



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Caractérisation hydrogéophysique du bassin d'alimentation de la galerie de Louchadière, St-Ours- Les-Roches (63)

Rapport final

BRGM/RP-71010-FR

Version 2 du 31 mai 2022

Choisissez un élément.

Bertin Clotilde, Bernard Julien, Martelet Guillaume, Renger Pierre-Alexandre

Vérificateur :

Nom : B. Vittecoq

Fonction : Directeur régional

Date : 29/06/2022

Signature :

Approbateur :

Nom : E. Vanoudheusden

Fonction : Directrice régionale déléguée

Date : 06/07/2022

Signature :

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

Contact : qualite@brgm.fr

SIVOM
SIOULE ET BOUBLE

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : Géologie, hydrogéologie, géophysique aéroportée, galerie de captage, Puy-de-Dôme, Chaîne des Puys, Louchadière.

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

Bertin Clotilde, Bernard Julien, Martelet Guillaume, Reninger Pierre-Alexandre (2022) – Caractérisation hydrogéophysique du bassin d'alimentation de la galerie de Louchadière, St-Ours-Les-Roches (63). Rapport final . BRGM/RP-71010-FR, 51 p.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-21/09/2021

Synthèse

Utilisée pour l'Alimentation en Eau Potable, la galerie de Louchadière capte des eaux souterraines circulant sous les épanchements de lave du volcan de Louchadière situé dans le massif volcanique de la Chaîne des Puys.

Confronté à une baisse de production de son ouvrage et dans un objectif de gestion durable de sa ressource, le SIVOM Sioule et Bouble a exprimé le besoin de mieux connaître l'hydrosystème dont dépend la galerie de Louchadière en particulier :

- de préciser l'existence ou non d'interactions avec les bassins hydrogéologiques proches et qui pourraient expliquer la diminution des débits ;
- de vérifier si les parties drainantes de la galerie sont positionnées de manière optimale au cœur du paléotalweg.

Différentes investigations ont été mises en œuvre pour connaître la nature et l'organisation du sous-sol, pour in fine mieux comprendre l'organisation des écoulements souterrains. Les travaux se sont appuyés sur l'utilisation et l'interprétation des données du levé géophysique aéroporté « AérOvergne ». Ils ont été couplés à l'examen des informations géologiques et hydrogéologiques disponibles en bibliographie ainsi que sur des observations in situ.

Les différents traitements appliqués aux données de mesures magnétiques et électromagnétiques permettent d'avoir une vision de l'emprise des coulées du bassin d'alimentation de la galerie. L'utilisation des données de forage, de la géologie de surface et des observations dans la galerie permet de restituer une géométrie simplifiée du volcanisme.

Le travail d'interprétation réalisé sur les différentes coupes obtenues par électromagnétisme montre des contrastes très nets de résistivités électriques, les formations volcaniques étant beaucoup plus résistantes que le socle granito-gneissique sous-jacent. Les coupes mettent également en évidence un horizon conducteur entre ces deux grands types de formations qui a été interprété comme étant l'horizon altéré du socle.

Une carte de l'altitude du toit du socle sous couverture a été dressée à partir du pointé du socle sur les différentes coupes obtenues par électromagnétisme. Elle a permis d'appréhender la paléo-morphologie du socle qui contraint les écoulements souterrains sous le recouvrement volcanique. Les formations granito-gneissiques constituent en effet le substratum imperméable de la nappe qui se crée à la base des formations volcaniques.

Il ressort de l'analyse de cette cartographie que la partie captante de la galerie repose au cœur d'une grande paléovallée, orientée selon une direction SO-NE, qui concentre des écoulements souterrains alimentés par de petites vallées secondaires. Les données confirment la dysmétrie de la paléovallée dans le secteur de la partie captante : le flanc Sud étant beaucoup plus abrupte que le flanc Nord.

L'examen de la paléo-morphologie du socle sous recouvrement volcanique permet de déterminer la ligne de partage des eaux souterraines avec le bassin de Volvic. Il permet en outre d'invalider l'hypothèse d'une remontée du bassin de Côme jusqu'à l'édifice volcanique de Louchadière.

La synthèse des connaissances sur la paléo-morphologie du socle et sur sa morphologie actuelle permet de proposer de nouveaux contours pour le bassin d'alimentation de la galerie. Ce dernier diffère de celui employé pour définir des périmètres de protection du captage de par son

extension en direction du Nord. Il englobe une portion de la route départementale n°943 où le trafic routier peut constituer une source de contamination potentielle de la ressource en eau. Une autre particularité du nouveau tracé est que le cône de Louchadière n'est que très partiellement inclus dans le bassin d'alimentation de la galerie de captage. Il en résulte que la fonction de régulation des fluctuations des précipitations météoriques qu'exerce habituellement ce type d'édifice volcanique est moins prégnante et explique pour partie l'irrégularité des débits captés dans la galerie.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. Contexte, problématique	9
1.2. Objectifs de l'étude.....	10
2. Investigations mises en oeuvre	11
2.1. Méthodes géophysiques	11
2.1.1. <i>Le levé géophysique hélicoptère AérOvergne</i>	11
2.1.2. <i>Données aérogéophysiques sur la zone d'étude</i>	12
2.2. Reconnaissances géologiques.....	16
2.2.1. <i>Généralités</i>	16
2.2.2. <i>A l'échelle du bassin versant</i>	17
2.2.3. <i>A l'échelle de la galerie de captage</i>	22
2.3. Reconnaissances hydrogéologiques	24
2.3.1. <i>Hydrogéologie du massif de la Chaîne des Puys</i>	24
2.3.2. <i>La galerie de captage de Louchadière</i>	27
3. Interprétation des données.....	29
3.1. Données aérogéophysiques.....	29
3.1.1. <i>Magnétisme</i>	29
3.1.2. <i>Electromagnétisme</i>	35
3.2. Interprétation croisée géologie et géophysique	38
3.3. Implications sur les écoulements souterrains	40
4. Synthèse des résultats	47
5. Bibliographie	49

Liste des figures

Figure 1 – Localisation du captage de Louchadière (source : © IGN)	9
Figure 2 – Vues du système SkyTEM®; (a) arrière et (b) avant de la boucle émettrice et (c) en vol.....	11
Figure 3 - Carte de l'anomalie magnétique réduite au pôle (RAP) entre St Ours à l'Ouest et le volcan de Louchadière à l'Est. Les lignes pointillées noires localisent les lignes de vol. Le figuré bleu représente l'emprise des terrains volcaniques de la carte géologique au millionième de la France. Les formations géologiques de forte aimantation magnétique se marquent par des couleurs orange à rose – notamment les cônes volcaniques et certaines coulées, comme celle captée par la galerie de Louchadière.	13
Figure 4 – Localisation des mesures électromagnétiques acquises (en noir) et exploitées (en rouge et orange pour les deux systèmes d'acquisition) dans le cadre de cette étude. Le tracé de la galerie est représenté par une polygone bleue	15
Figure 5 : Coupe schématique de la coulée de Louchadière au droit du secteur le plus amont de la galerie, A = d'après Auriat (1957) et B = d'après S.I.A.E.P Sioule et Bouble (1968). P1 et P2 représentent la position de deux puits et G1 une galerie de 90 m percée à partir du fond de P1. F1, F2, F3, F4 et F5 représentent la position de 5 forages dans lesquels la hauteur du niveau d'eau est représentée en bleu.....	18
c) Figure 6 : Compilation des données de forages et sondages (Logs) disponibles en BSS pour le secteur de la zone d'étude. Les sondages ayant touché le socle apparaissent sous la forme d'un rectangle avec la lithologie associée. Les sondages n'ayant rencontré que la couverture volcanique apparaissent sous la forme de ronds bleus. Le trait vert correspond au tracé de la galerie Reconnaissances géologiques de terrain	19
Figure 7 : A = Carte géologique de la zone d'étude (Jeambrun et al., 1973) sur laquelle sont reportés les points d'observation terrain (AFF1 à 13) et la géologie de la galerie de captage. Figurent aussi le tracé des écoulements pyroclastiques trachytiques (flèche rouge, d'après Boivin et al., 2017) et le contour des grands ensembles volcaniques de la zone d'étude (trait noir en gras). Les points d'observations terrain et les principaux contours géologiques sont aussi reportés, pour l'exemple, sur des cartes des données radiométriques (B) et magnétiques (C)	20
Figure 8 : Photographies de terrain dans la zone d'étude. A : coupe montrant le dos de la coulée de Louchadière, bréchifiée, sur laquelle repose un sol de 50 cm d'épaisseur au sein duquel on trouve un fin niveau volcanique trachytique provenant de l'explosion du Puy Chopine. B : exemple de roches volantes de granite trouvées au niveau du point d'observation AFF4. C : fossé fraîchement creusé exposant de gros blocs de lave trachytique provenant de l'explosion du Puy Chopine.	21
Figure 9 : Photographies de différents secteurs de la galerie de captage de Louchadière, visite du 15/02/2021. A : exemple de contact entre la semelle de la coulée et le socle gneissique altéré (sapolites), avec quelques décimètres de colluvions rubéfiées (côte ~ 245 m). B : Zone de faille dans le granite (côte ~ 800 m). C : Branche Sud du « Y », contact et venues d'eau entre la semelle scoriacée de la coulée, une couche de lapillis, les alluvions immatures et le socle altéré (zoom en D). E : branche Nord du « Y », montrant une géométrie similaire à C, avec une pente moins prononcée et l'absence d'alluvions stricto-sensu, remplacées par des colluvions. F : prismation de la coulée dans la partie terminale de la galerie, juste avant le « Y ».....	23

Figure 10 : Limites schématiques des dix principaux bassins hydrogéologiques du massif volcanique de la Chaîne des Puys (source : Boivin et al, 2017).....	25
Figure 11 : Schéma de la partie amont de la galerie de captage de Louchadière (Auriat, 1957 modifié). Les tirets longs schématisent l'axe du paléotalweg, les tirets courts correspondent aux limites de la coulée. F1 à F5 et P1 sont respectivement des forages de reconnaissance et un puits réalisés pour reconnaître la paléovallée.	27
Figure 12 : A : gradient horizontal de la RAP, B : tilt dérivative de la RAP. Les deux cartes font ressortir les bordures des corps magnétiques « superficiels » de façon cohérente, les coulées volcaniques traversées par la galerie de Louchadière s'allongent suivant un axe SO-NE.	30
Figure 13 : Analyse structurale semi-automatique de la carte magnétique (figurés noirs) qui permet de délimiter de façon numérique, objective, les bordures des principaux corps magnétiques de la carte. Les limites de la structure magnétique correspondant à la coulée volcanique traversée par la galerie de Louchadière sont figurées de façon plus soutenue.....	31
Figure 14 : A : localisation des profils magnétiques modélisés, sur fond d'anomalie magnétique réduite au pôle. B : coupe géologique interprétative le long du profil A (transversal à la paléovallée), dressée lors de la foration des puits P1 et P2 et des forages F1 à F5 d'après Auriat (1957), note : l'épaisseur de la coulée n'est pas à l'échelle. La localisation des forages F1 à F5 n'est pas précisément connue et ces ouvrages n'ont donc pas été utilisés.....	33
Figure 15 : Modélisation magnétique le long du profil A. Fenêtre du bas : modèle géologique (exagération verticale 1 :1), fenêtre du haut : données magnétiques (points noirs) à comparer à l'effet magnétique du modèle (trait noir). Cette coupe transversale à la paléovallée peut être mise en regard de la coupe géologique interprétative de la figure 14 B	34
Figure 16 : Modélisation magnétique le long de la galerie de Louchadière (profil B). Fenêtre du bas : modèle géologique (exagération verticale 1 :1), fenêtre du haut : données magnétiques (points noirs) à comparer à l'effet magnétique du modèle (trait noir).	34
Figure 17 : Modélisation magnétique le long du profil C, longitudinal par rapport à la paléovallée . Fenêtre du bas : modèle géologique (exagération verticale 1 :1), fenêtre du haut : données magnétiques (points noirs) à comparer à l'effet magnétique du modèle (trait noir).	35
Figure 18 : Localisation des deux profils présentés en Figure 19 . La position des forages recensés en BSS est également reportée (triangles verts) et la galerie est représentée par une polyligne bleue.	36
Figure 19 : Coupes EM localisées sur la figure précédente et sur lesquelles ont été projetés les forages situés à proximité, a) coupe Nord et b) coupe Sud. PV 1 et PV2 indiquent des paléovallées. Les points rendent compte du pointé de l'interface réalisé entre les formations volcaniques et le socle. Les forages sont distants d'environ 100 m par rapport aux coupes, ce qui peut entraîner un léger décalage entre la projection et ce qui est réellement vu au forage. C'est ce que l'on observe au niveau du forage BSS001STQG qui est normalement situé dans PV2.	36
Figure 20 : Grille de l'altitude du toit du socle obtenue par pointé sur les différentes coupes EM et interpolation entre les lignes de vol. La galerie est représentée par une polyligne dont la couleur varie en fonction de la lithologie observée dans la galerie (noir : basalte, gris : socle).....	37
Figure 21 : Eléments de de connaissances déduits de la cartographie de l'altitude du toit du socle sous recouvrements volcanique . La galerie est représentée par une polyligne blanche. A : cœur de la paléovallée principale (tirets oranges épais) et cœurs des paléovallées secondaires (tirets oranges fins). B : paléo-crête topographique sous couverture volcanique en pointillés bleus, flèches bleues : sens d'écoulement de l'eau souterraine dans les paléotalwegs sous couverture volcanique.....	41

Figure 22 : A = limites du bassin d'alimentation (tirets bleus clairs) du captage de Louchadière sous couverture volcanique. B = limites du bassin d'alimentation (tirets bleus foncés) en contexte de socle. La galerie est figurée en noir, fond : d'après carte géologique à 1/50000 n°693 du BRGM (les formations volcaniques sont symbolisées par le polygone blanc cerclé de rose, les formations du socle sont en rose et en jaune). 43

Figure 23 : Limites du bassin d'alimentation de la galerie de Louchadière sur fond géologique (A) et sur fond topographique (B). La galerie est symbolisée en noir, le polygone bleu représente le bassin d'alimentation déterminé à partir des investigations menées dans le cadre de la présente étude, le polygone en tirets noirs correspond au bassin d'alimentation défini par Livet (1999) et le polygone violet représente le bassin versant topographique. 44

Figure 24 : Morphologie et paléomorphologie du socle Rouquet et al (2012) modifié. En blanc : le contour du bassin de Volvic, en rouge les isolignes d'altitude du socle (tous les 50 m). Les carrés matérialisent les forages ayant atteints le socle (rouge) et les forages n'ayant pas atteints le socle (beige). 45

1. Introduction

1.1. CONTEXTE, PROBLEMATIQUE

Utilisée pour l’Alimentation en Eau Potable (AEP) depuis 1958, la galerie de Louchadière capte des eaux souterraines circulant sous les épanchements de lave du volcan de Louchadière rattaché au massif volcanique de la Chaîne des Puy (Figure 1).



Figure 1 – Localisation du captage de Louchadière (source : © IGN)

Situé dans le département du Puy-de Dôme, ce captage est une ressource capitale pour le SIVOM Sioule et Bouble qui distribue les eaux captées jusqu’au département voisin de l’Allier.

A la différence de la plupart des captages et sources de la Chaîne des Puy, la galerie de Louchadière se singularise par une grande irrégularité de ses débits. Depuis quelques années, l’exploitant observe également une baisse de production du captage.

Dans un objectif de gestion durable de sa ressource, le SIVOM Sioule et Bouble a besoin de mieux connaître l’hydrosystème dont dépend la galerie de Louchadière en particulier :

- de préciser l’existence ou non d’interactions avec les bassins hydrogéologiques proches et qui pourraient expliquer la diminution des débits ;
- de vérifier si les parties drainantes de la galerie sont positionnées de manière optimale au cœur du paléotalweg.

1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Une gestion durable de la ressource en eau souterraine nécessite la connaissance approfondie du sous-sol qui peut être acquise de façon directe (par exemple via des investigations de terrain, des forages, des essais mécaniques ou hydrauliques dans le sous-sol, des caractérisations en laboratoire d'échantillons) et/ou de manière indirecte au moyen de méthodes d'imagerie du sous-sol.

En contexte volcanique, il n'est généralement pas possible, à partir d'un simple examen de la topographie, d'identifier les formations géologiques pouvant contenir une voire plusieurs nappes et à plus forte raison leur localisation. En effet, le relief existant avant les émissions volcaniques, conditionne en grande partie les écoulements d'eau souterraine. La mise en place des horizons aquifères dépend également des différents produits émis (laves, projections scoriacées, cendres...) et de leur agencement les uns par rapport aux autres, de leur degré d'altération, de la présence de fractures, de structures ou appareils volcaniques particuliers (dykes, maars...).

Il est donc essentiel de bien connaître la nature et l'organisation du sous-sol pour comprendre l'organisation des écoulements souterrains.

A partir de l'interprétation conjointe des données de géophysique acquises dans le cadre du levé géophysique hélicopté « Aérovergne » et des données géologiques et hydrogéologiques (tirées de la bibliographie et d'observations in situ), l'étude a pour objectifs dans la mesure du possible de :

- Identifier les interfaces lithologiques majeures : laves, projections pyroclastiques, socle ;
- Cartographier le paléorelief, notamment à proximité de la galerie ;
- Cartographier les éventuelles structures particulières pouvant influencer l'écoulement des eaux souterraines ;
- Caractériser le niveau d'altération des horizons géologiques ;
- Identifier les formations aquifères ;
- Déterminer les limites du bassin d'alimentation de la galerie.

2. Investigations mises en oeuvre

2.1. METHODES GEOPHYSIQUES

2.1.1. Le levé géophysique hélicoptéré AérOvergne

Le levé AérOvergne, effectué par SkyTEM ApS, sous maîtrise d'œuvre du BRGM, s'est déroulé du 7 octobre au 24 octobre 2020. Il comprend 1018 km linéaire sur une base de lignes est-ouest espacées de 400 m sur laquelle des lignes nord nord-est sud sud-ouest ont été ajoutées selon un espacement variable de 400 m à plusieurs kilomètres. Le long de chaque ligne de vol, une mesure magnétique et électromagnétique a été prise sans discontinuer, à pas régulier, ce qui représente un point de donnée tous les 30-40 m. Notons que, pour l'électromagnétisme, une deuxième configuration a été testée sur un petit nombre de lignes. Dans ce cas, l'espacement des points de mesure est de 50 à 60 m.

Le système de mesure utilisé est le système SkyTEM® (<http://skytem.com>). Il est composé d'une boucle émettrice qui permet l'excitation du sous-sol, d'une boucle réceptrice pour mesurer la réponse du sous-sol, d'un générateur comme source d'énergie, ainsi que de différents instruments de navigation tels que GPS, inclinomètres et altimètres laser afin de positionner à tout moment la mesure dans l'espace (Figure 2). On note également la présence d'un magnétomètre, enregistrant le champ magnétique naturel, à l'avant du système.

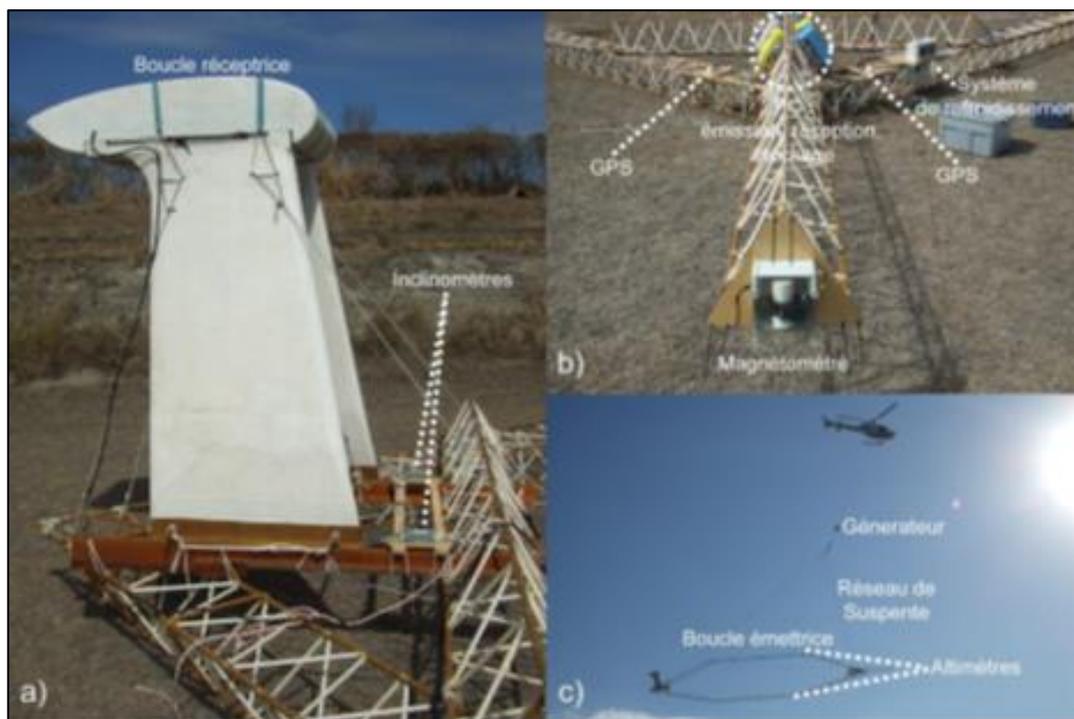


Figure 2 – Vues du système SkyTEM® ; (a) arrière et (b) avant de la boucle émettrice et (c) en vol.

La particularité du système SkyTEM® est d'émettre deux moments magnétiques différents (fonction du nombre de tour, de l'aire de la boucle d'émission et de l'intensité du courant injecté) : un moment, dit faible, qui assure une résolution en proche surface (dans la gamme ~0-100 m)

et un moment, dit fort, fournissant une information à des profondeurs plus importantes. Ces deux moments sont interprétés conjointement et correspondent à un même point de mesure.

2.1.2. Données aérogéophysiques sur la zone d'étude

a) Magnétisme

Le levé hélicoptère AérOvergne a permis d'acquérir une couverture aéromagnétique de la zone de levé. La mesure magnétique est passive, elle enregistre les variations du champ magnétique terrestre. Ses variations temporelles, qui ne présentent pas d'intérêt pour l'investigation du sous-sol sont soustraites de façon à ne restituer que les variations spatiales du champ. Celles-ci traduisent les contrastes d'aimantation des roches dans le sous-sol, depuis la surface jusqu'à plusieurs kilomètres de profondeur.

Les cartes produites donnent une vue d'ensemble de la répartition des formations géologiques plus ou moins magnétiques ; la modélisation de ces signaux permet de produire des coupes et modèles 3D du sous-sol présentant les interfaces et les discontinuités (failles) mettant en contact des unités géologiques aux propriétés magnétiques contrastées.

La carte la plus classique issue des prétraitements des données aéromagnétiques est la carte du champ total. Par retrait des composantes de grande longueur d'ondes du champ on obtient l'anomalie magnétique – qui restitue l'effet des contrastes magnétiques des premières centaines de mètres du sous-sol. Du fait que le champ magnétique n'est pas vertical, la lecture de ces cartes est complexe avec des déformations des signatures difficiles à interpréter.

On leur préfère donc la carte d'anomalies magnétiques Réduites Au Pôle (RAP) qui, à l'aide d'un opérateur mathématique ad hoc, permet de repositionner les signatures magnétiques à l'aplomb de leur source géologique. Leur lecture est relativement simple : une valeur élevée de la RAP traduit la présence d'une formation géologique plutôt magnétique. Le caractère dipolaire des anomalies magnétiques (association d'un positif et d'un négatif) peut néanmoins subsister après réduction au pôle, lorsque les roches ont une aimantation à dominante rémanente. La profondeur de la formation peut s'évaluer en première approche en observant la rugosité de la signature : une signature « rugueuse » traduit une source peu profonde, à l'inverse une signature « molle » traduit une source plus profonde. Les profondeurs ne sont quantifiables que lors de la modélisation – présentée ultérieurement.

La carte de la RAP est présentée en Figure 3 sur la zone de la galerie, étendue à l'Ouest jusqu'aux limites du levé, vers St Ours et à l'Est, jusqu'au volcan de Louchadière. On observe clairement le caractère magnétique des cônes volcaniques qui jalonnent l'Est de la carte, dont le volcan de Louchadière. Ces zones montrent de fortes anomalies dipolaires (marquées par des tons rouges et bleus accolés), qui traduisent une aimantation principalement rémanente des édifices. L'anomalie magnétique moyennement positive orientée SO-NE que recoupe la galerie de la Louchadière paraît en revanche faiblement rémanente (d'aimantation principalement induite), elle est produite par une coulée volcanique, en bonne correspondance qui sera étudiée plus en détail dans la suite. Dans leur ensemble, les formations volcaniques (cônes et coulées issues de la carte géologique à l'échelle du millionième de la France, représentées par le figuré bleu en Figure 3) constituent les formations les plus magnétiques de la zone.

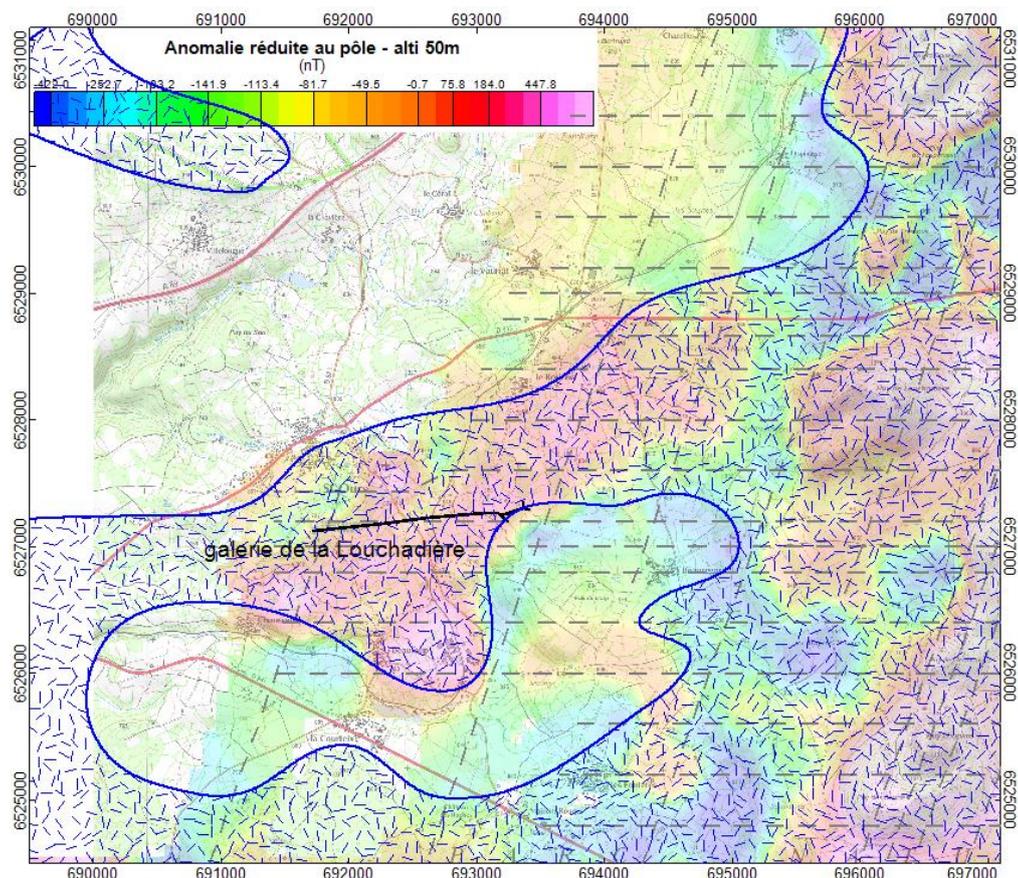


Figure 3 - Carte de l'anomalie magnétique réduite au pôle (RAP) entre St Ours à l'Ouest et le volcan de Louchadière à l'Est. Les lignes pointillées noires localisent les lignes de vol. Le figuré bleu représente l'emprise des terrains volcaniques de la carte géologique au millionième de la France. Les formations géologiques de forte aimantation magnétique se marquent par des couleurs orange à rose – notamment les cônes volcaniques et certaines coulées, comme celle captée par la galerie de Louchadière.

b) Electromagnétisme

La théorie de l'électromagnétisme (EM) appliquée à la géophysique est documentée dans différents ouvrages tels que Ward et Hohmann (1988) et Nabighian et Macnae (1991). Les grands principes de l'EM se basent sur les équations de Maxwell (19^e siècle), et plus particulièrement sur celles du domaine diffusif (i.e. les courants de conduction dominant) dans le cas d'un lever EM en domaine temporel. Ces équations permettent d'expliquer la diffusion des courants dans le sous-sol suite à une excitation externe ; diffusion qui dépendra, au premier ordre, de la conductivité/résistivité électrique du milieu qui sera donc le paramètre imagé.

Lors d'une mesure EM, un courant d'une intensité donnée est injecté dans la boucle émettrice afin de créer un champ magnétique, dit primaire (d'après l'équation de Maxwell Ampère). Ce même courant est ensuite coupé le plus nettement possible, entraînant alors une variation du champ primaire. Celle-ci se traduit par l'induction de courants de Foucault dans le sous-sol (d'après l'équation de Maxwell Faraday), créant, à leur tour, un champ magnétique dit secondaire et mesuré au niveau de la boucle réceptrice. Les courants se dissipent dans le sous-sol avec le temps (effet Joule), la donnée recueillie informera donc sur la décroissance du champ secondaire en fonction du temps, celle-ci étant directement liée à la conductivité du milieu. La profondeur d'investigation de la méthode, de l'ordre de 300 m en moyenne pour AérOvergne, dépend de l'intensité du courant injecté, de l'aire de la boucle d'émission, du niveau de bruit de la mesure ainsi que de la conductivité du sous-sol.

Traitement de la donnée de navigation

La position du dispositif est mesurée toutes les secondes grâce aux GPS installés à la fois sur la boucle et à la station de base.

L'attitude de la boucle est mesurée suivant l'axe de vol et sa perpendiculaire horizontale grâce aux deux inclinomètres placés sur la boucle. Ceux-ci permettent de suivre le comportement du système durant le lever afin de calculer les aires effectives des boucles d'émission et de réception. Un filtre médian permettant de retirer les valeurs aberrantes a été appliqué sur ces mesures. A noter que les aires effectives ont été corrigées de la topographie (Reninger et al., 2015).

Il existe deux moyens de connaître la garde au sol du dispositif, d'une part, grâce aux deux altimètres situés sur la boucle, d'autre part, par traitement du GPS différentiel et soustraction du modèle numérique de terrain. La première solution, est souvent complexe et subjective, particulièrement dans le cas d'une topographie accidentée. La seconde solution est donc préférée.

Traitement de la donnée électromagnétique

La mesure EM est extrêmement sensible aux champs EM « ambiants » aussi bien naturels qu'artificiels, ces derniers induisent un bruit sur la donnée. Comme source naturelle de bruit, on peut citer les « spherics », ondes EM issues de l'activité orageuse, se propageant dans l'ionosphère ; les sources artificielles de bruits comprennent quant à elles toutes installations humaines interagissant avec ou produisant un champ électromagnétique.

Afin de garder uniquement les mesures fiables, il est donc nécessaire de les filtrer et ainsi « débruiter » le jeu de données. Le traitement appliqué est basé sur l'utilisation de la décomposition en valeurs singulières (Reninger *et al.*, 2011). De plus, afin d'améliorer le ratio signal sur bruit, ce traitement est complété par l'application d'un moyennage qui s'adapte au niveau de bruit de chaque donnée et qui conserve au mieux la résolution (Reninger *et al.*, 2020). Enfin, une édition manuelle est réalisée sur l'ensemble du jeu de donnée.

A l'issue de cette étape, les données sont prêtes à être interprétées d'un point de vue géophysique afin d'imager les contrastes de résistivité du sous-sol qui expliquent les mesures observées.

La Figure 4 montre la localisation des données acquises (en noir) et de celles jugées exploitables (en rouge et orange pour les deux systèmes d'acquisition) à l'issue de l'étape de traitement.

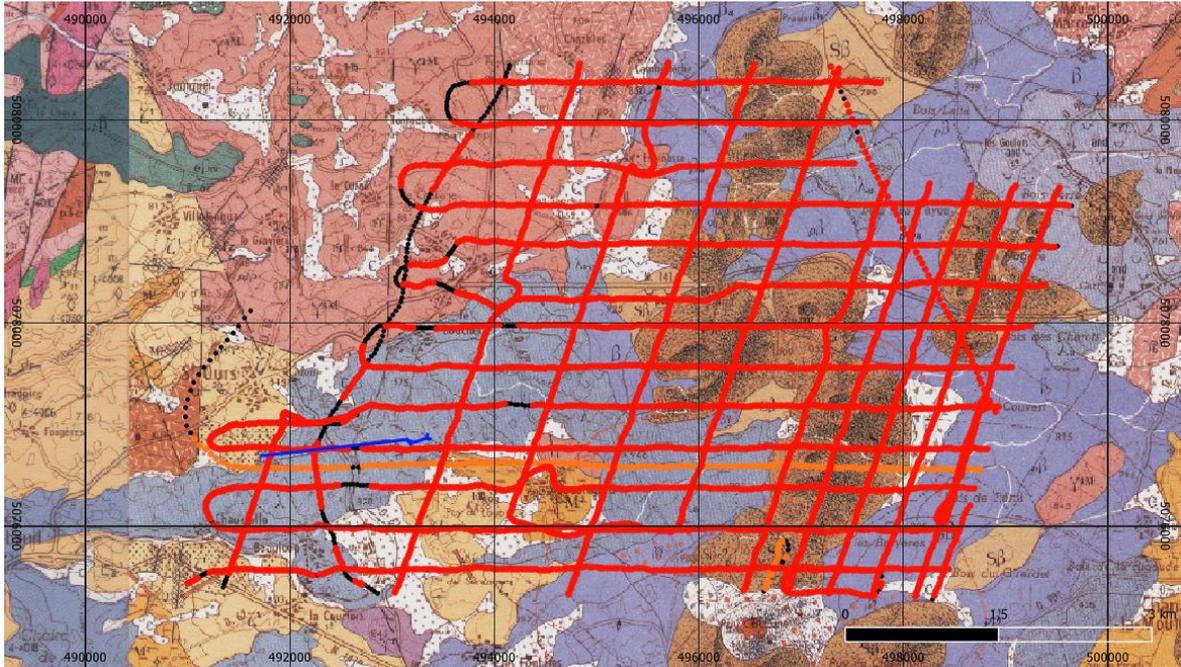


Figure 4 – Localisation des mesures électromagnétiques acquises (en noir) et exploitées (en rouge et orange pour les deux systèmes d'acquisition) dans le cadre de cette étude. Le tracé de la galerie est représenté par une polyligne bleue

Inversion de la donnée

Le principe de l'inversion en géophysique est de retrouver les propriétés physiques du sous-sol à l'origine des différents signaux mesurés (i.e. ici les décroissances EM), affectés par les caractéristiques de celui-ci. Pour ce faire, il est nécessaire de trouver le modèle schématisant le sous-sol qui minimise la différence entre les données mesurées et celles prédites par la théorie. Celui-ci est obtenu après définition d'un modèle de départ, par itération de modélisations EM et comparaison à la donnée mesurée. Les modèles pris en considération à cette étape permettent donc d'imager les contrastes de résistivité dans le sous-sol.

L'inversion couramment utilisée considère, pour chaque point de mesure, un modèle 1D (selon la profondeur) constitué d'un nombre n de couches, caractérisées par une épaisseur et une résistivité. Afin de stabiliser le processus, des contraintes spatiales entre les différentes couches des différents modèles sont également appliquées lors de l'inversion (cf. Spatially Constrained Inversion ; Viezzoli et al., 2008). A la fin de cette inversion, la profondeur d'investigation de chaque mesure est également évaluée afin de calculer une limite basse (hypothèse pessimiste ; profondeur d'investigation la plus faible) et une limite haute (hypothèse optimiste ; profondeur d'investigation la plus importante).

A l'issue de l'étape d'inversion, nous obtenons donc, à l'emplacement de chaque mesure, un modèle 1D constitué de n couches et défini par n épaisseurs et résistivités censé rendre compte des contrastes de résistivité existants en subsurface. Le nombre n n'est pas fixé avant l'inversion et dépend de notre appréhension de l'environnement géologique et de la complexité de celui-ci.

Une inversion de type « Smooth » a été réalisée (i.e. de nombreuses couches d'épaisseur fixe, dont seule la résistivité peut varier) : 40 couches entre 0 et 1000 m de profondeur. Ce type d'inversion a l'avantage d'être le moins dépendant des paramètres définis pour initialiser le calcul (i.e. reflétant notre appréhension de la géologie) mais le désavantage d'imager des variations lissées de la résistivité selon la profondeur.

2.2. RECONNAISSANCES GEOLOGIQUES

2.2.1. Généralités

La zone d'étude est caractérisée par la présence de trois principaux ensembles géologiques :

Le **système volcanique** de Louchadière se compose d'un **cône de scories strombolien**, formant le volcan proprement dit, associé à une **coulée de lave** qui s'épanche vers l'Ouest à partir de celui-ci. Il s'agit d'un exemple classique de **volcanisme monogénique** (c.à.d. mis en place au cours d'une seule et même éruption, assez brève), typique des cônes de scories de la Chaîne des Puys. La lave est de composition **trachybasaltique** (λ) et l'éruption a été datée par la méthode de thermoluminescence à 35000 ± 1000 ans (De Goër de Hervé *et al.*, 1991 ; Boivin *et al.*, 2017). Une petite coulée de basalte vient recouvrir la coulée trachybasaltique, et semble ainsi se mettre en place à la fin d'éruption, à partir du cône principal de la Louchadière.

Signalons aussi que des **dépôts pyroclastiques plus récents**, de **nature trachytique**, viennent **recouvrir** la coulée de Louchadière dans le Sud de la zone d'étude. Ces dépôts se présentent sous la forme d'un ensemble de **blocs** et de fragments de lave claire, dont la taille et l'épaisseur diminuent du Sud vers le Nord. Ils témoignent de la mise en place d'écoulements pyroclastiques (ou nuées ardentes) trachytiques provenant de l'explosion du **Puy Chopine** il y a ~ 9700 ans (Miallier *et al.*, 2004).

Le volcan de Louchadière s'est édifié sur le **plateau des Dômes**, un vaste domaine de **socle** de composition **granito-gneissique** qui possède une longue et complexe histoire géologique.

- Les **migmatites** (M^2) et les **gneiss** (ζ^1) du secteur de Beauregard et de Saint-Ours sont les roches les plus vieilles de la zone d'étude : elles sont le témoin de plusieurs grands cycles géologiques, dont le dernier est le cycle **Varisque** (ou **Hercynien**), qui a amené à la formation d'une vaste chaîne de montagne dans la région aux alentours de 300 millions d'années (Jeambrun *et al.*, 1973 ; Faure *et al.*, 2009). Ces deux roches dérivent de roches sédimentaires très anciennes, transformées dans l'écorce terrestre sous l'effet combinée de la pression et de la température : elles sont ainsi qualifiées de « **roches métamorphiques** ». Elles sont généralement riches en minéraux micas et possèdent une **structure interne bien marquée** (plissée, feuilletée ou rubanée).
- Les **granites** (Υ^{3M}) du Nord de la zone d'étude sont des **roches plutoniques**, formées par le refroidissement de magma en profondeur dans l'écorce terrestre. Il s'agit de roche **grenue**, généralement assez **homogène**, et bien répandue sur le plateau des Dômes (Jeambrun *et al.*, 1973).

L'ensemble de ce socle granito-gneissique est recoupé par de nombreuses failles, qui résultent de plusieurs phases tectoniques distinctes (Jeambrun *et al.*, 1973), et qui ont pu jouer ou re-jouer plusieurs fois au cours des temps géologiques. La phase alpine, la plus récente, donne des directions principales de fractures orientées au NNW-SSE ($\sim N155^\circ$) et NNE-SSW ($\sim N025^\circ$), et conduisant à une orientation générale N-S de la dislocation des terrains (Jeambrun *et al.*, 1973).

Les **formations superficielles** (ou régolithe) témoignent enfin de l'évolution la plus récente du paysage de la zone d'étude.

- Les formations du socle ont été largement **altérées** au cours du temps et se présentent la plupart du temps sous la forme d'**arènes** (pour le granite) ou de **saprolites** (pour les migmatites et les gneiss). Toutes deux sont des **formations peu consolidées**, d'**épaisseurs variables** et souvent **argilisées** (l'argile étant issue de l'altération des

minéraux constituant ces roches). Le socle est généralement considéré comme imperméable dans les modèles hydrogéologiques à grande échelle (Josnin *et al.*, 2007).

- Les **pent**es des reliefs (ou paléo-reliefs) sont généralement recouvertes de **colluvions**, un ensemble de **matériaux hétérogènes** emballés dans une **matrice brune** qui flue vers le bas des versants en drapant leur substrat. Les épaisseurs des colluvions sont **variables**, et augmentent généralement vers l'aval.
- Le fond des **vallées** ou **paléo-vallées**, dans lesquelles coulent (ou coulaient) des cours d'eau sont généralement formés par des **alluvions**, d'**épaisseurs variables**, composées de **graviers et galets**, dont la maturité dépend des distances de transport depuis la source.

Notons enfin que la carte volcanologique de la chaîne des Puys, document le plus récent disponible sur la zone d'étude (Boivin *et al.*, 2017) reprend fidèlement, sur la zone d'étude –à quelques modifications mineures près– les contours de la carte géologique de Clermont-Ferrand (Jeambrun *et al.*, 1973), en ajoutant cependant de manière notable les directions principales suivies par les écoulements pyroclastiques trachytiques provenant du Puy Chopine.

2.2.2. A l'échelle du bassin versant

a) Données bibliographiques

Les études menées lors des travaux liés au creusement de la galerie de captage de Louchadière, et notamment le fonçage de plusieurs puits et galeries de reconnaissances perpendiculaires à la coulée (alignés le long d'un axe NNO-SSE ; Figure 5) ont permis d'apporter de **nombreuses contraintes** quant à l'**architecture** de la **coulée** et la **morphologie** de la **paléovallée** (Auriat, 1957 ; S.I.A.E.P Sioule et Bouble ; 1969. La principale évolution entre les documents de 1957 et 1968 concerne l'asymétrie de la paléo-vallée, mieux prise en compte dans la version la plus récente de la coupe (*cf.* Figure 5). Des travaux complémentaires dédiés devront toutefois être entrepris afin d'harmoniser les deux coupes.

D'après ces documents historiques :

- la paléovallée de la Louchadière a été comblée par **une seule coulée basaltique**, très massive, à la prismation extrêmement bien développée à la base, et dont la semelle scoriacée est d'une épaisseur anormalement réduite (0.5-1.5 m). Le basalte massif est par endroit fortement diaclasé.
- la **paléovallée** est **fortement asymétrique**, avec un versant Nord peu penté et un versant Sud plus abrupte (au moins au niveau des travaux de reconnaissance, et plus ou moins marqué selon les auteurs, *cf.* Figure 5). Les deux coupes s'accordent cependant pour dire que la galerie est bien au droit du paléo-thalweg.
- des **alluvions peu évoluées** sont présentes en fond de thalweg. D'une puissance maximale estimée à 5-6 m (au niveau d'un puit creusé au niveau du Y de la galerie lors des travaux de creusement, et aujourd'hui comblé), leur épaisseur diminue rapidement à mesure que l'on sort de l'axe principale de la vallée, pour devenir nulle sur le flanc Nord de la paléovallée où la coulée repose directement sur les **arènes granitiques plus ou moins remaniées** (colluvions). Les travaux de percement de la galerie soulignant la présence « entre le socle de granite et la coulée basaltique prismée de formation perméable constituée par des blocs non roulés de granite à gangue sablo-argileuse » (Journet, 1969) : autrement dit, des arènes granitiques plus ou moins colluvionnées.
- La paléovallée est encaissée dans un **socle cristallin hercynien**, plus ou moins altéré, faillée ou argilisé, formé de gneiss au début de la galerie et de granite au fond.

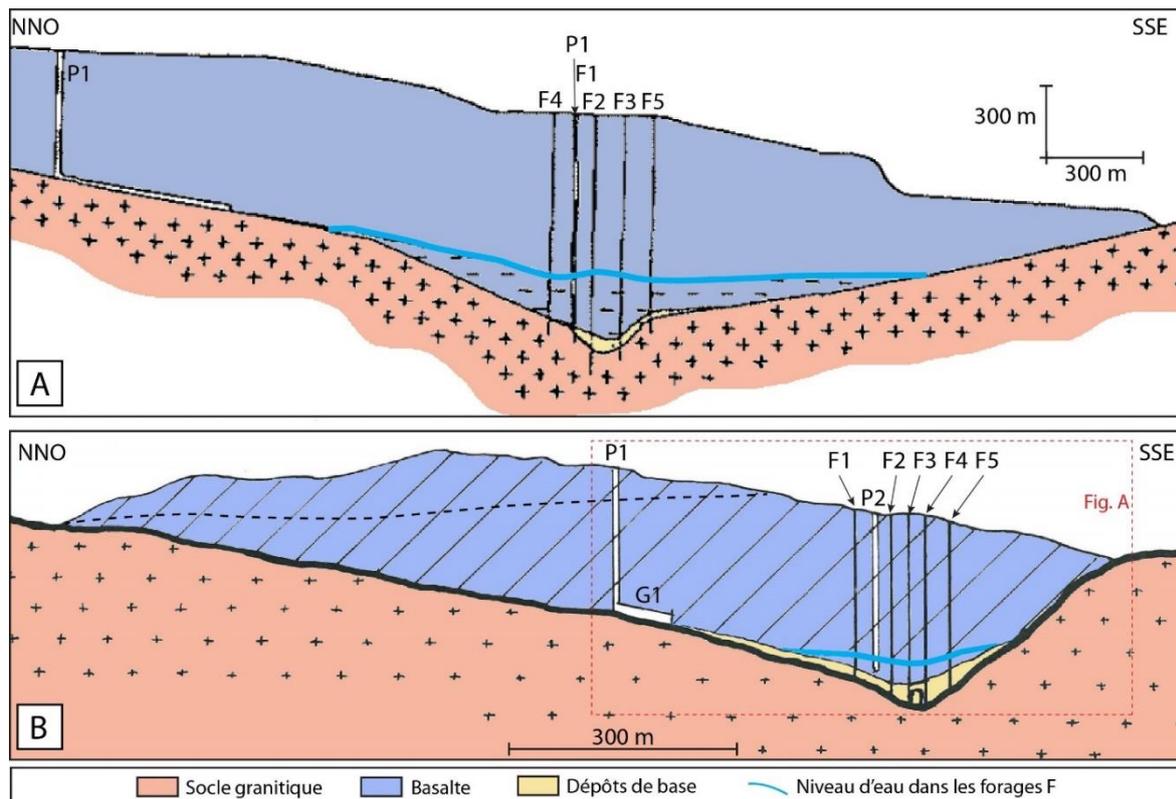


Figure 5 : Coupe schématique de la coulée de Louchadière au droit du secteur le plus amont de la galerie, A = d'après Auriat (1957) et B = d'après S.I.A.E.P Sioule et Bouble (1968). P1 et P2 représentent la position de deux puits et G1 une galerie de 90 m percée à partir du fond de P1. F1, F2, F3, F4 et F5 représentent la position de 5 forages dans lesquels la hauteur du niveau d'eau est représentée en bleu.

b) Données de forage en BSS

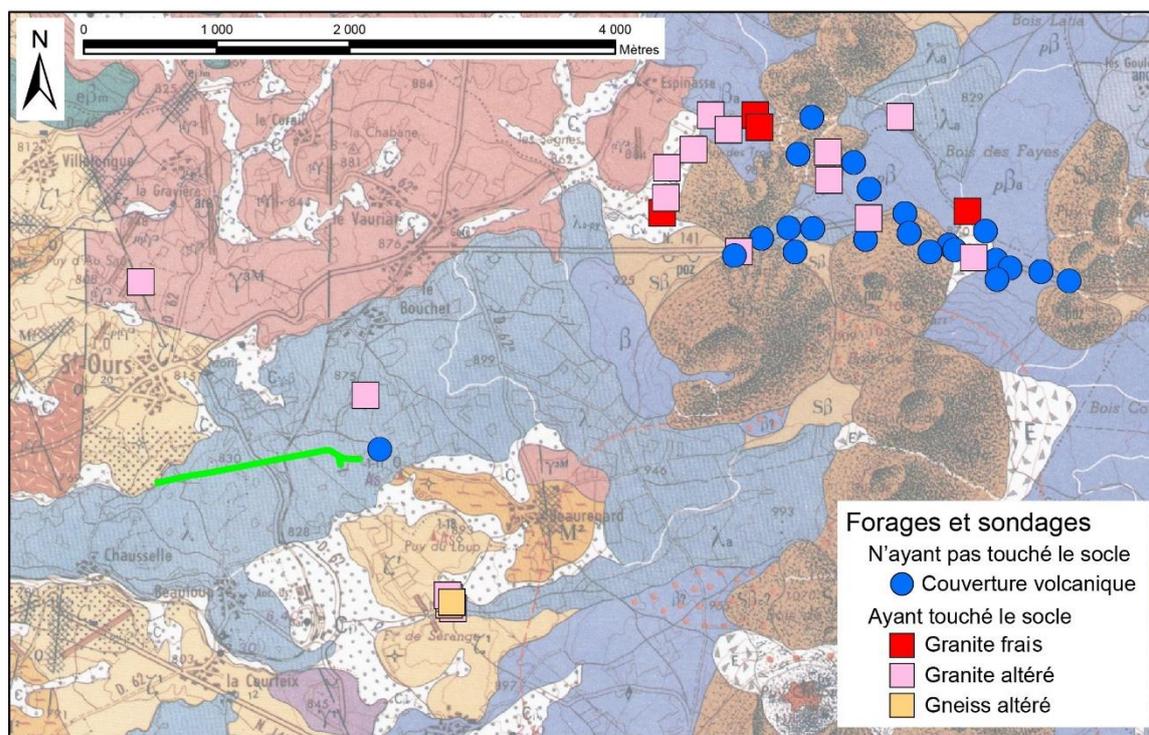
La compilation des données de forage disponibles dans la Base de données du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM a permis de retrouver 43 forages sur le secteur d'étude, dont 21 traversent entièrement la couverture volcanique pour atteindre le socle (Figure 6). La répartition n'est pas homogène et la plupart des sondages se situent en limite Nord-Est de la zone d'étude, dans le secteur investigué pour le dossier d'étude du fuseau nord du tracé du projet d'autoroute Périgueux / Clermont-Ferrand (CETE, 1988).

Les logs de ces forages ont été recodés de manière à en tirer une information géologique harmonisée selon 10 lithologies différentes : les colluvions basaltiques, les altérites de gneiss, les altérites de granite, les granites, les niveaux volcano-clastiques trachytiques, les retombées basaltiques scoriacées (lapillis), les brèches scoriacées basaltiques, les basaltes massifs, les dépôts de type maar (phréatomagmatiques) et les sables. Notons que le terme « basaltique » est ici employé dans son expression la plus générale, et n'a pas vocation à définir la chimie de la lave décrite dans le log de forage. De plus, les forages étant généralement destructifs, il est parfois difficile de distinguer de manière optimale les niveaux volcano-clastiques, lavés et en partie perdus dans les cuttings.

Ces logs de forages aux lithologies harmonisées ont pu être affichés dans le modèle 3D de traitement des données électromagnétiques (EM) du levé AérOvergne et utilisées de manière à :

- Interpréter de manière géologique et/ou hydrogéologique les variations de résistivité observées dans les coupes électromagnétiques ;

- Caler la profondeur de l'interface socle/couverture volcanique sur les forages le permettant ;
- Interpréter de manière croisée les données géologiques de surface, les données des logs de forage et les données aéro-géophysiques.



c) Figure 6 : Compilation des données de forages et sondages (Logs) disponibles en BSS pour le secteur de la zone d'étude. Les sondages ayant touché le socle apparaissent sous la forme d'un rectangle avec la lithologie associée. Les sondages n'ayant rencontré que la couverture volcanique apparaissent sous la forme de ronds bleus. Le trait vert correspond au tracé de la galerie Reconnaissances géologiques de terrain

Les reconnaissances géologiques menées dans le cadre de ce projet avaient pour but de **caractériser, si possible, les anomalies aérogéophysiques** susceptibles d'avoir des impacts sur les connaissances géologiques de la zone d'étude.

Nous nous sommes ainsi concentrés sur un secteur situé entre Beauregard, le Bouchet et le cône de Louchadière (Figure 7), qui présentait une **signature aérogéophysique compatible avec une zone de socle** (signal magnétique relativement faible, signal radiométrique fort en U, K, et Th) alors que la carte géologique figurait la **présence de basalte** (au signal aérogéophysique généralement fort en magnétisme et appauvri en radiométrie) recouvert çà et là par les dépôts pyroclastiques trachytiques plus récents provenant de l'explosion du Puy Chopine (Boivin *et al.*, 2017). Si la présence de lave trachytique, bien plus riche en potassium (K) que le trachybasalte du volcan de Louchadière, pourrait en partie au moins expliquer l'anomalie radiométrique, l'anomalie magnétique reste quant à elle problématique et doit être investiguée avec attention sur le terrain.

Comme présenté sur la Figure 7, **treize affleurements** ont pu être étudiés dans le secteur ciblé (les coordonnées GPS des points sont données en annexes). La grande majorité des points d'observation sont en **parfait accord avec les cartes géologiques disponibles** (Jeambrun *et al.*, 1973 ; Boivin *et al.*, 2017) et montrent la présence d'une **coulée de lave trachybasaltique**

recouverte par une couche trachytique dont l'épaisseur et la taille des fragments augmente à mesure que l'on se dirige vers le Sud de la zone d'étude (Figure 8).

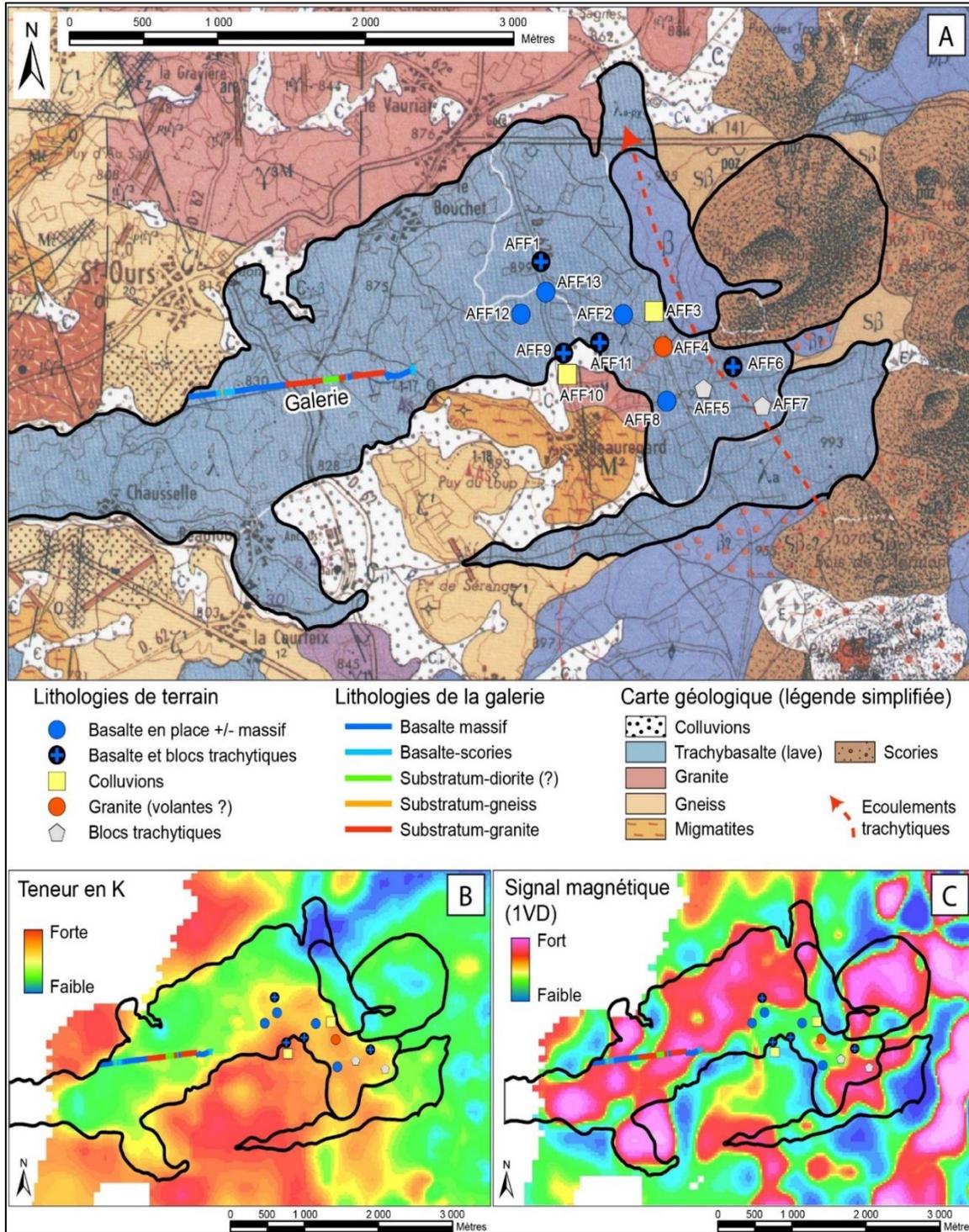


Figure 7: A = Carte géologique de la zone d'étude (Jeambrun et al., 1973) sur laquelle sont reportés les points d'observation terrain (AFF1 à 13) et la géologie de la galerie de captage. Figurent aussi le tracé des écoulements pyroclastiques trachytiques (flèche rouge, d'après Boivin et al., 2017) et le contour des grands ensembles volcaniques de la zone d'étude (trait noir en gras). Les points d'observations terrain et les principaux contours géologiques sont aussi reportés, pour l'exemple, sur des cartes des données radiométriques (B) et magnétiques (C)



Figure 8 : Photographies de terrain dans la zone d'étude. A : coupe montrant le dos de la coulée de Louchadière, bréchifiée, sur laquelle repose un sol de 50 cm d'épaisseur au sein duquel on trouve un fin niveau volcanique trachytique provenant de l'explosion du Puy Chopine. B : exemple de roches volantes de granite trouvées au niveau du point d'observation AFF4. C : fossé fraîchement creusé exposant de gros blocs de lave trachytique provenant de l'explosion du Puy Chopine.

Deux points d'observation sont cependant particulièrement intéressants pour la présente étude : les affleurements AFF3 et AFF4 montrent en effet tous deux la **présence de fragments granitique en surface**, sous la forme de petits clastes mélangés à des clastes volcaniques dans des colluvions pour AFF3 ou sous la forme d'un amas de **blocs décimétriques à métrique** en bordure de champ pour AFF4 (Figure 7 et Figure 8). Ces fragments granitiques, bien que remaniés par l'homme pour le AFF4 (pierrier de roches extraites des champs pour faciliter la culture) semblent cependant indiquer la **présence d'un pointement de socle dans ce secteur**, qui, bien que potentiellement recouvert par une fine couche de matériaux volcaniques, est cependant **suffisamment proche de la surface pour alimenter des colluvions et / ou libérer des volantes granitiques** dans les champs.

Ces observations de terrain viendraient ainsi valider les données aérogéophysiques indiquant la possible présence de socle très proche de la surface au Sud de la zone d'étude (Figure 7 B et C), ce qui apporte des **contraintes nouvelles** quant au contexte géologique du bassin versant étudié (voir Chapitre 3 pour l'interprétation).

2.2.3. A l'échelle de la galerie de captage

La galerie de captage est un **ouvrage sous-terrain rectiligne** de près de 1680 m de longueur se divisant en deux branches en forme de « Y » à partir de la cote 1644 m. De **nombreux relevés géologiques** y ont été effectués au cours du temps, que ce soit pour mieux comprendre l'agencement des terrains (Journet, 1969), définir des périmètres de protection (d'Arcy, 1987) ou, plus récemment, vérifier la stabilité de l'ouvrage (Cete-LRPC, 2006).

Les documents bibliographiques soulignent qu'au niveau du captage, les arrivées d'eau dans la galerie se font principalement sur le flanc nord, à l'**interface entre le substratum** (généralement qualifié de « granite ») **altéré et le basalte** plus ou moins massif.

Cette interface est composée de tout ou partie, selon les endroits, d'un **ensemble constitué de quelques décimètres d'alluvions grossières peu évoluées** représentant les paléo-matériaux présents dans le fond du talweg, et d'un **niveau décimétrique à métrique de cendres ou de brèches basaltiques** (il s'agit sans doute là, à la fois d'un **saupoudrage de lapillis** pré-coulée issus des premiers soubresauts de l'éruption de la Louchadière, et d'un niveau assez fin de **brèche de progression** liée à la mise en place de la coulée elle-même).

La visite réalisée dans le cadre du présent projet visait à reconnaître les **grandes lithologies** rencontrées sur le tracé de la galerie, ainsi que leur état d'altération et de fracturation général, de manière à **apporter des éléments de calage pour les données aérogéophysiques**. Pour ce faire, les observations effectuées le long de la galerie ont été « **géoréférencées** » sur la base des repères et relevés effectués par le Cete-LRPC en 2006 (Figure 7).

Les principales lithologies rencontrées sont :

- Un petit affleurement de **gneiss très altérés** ; de type saprolites argileuses, à la **structure interne** (foliation) bien marquée, et recouverts par quelques décimètres de colluvions puis par la semelle scoriacée de la coulée (Figure 9 A). Cet affleurement montrant le contact entre la coulée et son substratum gneissique, est précédé et suivi par une zone assez importante de **basalte bréchique**, marquant sans doute le fait que la galerie ait été tracée ici à la base de la coulée, dans le niveau de **semelle scoriacée** de la coulée.
- De longues zones où affleure du **granite**, montrant d'**importantes variations latérales de faciès**, entre un granite **très altéré et argilisé** et un granite **massif et sain**. Ce granite est recoupé par de nombreuses **zones de failles argilisées** et / ou de **filons de quartz blanc** (Figure 9 B). Les directions de ces discontinuités sont variées et les mesures effectuées lors de la visite ont donné des valeurs comprises entre N040° et N130° selon les secteurs.
- Un secteur réduit où semble affleurer une roche plus sombre, plus riche en minéraux ferro-magnésiens, et qui pourrait être de type **dioritique**, en enclave au sein du granite.
- De vastes secteurs où le **basalte massif** de la coulée présente un débit en **dalles sub-horizontales** (plutôt au début de la galerie) ou en une magnifique **prismation verticale aux colonnes métriques** à décimétriques (Figure 9 F).
- Une zone de captage, caractérisée par une **asymétrie marquée de la paléovallée** entre les branches Nord (peu pentée, ~20°) et Sud (fort pendage, ~45°) du « Y » terminal de la galerie, exposant le **contact entre la coulée de Louchadière et son substratum granitique, très altéré et argilisé** (Figure 9 C, D, E). Le basalte massif de la coulée est séparé du socle altéré par un niveau de **semelle scoriacée** (brèche de progression), un niveau de **lapillis fins** (probables saupoudrage de retombées volcaniques aériennes), un niveau de **colluvions** (branche Nord) ou d'**alluvions immatures** (branche Sud).

Ces observations sont fidèles aux travaux antérieurs (Journet, 1969 ; Cete-LRPC, 2006).

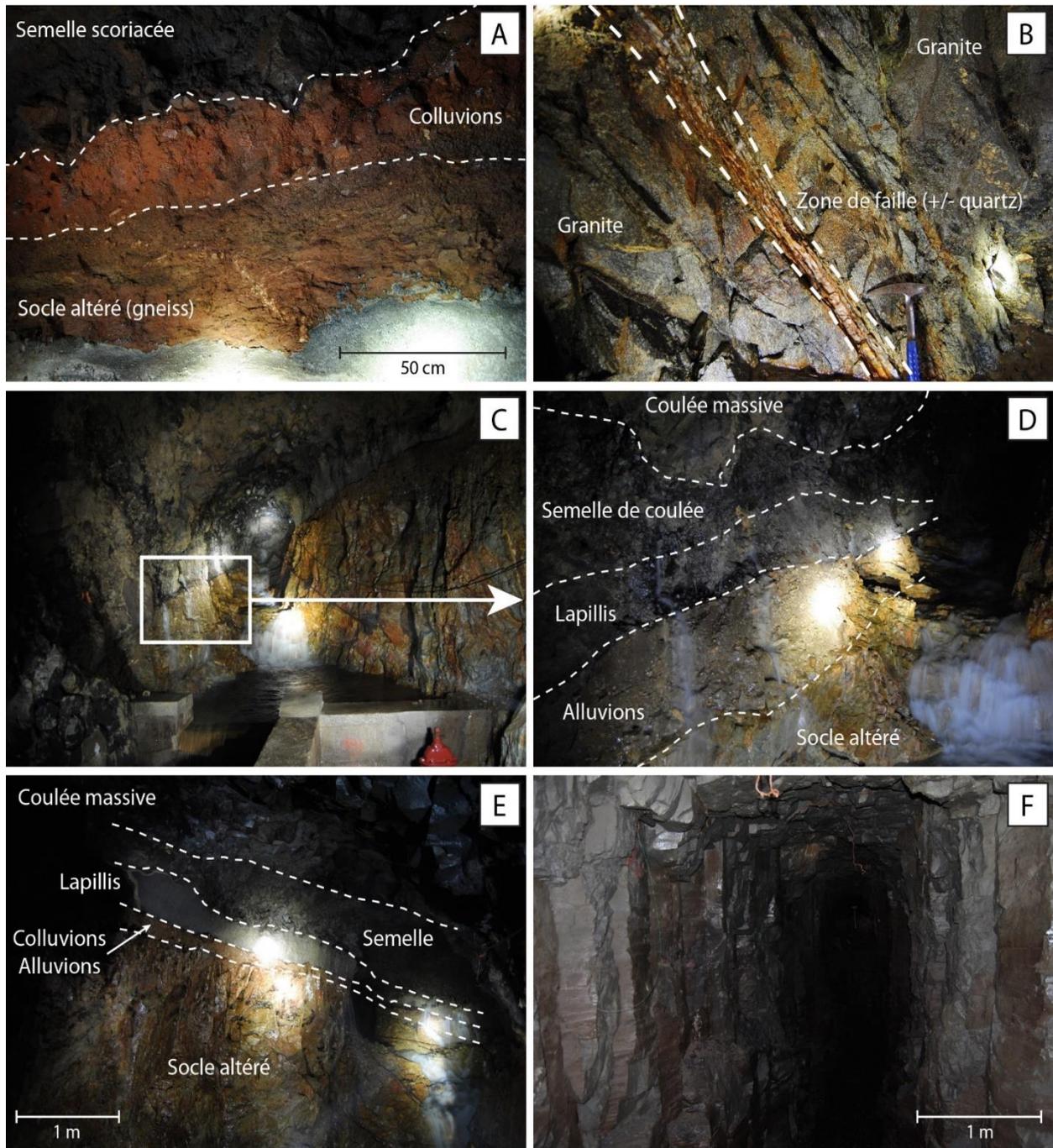


Figure 9 : Photographies de différents secteurs de la galerie de captage de Louchadière, visite du 15/02/2021. A : exemple de contact entre la semelle de la coulée et le socle gneissique altéré (saprolites), avec quelques décimètres de colluvions rubéfiées (côte ~ 245 m). B : Zone de faille dans le granite (côte ~ 800 m). C : Branche Sud du « Y », contact et venues d'eau entre la semelle scoriacée de la coulée, une couche de lapillis, les alluvions immatures et le socle altéré (zoom en D). E : branche Nord du « Y », montrant une géométrie similaire à C, avec une pente moins prononcée et l'absence d'alluvions stricto-sensu, remplacées par des colluvions. F : prismation de la coulée dans la partie terminale de la galerie, juste avant le « Y ».

Signalons enfin que les zones de contact entre la coulée et le substratum correspondent à des zones hétérogènes qui, par définition, sont les plus instables : elles ont donc fait l'objet d'une mise en sécurité et sont le plus souvent bétonnées. Les affleurements sont ainsi perdus.

2.3. RECONNAISSANCES HYDROGEOLOGIQUES

2.3.1. Hydrogéologie du massif de la Chaîne des Puys

La Chaîne des Puys est depuis longtemps reconnue comme une barrière orographique majeure bloquant les masses d'air océaniques humides poussées par les vents d'Ouest, et favorisant ainsi les précipitations sur le versant Ouest de ce relief volcanique. En effet, la Chaîne des Puys, par sa disposition perpendiculaire au sens de déplacement des perturbations océaniques, génère un effet de foehn qui induit une inégalité de pluviométrie entre le versant Ouest et le versant Est et qui se poursuit jusque dans la grande Limagne.

A ce déséquilibre Est/Ouest, il convient d'intégrer un effet d'altitude marqué : la pluviométrie annuelle moyenne mesurée à la station de Pontgibaud (671 m d'altitude) sur la période 1985-1995 par exemple a été de 855 mm, tandis que les sommets ont une pluviométrie voisine de 1000 mm (Geopal, 1996 ; Livet, 1999 ; Joux, 2002, Rouquet, 2012).

Les **formations granito-gneissiques** du plateau des Dômes peuvent contenir au sein de l'horizon altéré, des nappes de faibles extensions dont les exutoires (sources) donnent naissance à de petits cours d'eau. Lorsque la configuration topographique le permet, ces derniers ainsi que les eaux de ruissellement peuvent s'infiltrer sous les formations volcaniques et rejoindre l'aquifère sous-basaltique. Ce sont ces apports latéraux et les écoulements au sein des altérites présentes dans les paléovallées (paléotalwegs) qui sont à l'origine des concentrations importantes en arsenic que l'on peut mesurer dans certains captages de la Chaîne des Puys.

D'une manière générale, les **matériaux volcaniques** ont une perméabilité importante qui se traduit par l'absence de réseaux hydrographiques à leur surface. La quasi-totalité des précipitations s'y infiltrent verticalement jusqu'au paléorelief granito-gneissique. A son contact, l'eau va s'écouler jusqu'aux points bas des paléotalwegs où les nappes se créent à l'interface entre les formations volcaniques et les formations du socle. Le transfert de l'eau se fait ensuite de manière plus ou moins sub-horizontale, en suivant la pente du relief ante-volcanique. Les exutoires des nappes apparaissent en front de coulées et forment des sources abondantes qui se caractérisent souvent par une assez grande régularité temporelle de leur débits (Barbaud, 1983 ; Bouchet, 1987 ; Livet, 1999 ; Bertrand, 2009).

Le schéma de circulation des eaux souterraines au droit de la Chaîne des Puys est donc conditionné par le paléorelief granito-gneissique qui constitue le substratum imperméable des aquifères.

Or, la plus grande partie de ce paléorelief est masquée par les formations volcaniques. Seuls subsistent çà et là des pointements du socle qui permettent de définir localement des lignes de crêtes et donc de déterminer très localement des limites de partage des eaux de surface.

Sur la base de ces éléments topographiques et du calcul de bilans hydrologiques sur les principales émergences¹, plusieurs auteurs ont essayé de définir les grands bassins hydrogéologiques de la Chaîne des Puys. L'intégration de données géologiques des coupes de forages et des sondages géophysiques ont permis d'affiner les contours de certains bassins et de préciser les principaux axes d'écoulements des nappes au sein de ces derniers. (Belkessa, 1977 ; Barbaud, 1983 ; CETE-BRGM, 2009 ; Joux, 2002 ; Rouquet, 2012 ; Boivin *et al.* 2017). La

¹ Le débit des sources étant lié aux précipitations efficaces, il est par conséquent possible de calculer la surface du bassin d'alimentation nécessaire à l'obtention du débit mesuré

Figure 10 présente les contours schématiques des dix principaux bassins hydrogéologiques : 4 sur le versant Ouest et 6 sur le versant Est (Boivin *et al.*, 2017).

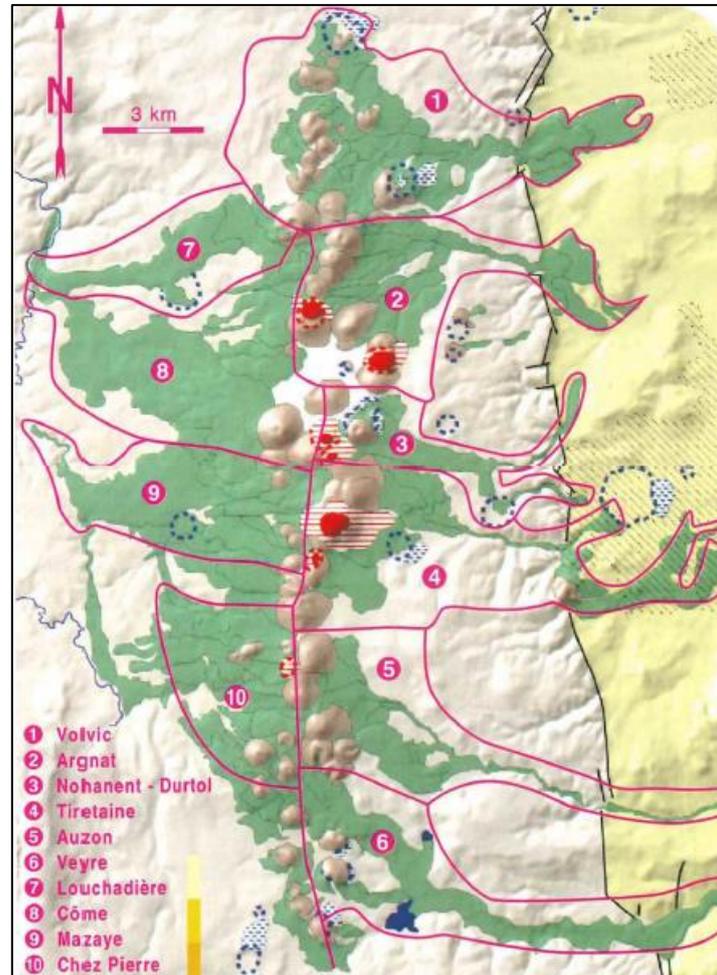


Figure 10 : Limites schématiques des dix principaux bassins hydrogéologiques du massif volcanique de la Chaîne des Puys (source : Boivin *et al.*, 2017)

Dans le détail, la circulation de l'eau souterraine dans les formations volcaniques est plus complexe et chaque bassin possède souvent un type de fonctionnement qui lui est propre.

En effet, les formations volcaniques présentent une structure géologique fréquemment très hétérogène, que ce soit :

- A l'échelle cartographique : la dynamique de mise en place de ces formations concourt à une forte variabilité spatiale, latérale et verticale. Des formations perméables et imperméables peuvent coexister à cette échelle ;
- A l'échelle d'une formation donnée : au sein d'une même paléovallée, les laves sont fréquemment interstratifiées avec des formations pyroclastiques plus perméables. Le forage du Suc de la louve dans le bassin de Volvic par exemple, a recoupé sept coulées de laves séparées chacune par des niveaux de scories ;
- A l'échelle d'un même ensemble lithologique considéré globalement comme perméable, coexistent des niveaux très perméables et d'autres moins perméables voire quasi

imperméables. C'est notamment le cas des coulées basaltiques dont les pourtours présentent un faciès scoriacé susceptible très perméable, tandis que les parties centrales plus massives souvent diaclasées (fissures de refroidissement) sont plutôt imperméables. Ces niveaux ou formations peu perméables, ainsi que les pendages originels parfois forts des coulées, peuvent générer une structure en « tuiles » (Lachassagne et Maréchal, 2004). Cela se traduit par des circulations locales perchées au toit des coulées qui alimentent en cascade les circulations sous-jacentes, soit au niveau de discontinuité telles que les fissures de refroidissement soit en limite d'extension de l'horizon imperméable (Stieltjes *et al*, 1988).

A l'hétérogénéité des formations volcaniques se conjugue des propriétés hydrodynamiques très différentes. En effet, les cônes de scories, les niveaux scoriacés du toit et de la base des coulées, et les formations pyroclastiques présentent une perméabilité d'interstices alors les laves se caractérisent par leur perméabilité de fissures. Cette dualité a des conséquences sur les vitesses de circulation de l'eau. Bouchet (1987) a ainsi montré que des réseaux de fissures importants dans les coulées basaltiques du bassin de la Veyre pouvaient permettre des vitesses de 70 km/h. Les projections pyroclastiques scoriacées quant à elles, sont reconnues pour le rôle de réservoir régulateur. Barbaud (1983) a estimé que le temps de renouvellement moyen y est compris entre 2,5 ans et 4 ans. L'infiltration au droit des cônes de scories des édifices volcaniques n'y est toutefois pas saturante : aucune nappe ne se met en place à ce niveau mais compte tenu du volume qu'ils constituent, ces derniers constituent une partie non négligeable de la réserve (Joux, 2002). Cette dualité de fonctionnement a également des conséquences sur la vulnérabilité des aquifères : les formations affectées d'une perméabilité d'interstices permettront une meilleure filtration des contaminants que les horizons fissurés.

Ainsi qu'il a été vu plus haut, les paléotalwegs drainent l'essentiel des écoulements souterrains. Toutefois ceux-ci sont concentrés sur de petites surfaces au regard de l'étalement des coulées visible à l'affleurement ce qui rend difficile la recherche d'eau par forage. Les travaux de reconnaissance pour le captage de Sérange (commune de St-Ours-les-Roches) par exemple ont révélé que la nappe n'excède pas 28 m de large pour une largeur de coulée de 120 m (D'Arcy *et al*, 1990), à Côme le rapport est de 450 m de nappe pour 2 km de coulée (Livet, 1999).

Il convient d'ajouter à cette description le rôle important que peuvent avoir des structures comme les maars ou les intrusions de type dyke notamment, qui en recoupant les autres formations volcaniques peuvent complexifier les écoulements souterrains. Les dykes peuvent contribuer à un compartimentage des aquifères ou, dans certains cas à conférer une certaine perméabilité à des ensembles peu perméables (Lachassagne et Maréchal, 2004). Les maars quant à eux peuvent constituer des réservoirs aquifères pouvant comporter plusieurs nappes superposées. Dans certains cas, il est possible d'observer une stratification physico-chimique des eaux souterraines. Le maar d'Enval (bassin de la Tiretaine) par exemple comporte une nappe dont le niveau supérieur (30-120 m de profondeur) est régulièrement renouvelé et qui est utilisé pour l'AEP. Au-delà de 150 m de profondeur, les études ont montré que l'absence de renouvellement conduisait à une qualité qui n'est pas compatible avec l'alimentation humaine (Livet, 2020).

Les processus d'altération (météoritique et hydrothermale) contribuent également à l'hétérogénéité de ces milieux en participant à la diminution de la perméabilité des roches, principalement du fait de leur argilisation et de la précipitation de minéraux secondaires (Lachassagne et Maréchal, 2004).

2.3.2. La galerie de captage de Louchadière

Dès 1947, il a été envisagé de rechercher de l'eau dans la grande cheire de Louchadière. La zone de prospection a été choisie pour répondre à la fois à un objectif qualitatif (absence de sources de contamination potentielle) et surtout de manière à pouvoir distribuer l'eau de manière gravitaire, c'est pourquoi il a été décidé qu'il fallait effectuer le captage de l'eau à la cote minimale de 820 m (Journet, 1969).

Les travaux ont débuté par des investigations géophysiques au sol qui avaient pour objectifs de déterminer l'allure du profil de la paleovallée, l'épaisseur et la structure du remplissage volcanique, l'état du substratum et, le profil en long des coulées et du paléotalweg (Journet, 1969). Des sondages mécaniques ont ensuite été implantés pour valider les résultats des recherches géophysiques (Auriat, 1957).

Les différents sondages ont montré qu'au droit de l'extrémité amont de la galerie (parties captantes) se trouve **une paléovallée fortement dissymétrique** : le flanc Sud est beaucoup plus pentu que le flanc nord. Il est à noter que lors de la création de la galerie, une galerie transversale orientée vers le Sud-Est a été réalisée pour vérifier la position du flanc Sud. Cette dernière, d'une longueur de 80 m, est située à 1430 m de l'entrée et à 370 m en aval dans des branches terminales captantes (Figure 11). Un puits creusé à 70 m de l'embranchement des 2 galeries a permis d'atteindre le fond du paléotalweg à la profondeur de 7 m.

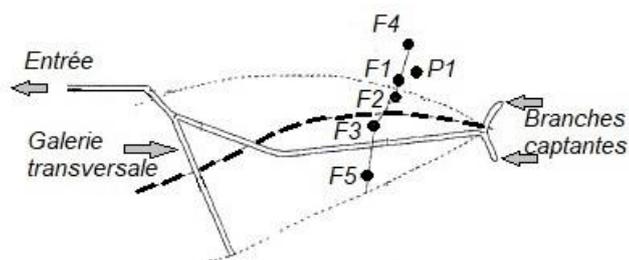


Figure 11 : Schéma de la partie amont de la galerie de captage de Louchadière (Auriat, 1957 modifié). Les tirets longs schématisent l'axe du paléotalweg, les tirets courts correspondent aux limites de la coulée. F1 à F5 et P1 sont respectivement des forages de reconnaissance et un puits réalisés pour reconnaître la paléovallée.

Deschamps (1986) a envisagé l'existence d'une seconde paléovallée plus ou moins parallèle à la paléovallée reconnue par les forages. Cette hypothèse n'a été reprise dans aucune des études postérieures (D'arcy, 1987 ; Mercier, 1994, Livet, 1999).

Les études accompagnant la création de la galerie ont révélé que le niveau piézométrique s'établissait à une profondeur de 56-57 m, donnant une **épaisseur saturée de 10 m maximum**. La largeur de la nappe est de l'ordre d'une centaine de mètres.

Tous les auteurs s'accordent sur le fait que la paléovallée dans laquelle est située la galerie est **orientée vers l'Ouest**, en direction du volcan de Louchadière. Au droit, de la partie captante, la nappe circule à l'interface entre le socle et la base d'une unique coulée de basalte d'une soixantaine de mètres d'épaisseur. Les observations réalisées dans le cadre de cette étude (cf. paragraphe 2.2.3.) et la bibliographie soulignent l'existence d'un horizon alluvial/colluvial peu développé surmontant le socle. Les écoulements souterrains se concentrent dans cet horizon et à la base de la coulée.

D'Arcy (1987) a relevé, dans le secteur où la galerie recoupe le granite, des suintements vers 900-920 m² ainsi qu'une petite venue d'eau continue vers 1170 m. Ces observations attestent de l'existence de circulations souterraines dans l'horizon altéré du socle.

Outre le fait que la paléovallée soit comblée par une unique coulée de lave au droit de la zone captante, la galerie de Louchadière se singularise également par une **grande irrégularité de son débit**.

Manifestement surestimé au démarrage des travaux (un débit de 650 l/s était espéré), il a été constaté dès 1956-1957, que le débit fluctuait de 80 l/s à 110 l/s (Journet, 1969). Le rapport Géopal (1996) présente une compilation des mesures effectuées entre 1962 et 1991. Son examen permet de constater la variation des débits instantanés, avec un minimum mesuré le 31/01/90 de l'ordre de 29 l/s et un maximum de 166 l/s le 24/03/1988. Livet (1999) et Géopal (1996) relie le débit de base de l'aquifère aux réserves contenues dans les projections scoriacées et dans le cône de scories du volcan de Louchadière. Les fluctuations à l'échelle annuelle sont pour Livet (1999), le résultat d'infiltrations plus rapides au droit de la coulée et sur ses bordures.

Il n'existe pas de consensus sur la position de la galerie dans le paleotalweg : D'Arcy (1987) considère que l'ensemble de la galerie ainsi que les zones productives sont situés sur le flanc Nord et non à l'aplomb de la paléovallée. Livet (1999) estime quant à lui que la galerie s'achève au cœur du paléotalweg, vraisemblablement à quelques mètres de celui-ci.

Des divergences perdurent également entre auteurs sur les limites amont du bassin d'alimentation de la galerie.

² Distance depuis l'entrée de la galerie

3. Interprétation des données

3.1. DONNEES AEROGEOPHYSIQUES

3.1.1. Magnétisme

a) *Analyse en carte du magnétisme*

L'application d'autres transformations mathématiques – de type gradient - à la RAP présentée précédemment, permet d'affiner la vision cartographique des coulées volcaniques qu'intercepte la galerie de la Louchadière.

En Figure 12 sont présentés le gradient horizontal de la RAP et le tilt derivative. Ces deux transformations font à la fois ressortir plus de détails et amplifient l'effet des sources superficielles par rapport à celles en profondeur. Le gradient horizontal en particulier marque les bordures des corps géologiques magnétiques. La valeur « zéro » du tilt derivative (liseré noir sur la carte) marque également en principe la bordure des corps géologiques magnétiques.

Ces deux cartes transformées fournissent une vision un peu différente, mais cohérente, de l'emprise de la coulée volcanique qu'intercepte la galerie de la Louchadière (on utilise ici le terme « la coulée », mais qui constitue en fait un empilement de coulées volcaniques successives).

La coulée s'allonge selon un axe SO-NE, limitée au Nord par les formations de socle depuis St Ours jusqu'à Le Vauriat et s'appuie au Sud sur le haut de socle de Beauregard. Au NE, en première analyse, la coulée paraît se terminer en direction des Sagnes, déconnectée du volcan de la Louchadière. Au SO, la coulée semble se dédoubler, un chenal aboutissant à la structure pseudo-circulaire de Beauloup, l'autre rejoignant Chausselle.

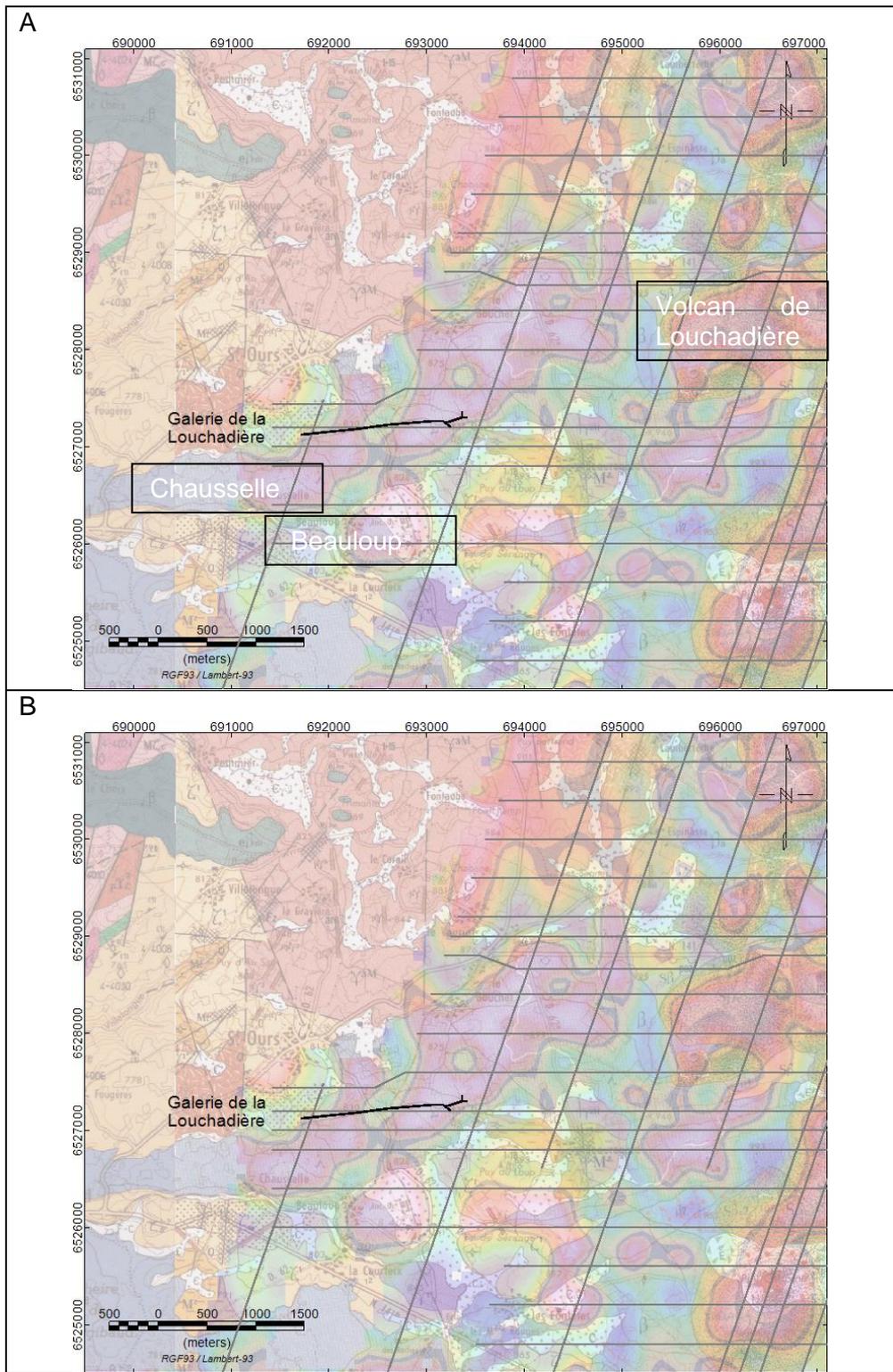


Figure 12 : A : gradient horizontal de la RAP, B : tilt dérivée de la RAP. Les deux cartes font ressortir les bordures des corps magnétiques « superficiels » de façon cohérente, les coulées volcaniques traversées par la galerie de Louchadière s’allongent suivant un axe SO-NE.

Pour figurer de manière plus précise les limites de cet épanchement volcanique, une analyse structurale semi-automatique a été mise en œuvre sur la carte magnétique (Figure 13).

Ce traitement permet, par un calcul mathématique objectif, de souligner les bordures des principaux corps géologique magnétiques. L'emprise de la coulée décrite précédemment est confirmée. Son architecture interne se précise suivant une chenalisation apparente. La terminaison SO en deux branches se marque également, en direction de la structure pseudo-circulaire de Beauloup d'une part et de Chausselle d'autre part.

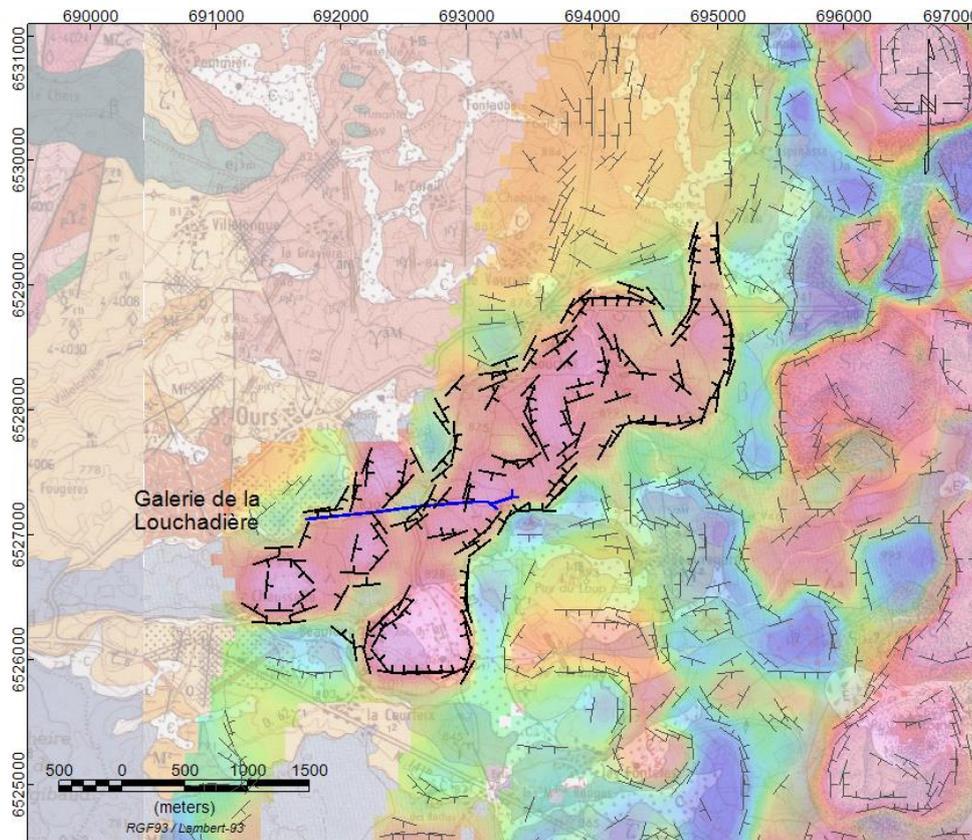


Figure 13 : Analyse structurale semi-automatique de la carte magnétique (figurés noirs) qui permet de délimiter de façon numérique, objective, les bordures des principaux corps magnétiques de la carte. Les limites de la structure magnétique correspondant à la coulée volcanique traversée par la galerie de Louchadière sont figurées de façon plus soutenue

b) Modélisation du magnétisme

En complément de leur analyse cartographique, les données aéromagnétiques peuvent être modélisées, c'est-à-dire qu'elles vont permettre d'étudier les géométries en profondeur des corps géologiques caractérisés par leurs propriétés magnétiques. Plusieurs approches de modélisation existent, directe ou inverse, qui permettent de façon plus ou moins automatique de restituer des géométries en 2D ou 3D du sous-sol.

Nous présentons ci-après des résultats de modélisation magnétique directe le long de 3 coupes dans la zone de la galerie de Louchadière. En modélisation directe, un interpréteur met en place des géométries géologiques dans le sous-sol suivant les informations dont il dispose (carte géologique, forages, etc.) et déforme progressivement ces géométries jusqu'à ce que leur effet magnétique (calculé par le logiciel) corresponde à la carte aéromagnétique.

Parmi les contraintes du modèle figurent la mesure des propriétés magnétiques des roches présentes sur la zone d'étude. Dans notre cas, il n'a pas été réalisé de mesures de susceptibilité magnétique de terrain, cependant, les propriétés magnétiques des principales formations

géologiques ont pu être approximées en cours de modélisation, grâce aux contraintes disponibles en forages. Les susceptibilités magnétiques utilisées sont résumées dans le Tableau 1. Il n'a pas été considéré d'aimantation rémanente dans la modélisation dans la mesure où la carte magnétique ne présentait pas de signatures notables traduisant ce type d'aimantation.

Type de roche	Susceptibilité magnétique (S.I.)
Volcanisme	0.17
Gneiss	0.003
Migmatites	0.00001
Granites	0.00001

Tableau 1 : Susceptibilités magnétiques des formations géologiques utilisées pour la modélisation des profils magnétiques.

Comme pressenti lors de l'analyse des cartes magnétiques, les formations volcaniques présentent des aimantations au moins deux ordres de grandeur supérieur à leur encaissant ; de ce fait, la modélisation est, en 1^{ère} approximation, essentiellement sensible à la géométrie du contact entre les laves et leur encaissant de socle, quelle qu'en soit la nature (gneiss, migmatites ou granite). De fait, dans les modèles présentés ci-après, la géométrie en profondeur des unités de socle est schématique, très mal contrainte, car les contrastes magnétiques entre formations de socle sont faibles. On a essentiellement contraint les contacts entre ces formations à partir de leur tracé en surface sur la carte géologique – que l'on a extrapolé sous le recouvrement des dépôts volcaniques.

La localisation des 3 profils modélisés A, B, C est présentée en Figure 14.

Outre la carte géologique – qui fixe la position des contacts géologiques en surface, deux puits P1 et P2 étaient disponibles à proximité de la galerie – également localisés en Figure 14 ainsi qu'une coupe géologique interprétative (Geopal, 1996) passant par ces deux puits (Figure 14 B). Le puits P1 atteint le toit du socle 37,5 m sous la surface et le puits P2 se termine dans les laves prismatiques à 63 m de profondeur, vraisemblablement à quelques mètres seulement du socle. Ces contraintes sont très fortes pour la modélisation et c'est donc le long d'un profil passant par ces 2 forages (Figure 15) qu'a débuté la modélisation – permettant notamment de caler les susceptibilités magnétiques des unités géologiques modélisées.

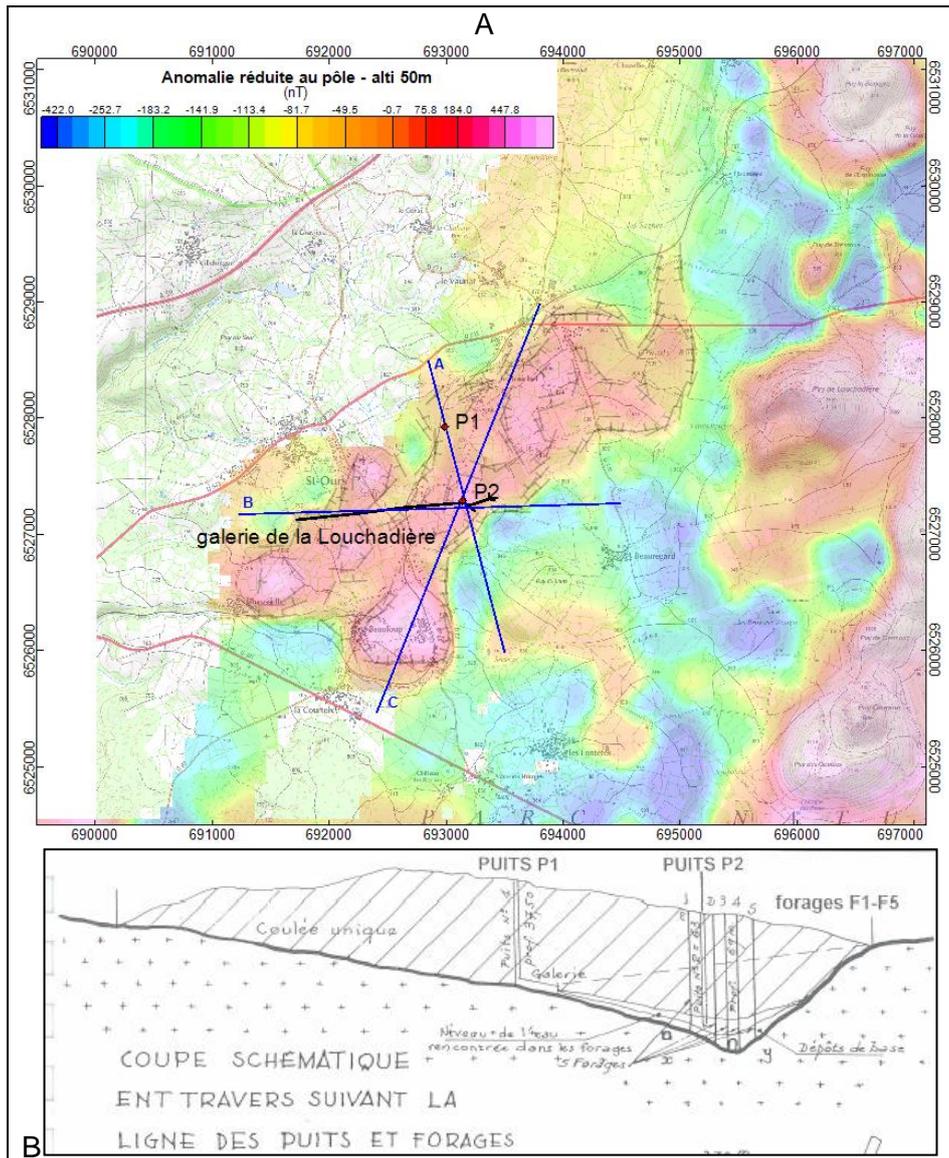


Figure 14 : A : localisation des profils magnétiques modélisés, sur fond d'anomalie magnétique réduite au pôle. B : coupe géologique interprétative le long du profil A (transversal à la paléovallée), dressée lors de la foration des puits P1 et P2 et des forages F1 à F5 d'après Auriat (1957), note : l'épaisseur de la coulée n'est pas à l'échelle. La localisation des forages F1 à F5 n'est pas précisément connue et ces ouvrages n'ont donc pas été utilisés.

Les 3 coupes magnétiques modélisées (Figure 15, Figure 16 et Figure 17) restituent des géométries géologiques relativement simplifiées (par exemple, elles ne prennent pas en compte les variations de faciès des formations géologiques), mais au premier ordre, elles représentent, notamment pour la géométrie de la base du volcanisme qui correspond au plus gros contraste d'aimantation, un modèle réaliste. D'autant qu'elles sont contraintes par les données de forage, la géologie de surface et dans la galerie.

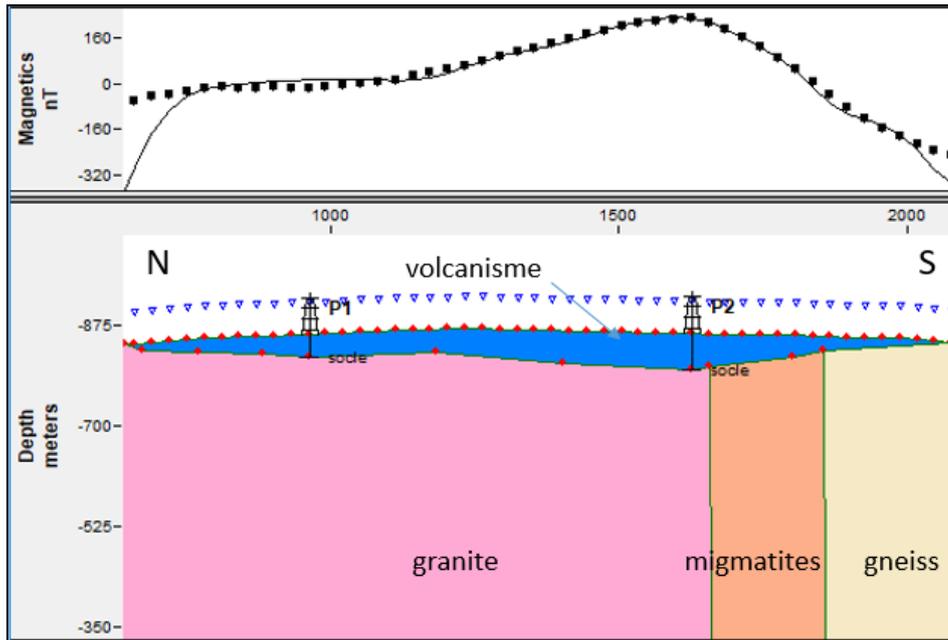


Figure 15 : Modélisation magnétique le long du profil A. Fenêtre du bas : modèle géologique (exagération verticale 1 :1), fenêtre du haut : données magnétiques (points noirs) à comparer à l'effet magnétique du modèle (trait noir). Cette coupe transversale à la paléovallée peut être mise en regard de la coupe géologique interprétative de la figure 14 B

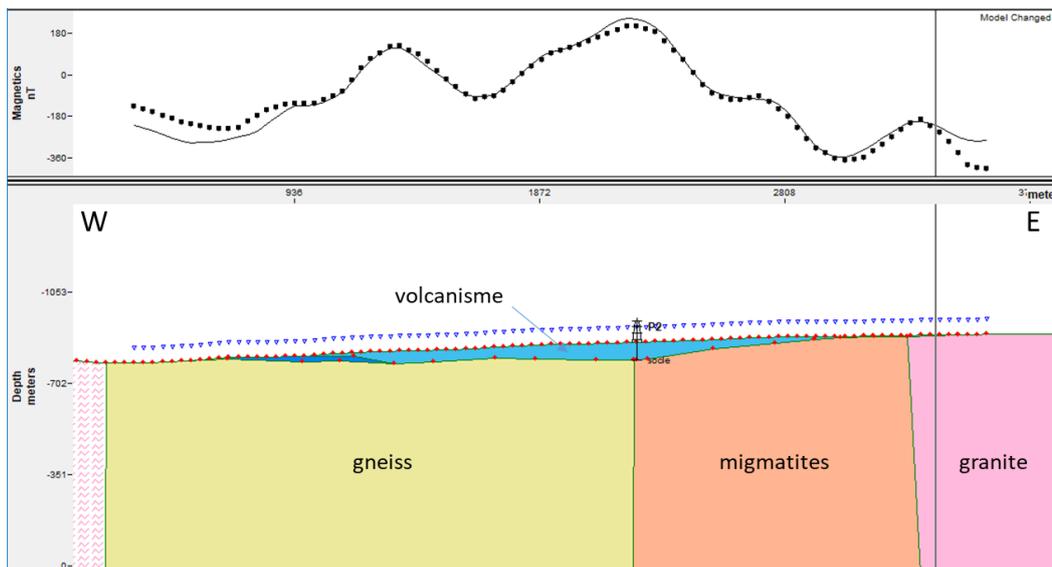


Figure 16 : Modélisation magnétique le long de la galerie de Louchadière (profil B). Fenêtre du bas : modèle géologique (exagération verticale 1 :1), fenêtre du haut : données magnétiques (points noirs) à comparer à l'effet magnétique du modèle (trait noir).

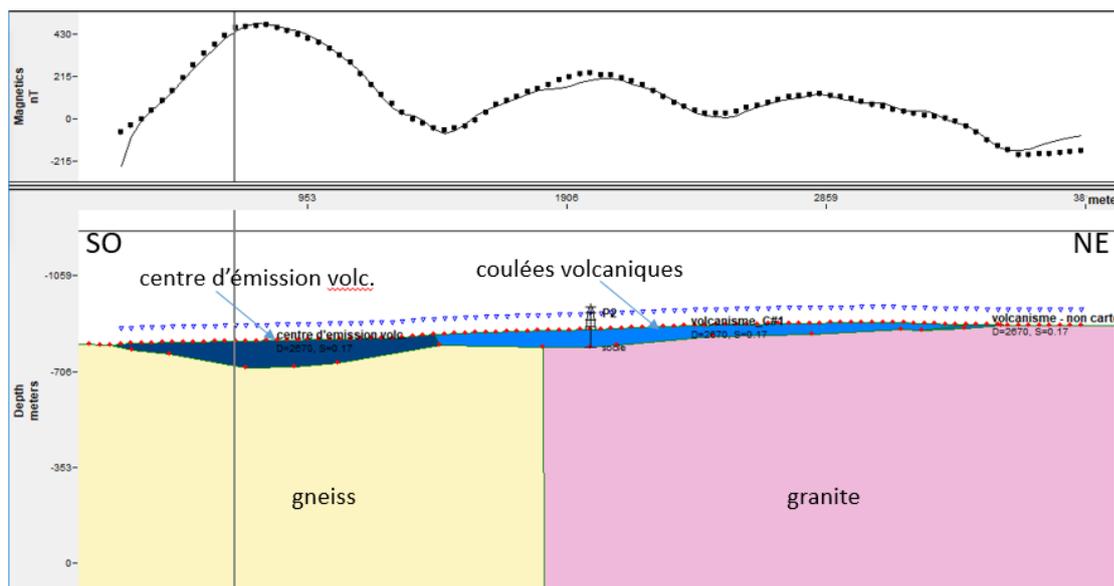


Figure 17 : Modélisation magnétique le long du profil C, longitudinal par rapport à la paléovallée . Fenêtre du bas : modèle géologique (exagération verticale 1 : 1), fenêtre du haut : données magnétiques (points noirs) à comparer à l'effet magnétique du modèle (trait noir).

Ces trois coupes montrent un épaissement maximal des dépôts volcaniques sur la zone modélisée de 70 mètres environ, avec des variations d'épaisseur très graduelles et des pentes plus marquées dans la direction NO-SE, ce qui est cohérent avec la direction d'allongement SO-NE des coulées, suggérée par l'étude préalable des cartes magnétiques.

Sur la base de ces résultats, la galerie de la Louchadière paraît donc positionnée à 130° environ par rapport à l'axe d'écoulement des laves et le captage paraît positionné proche de la partie la plus épaisse de ces coulées.

Afin de mieux qualifier ces résultats, ils seront confrontés à ceux obtenus indépendamment par exploitation des données électromagnétiques.

3.1.2. Electromagnétisme

Cette partie présente le travail d'interprétation réalisée sur les différentes coupes obtenues par électromagnétisme (EM). Pour cela, deux coupes sont prises en exemple. Elles sont présentées en rouge sur la Figure 18.

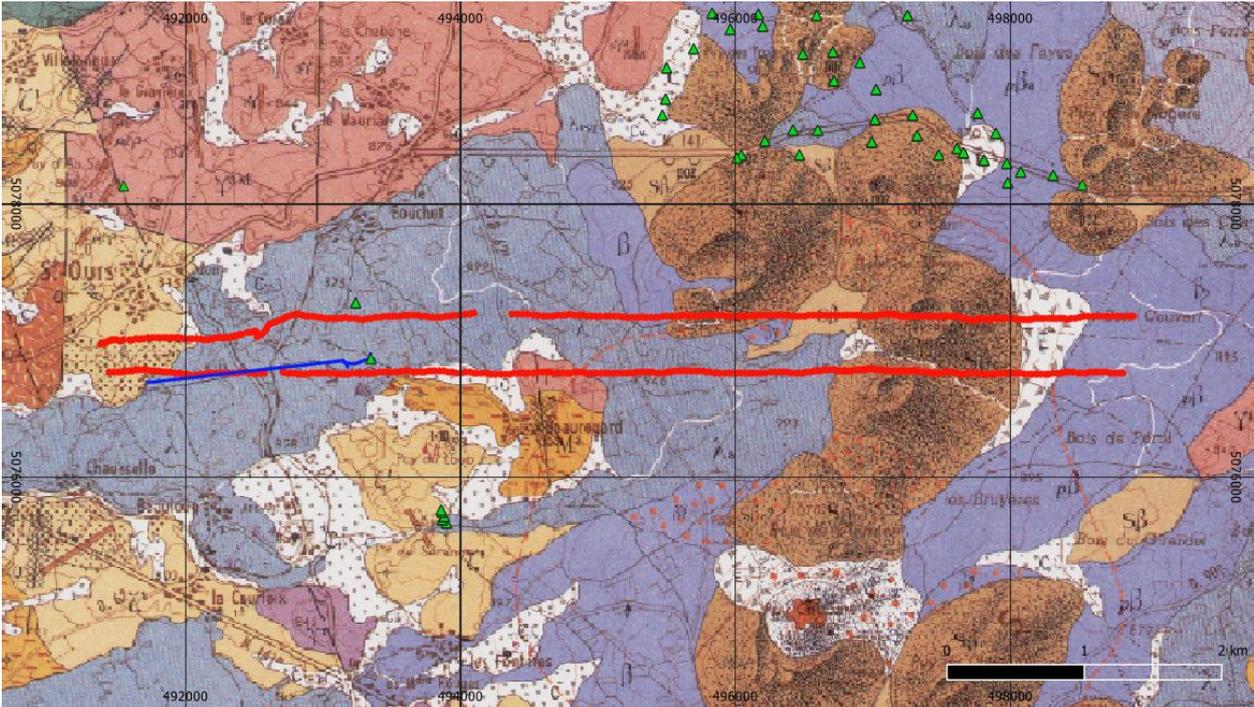


Figure 18 : Localisation des deux profils présentés en Figure 19 . La position des forages recensés en BSS est également reportée (triangles verts) et la galerie est représentée par une polyligne bleue.

La Figure 19 présente les deux coupes EM, localisées sur la figure précédente. La coloration rend compte de la résistivité électrique calculée par inversion. On observe un contraste de résistivité majeur entre la surface et la profondeur. En effet, en surface, les couleurs rouges à brunes indiquent la présence de roches très résistantes tandis qu'en dessous, les couleurs bleues à violettes soulignent une décroissance importante de la résistivité avec la profondeur, et semblent mettre en évidence un changement lithologique.

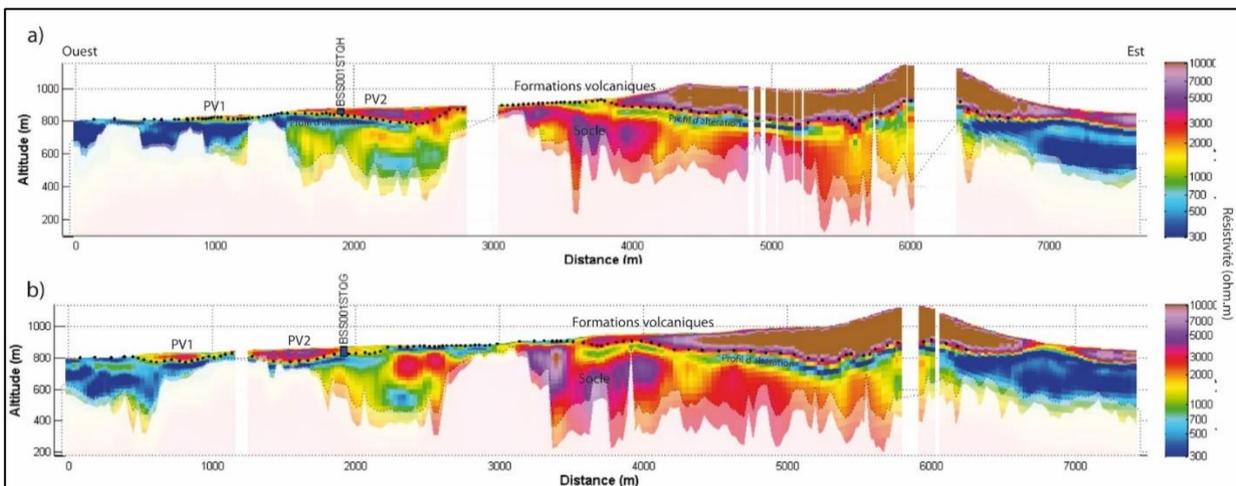


Figure 19 : Coupes EM localisées sur la figure précédente et sur lesquelles ont été projetés les forages situés à proximité, a) coupe Nord et b) coupe Sud. PV 1 et PV2 indiquent des paléovallées. Les points rendent compte du pointé de l'interface réalisé entre les formations volcaniques et le socle. Les forages sont distants d'environ 100 m par rapport aux coupes, ce qui peut entraîner un léger décalage entre la projection et ce qui est réellement vu au forage. C'est ce que l'on observe au niveau du forage BSS001STQG qui est normalement situé dans PV2

D'après nos connaissances sur la géologie de la zone et après comparaison avec les différents forages, il apparaît que les coupes permettent d'imager l'interface entre les formations volcaniques (en surface) et le socle (en profondeur). On note la présence d'un horizon bleu, donc conducteur, au contact entre les deux types de roches. Ce dernier a été interprété comme étant l'horizon altéré du socle.

Sur la coupe passant par la galerie (Figure 19 b) on retrouve les observations faites dans la galerie (qui se trouve à environ 790 m d'altitude) et synthétisées sur la Figure 7. D'Ouest en Est, on traverse bien du basalte (rouge), puis le substratum – granite ou gneiss (bleu) pour revenir dans du basalte (rouge/violet) à l'extrémité est de la galerie. Sur la coupe EM cela se traduit par la présence de deux paléovallées (PV1 et PV2), PV2 étant celle exploitée actuellement. Cela est parfaitement cohérent avec les observations faites sur les cartes magnétiques précédentes.

Les deux coupes imagent un toit du socle qui présente des variations d'altitude relativement importantes, on note même un pointement de ce socle vers 3000 - 4000 m de distance, au niveau des deux profils. Cela est cohérent avec les observations de terrain, du granite ayant été retrouvé à cet endroit (AFF4 Figure 7).

L'interface entre les formations volcaniques et le socle étant réputé avoir un contrôle important sur les écoulements souterrains, celle-ci a été pointée sur les différentes coupes EM (Figure 4), en s'aidant également de la carte géologique, des forages, des observations géologiques de terrain et des cartes magnétiques. Après interpolation entre les lignes de vol, la grille obtenue est présentée en Figure 20.

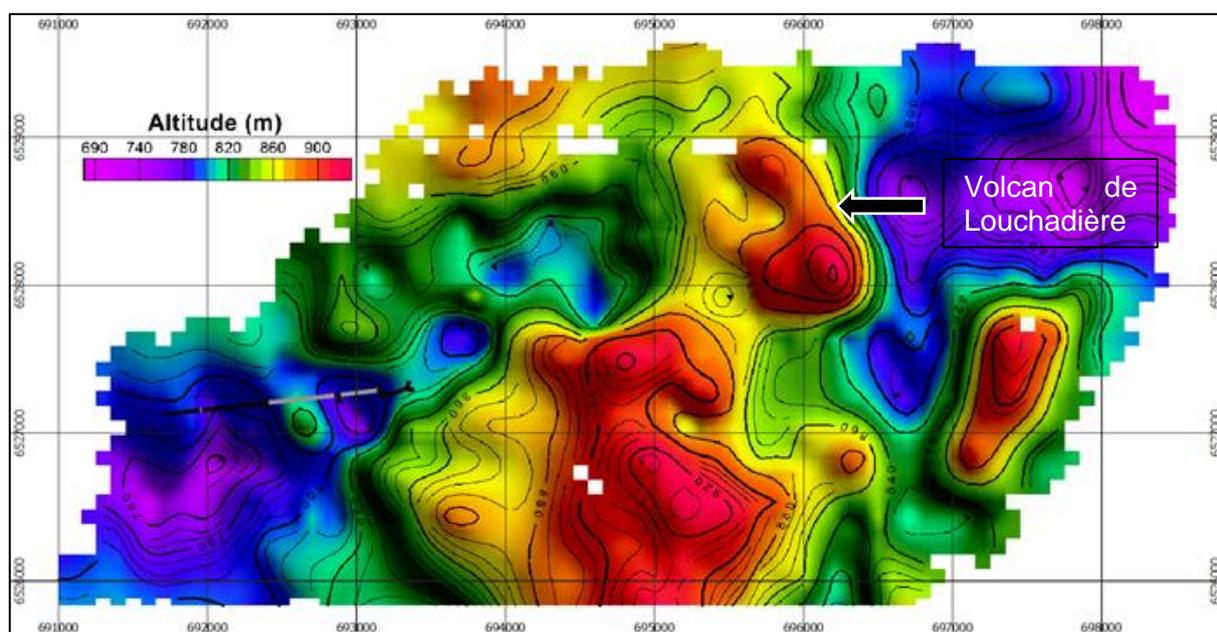


Figure 20 : Grille de l'altitude du toit du socle obtenue par pointé sur les différentes coupes EM et interpolation entre les lignes de vol. La galerie est représentée par une polygone dont la couleur varie en fonction de la lithologie observée dans la galerie (noir : basalte, gris : socle).

Cette figure confirme bien que l'altitude du toit du socle présente des variations assez marquées sur l'ensemble de la zone d'étude. On note la présence d'une « gouttière » partant vers le Sud-Ouest depuis Louchadière.

Si l'on compare la grille obtenue avec les différentes observations faites dans la galerie, on s'aperçoit que l'ensemble est plutôt cohérent, sachant qu'il faut garder à l'esprit la résolution

latérale et verticale de la méthode ainsi que le lissage de l'interpolateur. En effet, il est utile de rappeler que les lignes de vol sont espacées de 400 m, qu'aucune ne longe la galerie, que la méthode est intégratrice et que l'extrémité de celle-ci est située entre deux profils.

- A l'ouest, l'altitude du toit du socle est inférieure à celle de la galerie (~790 m). Toutefois, ces altitudes sont très proches, de manière cohérente avec les observations qui suggèrent que la base des basaltes est presque atteinte ; du socle a pu être observé à un endroit, ce qui pourrait correspondre au pointement imagé par la grille.
- En se déplaçant vers l'est on se retrouve alors dans le socle. Une remontée du toit est bien marquée sur la grille à cet endroit. Puis, plus on va vers l'est, tout en restant dans le socle, on se rapproche de l'interface, avec l'observation d'une passe de basalte. Ici, le modèle du toit du socle est entre 780 et 800 m d'altitude.
- A l'est, la galerie rencontre les basaltes et la paléovallée. Comme indiqué précédemment, l'extrémité est située entre deux lignes de vol, la remontée du toit du socle est donc un biais contraint par les points les plus proches lors de l'interpolation. Ceci nous indique indirectement que la largeur de la paléovallée est très limitée à cet endroit, ce qui est cohérent avec les observations. On note tout de même que l'extrémité de la galerie est bien située dans la « gouttière » imagée par la grille. La grille retranscrit également bien la différence en matière de pente entre le nord et le sud. Celle du nord est relativement douce, tandis que celle du sud est bien plus abrupte.

L'objectif ici était d'obtenir une carte issue des données EM héliportées seules afin de visualiser le comportement global du socle et ainsi comprendre les écoulements observés au niveau de la galerie en les replaçant dans leur environnement. Notons qu'une carte plus précise pourrait être obtenue en considérant aussi les forages et les observations faites dans la galerie, lors de l'interpolation. Cela rendrait le modèle plus précis très localement, au niveau de la galerie, mais ne changerait en rien la compréhension globale du système, permise par la méthode. De plus, le modèle obtenu doit servir de fil conducteur mais l'interprétation hydrogéologique doit également nécessairement se baser sur les différentes observations et forages disponibles.

3.2. INTERPRETATION CROISEE GEOLOGIE ET GEOPHYSIQUE

L'interprétation croisée des données aérogéophysiques et géologiques, bien que présentée de manière séparée dans le présent rapport, constitue le fil conducteur de cette étude.

Des aller-retours réguliers tout au long du processus d'interprétation des données permettent de vérifier leur cohérence ou la présence d'anomalies, investiguées ensuite sur le terrain (Figure 7). La calibration des données aérogéophysiques par rapport aux données géologiques disponibles (cartes, articles scientifiques et rapports de la bibliographie) et aux forages présents dans le secteur (Figure 6) font aussi partie intégrante de ce processus d'interprétation croisée.

Les forages recoupant la totalité de la pile volcanique et atteignant le socle sous couverture ont notamment été reportés sur les coupes EM les plus proches de manière à calibrer la réponse géophysique de cette interface majeure, et pouvoir ainsi la pointer – et donc propager l'information – sur l'ensemble des coupes EM disponibles.

Le résultat majeur de cette interprétation croisée est la reconstitution en 3D (par interpolation des pointés individuels sur les différentes coupes EM, et après calage par rapport aux forages) de la géométrie de l'interface entre le socle granito-gneissique et la couverture volcanique, comme présenté sur la Figure 20. Il s'agit là de la morphologie du relief (ou paléo-relief) présent dans le secteur avant la mise en place de la coulée de Louchadière.

Il ressort de cette interprétation croisée que :

1. Le bassin-versant de Louchadière ne contient qu'**une seule paléovallée principale**. Cette dernière, d'abord orientée vers le Nord-Ouest dans sa partie amont, oblique assez tôt vers le Sud-Ouest et conserve cette direction sur une grande partie de la zone d'étude (y compris dans la zone de la galerie), avant de s'orienter plus franchement vers l'Ouest à partir du secteur de Beauloup (Figure 20). Plusieurs **branches et/ou thalwegs secondaires** viennent rejoindre cette paléovallée principale, sur le modèle typique des vallées de la région. Comme connu de longue date (Auriat, 1957, la paléovallée est **fortement dissymétrique**, avec un versant Sud plus fortement pentu dans le secteur de la galerie. Nos données semblent montrer que cette dissymétrie pourrait s'inverser dans le secteur de Beauloup, où le versant Nord semble y être le plus pentu.
2. Une **arrête du socle granito-gneissique remonte jusqu'en sub-surface** dans un secteur au **Nord-Est de Beauregard** précédemment cartographié comme appartenant à la coulée de lave de la cheire de Louchadière. La présence de cette arrête de socle semble être **attestée par toutes les données à notre disposition**, et est imagée par :
 - o une remontée significative de l'interface socle/couverture volcanique sur les coupes EM (Figure 19) ;
 - o une anomalie magnétique bien plus faible que le corps principal de la coulée de la Louchadière proprement dite (Figure 12) ;
 - o une anomalie radiométrique assez enrichie en U, K et Th, signant pour partie la présence des dépôts pyroclastiques trachytiques provenant du Puy Chopine (Boivin *et al.*, 2017) et observés sur le terrain (Figure 8), mais également compatible avec la présence d'une petite fenêtre de socle en sub-surface ;
 - o la présence en surface de blocs erratiques décimétriques à métriques de granite (Figure 8) au droit des anomalies géophysiques précédemment listées (Figure 7).

Même s'il n'est pas possible d'exclure la présence d'une faible épaisseur (quelques mètres ?) de dépôts volcaniques en surface, la **découverte de ce relief de socle pour partie sous couverture** aura des **répercussions** importantes sur la **définition** des contours du **bassin-versant** de Louchadière. Le relief mis en évidence semble **discontinu, d'orientation globale NE-SO**, et se poursuit **sous le cône du Puy de Louchadière**.

3. Un **important remplissage basaltique** est présent au niveau de l'**anomalie magnétique circulaire de Beauloup** (Figure 12), ce qui vient confirmer les études précédentes. La forme circulaire de l'anomalie ainsi que l'épaisseur importante de basalte accumulé dans la dépression semblent plutôt en faveur d'un **remplissage d'un ancien cratère de maar** (Boivin *et al.*, 2017) que d'une paléo-dépression plus classique de type paléovallée (Jeambrun *et al.*, 1973). Notons cependant que les données dont nous disposons ne permettent pas de conclure de manière définitive sur cette question. Enfin, signalons qu'une ancienne coulée « andésitique » semble être décrite au niveau de Beauloup dans des documents historiques, (Journet, 1969), sans que cette information ne soit cependant reprise par la suite, ni sur la carte géologique (Jeambrun *et al.*, 1973), ni sur la carte volcanologique (Boivin *et al.*, 2017) du secteur.
4. La présence d'un **important réseau de discontinuités géophysiques** affectant le socle granito-gneissique, comprises au sein de deux familles de directions principales : N-S (N350 à N020, ou NNE-SSO à ONO-SSE) et N045 (NE-SO). De plus amples études seraient cependant nécessaires pour mieux caractériser ces discontinuités géophysiques, et notamment pour les rattacher à des objets géologiques telles que certaines familles de failles et/ou de fractures affectant le socle.

5. La **déconnexion apparente entre le cône et la coulée de la Louchadière**, visible notamment sur les données aéromagnétiques (Figure 12), pourrait s'expliquer par la présence du lambeau basaltique β , plus récent, et qui pourrait ainsi perturber le signal magnétique de la cheire de Louchadière.

Les conséquences en termes d'écoulements souterrains de cette vision actualisée de l'architecture sous couverture et de la géologie du bassin-versant de Louchadière (rendue possible grâce aux nouvelles données aérogéophysiques et aux contrôles de terrain) sont discutés dans le paragraphe ci-dessous.

3.3. IMPLICATIONS SUR LES ECOULEMENTS SOUTERRAINS

Grace aux données qui ont été acquises par aérogéophysique, il est possible de mettre en évidence de façon très nette la topographie existant avant les émissions de produits volcaniques. Or, ainsi qu'il a été vu au paragraphe 2.3., c'est cette paléo-topographie qui contraint la création des nappes et le sens d'écoulement de ces dernières vers leurs exutoires.

L'examen de la grille de l'altitude du toit du socle (Figure 21) c'est-à-dire la topographie du socle, apporte plusieurs informations essentielles :

- Une paléovallée importante s'étire selon une direction SO-NE à partir de l'amont de la galerie. Le cœur de la paléovallée matérialisé sur la figure par les tirets épais oranges, se situe à des altitudes proches de 800 m (teinte bleue);
- En aval de la partie captante, le cœur de la paléovallée se trouve au Sud de la galerie. La paléovallée est alors orientée vers l'Ouest Sud-Ouest et les altitudes du cœur de la vallée diminuent pour atteindre 720-740 m à l'Ouest de l'image (teintes rose à violet).;
- Cette vallée principale s'accompagne de plusieurs petites vallées secondaires (tirets fins oranges) de forts dénivelés. Cette configuration est typique des têtes de bassin que l'on peut encore observer actuellement en contexte de socle ;
- L'hypothèse de Deschamps (1986) sur l'existence d'une seconde paléovallée plus ou moins parallèle à celle reconnue par les forages de reconnaissance ne se vérifie pas ;
- La partie captante de la galerie est très proche du cœur de la paléovallée principale et comme il est indiqué dans la bibliographie, la galerie transversale (cf. paragraphe 2.3.2.) s'achève effectivement tout près du flanc Sud;
- Une paléo-crête topographique (pointillés bleus) se dessine clairement en amont de la principale paléovallée. Elle correspond à la ligne de partage des eaux souterraines dans un secteur sous couverture volcanique qui comprend notamment l'édifice volcanique de Louchadière.

La synthèse de ces informations permet de déterminer les directions d'écoulement de l'eau souterraine dans les paléotalwegs secondaires et le paleotalweg principal de Louchadière , sous le recouvrement volcanique (Figure 21 b).

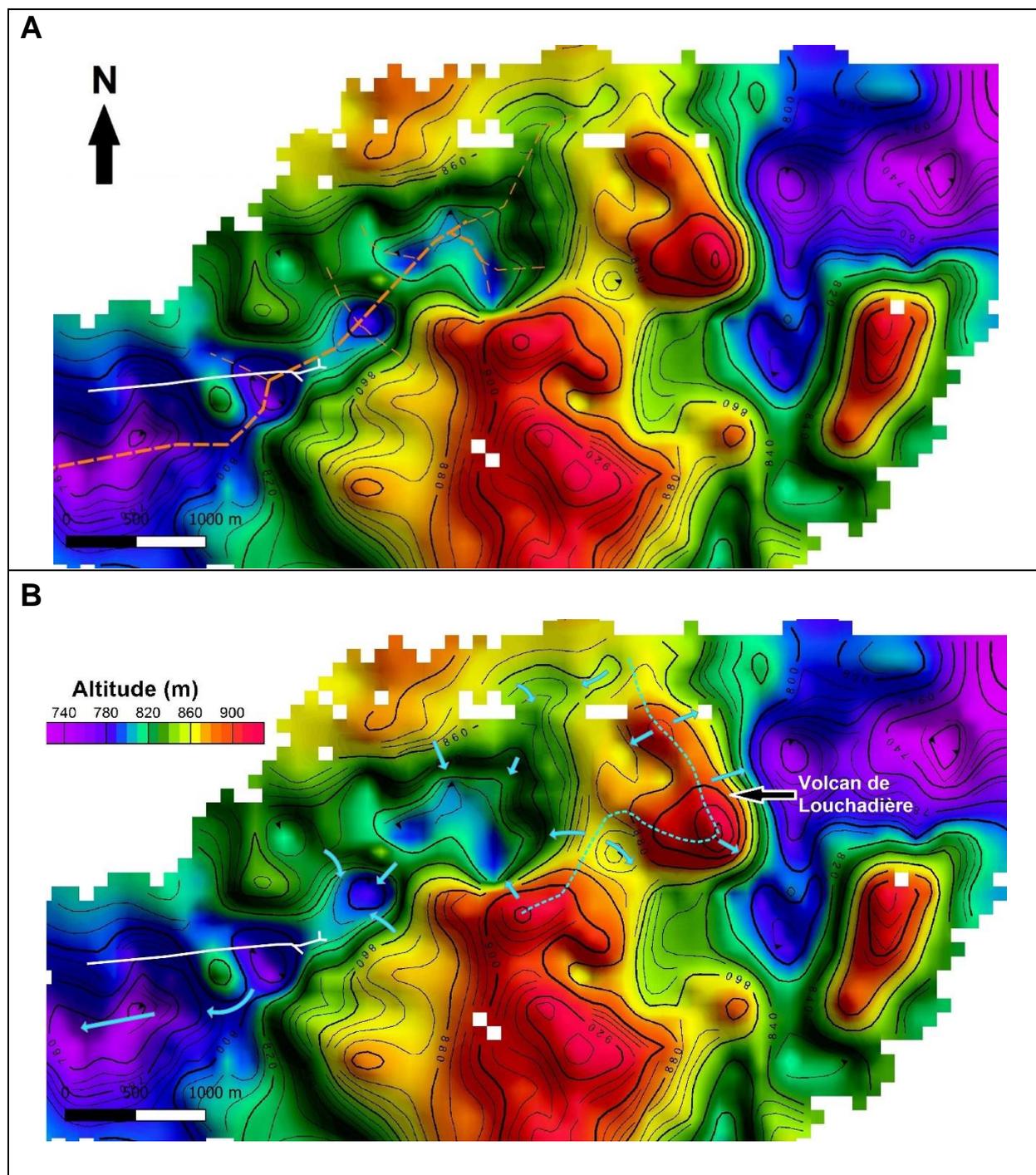


Figure 21 : Eléments de de connaissances déduits de la cartographie de l'altitude du toit du socle sous recouvrements volcanique . La galerie est représentée par une polygone blanche. A : cœur de la paléovallée principale (tirets oranges épais) et cœurs des paléovallées secondaires (tirets oranges fins). B : paléo-crête topographique sous couverture volcanique en pointillés bleus, flèches bleues : sens d'écoulement de l'eau souterraine dans les paléotalwegs sous couverture volcanique.

Le bassin d'alimentation de la galerie de captage

La détermination des contours du bassin d'alimentation du captage s'est appuyée sur la concordance de la surface nécessaire à son alimentation et les limites structurales.

Dans son étude pour la définition des périmètres de protection du captage, Livet (1999) a estimé les débits spécifiques entre 16 à 18 l/s km² ce qui l'a conduit à envisager un bassin d'alimentation compris entre 4,3 km² et 4,8 km².

Ainsi qu'il a été vu paragraphe 2.3., la topographie du socle (substratum imperméable de nappes qui se créent à la base des formations volcaniques) conditionne les écoulements:

- Dans les secteurs sous couverture volcanique, l'essentiel des précipitations météoriques s'infiltré et suit un transfert vertical jusqu'au socle. Les nappes se créent dans les points bas des paléovallées ;
- Dans les secteurs où le socle est présent à l'affleurement, le ruissellement de surface peut, si la topographie s'y prête (altitude supérieure à la base des coulées), s'infiltrer sous les coulées et participer à l'alimentation du captage.

La connaissance de la topographie du socle est donc essentielle pour déterminer les limites du bassin d'alimentation de la galerie.

Les investigations aérogéophysiques ont permis de reconstituer la topographie du socle sous le recouvrement volcanique et de délimiter dans un 1^{er} temps la ligne de partage des eaux souterraines (Figure 21). La Figure 22 A présente ces données sur un fond géologique. La limite du bassin d'alimentation sous couverture volcanique est représentée en tirets bleus clairs. Dans un deuxième temps, en couplant la connaissance de la localisation des paléovallées et l'utilisation des données altimétriques dans les zones de socle (RGE ALTI® 5 m de l'IGN), il a été possible d'identifier les secteurs où les eaux qui ruissellent sur le socle peuvent s'écouler en direction de ces paléovallées. Ce travail a permis de préciser les limites du bassin d'alimentation en contexte de socle (Figure 22 B).

La combinaison de ces différentes limites permet de tracer le bassin d'alimentation global du captage de Louchadière. Il est présenté sur la Figure 23.

Il apparaît que :

- La surface du bassin d'alimentation défini dans la présente étude (4,4 km²) est dans l'ordre de grandeur de l'estimation faite par Livet sur la base des débits spécifiques calculés pour le captage.

A titre anecdotique, le bassin versant topographique a été représenté sur la Figure 23 B. Sa taille réduite (1.6 km²) n'est pas compatible avec les débits spécifiques estimés au captage. Ceci démontre l'absence de concordance entre le bassin d'alimentation hydrogéologique et le bassin versant topographique en contexte volcanique.

- Le bassin délimité dans notre étude est décalé vers le Nord par rapport au bassin défini par Livet dans le cadre de la définition des périmètres de protection du captage en 1999 et ne comprend qu'une fraction du cône de Louchadière.

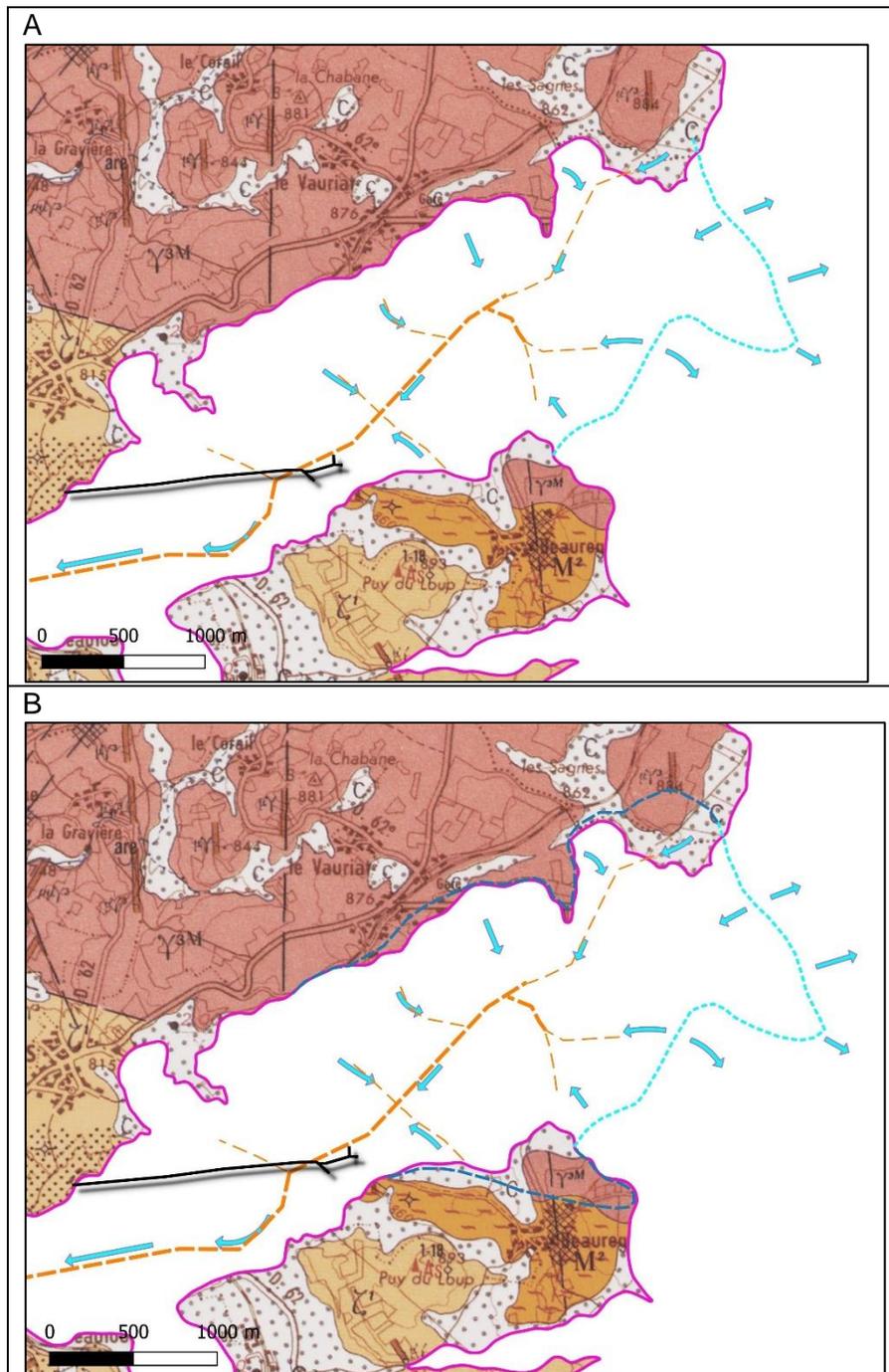


Figure 22 : A = limites du bassin d'alimentation (tirets bleus clairs) du captage de Louchadière sous couverture volcanique. B = limites du bassin d'alimentation (tirets bleus foncés) en contexte de socle. La galerie est figurée en noir, fond : d'après carte géologique à 1/50000 n°693 du BRGM (les formations volcaniques sont symbolisées par le polygone blanc cerclé de rose, les formations du socle sont en rose et en jaune).

Or, ainsi qu'il a été vu paragraphe 2.3., les projections scoriacées et notamment la zone non saturée des cônes volcaniques, jouent un rôle important dans la régulation des écoulements souterrains en « amortissant » les fluctuations des précipitations annuelles et interannuelles dans la Chaîne des Puys. Dans le cas du bassin de Louchadière, notre étude montre que le cône volcanique éponyme n'est que partiellement inclus dans le bassin d'alimentation. La combinaison de ce constat avec la présence d'une coulée unique (affectée d'une perméabilité de fissures) au droit de la partie captante et l'existence de phénomènes de ruissellements (transferts rapides) sur le socle en bordure de coulée permettent d'expliquer l'irrégularité des débits mesurés au captage.

La redéfinition des contours du bassin d'alimentation a également pour conséquence d'intégrer au Nord, d'une partie de la route départementale n° 943. Le trafic routier sur cet axe n'est pas négligeable et ce secteur constitue une source potentielle de contamination de la ressource qui n'a pas été prise en compte lors de la définition des périmètres de protection du captage.

Relations avec les bassins adjacents

Selon Rouquet *et al* (2012) la limite entre le bassin de Louchadière et le bassin de Volvic, matérialisée par le trait blanc sur la Figure 24 passerait approximativement par le Puy de Tressous et l'Est du Puy de Louchadière.

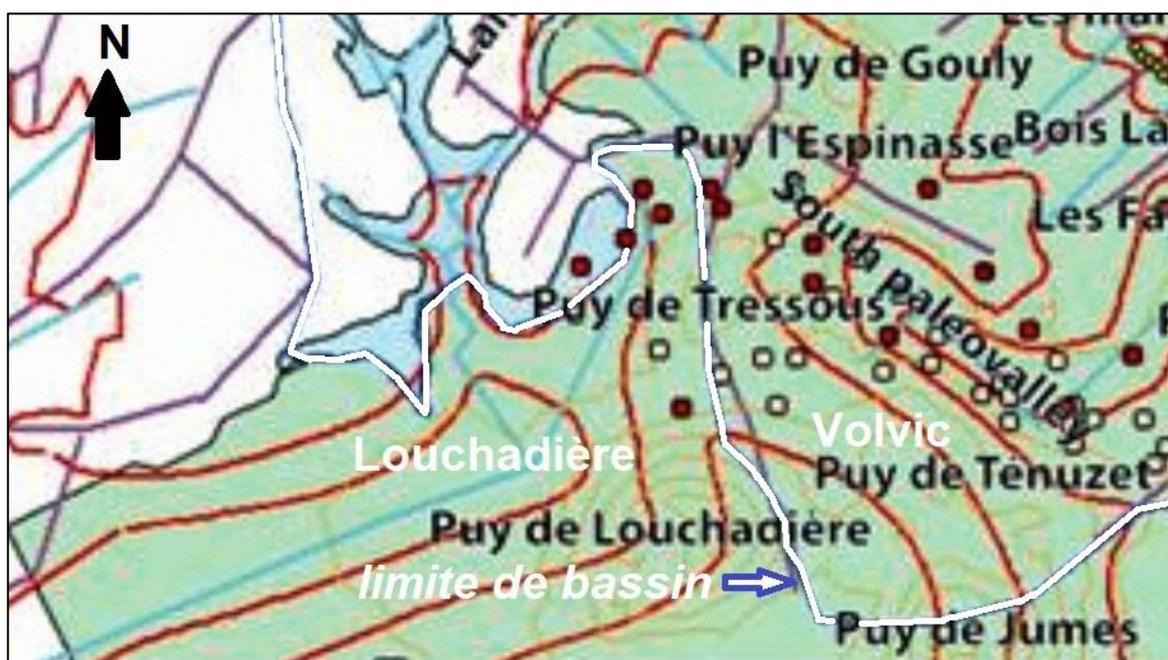


Figure 24 : Morphologie et paléomorphologie du socle Rouquet *et al* (2012) modifié. En blanc : le contour du bassin de Volvic, en rouge les isolignes d'altitude du socle (tous les 50 m). Les carrés matérialisent les forages ayant atteint le socle (rouge) et les forages n'ayant pas atteint le socle (beige).

D'après notre étude, la ligne de partage des eaux entre les deux bassins se trouverait un peu plus à l'Ouest, le puy de Tressous en particulier serait entièrement rattaché au bassin de Volvic (cf la paléo-crête topographique imagée de la figure 23 B).

La cartographie des limites des principaux bassins hydrogéologiques de la Chaîne des Puys proposées par Boivin *et al* (2017) fait remonter le bassin de Côme jusqu'au puy de Louchadière

(Figure 10). L'examen de la morphologie du socle sous couverture volcanique déterminée dans le cadre de la présente étude révèle que seul l'amont du bassin de Volvic et peut-être celui d'Argnat³ est contigu avec l'amont du bassin de Louchadière et notamment le volcan éponyme. En effet, les données au Sud du volcan de Louchadière montrent que le sens d'écoulement des eaux souterraines sur le socle est orienté dans un 1^{er} temps vers l'Est puis vers le Nord pour rejoindre la dépression de grande dimension (caractérisée par des altitudes de l'ordre de 700 m environ) qui se dessine au Nord-Est de l'image de la figure 21 B.

La position de la galerie dans le paléotalweg.

Bien qu'aucune ligne de vol ne longe la galerie (cf. paragraphe 3.1.2.), l'interprétation des données géophysiques couplées à l'analyse des données bibliographiques et aux observations géologiques permet d'affirmer que la partie captante est située dans un point bas de la paléovallée. Il est plausible qu'elle ne repose pas entièrement sur le substratum imperméable et qu'une fraction des écoulements échappe au captage mais cette part doit être relativement modeste.

³ L'interprétation des données de géophysique aéroportée n'a pas été réalisé sur le versant Est de la Chaîne des Puys à ce jour

4. Synthèse des résultats

Différentes investigations ont été mises en œuvre pour mieux connaître la nature et l'organisation du sous-sol du bassin alimentant la galerie de captage de Louchadière dans l'objectif d'une meilleure connaissance des écoulements souterrains. En effet, ceux-ci sont conditionnés par la morphologie du socle granito-gneissique qui constitue le substratum imperméable de la nappe présente à la base des formations volcaniques.

Les travaux se sont appuyés sur l'utilisation et l'interprétation des données du levé géophysique aéroporté « AérOvergne ». Ils ont été couplées à l'examen des informations géologiques et hydrogéologiques disponibles en bibliographie ainsi que sur des observations in situ.

Les différents traitements appliqués aux données de mesures magnétiques permettent d'avoir une vision de l'emprise des coulées du bassin d'alimentation de la galerie. Les données de forage, la géologie de surface et les observations dans la galerie permettent de restituer une géométrie simplifiée du volcanisme. Les résultats montrent que la galerie est positionnée à 130° environ par rapport à l'axe d'écoulement des coulées de lave et que la partie captante semble située dans la partie la plus épaisse de ces coulées, et donc vraisemblablement à proximité du cœur du paléotalweg.

Le travail d'interprétation réalisé sur les différentes coupes obtenues par électromagnétisme montre des contrastes très nets de résistivités électriques : les formations volcaniques sont très résistantes alors que le socle granito-gneissique présente une résistivité bien moindre. Les coupes mettent également en évidence un horizon conducteur entre ces deux types de formations qui a été interprété comme étant l'horizon altéré du socle.

Le pointé du socle sur les différentes coupes obtenues par électromagnétisme a permis de dresser une image de l'altitude du toit du socle à l'échelle du bassin de la galerie de captage. Ce travail apporte des informations essentielles qui permettent de préciser les directions d'écoulement des eaux sous le recouvrement volcanique et, qui conduisent à redéfinir le bassin d'alimentation du captage.

Il ressort de cette cartographie que la partie captante de la galerie repose au cœur (ou non loin du cœur) d'une grande paléovallée, orientée selon une direction SO-NE, qui concentre des écoulements souterrains alimentés par de petites vallées secondaires. Cette paléovallée s'achève approximativement au droit du flanc Ouest du volcan de Louchadière. Une paléo-crête topographique se dessine entre l'Ouest du Puy de Tressous et le quart Nord-Ouest du puy de Louchadière, marquant la ligne de partage des eaux souterraines entre le bassin de Volvic et le bassin de Louchadière.

Les investigations géologiques menées au Sud-Ouest du cône de Louchadière laissent entrevoir une possible présence de socle très proche de la surface dans une zone cartographiée en tant que coulée volcanique. Cette hypothèse a été validée par les données géophysiques qui montrent dans ce secteur: 1) une remontée significative de l'altitude du toit du socle, 2) une anomalie magnétique bien plus faible que le corps principal de la coulée et 3) une anomalie radiométrique assez enrichie en uranium, potassium et thorium compatible avec la présence de socle en sub-surface. L'existence de cette remontée du socle a pour conséquence de fixer ici la limite du bassin d'alimentation de la galerie. La paléo-morphologie du socle, dans ce secteur, conduit également à exclure l'existence d'une limite commune avec le bassin hydrogéologique de Côte contrairement à ce qui figure dans la bibliographie.

La combinaison de l'analyse des données acquises sur la paléo-morphologie du socle sous couverture volcanique et la prise en compte de la morphologie du socle à l'affleurement permet de proposer un nouveau contour pour le bassin d'alimentation de la galerie de captage en prenant en compte 1) les zones où le ruissellement superficiel contribue à alimenter les écoulements souterrains par infiltration sous les coulées et 2) les paléovallées participant à l'alimentation de la nappe de la paléovallée principale où la galerie est implantée.

La superficie du bassin d'alimentation ainsi déterminée est concordante avec la surface nécessaire à l'alimentation du captage estimée à partir des débits spécifiques pris en compte lors de la définition des périmètres de protection du captage. Toutefois, le bassin d'alimentation élaboré dans le cadre de la présente étude diffère de celui proposé pour les périmètres de protection de par son extension en direction du Nord. Il englobe une portion de la route départementale n°943 où le trafic routier peut constituer une source de contamination potentielle de la ressource en eau. Une autre particularité est que le cône volcanique de Louchadière n'est que très partiellement inclus dans le bassin d'alimentation de la galerie de captage. Il en résulte que la fonction de régulation des fluctuations des précipitations météoriques qu'exerce habituellement ce type d'édifice volcanique est moins prégnante et explique pour partie l'irrégularité des débits captés dans la galerie.

L'examen de la cartographie de la morphologie du socle permet également de confirmer les interprétations tirées des forages de reconnaissance effectués lors de la création de la galerie, à savoir une dissymétrie marquée de la paléovallée dans le secteur de la partie captante : le flanc Sud étant beaucoup plus abrupte que le flanc Nord.

5. Bibliographie

- Auriat, S., 1957, Etude des sondages et captages dans quelques coulées de la Chaîne des Puys (Balmet, Côme, Louchadière, Aydat et Tiretaine): Revue des Sciences Naturelles d'Auvergne, v. 23, p. 97-141.
- Barbaud J. Y., 1983, Etude chimique et isotopique des aquifères de la Chaîne de Puys, temps de transit et vulnérabilité des systèmes de Volvic et d'Argnat. Thèse de 3ème cycle, faculté des sciences d'Avignon, 209 pp.
- Belkessa R., 1977 – Hydrogéologie de la Chaîne des Puys. D.E.S. Université de Clermont-Fd, 130 p.
- Bertrand G., 2009. De la pluie à l'eau souterraine. Apport du traçage naturel (ions majeurs, isotopes) à l'étude du fonctionnement des aquifères volcaniques. (Bassin d'Argnat, France). Thèse, Université Blaise Pascal Clermont-Fd. 251 pp.
- Boivin, P., Besson, J., Briot, D., Deniel, C., Gourgaud, A., Labazuy, P., Langlois, E., De Larouzière F.-D., Livet, M., Médard, E., Mercieca, C., Mergoïl, J., Miallier, D., Morel, J.-M., Thouret, J.-C., Vernet, G., 2017. Carte volcanologique de la Chaîne des Puys à 1/25 000. Carte et notice explicative (6ème édition). Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne.
- Bouchet C. 1987. Hydrogéologie du milieu volcanique. Le bassin de la Veyre. Analyse et modélisation du bassin versant du lac d'Aydat. Etude d'un aquifère fissuré basaltique. Thèse Université d'Avignon, 319 pp.
- CETE, 1988, Autoroute Périgueux Clermont-Ferrand - Dossier d'étude préliminaire - Etude Hydrogéologique de la Chaîne des Puys. Rapport : cartes géologiques, résultats des sondages et position du substratum. Dossier N°63/88/0589/1.
- CETE-LRPC, 2006, Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement - Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées. Galerie de captage de Louchadière (Commune de Saint Ours les Roches - Puy de Dôme) : Etude géotechnique de stabilité, Dossier n°63.05.18423.
- CETE-BRGM, 2009. Bilan hydrogéologique des bassins de la Chaîne des Puys. Rapport final. CETE Lyon / LRPC 63.07.19728 - BRGM RP-57092-FR.
- D'Arcy, D., 1987, Détermination de périmètres sanitaires règlementaires protégeant la galerie captante de Louchadière (Commune de Saint Ours les Roches, Puy de Dôme) pour le compte du SIAEP Sioule et Bouble, Rapport BRGM, N°87 AUV 001.
- D'Arcy D., Michaely B., Maillard J. (1990). Travaux de reconnaissance pour le développement de la ressource en eau. Fontaine de Sérange, commune de St-Ours-les-Roches (Puy-de Dôme). Rapport BRGM/RR-30405-FR.
- De Goër de Hervé, A., Camus, G., Boivin, P., Gourgaud, A., Kieffer, G., Mergoïl, J., Vincent, P.-M., 1991. Volcanologie de la Chaîne des Puys (Massif Central français). 3^{ème} édition.
- Deschamps L. 1986.. Méthodologie polarisation spontanée appliquée à l'hydrogéologie. Contribution à l'interprétation des anomalies. Mémoire de D.E.A. Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand
- Geopal, 1996. Captage de Louchadière (63). Etude hydrogéologique préalable à l'institution des périmètres de protection. Rapport n° 96 PDD 09.

- Faure, M., Lardeaux, J.-M., Ledru, P., 2009. A review of the pre-Permian geology of the Variscan French Massif Central. *Comptes Rendus Geoscience, Mécanique de l'orogénie varisque : Une vision moderne de la Recherche dans le domaine de l'orogénie. Mechanics of Variscan Orogeny: A modern view on orogenic research* 341, 202–213.
- Jeambrun, M., Giot, D., Bouiller, R., Baudry, D., Camus, G., 1973. Carte géol. France (1/50 000), feuille Clermont-Ferrand (693) – Orléans : Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Notice explicative par Aubert M., Bouiller R., Camus G., Cochet A., D'Arcy D., Giot D., Jeambrun M., Roche A., Bonhommet N. (1973), 64 p.
- Josnin, J. Y., Livet, M., & Besson, J. C. (2007). Characterizing unsaturated flow from packed scoriated lapilli: Application to Strombolian cone hydrodynamic behavior. *Journal of hydrology*, 335(3-4), 225-239.
- Joux, M., 2002. Structure et fonctionnement hydrogéologique du système aquifère volcanique des eaux de Volvic (Chaîne des Puys, Massif Central français). Université d'Avignon, 284pp.
- Journet J. (1969). Le captage sous-basaltique de Louchadière. *Techniques et sciences municipales*, 64^e année, n°12, 428-432.
- Lachassagne P., Maréchal J. C., 2004. Synthèse des concepts et méthodes de l'hydrogéologie des milieux volcaniques appliquées à la prospection géothermique. Rapport final. BRGM/RP-53135-FR, 76 p., 14 fig., 2 tabl. 2 ann.
- Livet M., 1999. Avis sur la protection de la galerie de Louchadière. Commune de St-Ours-les-Roches (Puy-de-Dôme).
- Livet M., 2020. Avis hydrogéologique sur la protection des forages de la commune d'Orcines et de Clermont-Ferrand dont la gestion est reprise par Clermont Auvergne Métropole.
- Miallier, D., Michon, L., Évin, J., Pilleyre, T., Sanzelle, S., & Vernet, G. (2004). Volcans de la chaîne des Puys (Massif central, France) : point sur la chronologie Vasset–Kilian–Pariou–Chopine. *Comptes Rendus Geoscience*, 336(15), 1345-1353.
- Mercier F., 1994. Avis hydrogéologiques sur les périmètres de protection de la galerie de Louchadière, SIAEP Sioule et Bouble.
- Nabighian M.N., Macnae J.C., 1991. Time domain electromagnetic prospecting methods. Nabighian, M.N. (Ed.), *Electromagnetic methods in applied geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, 2, part A, 427-520
- Reninger PA, Martelet G., Perrin J., 2015. Frame effective tilt correction for HEM data acquired over rugged terrain. First European Airborne Electromagnetics Conference, 6-10 Septembre, Turin
- Reninger P.-A., Martelet G., Deparis J., Perrin J., Chen Y., 2011. Singular value decomposition as a denoising tool for airborne time domain electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics* 75, 264-276
- Reninger P.-A., Martelet G., Perrin J., Dumont M., 2020. Processing methodology for regional AEM surveys and local implications. *Exploration Geophysics*, 51, 143-154
- Rouquet, S., Boivin, P., Lachassagne, P., and Ledoux, E., 2012, A 3-D genetic approach to high-resolution geological modelling of the volcanic infill of a paleovalley system. Application to the Volvic catchment (Chaîne des Puys, France) : *Bulletin de la Société Géologique de France*, v. 183, p. 395-407.
- S.I.A.E.P. Sioule et Bouble (1995), 50 ans au service de l'eau, 34 p.

Stieltjes L., Gourgaud B., Steenhoudt M., 1988. Modes de circulation et de gisement de l'eau souterraine dans un volcan bouclier basaltique. Exemple de l'île de la Réunion, milieu océanique tropical. *Hydrogéologie*, 2, 83-94.

Viezzoli A., Christiansen A.V., Auken E., Sørensen K., 2008. Quasi-3D modeling of airborne TEM data by spatially constrained inversion. *Geophysics* 73, F105-F113

Ward S.H., Hohmann G.W., 1988. Electromagnetic theory for geophysical applications. Nabighian, M.N. (Ed.), *Electromagnetic methods in applied geophysics*, Society of Exploration Geophysicists 1, 131-311



Direction régionale Auvergne Rhône-Alpes
12 avenue des Landais
63170 Aubière
Tél. : 04.73.15.23.00
www.brgm.fr