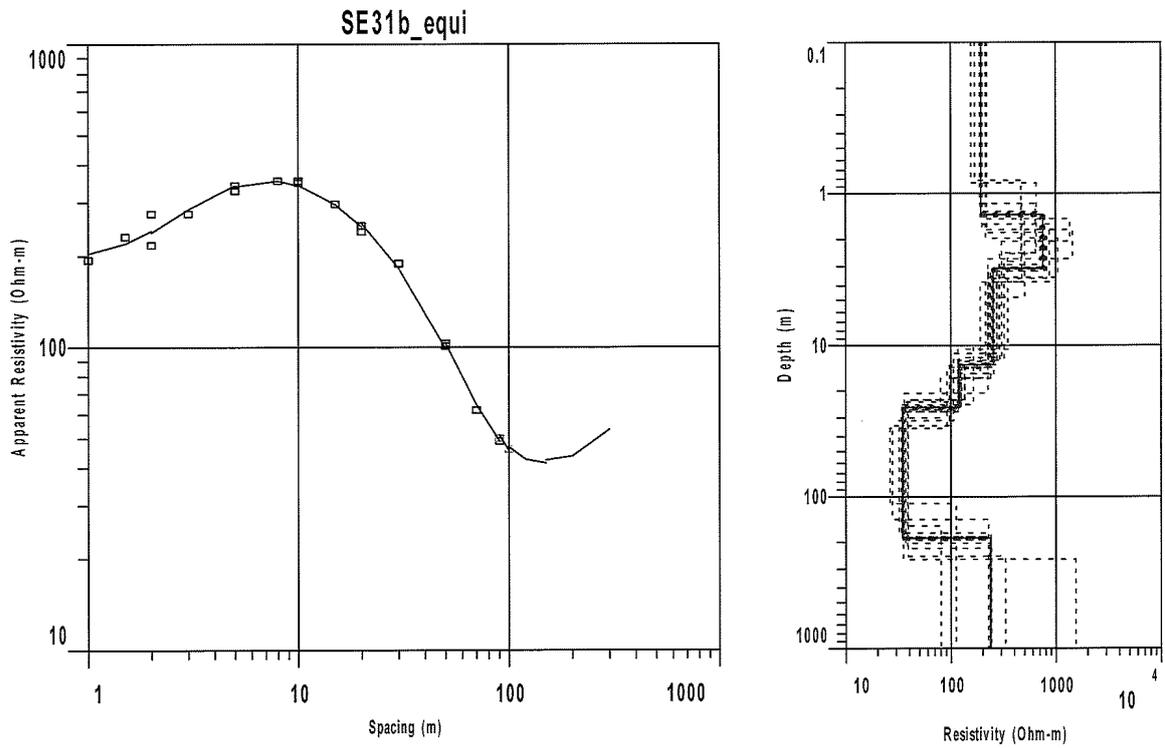
## **Annexe 3**

# **Coupes géoélectriques et géologiques interprétatives des sondages électriques réalisés dans la vallée de la Garonne**







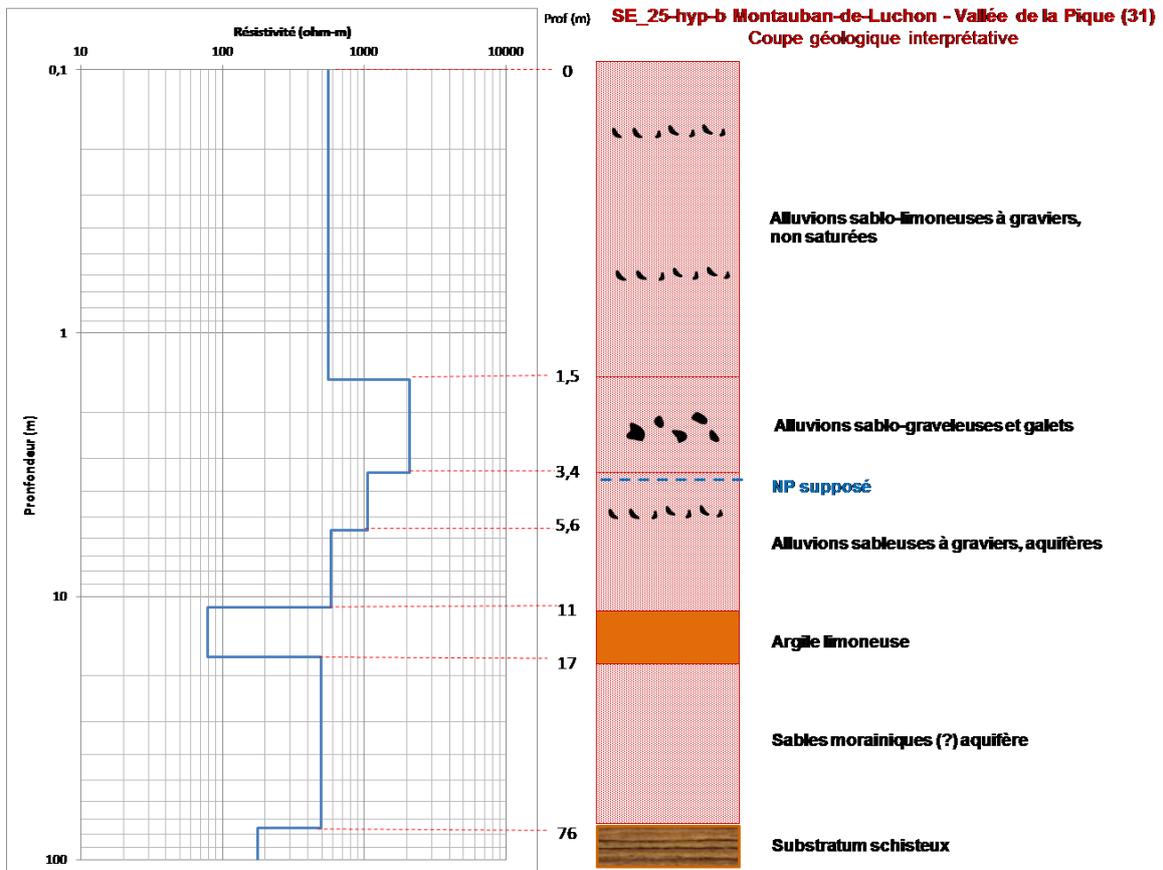
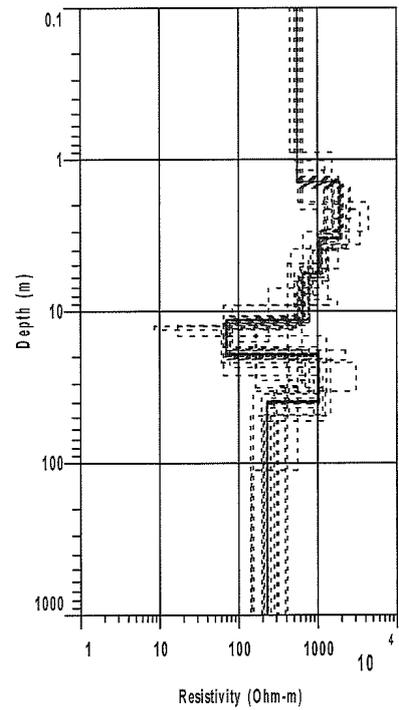
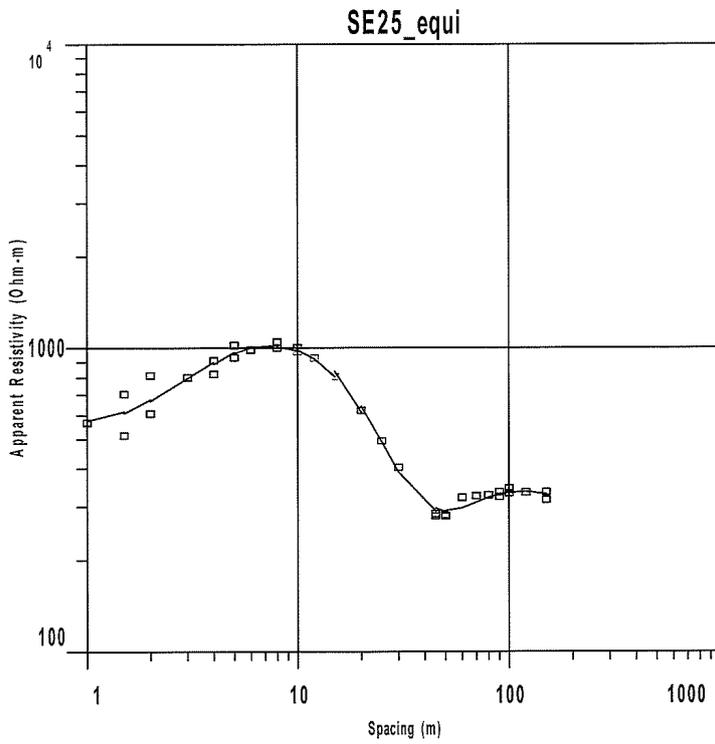




## **Annexe 4**

# **Coupes géoélectriques et géologiques interprétatives des sondages électriques réalisés dans la vallée de la Pique**



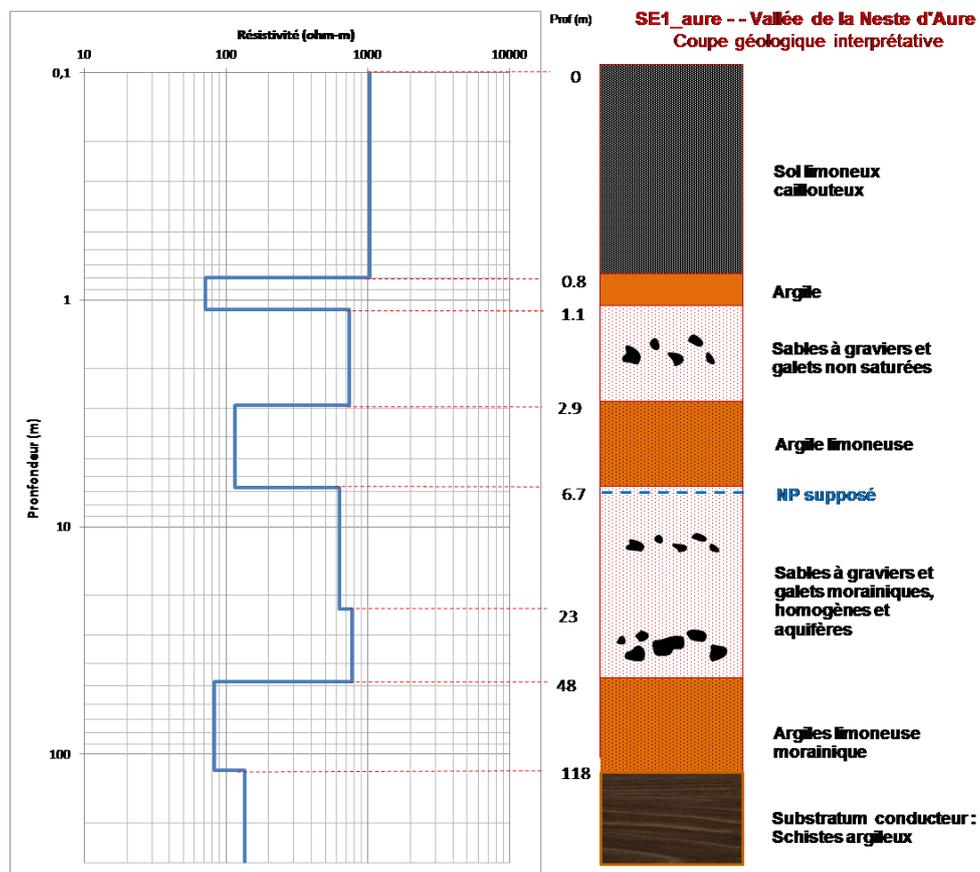
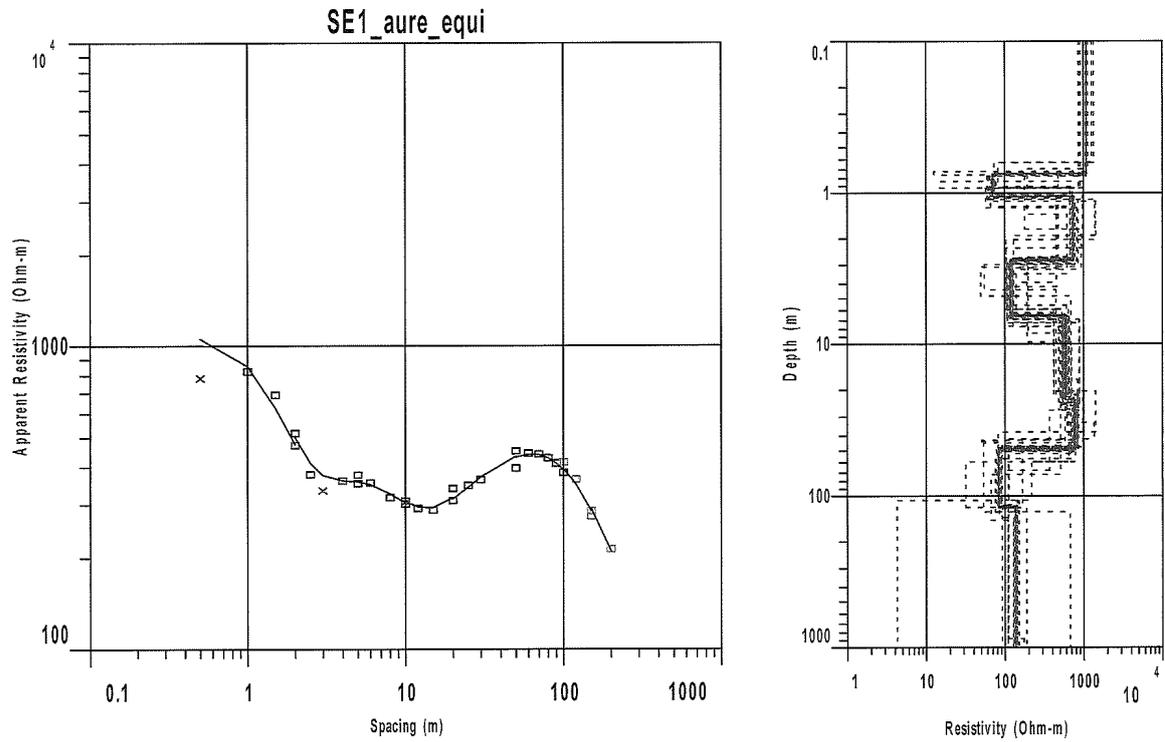


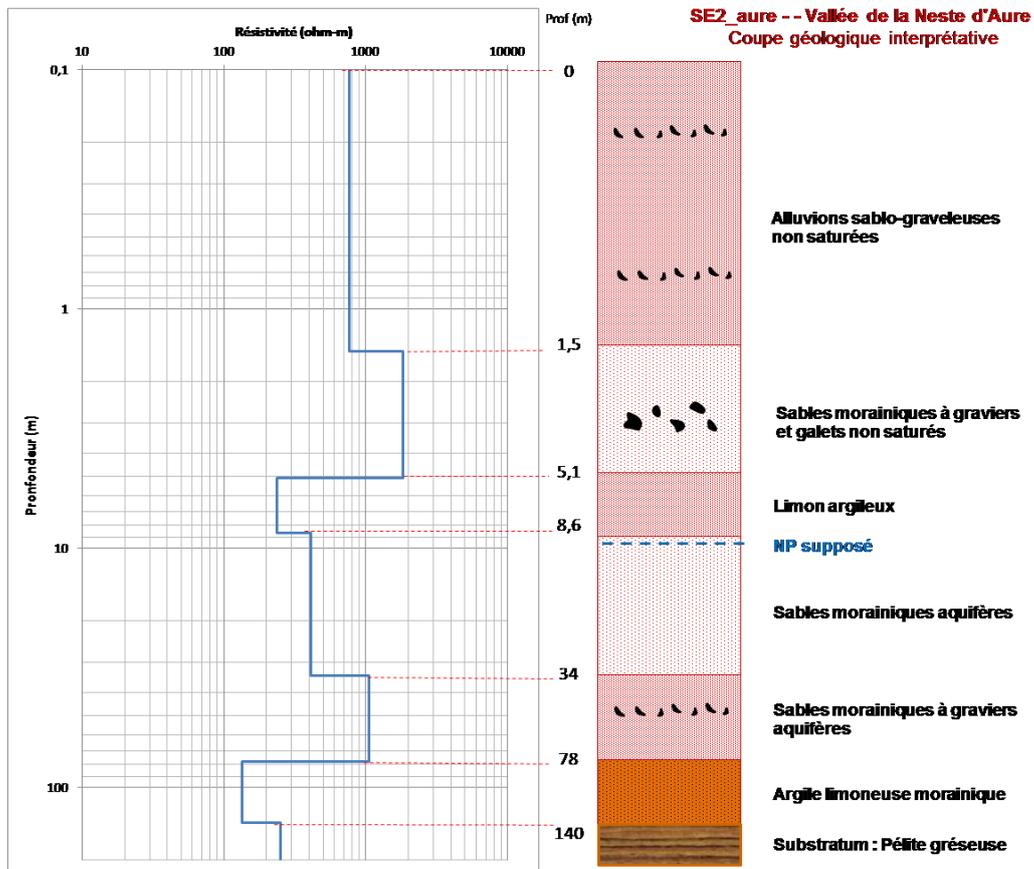
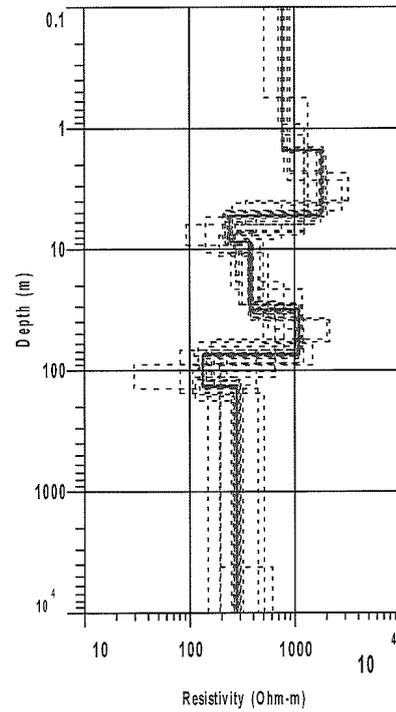
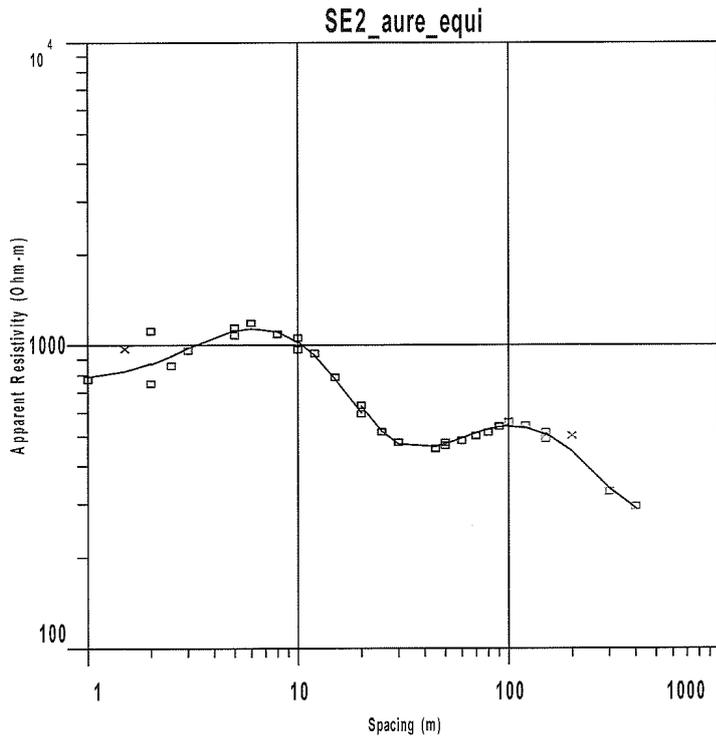


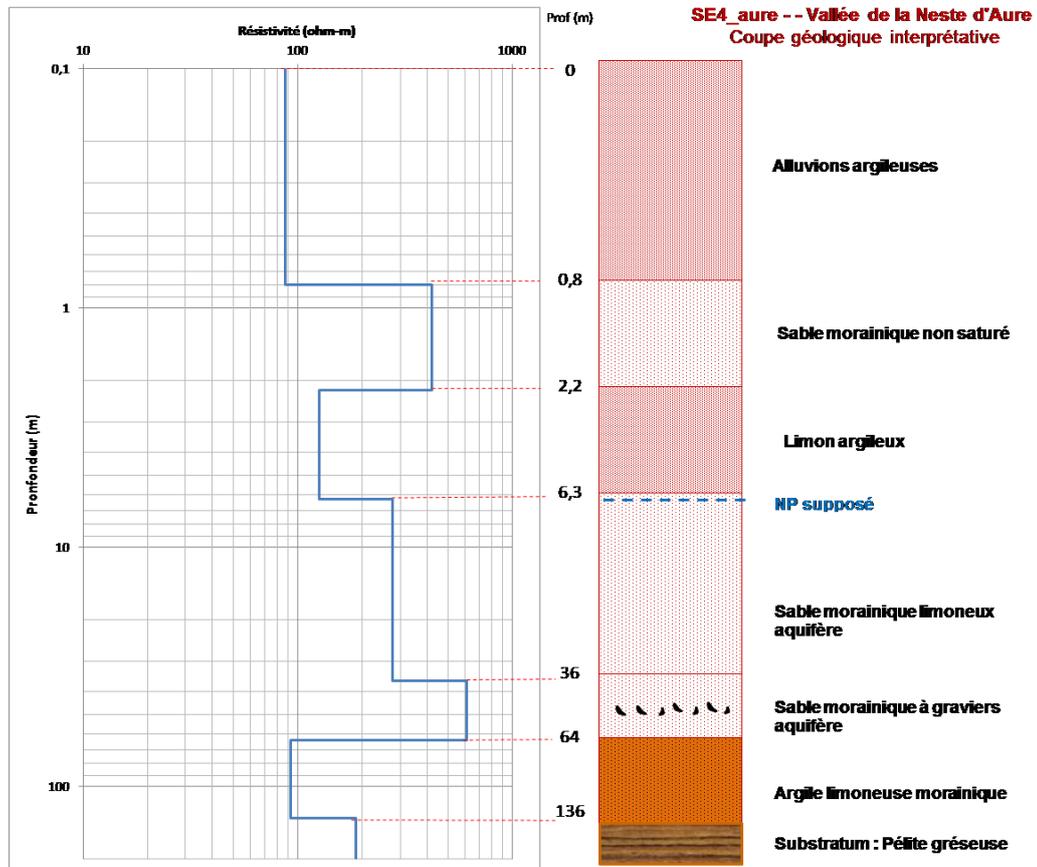
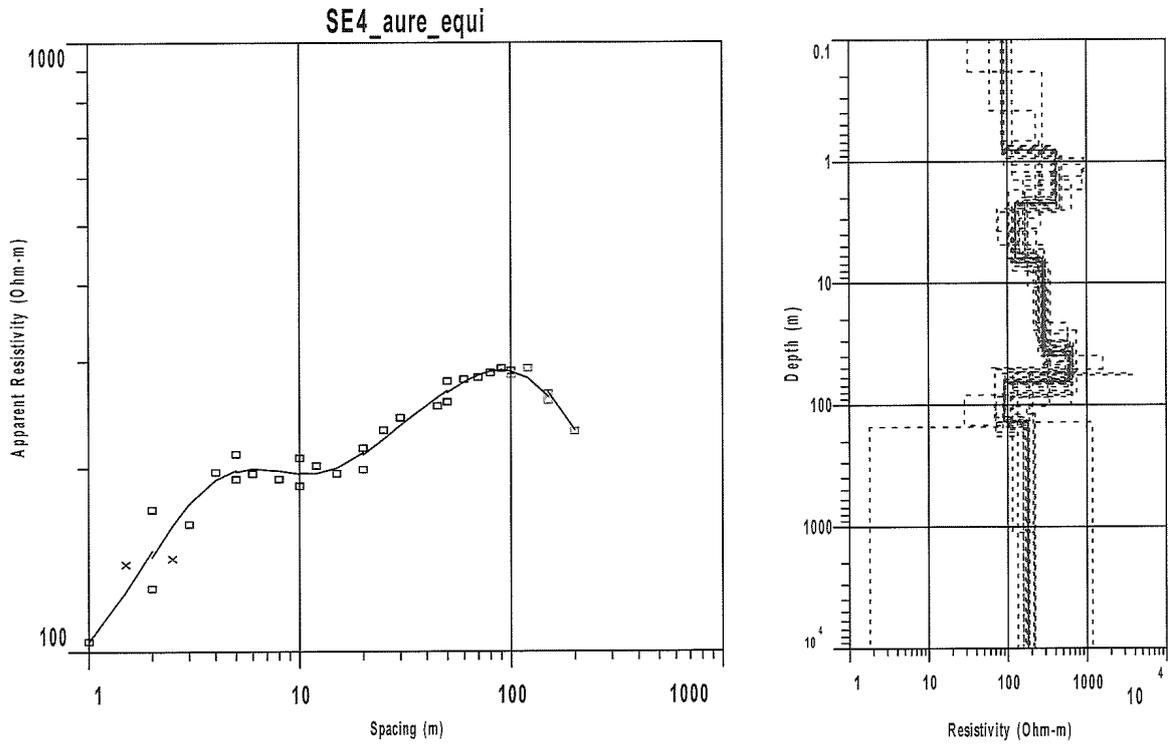
## **Annexe 5**

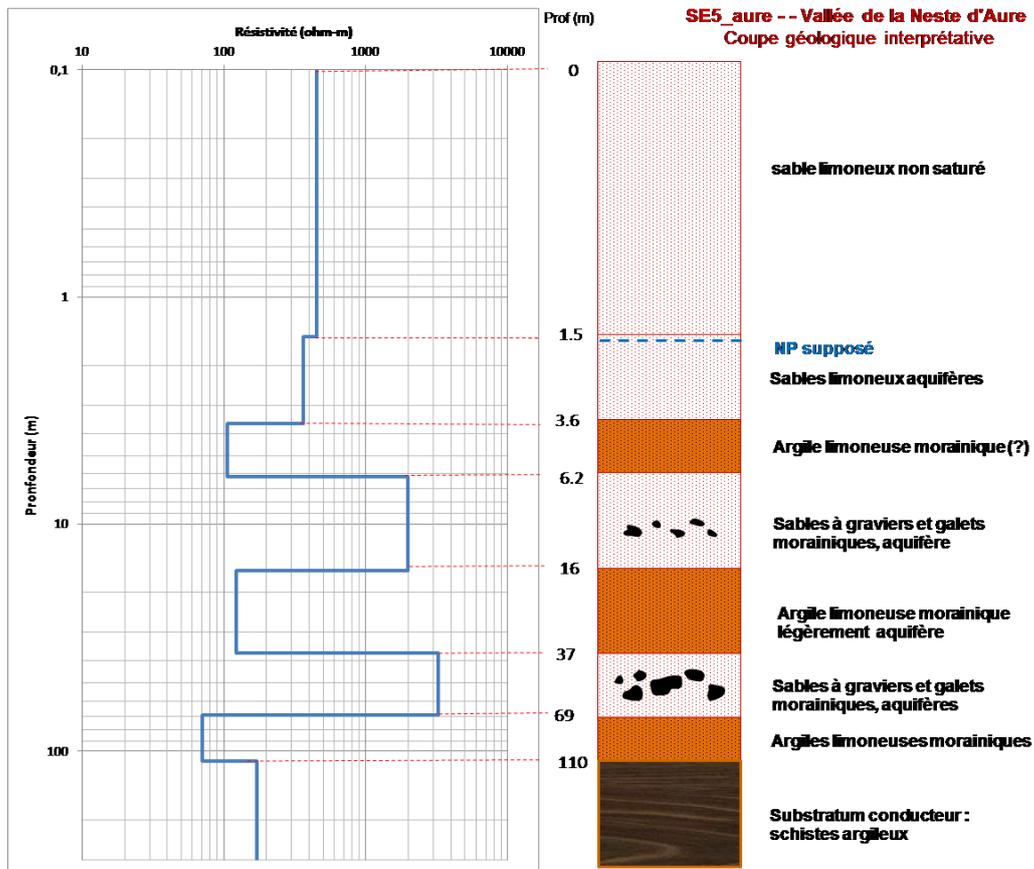
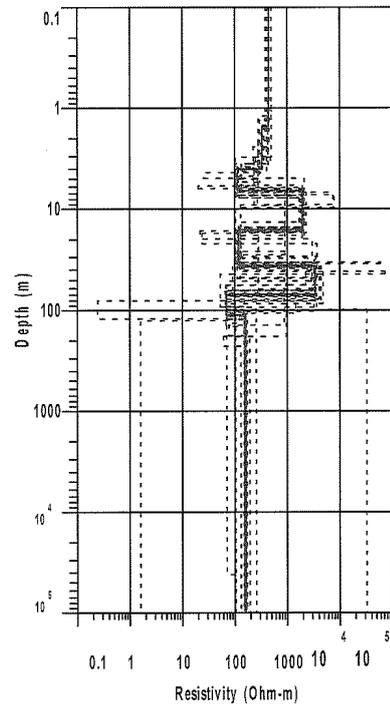
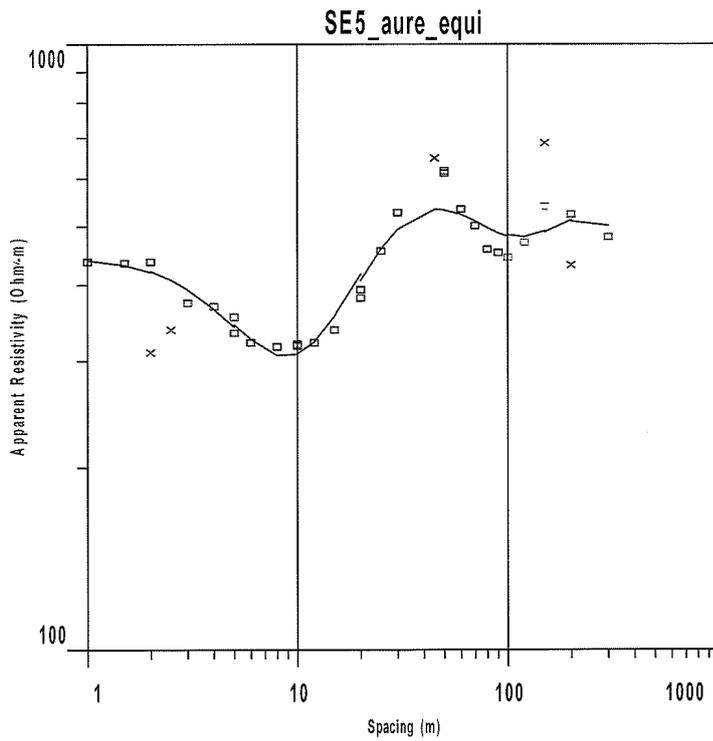
# **Coupes géoélectriques et géologiques interprétatives des sondages électriques réalisés dans la vallée de la Neste d'Aure**

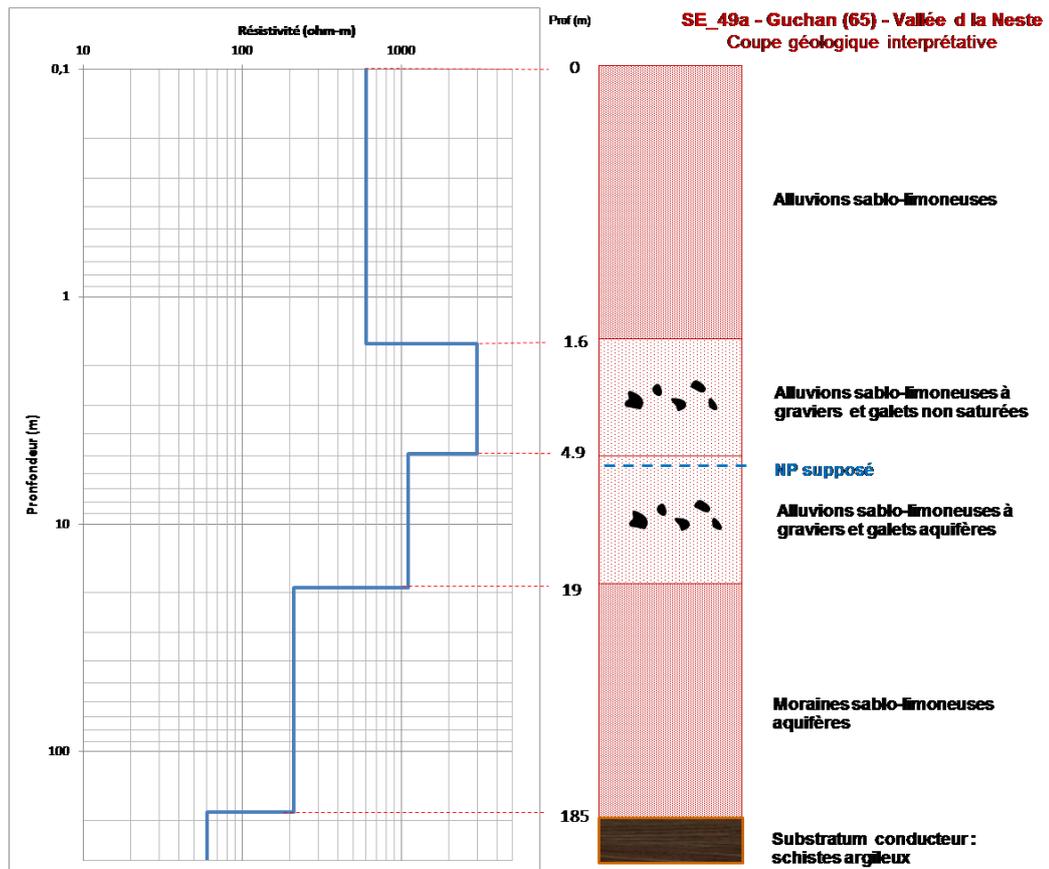
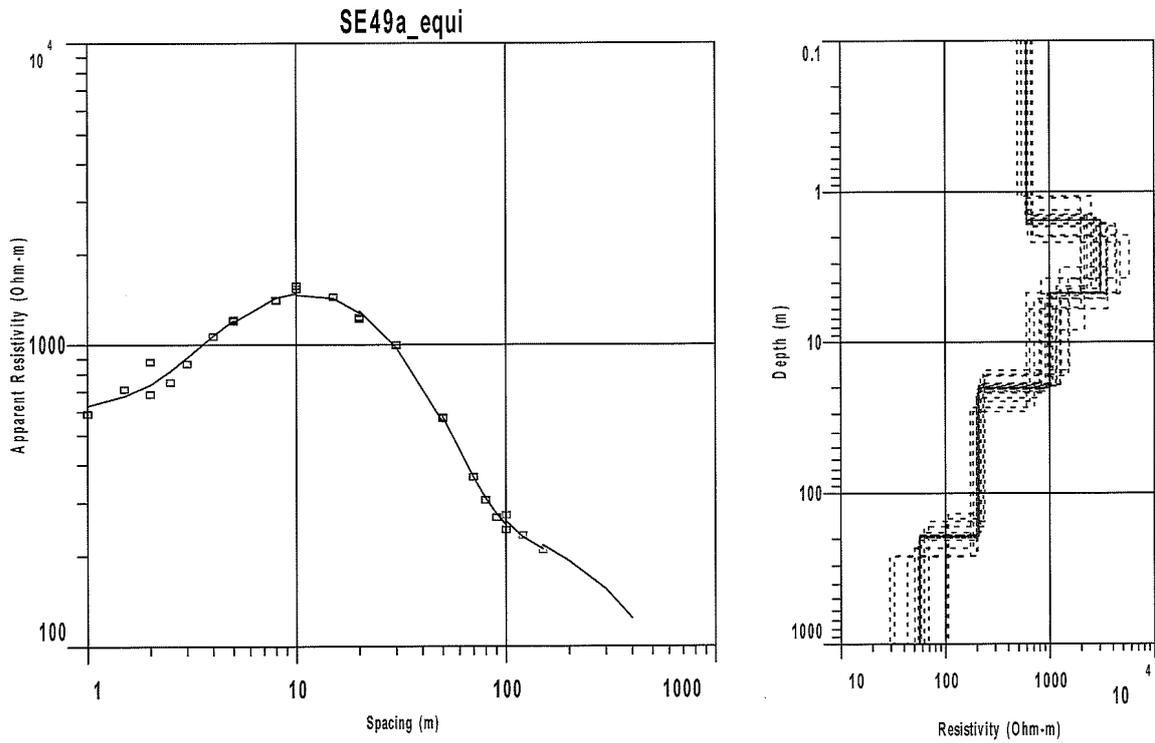


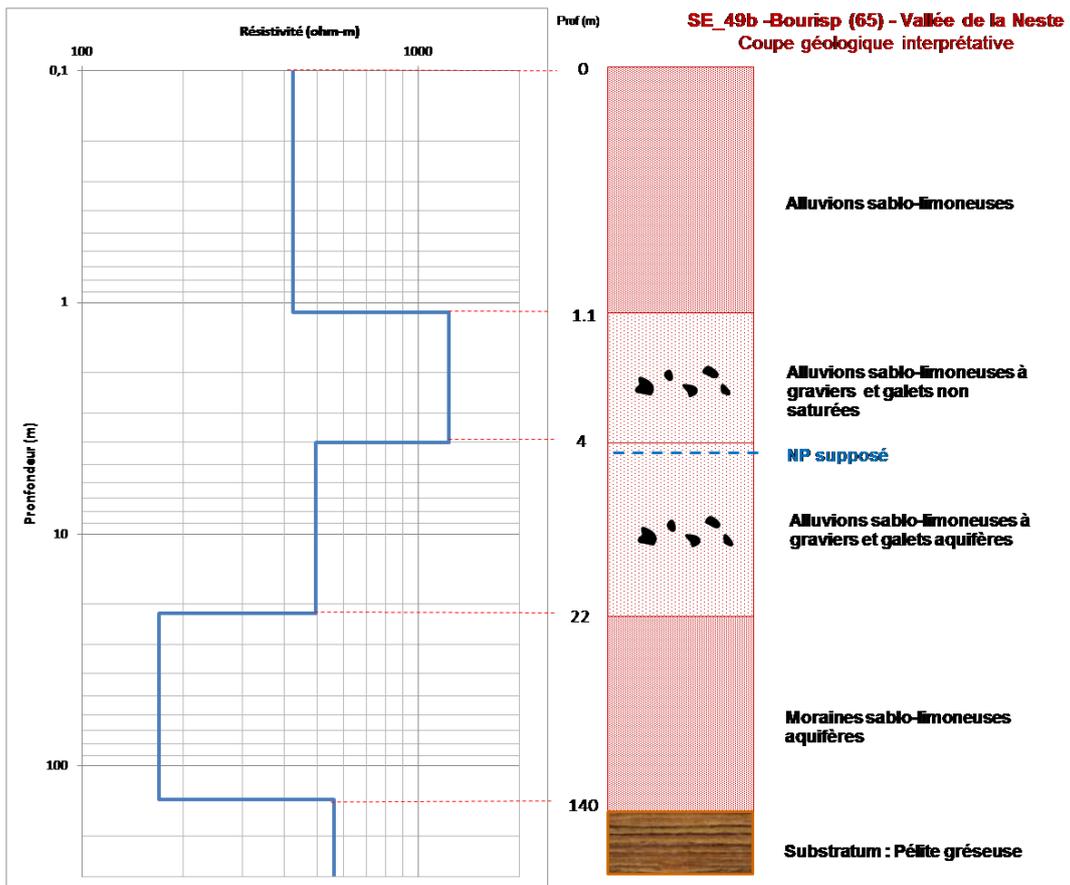
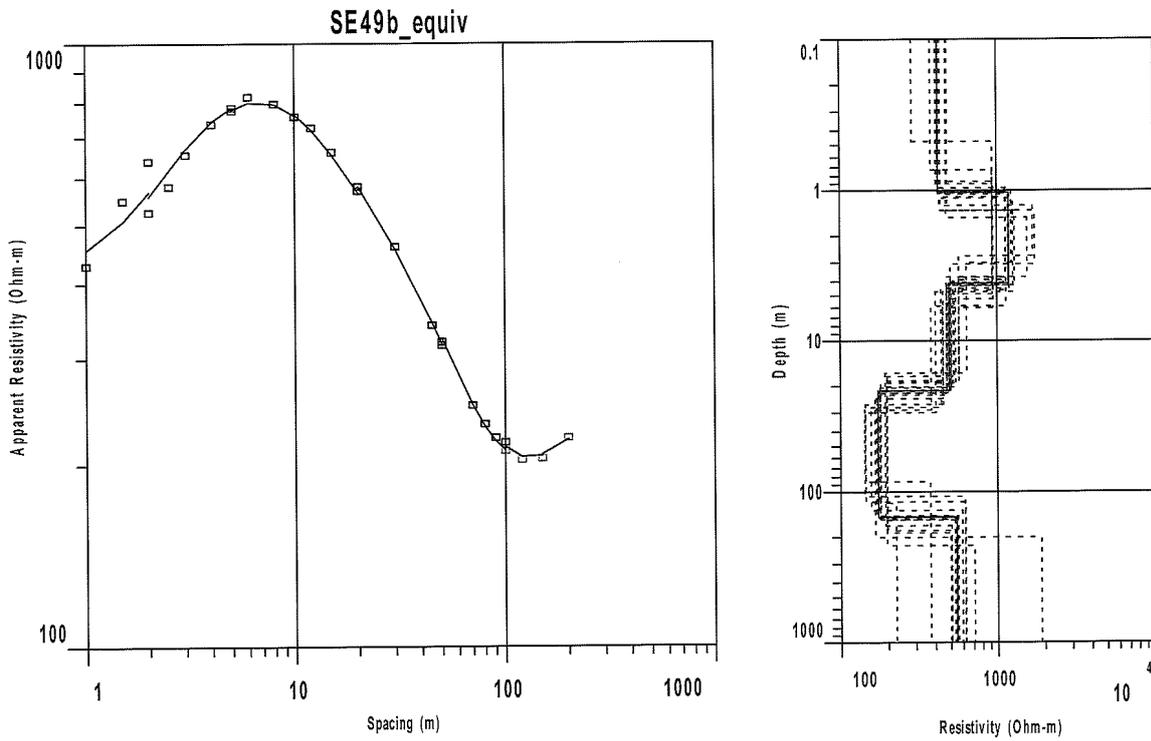


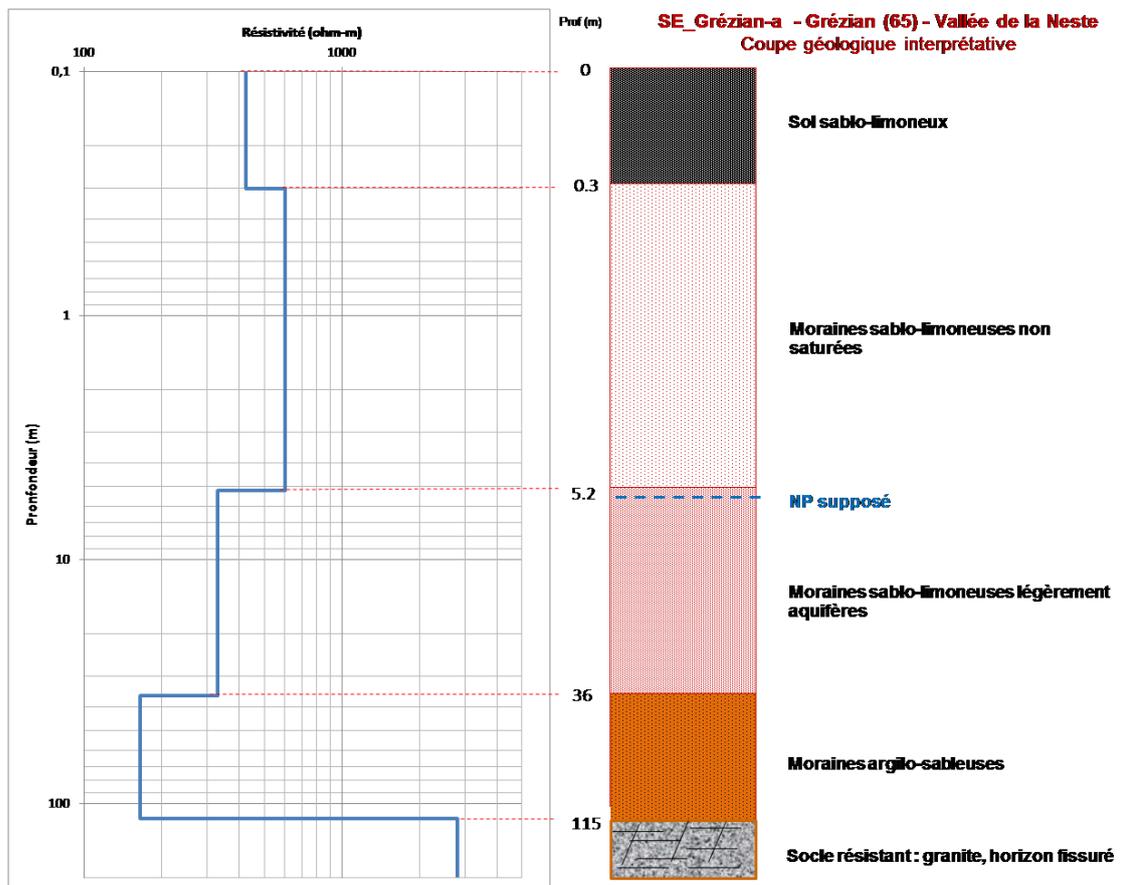
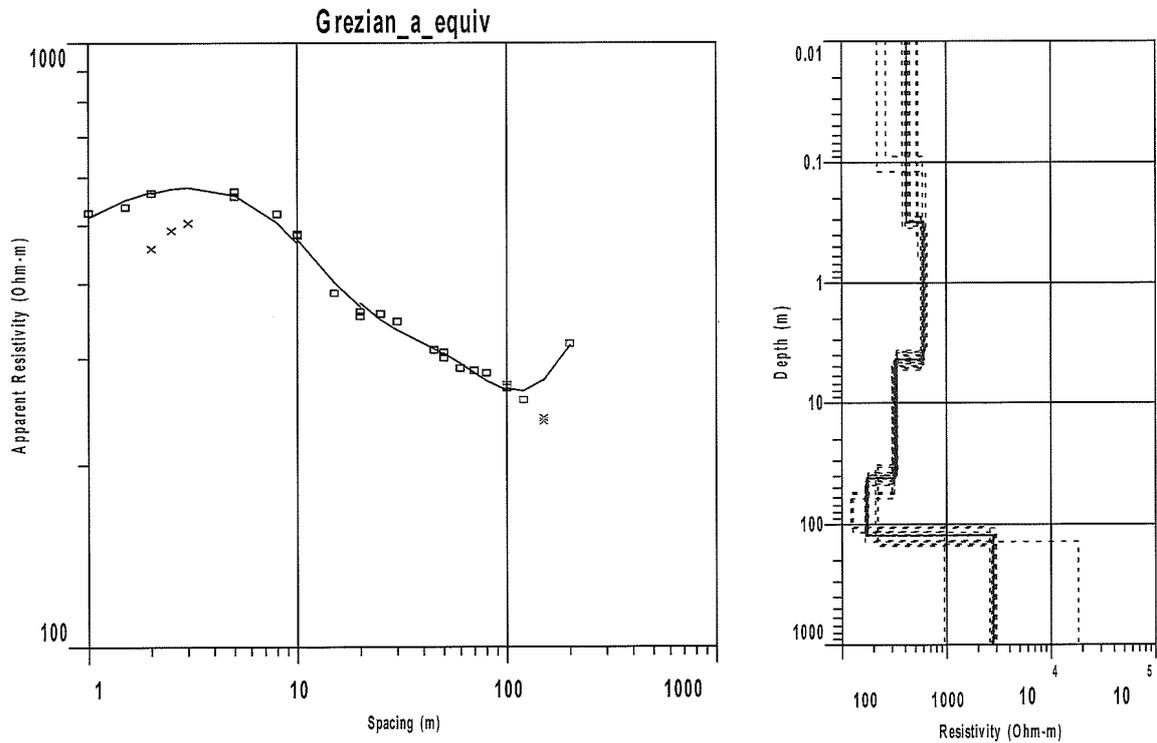


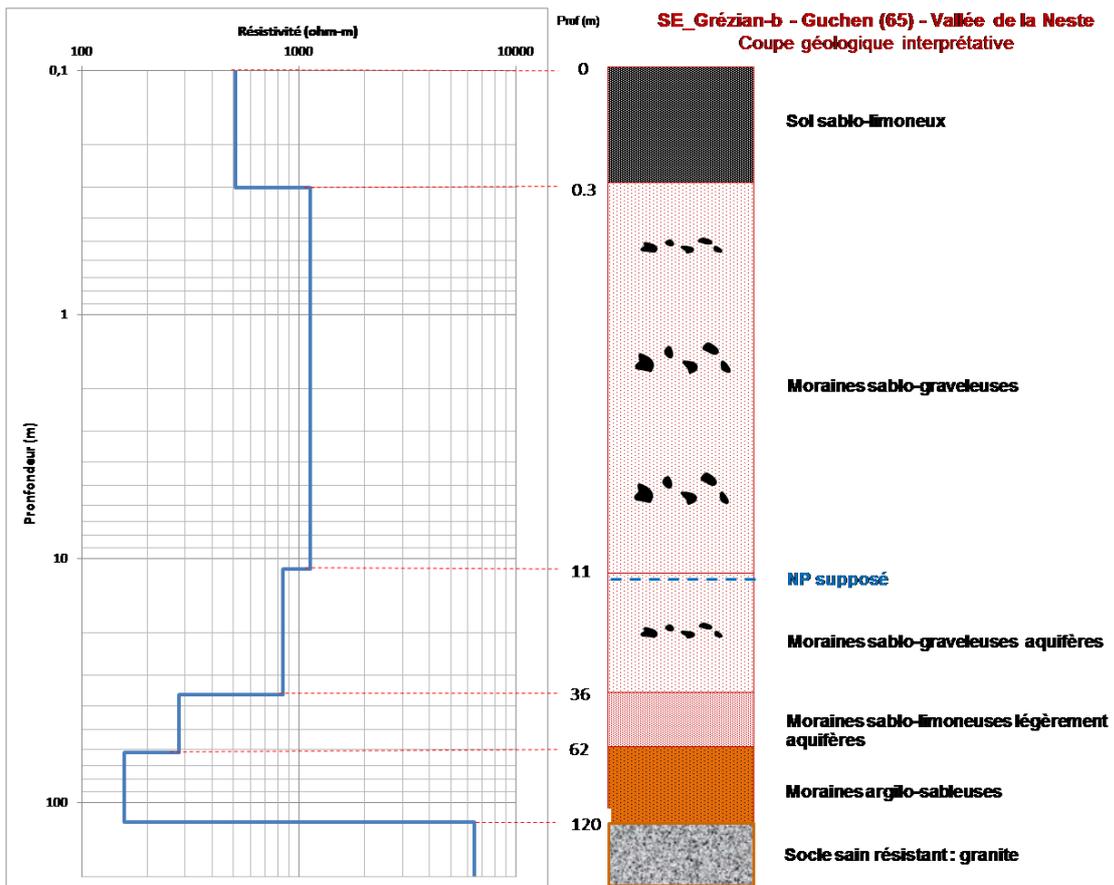
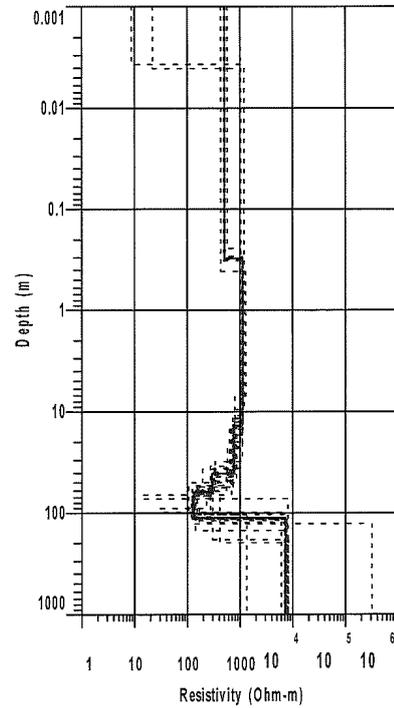
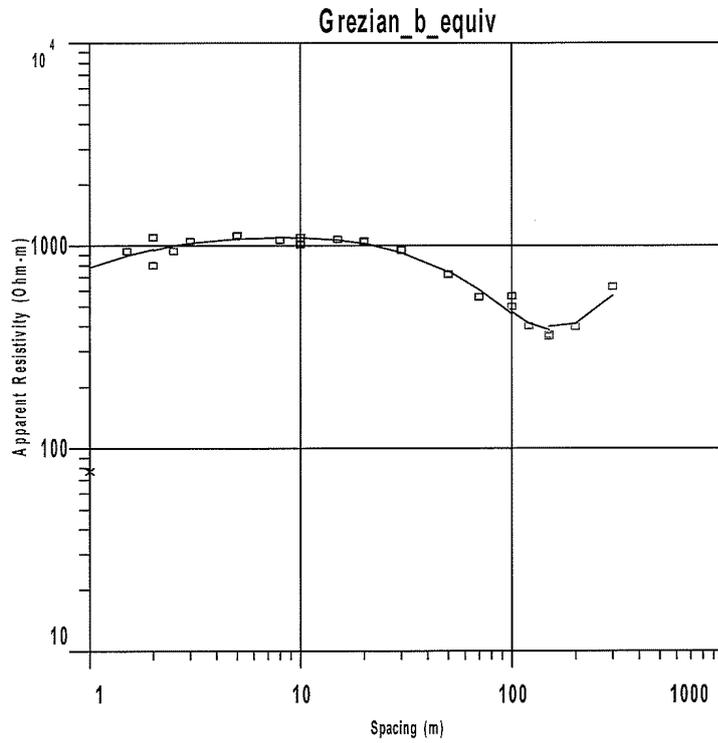








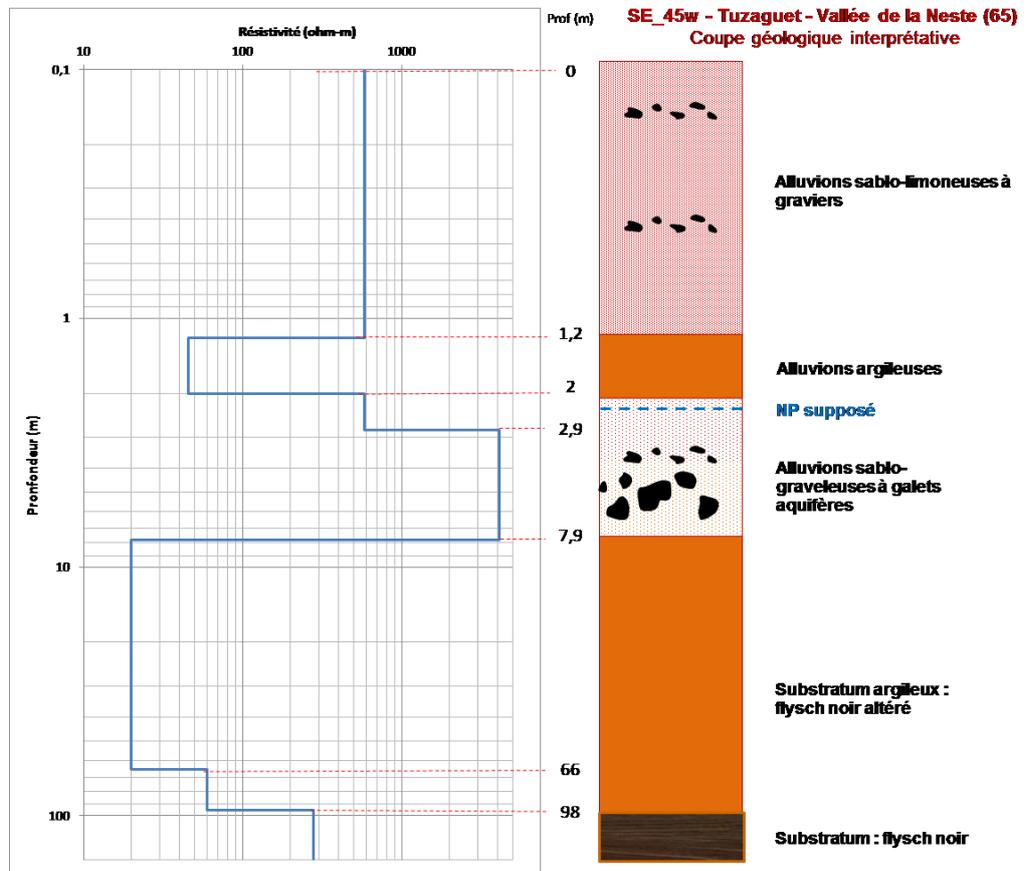
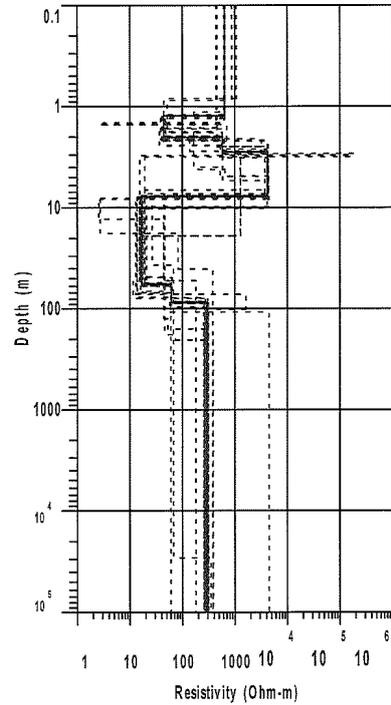
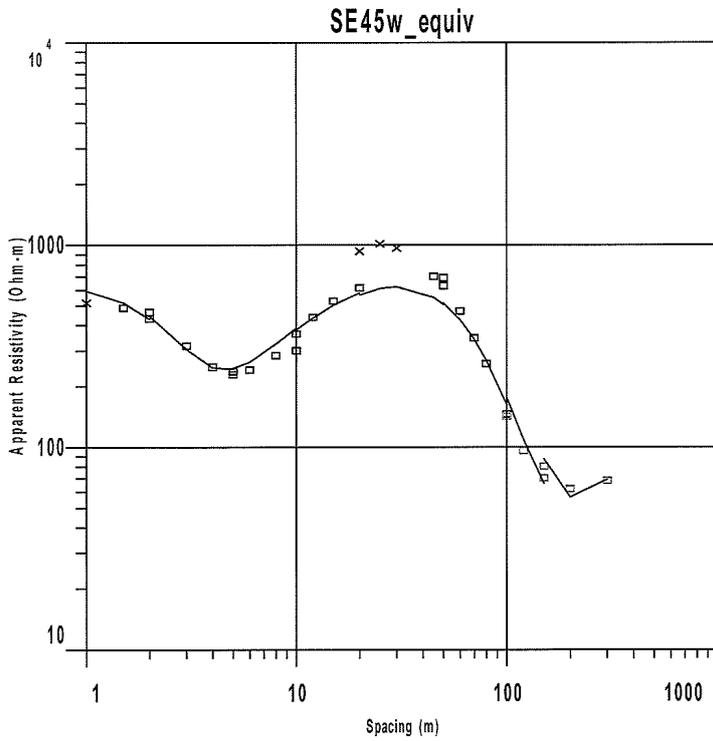


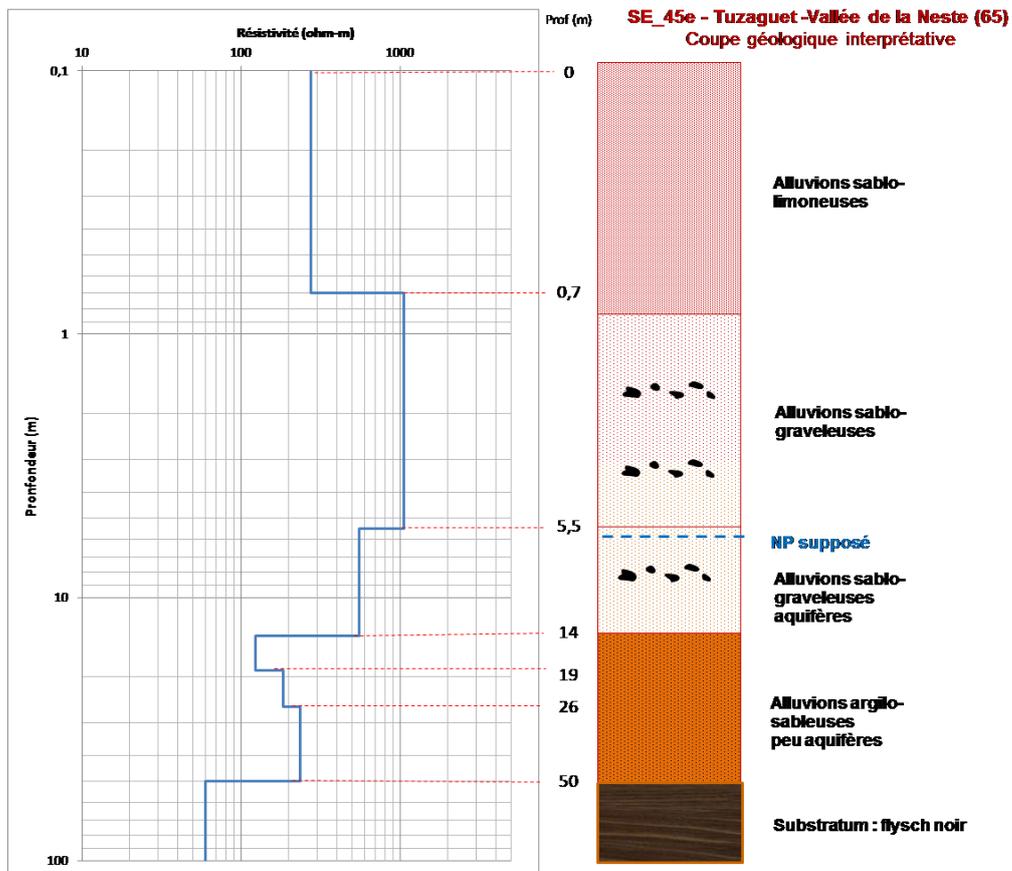
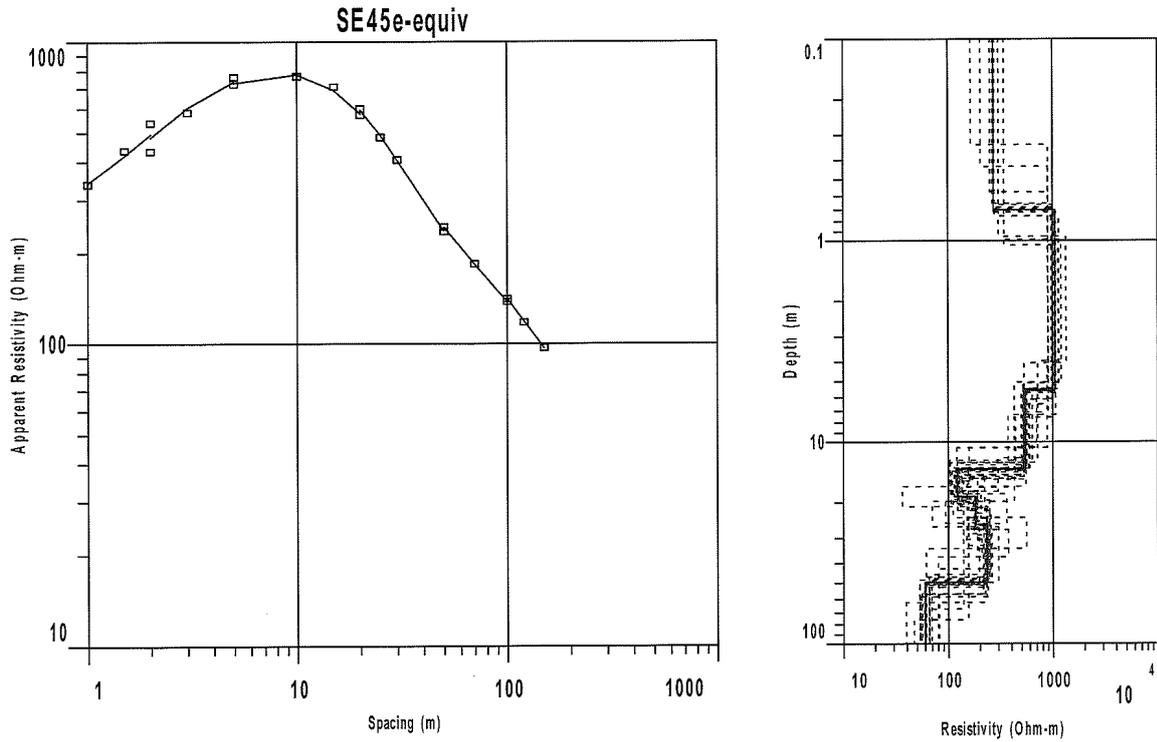


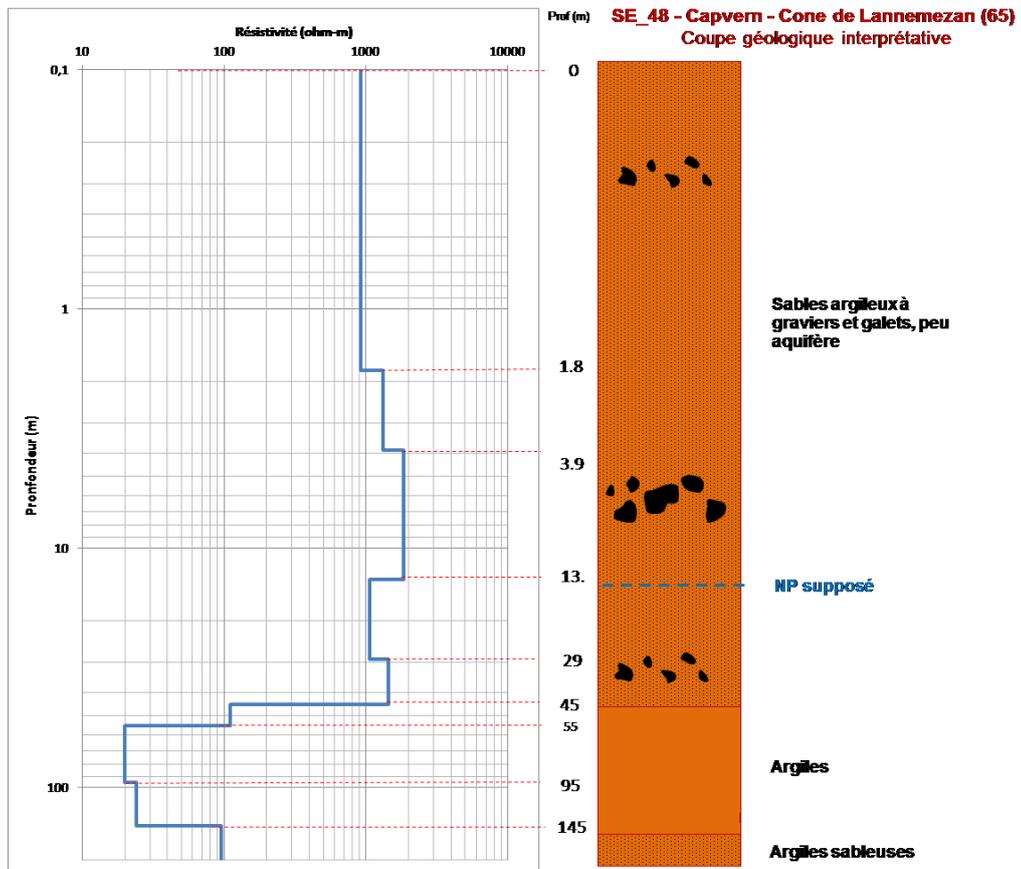
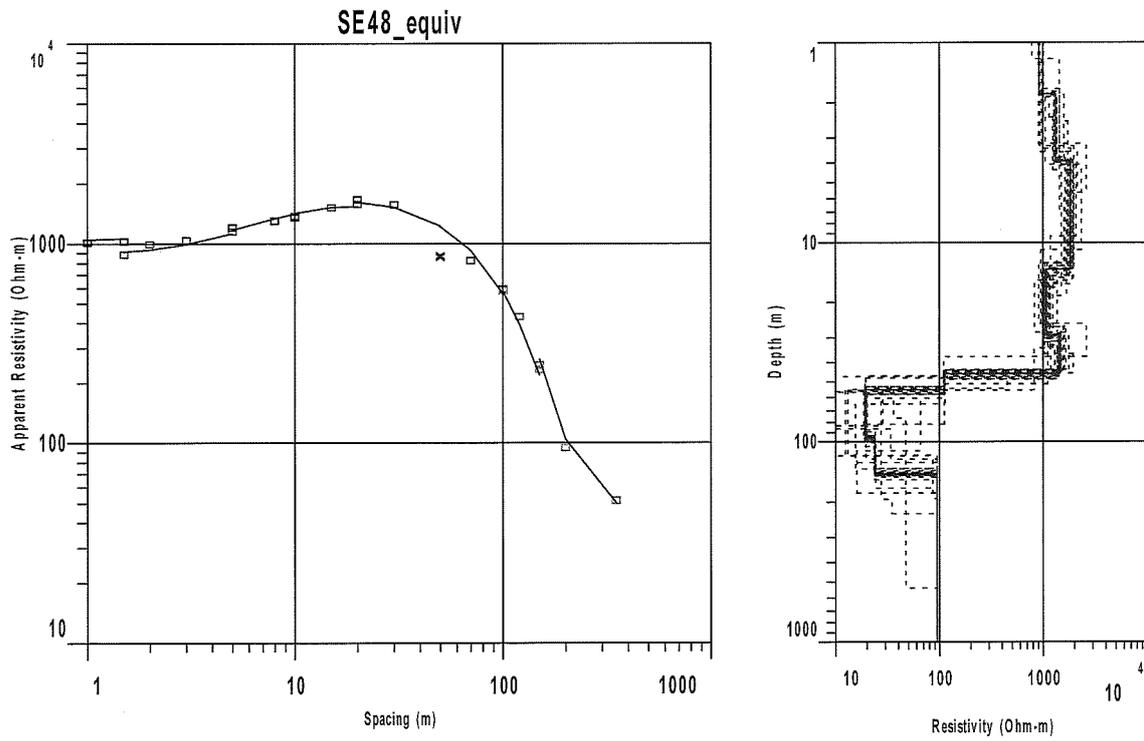
## **Annexe 6**

# **Coupes géoélectriques et géologiques interprétatives des sondages électriques réalisés dans la vallée de la Neste et le cône de Lannemezan**







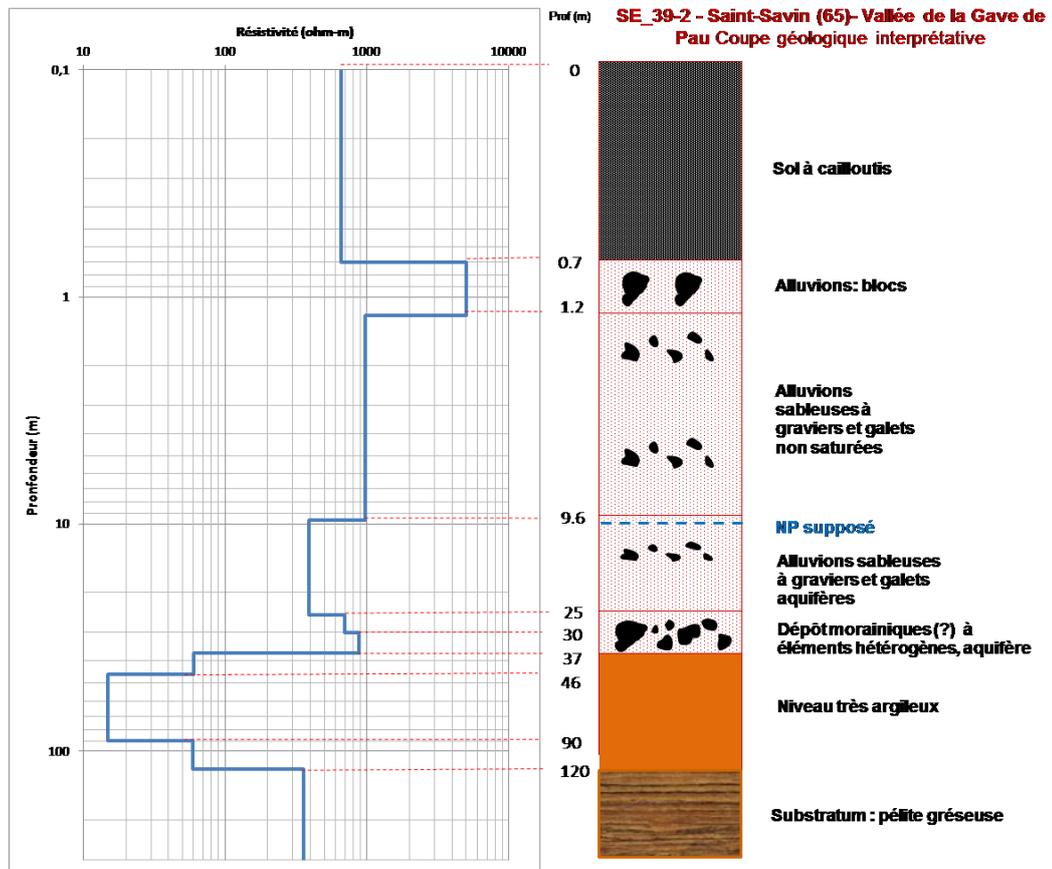
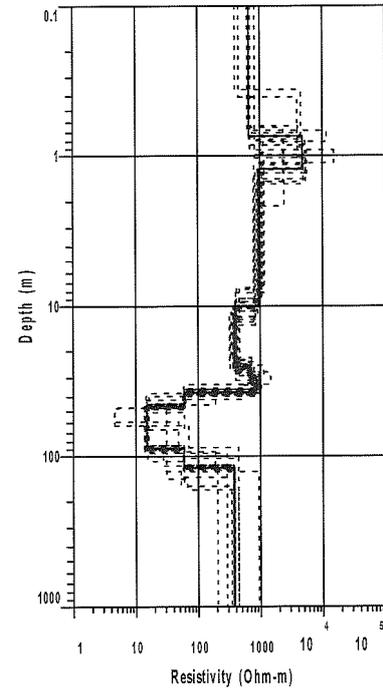
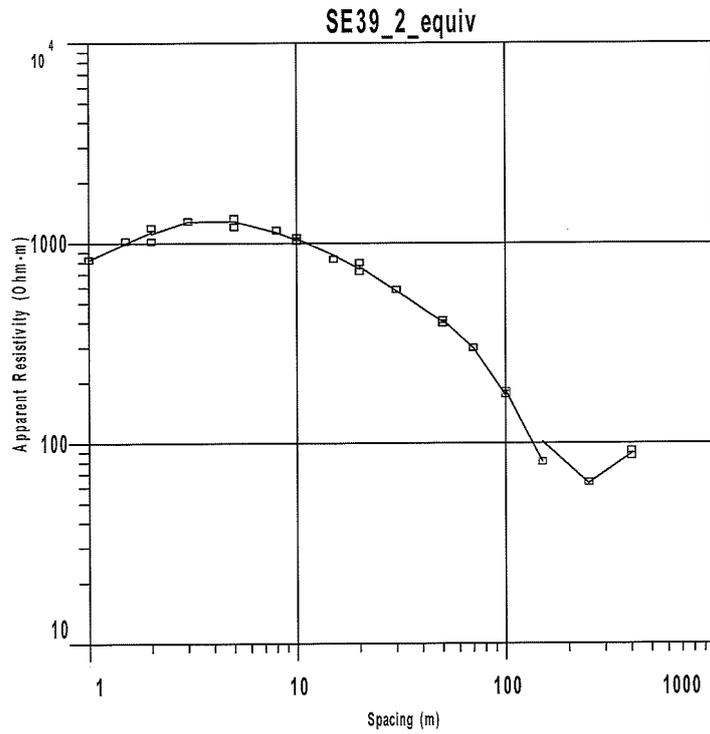


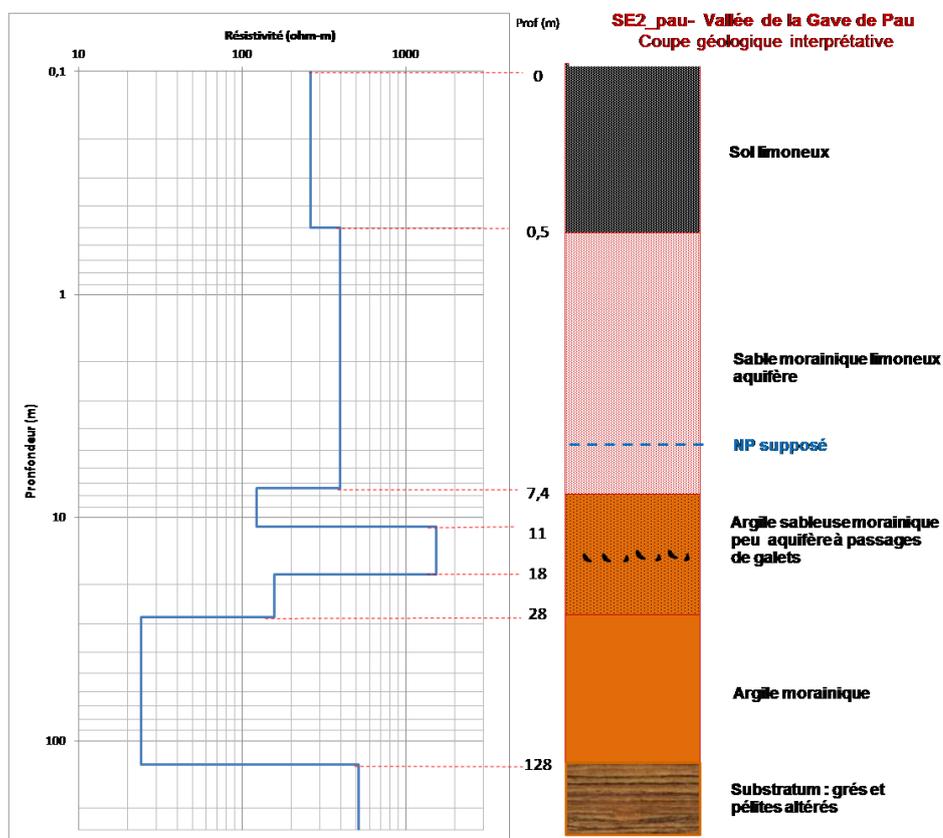
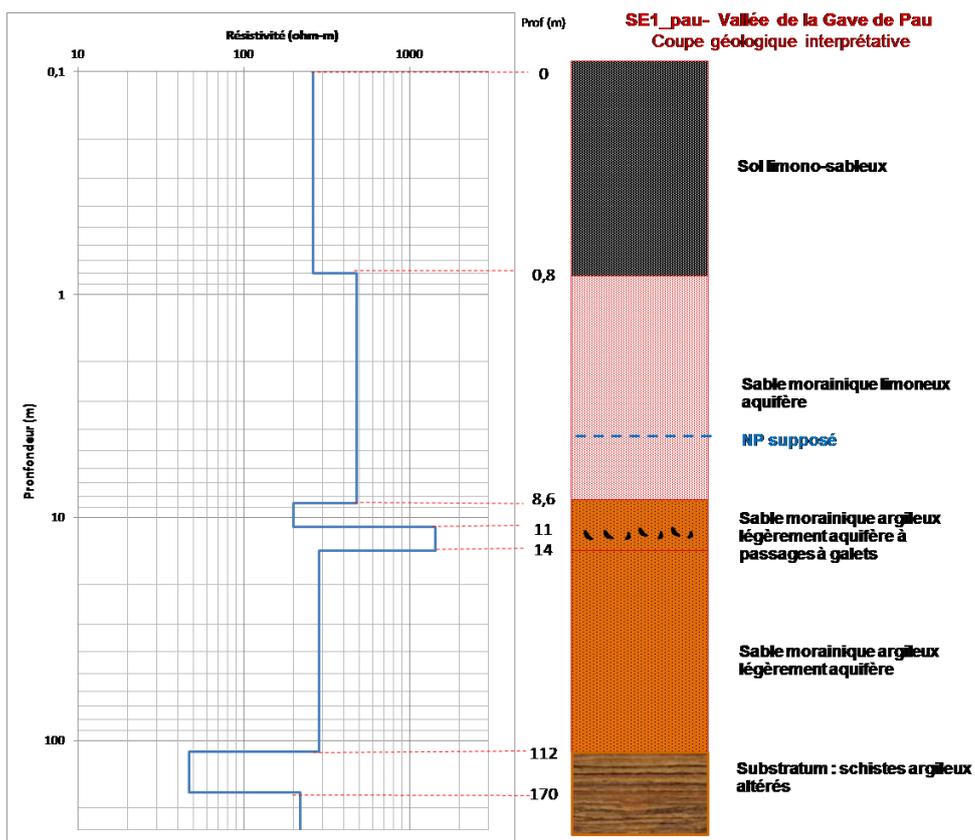


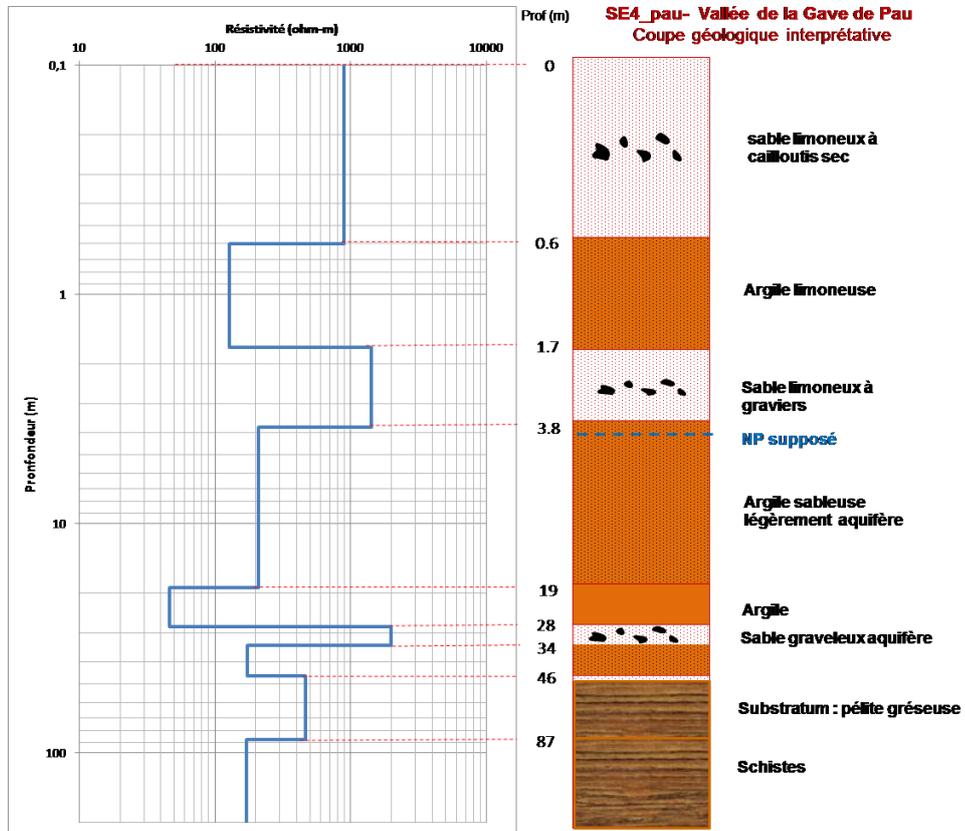
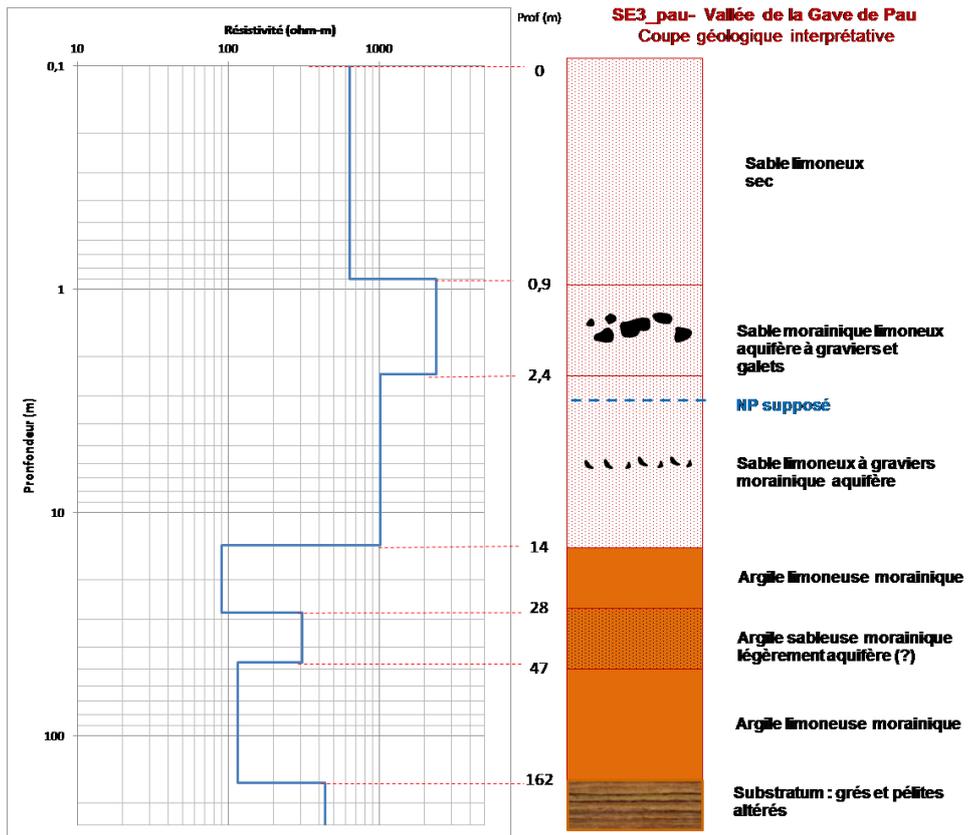
## **Annexe 7**

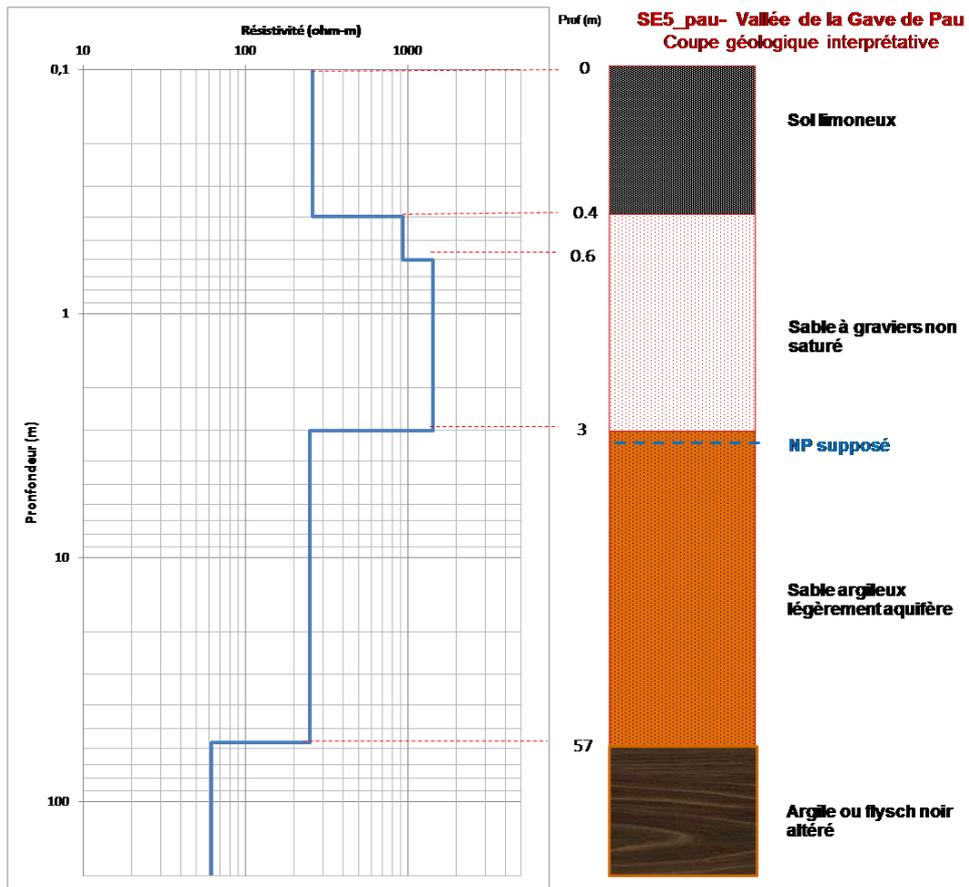
# **Coupes géoélectriques et géologiques interprétatives des sondages électriques réalisés dans la vallée du gave de Pau**











## **Annexe 8**

# **Rapport technique des résultats de prospection de gravimétrie et de sismique passive en vallée d'Aure et vallée de la Garonne**



# **Résultats de prospection géophysique dans les vallées de la Neste d'Aure et de la Garonne : estimation de l'épaisseur du remplissage sédimentaire**

-

## **Rapport Technique**

**06/11/2015**

**Bottelin, P.<sup>1</sup>; Dufrechou, G.<sup>1</sup>; Seoane, L.<sup>1</sup>; Llubes, M.<sup>1</sup>; Monod, B.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Géosciences Environnement Toulouse, UMR CNRS-IRD-Université de Toulouse, Observatoire  
Midi-Pyrénées, 14 av. E. Belin, 31400 Toulouse cedex, France;

<sup>2</sup>BRGM, direction régionale Midi-Pyrénées, 3 rue Marie Curie, 31527 Ramonville St-Agne,  
France.

## Sommaire

1. Méthodes .....	5
2. Mesures et résultats en vallée d'Aure.....	6
2.1 Contexte géologique et géotechnique .....	6
2.2 Analyse des mesures en sismique passive .....	8
2.3 Résultats et interprétation de la sismique passive .....	10
2.4 Traitements et résultats des mesures gravimétriques.....	13
3. Densification de l'étude gravimétrique de 2013 dans la vallée de la Garonne .....	18
4. Discussion – Incertitudes.....	21
5. Conclusions.....	21
6. Annexes .....	22
7. References.....	23

## Table des illustrations

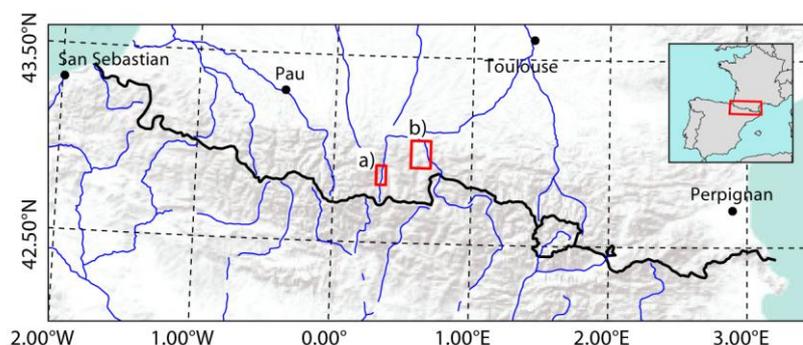
<b>Figure 1:</b> Localisation des deux zones étudiées, indiquées par un rectangle rouge. Elles sont situées dans la vallée de la Neste d'Aure (a), et dans la vallée de la Garonne, au niveau de Saint-Bertrand de Comminges (b). .....	4
<b>Figure 2:</b> a) Carte tectonique simplifiée des Pyrénées [adaptée de Vergés et al. 2002]. La Zone Sud Pyrénéenne (SPZ), La Zone Axiale Pyrénéenne (PAZ), la Zone Interne Métamorphique (IMZ) et la Zone Nord Pyrénéenne (NPZ) sont indiquées en nuances de gris. b) Carte de l'extension glaciaire maximale dans les Pyrénées (en bleu, tiré de Calvet et al. [2011]). La vallée d'Aure est indiquée par une étoile noire, celle de la Garonne par un carré noir.....	7
<b>Figure 3:</b> Carte de la zone d'étude dans la vallée d'Aure. La vallée d'Aure est délimitée par les pointillés blancs, le forage profond est marqué d'une étoile blanche. a) Les 69 mesures de sismique passive sont indiquées par des points noirs. b) Les 87 mesures de gravimétrie sont indiquées par les triangles rouges. ....	9
<b>Figure 4:</b> Exemple de courbes HVSR pour trois points de mesure. La courbe HVSR moyenne (MHVSR) est indiquée en rouge. Les courbes $MHVSR/\sigma_{HV}$ et $MHVSR*\sigma_{HV}$ sont dessinées en noir, $\sigma$ étant l'écart-type. La fréquence du pic d'HVSR ( $f_0$ ) est indiquée par la ligne gris verticale. Les limites $f_0 \pm \sigma(f_0)$ sont dessinées en traits fins gris. ....	10
<b>Figure 5:</b> (a) et (b) Carte de la fréquence de résonance $f_0$ dans la vallée de la Neste d'Aure, en échelle logarithmique et linéaire, respectivement. c) Carte de l'épaisseur de sédiments ( $H$ ) du remplissage de la vallée d'Aure. Cette épaisseur a été calculée pour une résonance 1 D (eq. 1), en prenant $V_s = 590$ m/s. Les points de mesure sont entourés en noir (jeu de données D1) ou en blanc (jeu de données D2). ....	12
<b>Figure 6:</b> (a) carte de l'anomalie gravimétrique de Bouguer simple du secteur de Saint-Lary-Arreau ; (b) carte de l'anomalie de Bouguer complète, de la même zone que (a). Les points blancs représentent la position des stations gravimétriques utilisées pour réaliser les cartes. ....	14
<b>Figure 7:</b> (a) Carte de la composante régionale de l'anomalie de Bouguer complète de la vallée d'Aure entre Saint-Lary et Arreau ; (b) carte de composante résiduelle de l'anomalie de Bouguer complète de la vallée d'Aure entre Saint-Lary et Arreau. Le triangle noir correspond au forage ayant atteint le substratum. ....	15
<b>Figure 8:</b> Epaisseur du remplissage sédimentaire dans la vallée de la Neste d'Aure, estimée à partir de la campagne gravimétrique. Le contraste de densité entre les sédiments et le substratum est fixé respectivement à 0.2 (a), 0.4 (b) et 0.6 (c) .....	17
<b>Figure 9:</b> Carte de la zone d'étude dans la vallée de la Garonne. La vallée est délimitée par les pointillés blancs. Les 25 mesures de gravimétrie sont indiquées par les triangles rouges. Les points gravimétriques du BGI sont indiqués par les triangles gris. ....	18
<b>Figure 10:</b> Carte de l'anomalie gravimétrique de Bouguer complète dans la vallée de la Garonne. Les triangles noirs correspondent aux stations utilisées pour réaliser la carte de l'anomalie de Bouguer complète. Les triangles blancs correspondent aux stations présentant des valeurs gravimétriques erronées. ....	19
<b>Figure 11:</b> Epaisseurs sédimentaires dans la vallée de la Garonne, estimées à partir des données gravimétriques des campagnes de 2013 et de 2015. Le calcul a été fait pour trois contrastes de densité différents. ....	20

Dans le cadre du projet POTAPYR, nous avons travaillé sur deux vallées pyrénéennes avec pour but d'estimer leur remplissage sédimentaire. Nous avons sélectionné une zone autour de la Neste d'Aure (Hautes-Pyrénées, 65, voir Fig. 1) dans la partie située entre Saint-Lary Soulan, en amont, jusqu'au sud d'Arreau. Il s'agit là du secteur sur lequel nous avons passé le plus de temps, car aucun travaux n'avaient été faits, mise à part des sondages électriques réalisés par le BRGM.

La seconde étude consiste en une extension/densification des mesures réalisées par Joseph Martinod, Stéphane Perrouy et Bérangé Moussirou Moussirou dans le cadre d'un stage de Master 2, soutenu par le projet POTAPYR au printemps 2013 [Perrouy et al., 2015]. La zone étudiée s'étend des communes de Seilhan-Labroquère, au nord, jusqu'au confluent de la Pique et de la Garonne à Marignac, au sud (Fig. 1).

Ce travail en commun avec le BRGM avait un double objectif. Tout d'abord de répondre à la question des réserves potentielles en eau, les sédiments de rivière étant souvent de bons aquifères et cette problématique intéresse le BRGM. De notre côté, nous en avons profité pour tenter une approche méthodologique innovante, associant les mesures classiques de gravimétrie à une étude du bruit de fond sismique, jamais encore développée dans les Pyrénées. La vallée de Saint-Lary a été choisie pour mener à bien ce double objectif. Les premiers résultats de cette collaboration BRGM – GET sont d'ores et déjà valorisables par une publication qui sera finalisée au cours du premier trimestre 2016.

Trois fichiers informatiques sont fournis pour accompagner ce rapport. Ils contiennent les mesures et les résultats d'interprétation des campagnes de sismique passive et de gravimétrie relative dans la vallée d'Aure – GRAVI\_POTAPYR\_STLARY et SISMO\_POTAPYR\_STLARY – ainsi que la campagne de gravimétrie relative dans la vallée de la Garonne – fichier GRAVI\_POTAPYR\_STBERTRAND. Une description du contenu de ces fichiers est donnée en annexe.



**Figure 1:** Localisation des deux zones étudiées, indiquées par un rectangle rouge. Elles sont situées dans la vallée de la Neste d'Aure (a), et dans la vallée de la Garonne, au niveau de Saint-Bertrand de Comminges (b).

# 1. Méthodes

## 1.1 Gravimétrie relative

La gravimétrie est la méthode d'étude la plus classique utilisée généralement dans ce genre de contexte. Les mesures sont rapides – sur un site calme, 10 à 15 minutes d'acquisition suffisent pour obtenir la précision nécessaire – et elles sont faciles à mettre en œuvre sur la plupart des terrains. Elles doivent impérativement être couplées à des mesures de positionnement. Dans notre cas, l'erreur sur la position ne devrait pas dépasser 50cm si l'on veut un résultat acceptable pour l'épaisseur sédimentaire. Lors de l'interprétation des données, l'incertitude sur la densité des roches environnantes, ainsi que sur le contraste de densité entre les sédiments et l'encaissant, sera prédominante pour la qualité des résultats obtenus. Il faudra caler le mieux possible ces deux paramètres. Nous veillerons à utiliser dans cette étude toutes les informations mises à notre disposition.

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un gravimètre Scintrex CG5 appartenant à l'IRD. Le protocole d'acquisition consistait à faire 10 séries de 120 mesures à chaque station qui sont ensuite moyennées. L'effet de la marée terrestre est automatiquement retiré lors de l'acquisition par le gravimètre, et nous avons vérifié la validité de ces corrections. Les effets de charge océanique et de pression atmosphérique ne sont pas pris en compte car ils sont négligeables par rapport aux effets recherchés. La dérive instrumentale a été corrigée au moment du traitement des données, en retirant une tendance linéaire. Cette tendance a été calculée grâce aux réoccupations régulières des stations lors des levés et d'une station de base que nous avons implantée à Saubissan (commune de Guchan), ce qui diminue le nombre total de nouvelles stations réalisées. Des mesures de gravimétrie absolue ont été réalisées sur la station gravimétrique située à Vignec (juste à côté de Saint-Lary, point référencé par l'IGN : <http://geodesie.ign.fr/fiches/pdf/6538808.pdf>). Nous avons utilisé cette valeur pour caler les variations spatiales de nos mesures relatives faites par le gravimètre CG5.

Le positionnement des stations est assuré par Global Navigation Satellite System (GNSS). Dans ce contexte de vallée, plus ou moins encaissé, il a fallu augmenter le temps d'acquisition afin de garantir une précision suffisante. Une base fixe a été installée dans chacun des deux secteurs étudiés – Neste d'Aure et Garonne – sans pouvoir toutefois garantir partout la visibilité avec le récepteur mobile, localisé à l'emplacement du gravimètre. La montagne crée un masque important autour de l'antenne. Par précaution, nous sommes restés 30 minutes sur chaque station, même si cela devait nous ralentir. Nous avons privilégié la qualité du positionnement plutôt que risquer de perdre des stations. Toutes les données ont été traitées en DGPS (positionnement différentiel à partir des satellites GPS et GLONASS). Malgré cela, certaines positions ont dû être recalculées par PPP – Positionnement

Ponctuel Précis – à cause du manque de satellites en commun avec la base. Au final, nous obtenons une précision de 30cm ou moins pour 80 % des mesures. Pour les 20% restantes nous avons des précisions supérieures à 30cm mais toujours inférieures à un mètre.

## ***1.2 Sismique passive***

La présence de couches de sol superficielles de faible impédance sismique peut donner lieu à des phénomènes de résonance sismique dus au piégeage d'ondes, par exemple dans le cas de remplissage sédimentaire reposant sur un substratum rocheux. Dans certaines conditions, la fréquence de résonance  $f_0$  de la couche superficielle peut être extraite des enregistrements du bruit de fond sismique, en calculant le ratio spectral entre les vibrations horizontales et verticales (*HVSR*) [Nakamura 1989; Lachet & Bard 1994]. Cette méthode passive permet des reconnaissances bon marché et efficaces et a été largement utilisée ces vingt dernières années [cf. revue de littérature de Mucciarelli & Gallipoli 2001]. Pour des géométries 1 D,  $f_0$  dépend seulement de la vitesse des ondes de cisaillement ( $V_s$ ) et de l'épaisseur ( $H$ ) de la couche superficielle [Murphy et al. 1971; Bodin & Horton 1999]. Cette propriété rend la technique du *HVSR* particulièrement efficace pour l'exploration de la profondeur du substratum sous remplissage de faible impédance sismique. La profondeur ainsi estimée montre généralement moins de 15 % d'erreur, à condition que les profils de  $V_s$  soient bien connus en tout point du remplissage. Cependant, les bassins sur-creusés dans les vallées ont généralement une géométrie assez courbe et irrégulière, ce qui génère des effets 2 D et 3 D plus complexes. Bard & Bouchon [1985] ont défini un critère basé sur le ratio entre largeur et longueur de la vallée pour séparer les cas de résonance 1 D et 2 D. Une distinction claire entre la part 1 D ou 2 D dans la résonance des vallées fait cependant toujours l'objet de débats. Comme beaucoup de méthodes géophysiques, l'efficacité de la méthode *HVSR* peut être grandement améliorée en ajoutant de l'information et des contraintes provenant de forages ou d'autres méthodes géophysiques indépendantes.

## **2. Mesures et résultats en vallée d'Aure**

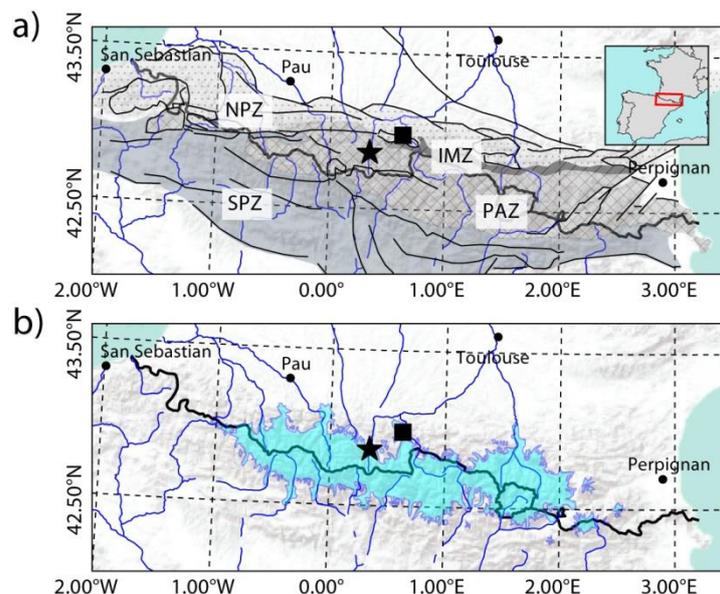
### ***2.1 Contexte géologique et géotechnique***

Les trois unités tectoniques pyrénéennes majeures affleurent le long de la vallée d'Aure (Fig. 2a, Vergés et al. 2002). Du sud au nord :

- (i) La Zone Axiale Primaire est principalement composée de roches métamorphiques d'âge Précambrien et Paléozoïque d'origine sédimentaire (schistes, dolomite, calcaire, grès) ;
- (ii) La Zone Interne Métamorphique affleure plus au nord, montrant des terrains sédimentaires métamorphisés d'âge mésozoïque (calcaire, dolomite, marbre) et des écailles du socle ;
- (iii) La Zone Nord Pyrénéenne, composée de terrains sédimentaires du Mésozoïque.

Dans sa partie sud, le bassin de la vallée d'Aure présente un substratum sédimentaire (calcaires, pélites, schistes) du Dévonien inférieur à moyen. Des calcaires, des séries flyschoides gréseuses et des schistes noirs du Carbonifère affleurent dans la partie Nord [Mirouse and Barrère 1993].

Au cours du Pléistocène, les Pyrénées ont subi plusieurs phases majeures de glaciations, avec des phases successives de progression et de retrait glaciaire. Le maximum glaciaire, représentée Fig. 2b fut probablement atteint au Pleistocène moyen et/ou durant les glaciations du Würm [Delmas et al. 2012]. Dans la vallée d'Aure, les glaciers n'ont recouvert que la moitié amont de la vallée, ne dépassant que rarement le verrou de Cadéac (Fig. 2b et 3a, [Mirouse and Barrère 1993]). L'érosion glaciaire a créé une vallée de morphologie glaciaire typique en forme de U d'environ 1 km de large sur 10 km de long entre St-Lary-Soulan et Arreau, rempli de nos jours de sédiments. Comme il n'y eut plus de glaciation significative dans les Pyrénées depuis le Würm [Calvet 2004], le remplissage sédimentaire du bassin d'Aure est relativement homogène et composée de dépôts fluvio-lacustres. Ceci est en accord avec la la carte géologique de la surface du bassin [Barrère et al. 1984], où seulement quelques éboulis de pente et cônes alluviaux sont cartographiés sur les bords de la vallée.



**Figure 2:** a) Carte tectonique simplifiée des Pyrénées [adaptée de Vergés et al. 2002]. La Zone Sud Pyrénéenne (SPZ), La Zone Axiale Pyrénéenne (PAZ), la Zone Interne Métamorphique (IMZ) et la Zone Nord Pyrénéenne (NPZ) sont indiquées en nuances de gris. b) Carte de l'extension glaciaire maximale dans les Pyrénées (en bleu, tiré de Calvet et al. [2011]). La vallée d'Aure est indiquée par une étoile noire, celle de la Garonne par un carré noir.

Six forages provenant de la Base de données du Sous-Sol du BRGM sont recensés dans la vallée d'Aure. Cinq forages ne mesurent que de quelques mètres à environ 20m de profondeur ; ils n'ont traversé que la couche de sédiments sans atteindre le substratum rocheux. En revanche, le sixième forage localisé à proximité de St-Lary-Soulan (étoile blanche, Fig. 3), atteint 1318m de profondeur. Il révèle une couverture sédimentaire relativement homogène sur 120 m d'épaisseur composée de dépôts fluvio-lacustres, reposant sur des schistes noirs et calcaires de la Zone Axiale Pyrénéenne (substratum).

## ***2.2 Analyse des mesures en sismique passive***

L'implantation des points de mesure est indiquée par des points noirs sur la Fig. 3a. Le bruit de fond sismique a été mesuré en 69 points répartis sur l'ensemble de la vallée d'Aure. Pour chaque station, les vibrations ambiantes ont été enregistrées durant au moins 40 min avec deux capteurs sismiques à trois composantes (3C): un capteur large-bande *Güralp CMG40T* (période propre de 30 s) et un capteur courte-période *IHR 3D* (fréquence propre de 2 Hz) [<http://sismob.resif.fr/>]. Le flux sismique a été enregistré par une station *Agcodagis Osiris* à une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz.

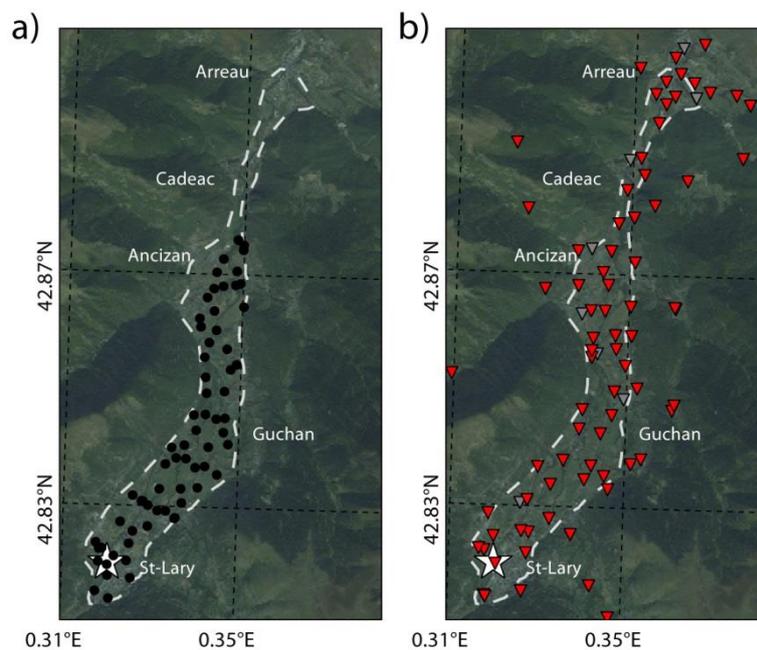


Figure 3: Carte de la zone d'étude dans la vallée d'Aure. La vallée d'Aure est délimitée par les pointillés blancs, le forage profond est marqué d'une étoile blanche. a) Les 69 mesures de sismique passive sont indiquées par des points noirs. b) Les 87 mesures de gravimétrie sont indiquées par les triangles rouges.

Les vibrations ambiantes ont ensuite été traitées avec le logiciel *Geopsy* [www.geopsy.org]. La moyenne et tendance de chaque point de mesure ont été soustraites, puis les enregistrements ont été filtrés en passe-haut à 0,1 Hz. Les événements transitoires ont été éliminés en utilisant un algorithme STA/LTA [Trnkoczy 2002] avant de découper les traces sismiques en fenêtres de 25 s de longueur apodisées pour réduire la variabilité spectrale du bruit de fond. Le spectre de Fourier est ensuite calculé pour chaque fenêtre et lissé avec un filtre de Konno-Ohmachi en utilisant le paramètre de lissage standard  $b = 40$  [Konno & Ohmachi 1998]. La composante horizontale est calculée comme étant la moyenne quadratique des composantes Nord et Est. Le ratio spectral entre les vibrations horizontales et verticales (*HVSR*) est calculé pour chaque fenêtre, donnant une courbe moyenne ( $\overline{HVSR}$ ) et un écart-type ( $\sigma_{HVSR}$ ) pour chaque point de mesure (Fig. 4). 7 mesures de *HVSR* ont été écartées car elles ne satisfont pas les critères de fiabilité édictés dans le guide *SESAME* [SESAME Europeanproject 2004], principalement en raison d'événements transitoires ou de problèmes instrumentaux. Dans le jeu de 62 courbes d'*HVSR* satisfaisant aux tests, nous avons recherché les pics remplissant les conditions de fiabilité. Le pic d'*HVSR* a été recherché dans la gamme 0.5-50 Hz correspondante aux fréquences de résonance plausibles pour des remplissages sédimentaire d'épaisseur métrique à pluri-hectométrique. Les pics situées en dessous de la fréquence de résonance du capteur n'ont pas été pris en compte pour des raisons de fiabilité [Guillier et al. 2008].

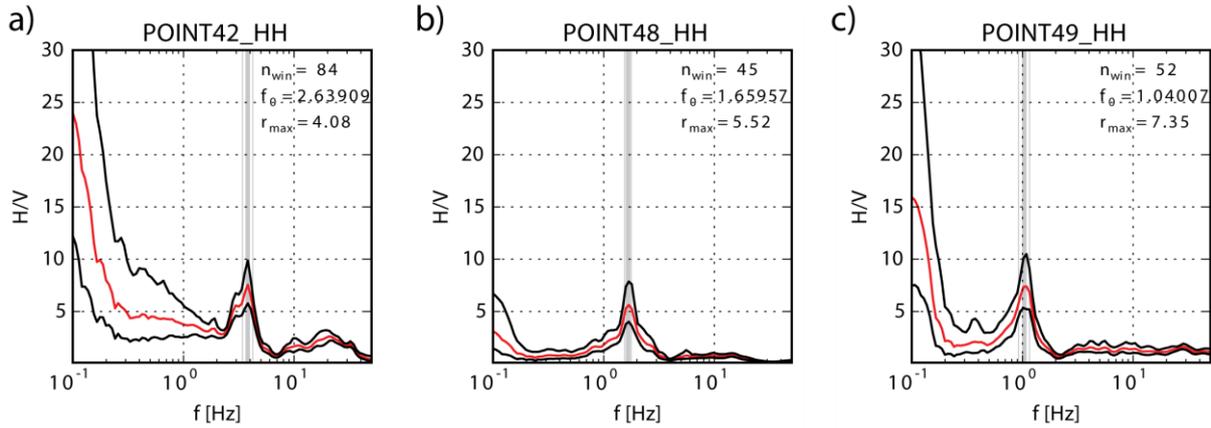


Figure 4: Exemple de courbes HVSR pour trois points de mesure. La courbe HVSR moyenne (MHVSR) est indiquée en rouge. Les courbes MHVSR/ $\sigma_{HV}$  et MHVSR\* $\sigma_{HV}$  sont dessinées en noir,  $\sigma$  étant l'écart-type. La fréquence du pic d'HVSR ( $f_0$ ) est indiquée par la ligne gris verticale. Les limites  $f_0 \pm \sigma(f_0)$  sont dessinées en traits fins gris.

### 2.3 Résultats et interprétation de la sismique passive

Sur la plupart des stations, des HVSR élevés sont observés à basse fréquence ( $< 1$  Hz), comme pour la station 42\_HH (Fig. 3a). Cette caractéristique pourrait être due aux effets du vent [SESAME 2004], même si les mesures ont été évitées proches des structures, arbres ou hautes herbes durant les périodes les plus ventées. Seules 18 stations sur 62 remplissent les conditions strictes de fiabilité édictées par les références SESAME (jeu de données D1), essentiellement à cause de ces perturbations basse fréquence. En conséquence, une recherche manuelle de pics d'HVSR a été entreprise en assouplissant les critères de fiabilité. En particulier, l'effet des HVSR élevés à basse fréquence a été pris en compte en pointant la limite supérieure du plateau, au-delà de laquelle le HVSR chute.. Le jeu de données satisfaisant ces critères élargis représente 44 stations additionnelles (jeu de données D2).

Quel que soit le jeu de données étudié, les pics de HVSR pour chaque point de mesure ont pu être interprétés comme les effets de résonance sismique du remplissage de la vallée d'Aure (cf. Introduction 1.2). La fréquence du premier pic est un bon estimateur de la fréquence fondamentale de résonance  $f_0$ .

Les fréquences de résonance  $f_0$  extraites des courbes de HVSR sont présentées Fig. 5a et b avec une échelle logarithmique et linéaire, respectivement.  $f_0$  est comprise entre 0.7 et 20.8 Hz. L'observation majeure est que les fréquences  $f_0$  dans la partie Nord de la vallée d'Aure sont plus élevées ( $> 5$  Hz) alors que des valeurs bien inférieures sont observées dans la partie Sud ( $< 5$  Hz). Cette observation est mieux visible avec l'échelle de couleurs logarithmique (Fig. 5a). ). La partie Sud de la

vallée montre une certaine homogénéité des fréquences  $f_0$ , la partie Nord présentant une variabilité plus importante.

Les fréquences de résonance ont été utilisées pour cartographier l'épaisseur du remplissage sédimentaire de la vallée d'Aure. Pour cela, une inversion préliminaire a été conduite en utilisant un modèle de résonance 1 D. Dans ce modèle, la fréquence de résonance fondamentale ( $f_0$ ) est reliée à l'épaisseur des sédiments (H) et à la vitesse des ondes de cisaillement ( $V_S$ ) par l'équation suivante:

$$f_0 = \frac{V_S}{4H} \text{(eq. 1)}$$

La mesure de  $f_0$  au niveau du forage profond de St-Lary a été utilisée pour calculer un  $V_S$  moyen de  $590 \text{ m.s}^{-1}$ . Cette valeur est en bon accord avec la littérature pour un des remplissages fluvio-lacustres quaternaires [Barnaba et al. 2010, Claprood et al. 2012, Le Roux et al. 2012, Guéguen et al. 2007], bien que sujette à de possibles variations latérales. En utilisant cette valeur de  $V_S$ , la carte d'épaisseur du remplissage sédimentaire a été tracée (Fig. 5c). L'épaisseur du remplissage calculée varie entre 7 à 210 m et suit la même répartition spatiale que  $f_0$ . Le substratum est situé plus en profondeur dans la partie Sud du bassin d'Aure (généralement  $> 100 \text{ m}$ ) que dans la partie nord (généralement  $< 100 \text{ m}$ ). L'incertitude sur la position du substratum dépend principalement de la contrainte sur  $V_S$ . On estime généralement à 15 % l'erreur relative sur la profondeur dans les zones où le profil de  $V_S$  est bien connu. Des erreurs plus importantes peuvent provenir d'effets de résonance 2 D ou 3 D, particulièrement dans les zones où la topographie du substratum est prononcée.

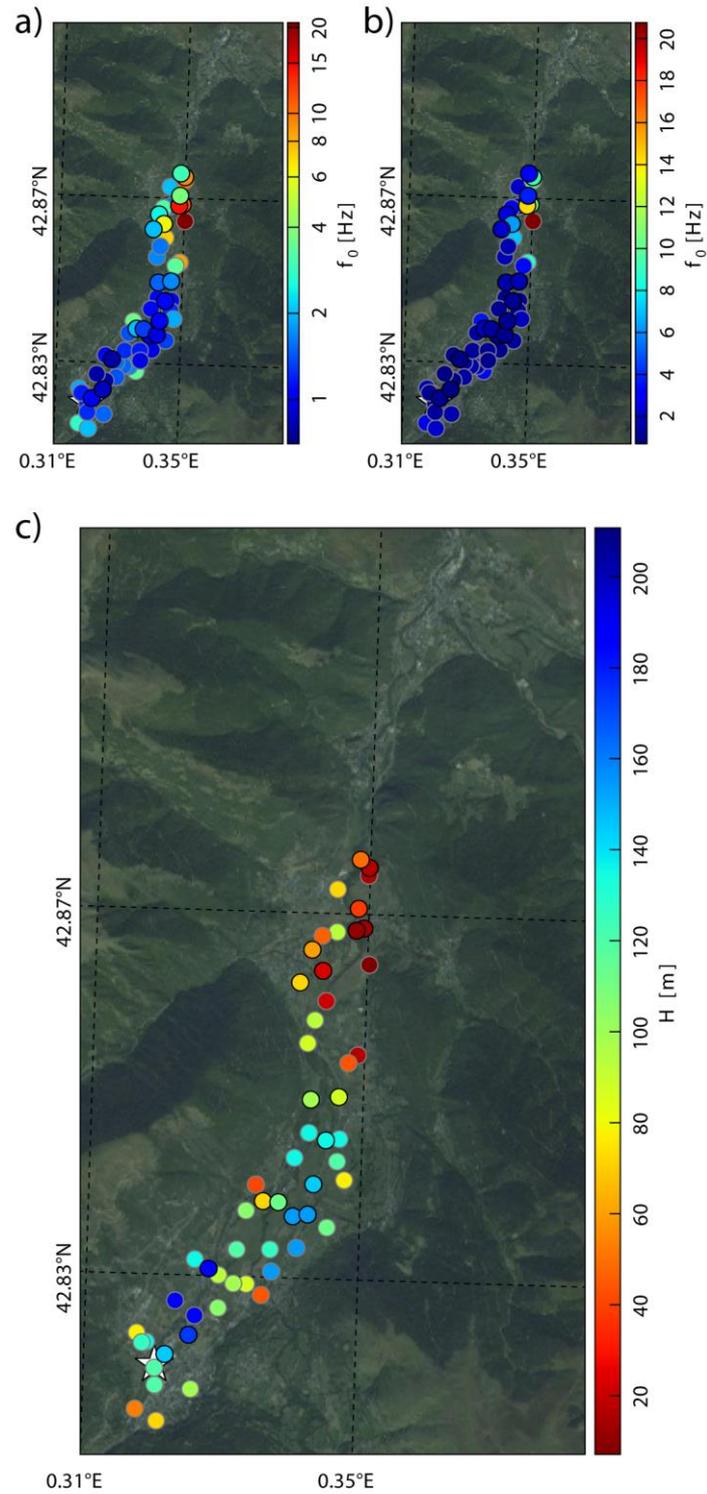


Figure 5: (a) et (b) Carte de la fréquence de résonance  $f_0$  dans la vallée de la Neste d'Aure, en échelle logarithmique et linéaire, respectivement. c) Carte de l'épaisseur de sédiments ( $H$ ) du remplissage de la vallée d'Aure. Cette épaisseur a été calculée pour une résonance 1 D (eq. 1), en prenant  $V_s = 590$  m/s. Les points de mesure sont entourés en noir (jeu de données D1) ou en blanc (jeu de données D2).

## ***2.4 Traitements et résultats des mesures gravimétriques***

La campagne gravimétrique a permis de mesurer 87 nouvelles stations entre Saint-Lary et Arreau dans et sur les bords de la vallée d'Aure, (Fig. 3b).

- Calcul de l'anomalie de Bouguer complète

Les données issues de la base de données gravimétriques du BGI [<http://bgi.omp.obs-mip.fr/>] ont été rajoutées aux mesures réalisées durant cette étude pour intégrer le maximum d'information disponible. Nous avons utilisé l'altitude mesurée par GNSS pour calculer l'anomalie à l'air libre qui supprime les variations gravimétriques résultant de la différence d'altitude entre les stations et replace les mesures gravimétriques sur un référentiel équipotentiel unique pour l'ensemble du levé.

L'anomalie de Bouguer simple tient compte du défaut ou de l'excès de masse compris entre le référentiel et la station de mesure et a été calculée avec une densité  $d = 2.65$  (Fig. 6a). L'anomalie de Bouguer complète est obtenue en appliquant une correction de terrain calculée à partir du logiciel Gravsoft [Forsberg et Tscherning,2008], qui tient compte de l'effet du relief régional sur les valeurs de gravité mesurées aux différentes stations. Le MNT qui a servi aux calculs de la correction de terrain est celui obtenu à partir des données ASTER, pour lequel la résolution spatiale est estimée à 30m (téléchargeable sur le site de la NASA <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>). Cette résolution est suffisante pour nos besoins, et la qualité de ce MNT par rapport aux anciens modèles proposés a été validée. Les cartes de l'anomalie de Bouguer simple (Fig. 6a) et complète (Fig. 6b) a été réalisée en utilisant un algorithme d'interpolation de courbure minimale avec le logiciel Oasis Montaj de Geosoft.

- Composante régionale et résiduelle de l'anomalie de Bouguer complète

L'anomalie de Bouguer complète représente la réponse gravimétrique résultant d'hétérogénéités de densité dans le sous-sol et permet ainsi l'interprétation géologique de celle-ci. Les anomalies gravimétriques de grande longueur d'onde, dites régionales, sont produites par des hétérogénéités en profondeur. Les anomalies de courtes longueurs d'onde, dites résiduelles, sont dues à la présence de contacts entre des roches de densités significativement différentes proches de la surface. La composante résiduelle de l'anomalie gravimétrique de Bouguer est superposée avec, et souvent masquée par, la composante régionale. Il est ainsi nécessaire de retirer la tendance régionale à l'anomalie de Bouguer complète pour isoler la composante résiduelle exploitable en termes d'épaisseur sédimentaire.

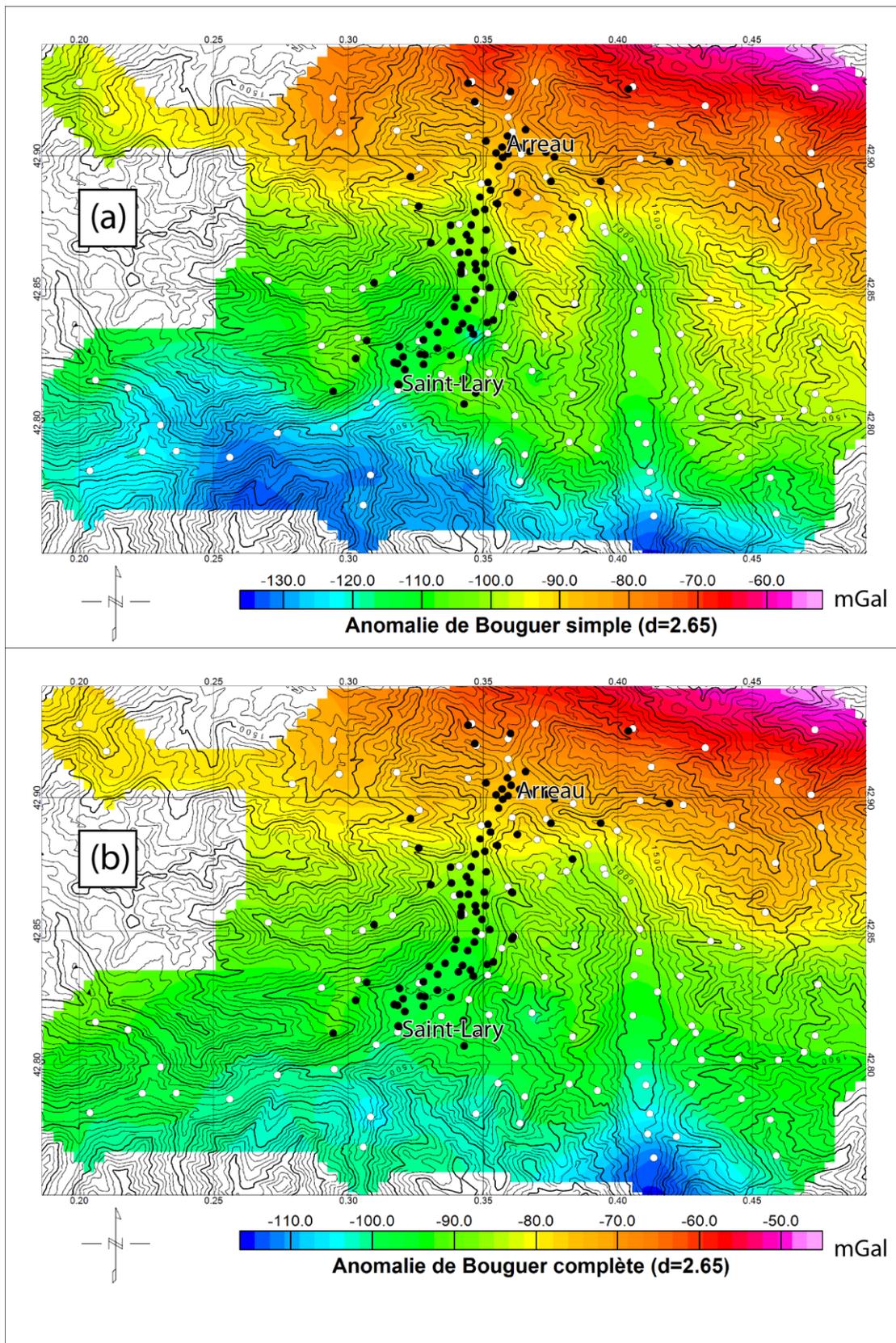


Figure 6 : (a) carte de l'anomalie gravimétrique de Bouguer simple du secteur de Saint-Lary-Arreau ; (b) carte de l'anomalie de Bouguer complète, de la même zone que (a). Les points blancs correspondent aux stations préexistantes, les points noirs aux nouvelles stations mesurées par cette étude.

Tel que proposé par Perrouy et al. [2015], la composante régionale de l'anomalie de Bouguer complète a été calculée en utilisant uniquement les stations en dehors de la vallée - BGI et celles acquises lors de ce projet. Elles sont situées sur le substratum pour lequel l'épaisseur des dépôts est nulle (Fig. 7a). La composante résiduelle de l'anomalie gravimétrique de Bouguer complète (Fig. 7b) a été ainsi obtenue par soustraction de la composante régionale de l'anomalie de Bouguer complète (sans les stations situées dans la vallée) à la carte de l'anomalie de Bouguer complète (incluant la totalité des stations gravimétriques).

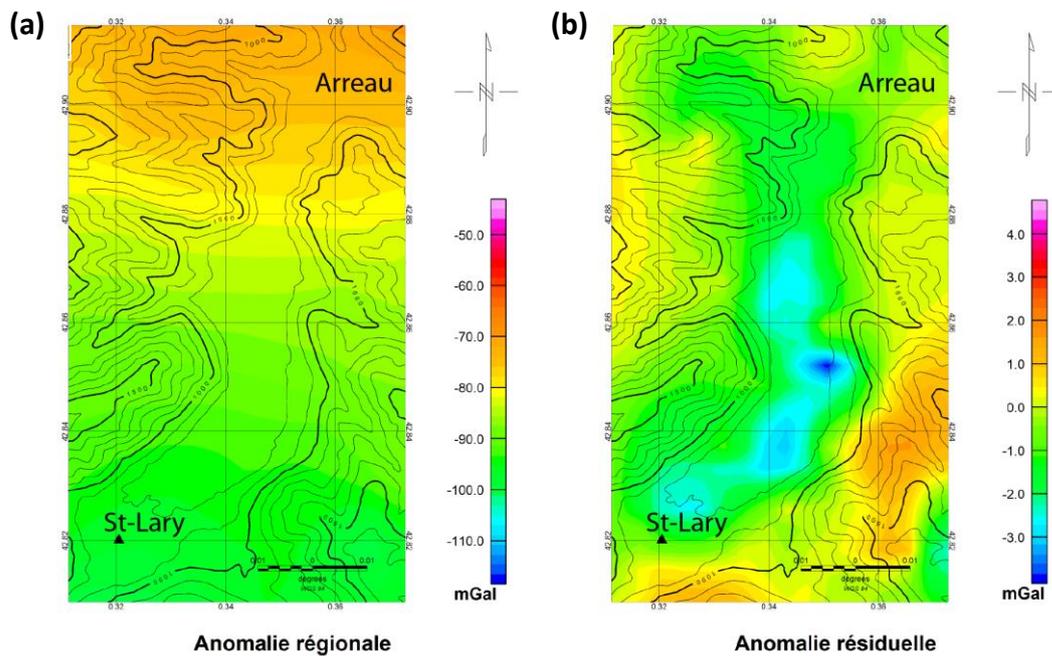


Figure 7 : (a) Carte de la composante régionale de l'anomalie de Bouguer complète de la vallée d'Aure entre Saint-Lary et Arreau ; (b) carte de composante résiduelle de l'anomalie de Bouguer complète de la vallée d'Aure entre Saint-Lary et Arreau. Le triangle noir correspond au forage ayant atteint le substratum.

- Estimation de l'épaisseur des sédiments dans la vallée

Un premier ordre de grandeur du remplissage peut être estimé en considérant que :

$$P_{\text{profondeur du remplissage}} = \frac{\text{anomalie résiduelle}}{2\pi \Delta d G}$$

Avec  $\Delta d$  le contraste de densité entre le remplissage et l'encaissant, et  $G$  la constante gravitationnelle universelle.

Nous avons interprété les résidus en prenant trois contrastes de densité  $\Delta d$  différents entre le remplissage sédimentaire de la vallée et le substratum rocheux (Fig. 8). La valeur  $\Delta d = 0.2$  a été

définie pour coïncider avec la profondeur des sédiments quaternaires dans le sondage réalisé près de Saint-Lary (voir BSS, BRGM) qui a atteint le substratum à 120m de profondeur. La Figure 8a montre le résultat de cette interprétation. Les épaisseurs sédimentaires vont de quelques mètres à plus de 350m par endroits. Elles sont généralement plus profondes au centre de la vallée que sur les bords, ce qui est logique et valide la bonne qualité des mesures. On observe une diminution de l'épaisseur vers le nord, au niveau du verrou glaciaire de Cadéac. Autour d'Arreau, l'épaisseur des sédiments ne dépasse pas 50m. Des profondeurs de remplissage ont également été calculées avec des valeurs de  $\Delta d$  égales à 0.4 et à 0.6. Les profondeurs établies à partir de ces deux valeurs sont présentées respectivement dans les figures 8b et 8c. Un contraste de densité de 0.4 donne des épaisseurs sédimentaires plus proches de celles obtenues par la prospection de sismique passive.

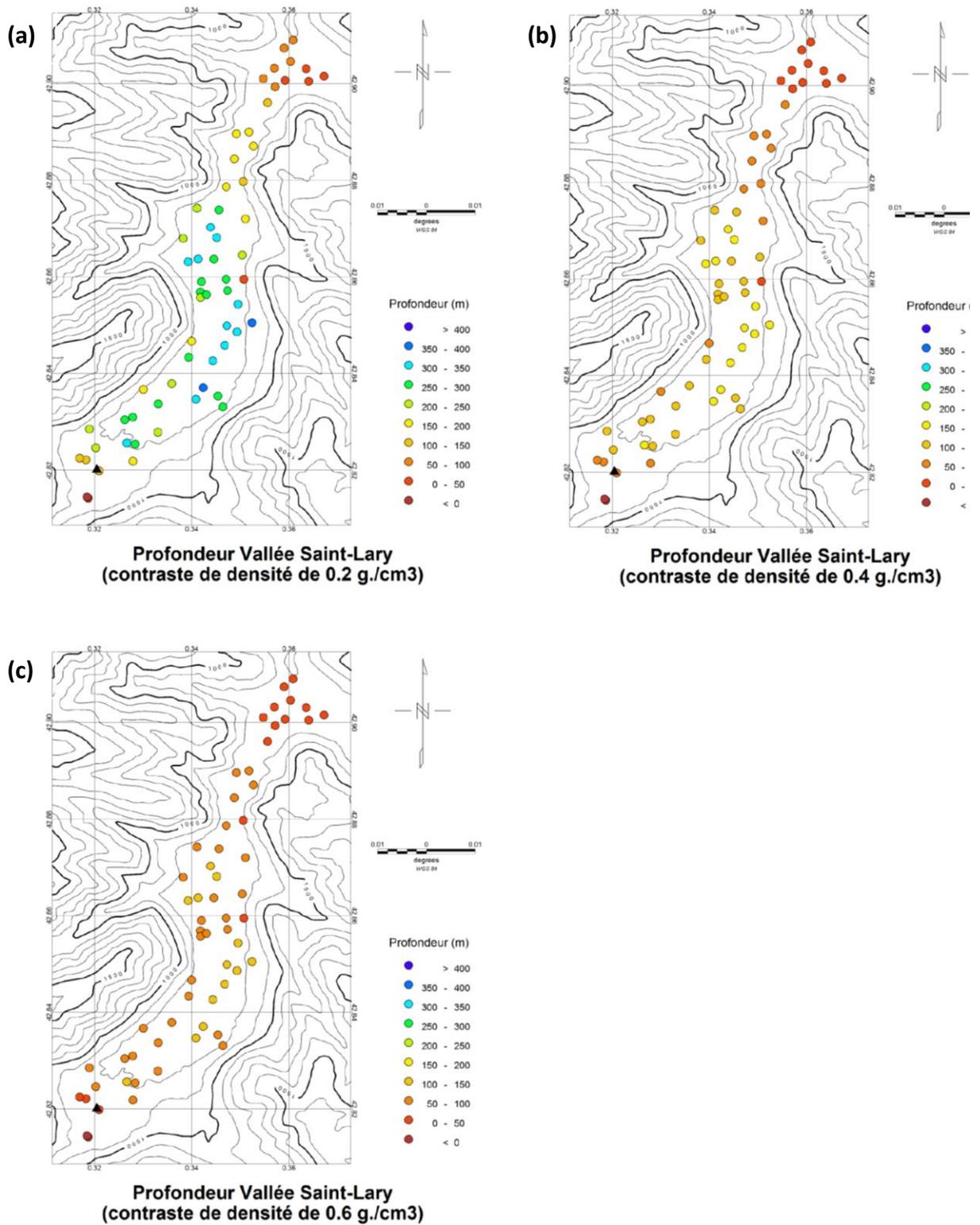


Figure 8 : Epaisseur du remplissage sédimentaire dans la vallée de la Neste d'Aure, estimée à partir de la campagne gravimétrique. Le contraste de densité entre les sédiments et le substratum est fixé respectivement à 0.2 (a), 0.4 (b) et 0.6 (c)

### 3. Densification de l'étude gravimétrique de 2013 dans la vallée de la Garonne

La Garonne traverse la zone axiale pyrénéenne successivement vers l'ouest puis vers le nord. Les sédiments quaternaires ne sont que peu présents dans la partie amont de la Garonne, au sud de Saint-Béat. En aval de Saint-Béat, la Garonne s'écoule vers le nord et rencontre un de ses principaux affluents de la région, la rivière Pique. La vallée située en aval du verrou de Saint-Béat a été surcreusée par le glacier qui l'a occupée. Sa morphologie présente deux grands bassins glaciaires (bassins de Marignac et de Frontignan), dans lesquels la vallée dépasse 2 km de largeur. Ces bassins sont séparés par des segments dans lesquels la vallée est plus étroite (<1 km). La vallée s'élargit à nouveau vers le bassin de Barbazan au nord de la zone d'acquisition, dans le secteur de Labroquère; fig. 9).

Dans la vallée de la Garonne, 25 nouvelles stations ont été mesurées. Elles viennent compléter les points réalisés lors d'une campagne réalisée en 2013 par Joseph Martinod et Bérangé Moussirou. La Figure 9 montre la répartition géographique de ces mesures, un triangle rouge pour les données acquises en 2015 et un triangle gris pour celles de la base de données du BGI. Huit stations acquises cette année dans le nord-ouest de la zone d'étude n'ont pas été prises en compte car elles présentaient des valeurs aberrantes, sur les mesures de gravité, d'origine non expliquée. Les fortes pentes au confluent entre la Pique et la Garonne n'ont pas permis la mesure de points dans ce secteur.

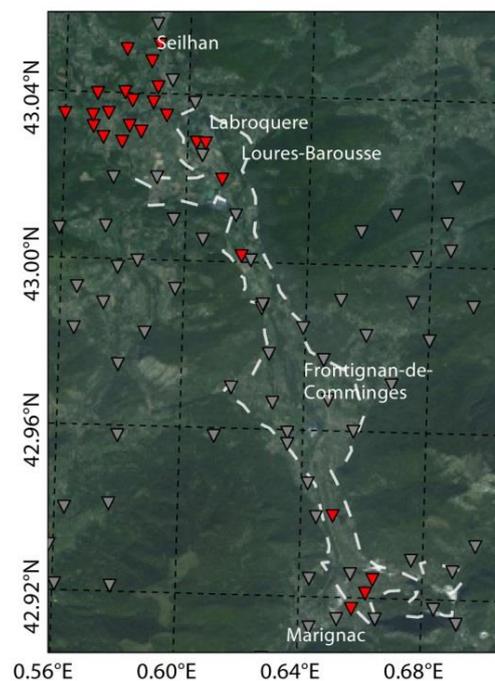
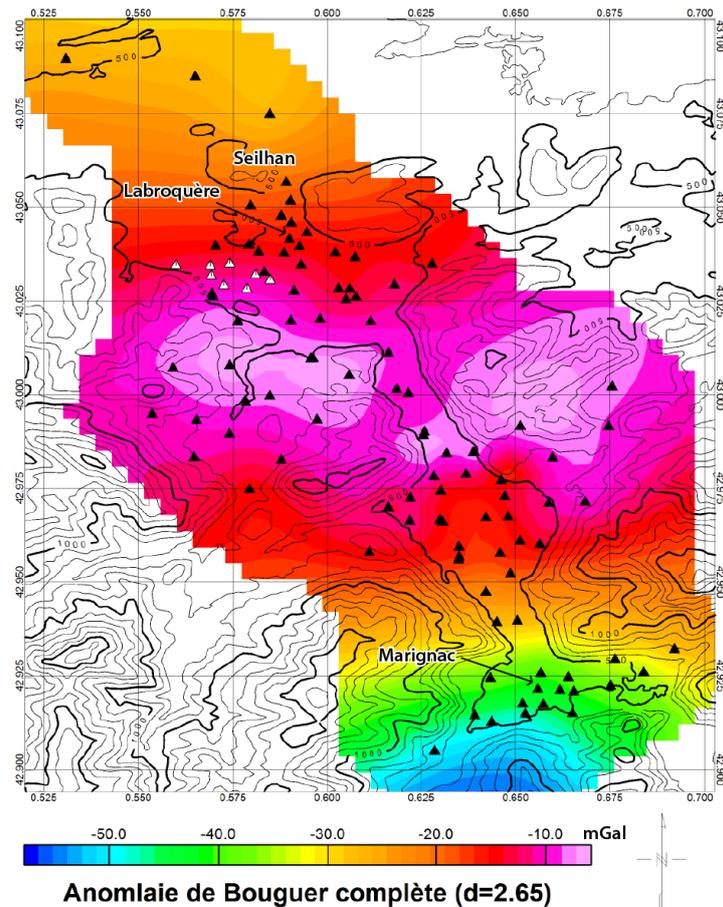


Figure 9: Carte de la zone d'étude dans la vallée de la Garonne. La vallée est délimitée par les pointillés blancs. Les 25 mesures de gravimétrie sont indiquées par les triangles rouges. Les points gravimétriques du BGI sont indiqués par les triangles gris.



*Figure 10 : Carte de l'anomalie gravimétrique de Bouguer complète dans la vallée de la Garonne. Les triangles noirs correspondent aux stations utilisées pour réaliser la carte de l'anomalie de Bouguer complète. Les triangles blancs correspondent aux stations présentant des valeurs gravimétriques erronées.*

Le protocole d'acquisition, la stratégie de traitement et le choix des paramètres pour le calcul des anomalies – densité du substratum et contraste de densité avec les sédiments – sont identiques à ce qui a été fait pour la vallée de la Neste d'Aure. Nous avons pris soin, lors d'une journée de mesure près de la Garonne, de mesurer également ce jour-là le point absolu de Vignec, ainsi que la station de base qui nous a servi pour Saint-Lary. Cette précaution nous permet de caler nos points par rapport au site de l'absolu. Ils seront donc parfaitement exploitables si une nouvelle campagne de mesures est réalisée, ou si l'on souhaite les utiliser en complément d'une base de données telle que celle du BGI. Huit stations présentant des valeurs gravimétriques aberrantes ne sont pas exploitables (triangles blancs dans Fig. 10) et n'ont pas été utilisées pour réaliser la carte de l'anomalie de Bouguer complète).

La tendance régionale a été retirée en se basant uniquement sur les stations situées sur le substratum. La figure 11 montre le résultat du calcul de l'épaisseur sédimentaire, pour les trois contrastes de

densités : 0,2, 0,4 et 0,6. Le calcul a été fait sur l'ensemble des stations gravimétriques localisées dans la vallée, incluant les données de 2013 et de 2015.

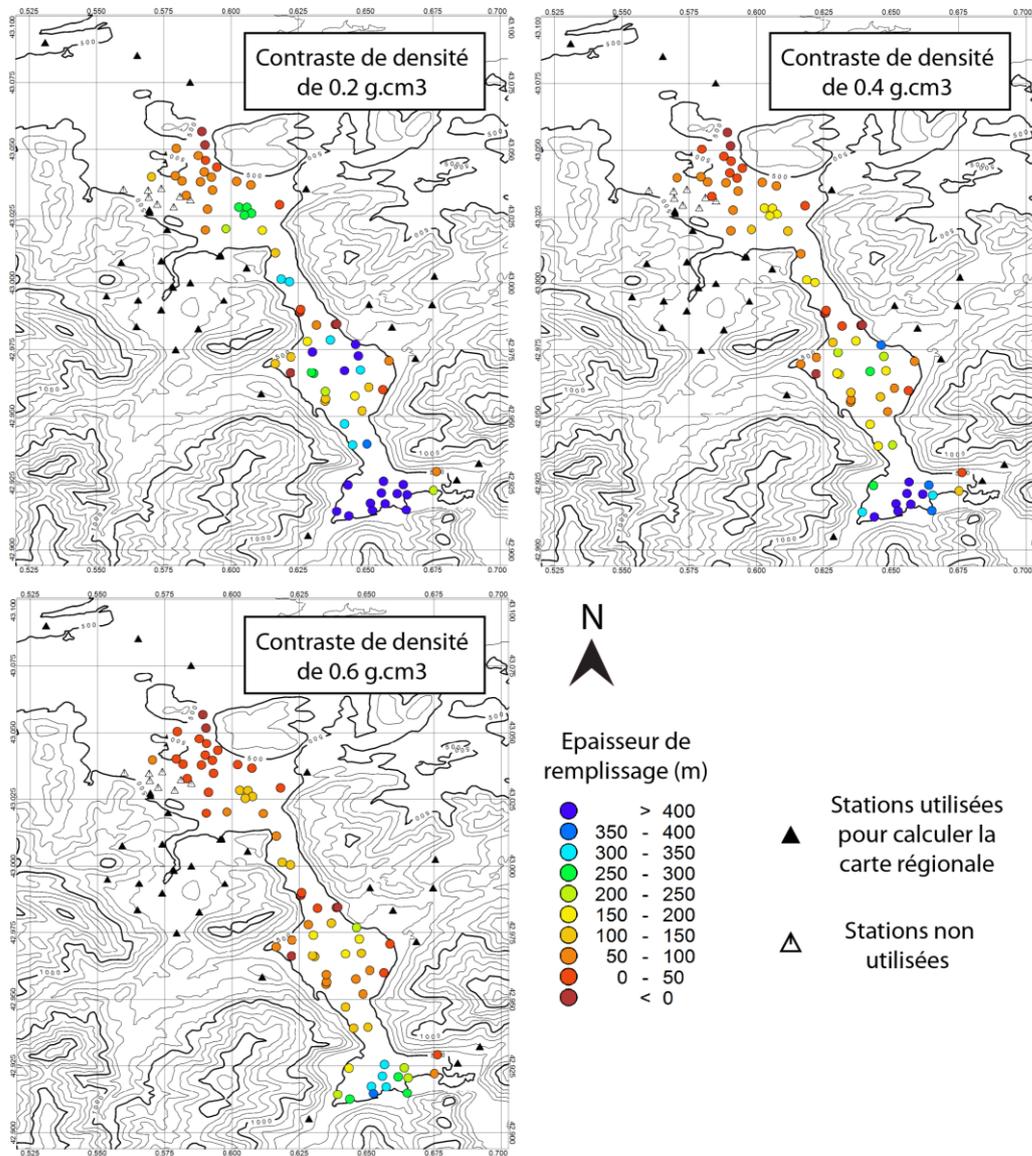


Figure 11 : Epaisseurs sédimentaires dans la vallée de la Garonne, estimées à partir des données gravimétriques des campagnes de 2013 et de 2015. Le calcul a été fait pour trois contrastes de densité différents.

## **4. Discussion – Incertitudes**

Les deux méthodes géophysiques employées requièrent un calage des paramètres afin d'obtenir l'épaisseur du remplissage sédimentaire.

Pour l'écoute sismique passive, le paramètre principal est la connaissance du profil de vitesse des ondes de cisaillement. Nous avons choisi de calculer ce paramètre à partir de la mesure réalisée au forage de Saint-Lary. La vitesse des ondes de cisaillement calculée a été ensuite confrontée aux valeurs classiques de la littérature dans des environnements comparables. Des informations apportées par des forages additionnels ou des mesures géophysiques complémentaires permettraient de conforter cette valeur.

Pour la gravimétrie, l'incertitude principale réside dans le choix du contraste de densité. Pour leur travail dans la vallée de la Garonne, Martinod et Moussirou Moussirou l'avaient fixé à 0.6. Si l'on décide de prendre cette valeur pour la Neste d'Aure, on ne modifie pas la géométrie du remplissage de la vallée par rapport à une valeur de 0.4. On obtient des valeurs plus faibles, le maximum atteignant 120 m alors qu'il dépasse 350m si l'on choisit un contraste de densité égal à 0.2, calé par le forage de Saint-Lary. On comprend donc l'importance de contraindre au mieux ce paramètre. Actuellement, il semble qu'un contraste de 0.4 soit le plus pertinent, puisqu'il permet d'avoir des résultats proches de ceux de la sismique.

Lors de la campagne de mesures, nous avons remarqué la présence d'un chantier pour le contournement de Cadéac. Il est très probable qu'au moins un forage jusqu'au substratum rocheux a été fait lors des études géotechniques du site. Il serait pertinent de pouvoir récupérer cette information.

## **5. Conclusions**

Dans la vallée de Saint-Lary, les épaisseurs sédimentaires ont pu être estimées par sismique passive et gravimétrie. Les interprétations donnent des résultats cohérents entre les deux méthodes. Il reste cependant des incertitudes sur les vitesses des ondes sismiques et le contraste de densité, qui pourraient être contraintes ultérieurement par des informations complémentaires.

Par la suite, une réflexion plus poussée à ce sujet sera menée pour tenter d'améliorer et de valider les épaisseurs obtenues dans ce rapport. Un article scientifique associant Bernard Monod (BRGM, Midi-Pyrénées) sera soumis à la communauté scientifique.

Dans la vallée de Saint-Bertrand de Comminges, nos mesures viennent compléter celles acquises en 2013. Le résultat ne montre pas d'amélioration significative sur l'estimation des anomalies.

## 6. Annexes

### 1. Descriptif des fichiers Excel pour les mesures gravimétriques :

**GRAVI\_POTAPYR\_STLARY.xlsx** est un fichier au format Excel, contenant 12 colonnes :

<b>Station</b>	le nom de la station gravimétrique
<b>Latitude</b>	la latitude de la station
<b>Longitude</b>	la longitude de la station
<b>Altitude</b>	l'altitude, référencée au géoïde
<b>Gravité</b>	la mesure gravimétrique, corrigée de la dérive instrumentale, de la marée terrestre, et calée sur la valeur de la station absolue de VIGNEC (voir BGI)
<b>g (WGS84)</b>	la valeur de g calculée sur l'ellipsoïde WGS84 d'après la formule de Moritz
<b>Air Libre</b>	l'anomalie à l'Air Libre
<b>Bouguer simple</b>	l'anomalie de Bouguer, calculée avec une densité $d=2.65$
<b>CT</b>	la correction topographique, estimée à partir du MNT ASTER
<b>Bouguer complète</b>	calculée en tenant compte de la correction CT
<b>Résiduelle</b>	Anomalie résiduelle, une fois la tendance régionale retirée
<b>Epaisseur sédim</b>	l'épaisseur des sédiments calculée avec un contraste de densité = 0.4

ND (Non Déterminé) indique les points en dehors de la vallée

Le fichier **GRAVI\_POTAPYR\_STBERTTRAND.xlsx** est au même format.

### 2. Descriptif du fichier Excel pour la sismique :

Le fichier **SISMO\_POTAPYR\_STLARY** est au format .csv, séparateur: point-virgule. Il contient 5 colonnes; **Numéro du point** (HH pour capteur large bande et BH pour capteur courte période); **F0**: fréquence de résonance fondamentale (Hz); **Longitude** (degrés décimaux); **Latitude** (degrés décimaux); **Indice de qualité** (S: remplit les critères stricts SESAME, E: Etendu, satisfait le pointé manuel; N: ne remplit aucun critère qualité), **E**: épaisseur du remplissage estimée à partir de l'équation (eq. 1) pour une résonance 1 D (m).

## 7. References

- Bard, P. Y., & Bouchon, M. (1985). The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(2), 519-541.
- Barnaba, C., Marello, L., Vuan, A., Palmieri, F., Romanelli, M., Priolo, E., & Braitenberg, C. (2010). The buried shape of an alpine valley from gravity surveys, seismic and ambient noise analysis. *Geophysical Journal International*, 180(2), 715-733.
- Barrère, P., Bouquet, C., Debroas, E.-J., Pélissonnier, H., Peybernès, B., Soulé, J.-C., Souquet, P. & Ternet, Y. (1984) Carte géologique de la France au 1/50 000ème, feuille Arreau (1072), *Orléans : Bureau de Recherches Géologiques et Minières*.
- Bodin, P., & Horton, S. (1999). Broadband microtremor observation of basin resonance in the Mississippi embayment, Central US. *Geophysical Research Letters*, 26(7), 903-906.
- Calvet, M. (2004). The Quaternary glaciation of the Pyrenees. *Developments in Quaternary Sciences*, 2, 119-128.
- Calvet, M., Delmas, M., Gunnell, Y., Braucher, R., & Bourles, D. (2011). Recent advances in research on Quaternary glaciations in the Pyrenees. *Quaternary Glaciations, extent and chronology: A closer look. Developments in Quaternary Science*, 15, 127-139.
- Claprod, M., Asten, M. W., & Kristek, J. (2012). Combining HVSr microtremor observations with the SPAC method for site resonance study of the Tamar Valley in Launceston (Tasmania, Australia). *Geophysical Journal International*, 191(2), 765-780.
- Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., Braucher, R., & Bourlès, D. (2012). Les glaciations quaternaires dans les Pyrénées ariègeoises: approche historiographique, données paléogéographiques et chronologiques nouvelles. *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 23(1), 61-85.
- Forsberg R, Tscherning CC (2008) An overview manual for the GRAVSOFr Geodetic Gravity Field Modelling Programs. 2 edn. Contract report for JUPEM Guéguen, P., Cornou, C., Garambois, S., & Banton, J. (2007). On the limitation of the H/V spectral ratio using seismic noise as an exploration tool: application to the Grenoble valley (France), a small apex ratio basin. *Pure and Applied Geophysics*, 164(1), 115-134.
- Guillier, B., Atakan, K., Chatelain, J. L., Havskov, J., Ohrnberger, M., Cara, F., ... & SESAME Team. (2008). Influence of instruments on the H/V spectral ratios of ambient vibrations. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(1), 3-31.
- Konno, K., & Ohmachi, T. (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1), 228-241.
- Lachet, C., & Bard, P. Y. (1994). Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique. *Journal of Physics of the Earth*, 42(5), 377-397.
- Le Roux, O., Cornou, C., Jongmans, D., & Schwartz, S. (2012). 1-D and 2-D resonances in an Alpine valley identified from ambient noise measurements and 3-D modelling. *Geophysical Journal International*, 191(2), 579-590.
- Mirouse, R. and Barrère, P., (1993) Notice explicative de la carte géologique de la France au 1/50 000ème, feuille Vielle-Aure (1083), *Orléans : Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, 111 pp.

- Murphy, J. R., Davis, A. H., & Weaver, N. L. (1971). Amplification of seismic body waves by low-velocity surface layers. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(1), 109-145.
- Mucciarelli, M., & Gallipoli, M. R. (2001). A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 42(3-4), 255-266.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1).
- Perrouy, S., Moussirou, B., Martinod, J., Bonvalot, S., Carretier, S., Gabalda, G., Monod, B., Herail, G., & Remy, D. (2015). Geometry of two glacial valleys in the northern Pyrenees estimated using gravity data. *Comptes Rendus Geoscience*, 347(1), 13-23.
- SESAME European project, (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation. SESAME European Research Project WP12 - Deliverable D23.12, European Commission – Research General Directorate, Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME.
- Trnkoczy, A. (2002). Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. *IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice*, 2, 1-19.
- Vergés, J., Fernández, M., & Martínez, A. (2002). The Pyrenean orogen: pre-, syn-, and post-collisional evolution. *Journal of the Virtual Explorer*, 8, 57-76.





Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

**Direction régionale Occitanie – Site de toulouse**  
3, rue Marie Curie  
Bât. Aruba / BP 49  
31527 – Ramonville-Saint-Agne – France  
Tél. : 05 62 24 14 50