





# Méthodologie de l'inventaire du potentiel géothermique des Limagnes : projet COPGEN Compilation des données

**BRGM/RP-52644-FR**  
septembre 2003

Étude réalisée dans le cadre de la convention  
de recherche n° 05 02 037 établie entre l'ADEME et le BRGM

**A. Genter**

Avec la collaboration de

**D. Giot, N. Lieutenant, P. Nehlig, Ph. Rocher, J.Y. Roig, Ph. Chevremont,  
L. Guillou-Frottier, G. Martelet, A. Bitri, J. Perrin, O. Serrano, N. Courtois,  
Ph. Vigouroux, Ph. Négrel, H. Serra, E. Petelet-Giraud**

**A D E M E**



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

Mots clés : Géothermie, Géologie, Volcanisme, Thermique, Forages, Sources thermales, Fluides, Géophysique, Hydrogéologie, Limagnes, Massif central.

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

Genter A. avec la collaboration de Giot D., Lieutenant N., Nehlig P., Rocher Ph., Roig J.Y., Chevremont Ph., Guillou-Frottier L., Martelet G., Bitri A., Perrin J., Serrano O., Courtois N., Vigouroux Ph., Négrel Ph., Serra H., Petelet-Giraud E. (2003) - Méthodologie de l'inventaire géothermique des Limagnes : projet COPGEN. Compilation des données. BRGM/RP-52644-FR, 122 p., 49 fig., 8 tabl., 1 ann.

© BRGM, 2003, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Dans le cadre d'une politique de relance des énergies renouvelables sur le territoire métropolitain, l'ADEME et le BRGM ont mis en place un projet méthodologique d'inventaire de la ressource géothermale basse et moyenne énergie au travers de la convention de recherche n° 05 02 037 signée le 29 octobre 2002. Ce projet, intitulé COPGEN ou **CO**mpilation du **P**otentiel **GE**othermique **N**ational, s'est focalisé sur la zone des Limagnes en Auvergne, qui correspond géologiquement à une série de bassins tertiaires situés sur la bordure nord du Massif central.

Ce rapport, réalisé en cours de projet, présente donc les résultats de la phase de compilation des données du sous-sol et/ou des connaissances disponibles dans les différents domaines géoscientifiques, à savoir la géologie de surface et en forage, la géophysique d'infrastructure (gravimétrie-magnétisme) et la géophysique pétrolière (sismique), la thermique, l'hydrogéologie, et les connaissances sur la nature des fluides (sources thermales). De plus, la mise en place d'un Système d'Information Géographique (SIG), qui rassemble l'ensemble des données synthétisées, est également présentée sous forme succincte puisqu'elle a fait l'objet d'une étude indépendante (Lieutenant, 2003). Compte-tenu de la richesse des synthèses géophysique et géochimique, deux autres rapports distincts ont été réalisés de manière séparée (Martelet *et al.*, 2003, Serra *et al.*, 2003). Seuls, les enseignements majeurs de ces travaux ont été repris dans ce rapport.

La synthèse pluridisciplinaire des données géoscientifiques a été réalisée à deux échelles :

- à l'échelle régionale, avec la compilation et la recherche d'informations principalement géologiques, géophysiques et géochimiques dans une zone élargie, qui correspond géographiquement à l'ensemble des Limagnes et de quelques bassins tertiaires du Massif central ;
- à l'échelle locale, avec une synthèse plus focalisée sur la Limagne d'Allier dans laquelle nous avons réalisé une réinterprétation plus fine de la géologie à partir de données de forages anciens.

### Apport de la géologie de bassin

La synthèse géologique a été réalisée sur environ 400 forages, plus ou moins bien documentés, identifiés dans la Banque des données du Sous-Sol (BSS) et dans la littérature pétrolière. En Limagne d'Allier, ces sondages recoupent tout le bassin depuis les formations du Quaternaire jusqu'au socle paléozoïque. Pour les forages où nous disposons d'informations géologiques (rapport technique, coupe géologique, diagraphies), une réinterprétation complète de la lithologie a été réalisée en termes de stratigraphie séquentielle. Ce type d'analyse permet d'individualiser des zones à lithologie variée (sables, argiles sableuses, carbonates, évaporites) dont la composition et la texture confèrent au milieu géologique des propriétés pétrophysiques (porosité) ayant un intérêt potentiel en terme de réservoir géothermique (perméabilité). L'étude de la Limagne d'Allier a montré que la succession des faciès s'ordonne en cinq séquences lithostratigraphiques. Les sommets de séquence sont codés spécifiquement (S1 à S5) ainsi que le toit du socle (S0). Chacune de ces séquences développe de la

base vers le sommet : un terme détritique sableux et sablo-argileux bariolé ou vert, un terme intermédiaire mixte sablo-argileux et carbonaté, puis un terme sommital carbonaté, parfois évaporitique. Une base de données sur les forages a donc été construite et codifiée selon l'organisation des lithofaciès retenus.

Bien que le nombre de forages ayant atteint le socle soit relativement limité, des structures majeures s'individualisent. La Limagne d'Allier se décompose en deux bassins distincts : le bassin de Moulins au nord, orienté NE-SW et le bassin de Clermont au sud, orienté N-S puis NE-SW. Le bassin de Moulins montre une asymétrie avec une subsidence maximale à l'est et au sud. L'inverse s'observe dans le bassin de Clermont, l'affaissement maximum s'enregistre à l'ouest et une fosse très profonde est générée au niveau de Clermont et Riom. Un seuil sépare les deux bassins, au nord de la faille d'Aigueperse et selon un tracé parallèle à celle-ci. Les profondeurs maximales certifiées par forage sont de l'ordre de 1 000 m pour le bassin de Moulins et de 2 000 m pour le bassin de Clermont. Les corps détritiques liés à la séquence S1 sont présents de façon systématique en partie profonde des bassins. L'analyse de la répartition du corps détritique S1, le plus profond, montre une répartition particulière, fortement influencée par les failles. Le pied de la faille d'Aigueperse est bien marqué par un cône détritique. Dans la fosse de Clermont, les accumulations sont importantes en fond de fosse, là aussi en liaison probable avec les failles proches (fig. 23). Plus au nord, la zone de Riom n'est pas renseignée. Au nord-est le bassin de Moulins possède des horizons détritiques importants tant en épaisseur qu'en extension pour les trois séquences inférieures. Ces horizons sont séparés les uns des autres par des intercalaires argilo-carbonatés. La profondeur maximale du bassin est de 1 000 m. Au sud, le bassin de Clermont est très fortement accidenté et la zone profonde se réduit à une ou plusieurs fosses étroites axées sur Clermont et Riom. Les corps détritiques appartiennent aux séquences 1 et 2 et sont directement superposés sans intercalaire marneux, constituant ainsi un réservoir géothermique potentiel très épais (4 à 500 m). Les profondeurs atteintes sont de 1 880 m au forage Croix-Neyrat.

Le traitement et l'interprétation des profils sismiques d'origine pétrolière, sur la zone clermontoise est en cours. La compilation des données de forage et des principaux horizons marqueurs sismiques devraient apporter des précisions sur la géométrie de l'ensemble détritique inférieur et surtout sur la géométrie des failles encadrant la fosse. Les surfaces des corps sédimentaires serviront de support à la construction du modèle géométrique 3D.

### **Apport de la thermique**

La synthèse bibliographique sur les données thermiques de Limagne d'Allier et de sa périphérie a permis de faire le point sur les données de température et de flux de chaleur en profondeur connues dans cette région. Un rapport indépendant a été réalisé et l'ensemble de la synthèse est rassemblé dans Martelet *et al.* (2003). Cependant, les points majeurs de l'état des connaissances sur le régime thermique de la région étudiée sont résumés dans ce rapport. En Limagne d'Allier, les principaux réservoirs intéressants sont situés dans des formations détritiques arkosiques de bordures de bassin. Les données thermiques sont issues de deux origines distinctes, d'une part une base de données internationale ou *International Heat Flow Commission* et d'autre part une synthèse géothermique de la France (Gable, 1978). Plus ponctuellement, des données de température liées à des forages géothermiques réalisés dans les années 80, ont été retrouvées comme celles du forage Les Vergnes 1 ou Croix-Neyrat situé à

proximité de Riom et celui de Beaumont situé dans la banlieue de Clermont-Ferrand. Ces données montrent que le gradient géothermique dans cette région est voisin de 60 °C/km, ce qui est presque le double du gradient géothermique moyen dans le bassin parisien. Le flux de chaleur montre également des fortes valeurs, d'environ 120 mW/m<sup>2</sup>, ce qui est également le double de la moyenne pour un bassin type bassin de Paris.

La carte des températures à 500 m montre des isothermes allongées selon un axe N20E, avec une isotherme maximale de 40 °C localisée sur la bordure ouest du fossé, entre Riom au sud et Saint-Pourçain-sur-Sioule au nord. Les valeurs de température les plus élevées (supérieures à 40 °C) sont localisées au nord de la zone, en accord avec le tracé des isothermes. La carte des températures à 1 000 m montre également des isothermes allongées selon un axe N20E, avec une isotherme maximale de 80 °C localisée au nord-est de Gannat, c'est-à-dire plus interne au bassin. Nous observons un décalage sud-est par rapport à l'isotherme maximale à 500 m de profondeur. La carte des températures à 1 500 m montre des isothermes allongées selon un axe N35E. Cette modification de l'axe d'allongement peut être causée par l'influence de la faille d'Aigueperse orientée NE-SW. Par rapport aux isothermes maximales à 500 m et 1 000 m, l'isotherme 105 °C à 1 500 m est décalée vers le centre du bassin à l'est de Riom.

Deux forages géothermiques ont été réalisés dans les années 1980 en Limagne d'Allier par la compagnie Géotherma : un forage dans la proche banlieue de Clermont, forage de Beaumont et un forage à proximité de Riom, forage de Les Vergnes dit Croix-Neyrat. Au niveau des températures, le forage de Beaumont a donné une température fond de trou de 44,6 °C à 1 335 m de profondeur. Celui de Les Vergnes a donné une température de 107 °C à 1 886 m. Compte tenu des productivités faibles, aucun de ces forages n'a donné lieu à une exploitation géothermique.

Pour conclure sur les aspects thermiques, nous avons peu d'informations sur l'origine des données, ainsi que sur les méthodes d'interpolation appliquées pour le calcul des isothermes. L'allure générale des isothermes est toujours la même, c'est-à-dire parallèle au bassin, bien que les données soient distribuées de manière hétérogène. En revanche, la position du maximum évolue spatialement du nord-est vers le sud. La zone la plus chaude correspond à des températures de 100 °C à 1 500 m de profondeur sur un axe Aigueperse - Clermont-Ferrand.

### **Apport de la géophysique**

La synthèse géophysique a permis de faire le point sur les anciennes données géophysiques diverses acquises (sismique, magnétisme, gravimétrie, méthodes électriques, magnétotellurique, du bruit sismique, données en forage...) et leurs interprétations, dans la région des Limagnes et à sa périphérie. Ce travail a été réalisé en vue de montrer l'apport des différentes méthodes pour la mise en évidence de zones à potentiel géothermique. L'accent a également été mis sur l'intérêt des différentes méthodes pour la caractérisation en profondeur des corps géologiques, du point de vue géométrique, mais aussi en ce qui concerne leurs propriétés physiques. Un rapport indépendant (Martelet *et al.*, 2003) a été réalisé qui regroupe et développe les éléments géophysiques de cette synthèse en y incluant les aspects thermiques. Dans la mesure où COPGEN devait permettre la mise au point d'une méthodologie d'inventaire du potentiel géothermique basse et moyenne énergie sans acquisition importante de données, ce premier travail a consisté à inventorier les données et la

bibliographie disponibles, les réunir, et effectuer les retraitements qui s'avéraient nécessaires.

Les données géophysiques prises en compte lors de la phase de compilation sont les suivantes :

1. Les données de sismique pétrolière qui permettent, à partir des réflecteurs interprétés, d'établir une trame structurale et géologique. Trois grandes campagnes de sismique pétrolière et une campagne Cogema, qui reste assez mal connue car inédite, couvrent une part importante de la Limagne d'Allier. Ces campagnes permettent une imagerie qui s'étend depuis la sub-surface jusqu'au toit du socle. Ces campagnes anciennes ont montré une forte dissymétrie E-W du bassin d'Allier.
2. Les données de champs de potentiels (gravimétrie et magnétisme aéroporté) qui devront permettre, par des approches indirectes, inverses ou de modélisation directe d'appréhender les grands traits de la structuration du bâti géologique. Pour qu'elles prennent tout leur intérêt, ces méthodes doivent être contraintes par la sismique et par des mesures de densités et de susceptibilité. La carte d'anomalie de Bouguer résiduelle, couvrant la zone d'emprise du projet, reflète l'ensemble des contrastes de densités qui existe sous la surface topographique. Cette carte gravimétrique apparaît très cohérente avec la géologie : les anomalies négatives sont associées aux bassins et aux granites, les anomalies positives se localisent à l'aplomb des unités de socle et volcaniques. À partir des données aéromagnétiques, dans la zone de Clermont-Riom, des anomalies locales de faible amplitude sont visibles. Elles reflètent sans doute la présence de matériel volcanique intercalé dans le bassin. Plus au nord, entre Vichy et Moulins, on observe de fortes anomalies certainement associées à la nature magnétique du socle sous le bassin.
3. Des données d'origines diverses (méthodes électriques/électromagnétiques, méthode du bruit sismique,...) qui représentent des études locales mais que l'on ne doit pas négliger dans la mesure où elles permettent notamment de localiser en profondeur des zones de faille associées à des circulations de fluides. En Limagne, dans la zone de Clermont-Riom, les résultats de sondages électriques et de l'étude du bruit sismique ont été combinés. On a ainsi mis en évidence au NE de Riom, une concordance entre conductivité et bruit sismique accru. Cette zone est par ailleurs localisée sur un accident (comme les autres zones de fort bruit sismique d'ailleurs), ce qui permet, au moins localement, de présager des effets de circulations profondes de fluides à la faveur d'accidents géologiques.
4. Des données de forage : paramètres physiques des roches à partir de diagraphies ou de mesures sur carottes, essais de pompage permettant d'évaluer la qualité des réservoirs *in situ*. De manière générale, les niveaux détritiques du Stampien constituent les principaux horizons réservoir visés jusqu'à présent. Les porosités qui y ont été observées sont souvent significatives (jusqu'à 25-30 %). En revanche, les perméabilités sont généralement médiocres, de l'ordre du milliDarcy, atteignant exceptionnellement plusieurs dizaines de milliDarcy.

### **Apport de l'hydrogéologie**

L'hydrogéologie des Limagnes est assez largement contrôlée par la géométrie des grands accidents structuraux. L'hétérogénéité verticale et latérale du remplissage

sédimentaire des Limagnes (variations latérales de faciès entre la bordure et le centre du bassin, variations de puissance), associée avec les jeux de horsts et grabens qui ont affecté le Massif central à la fin du Miocène, sont deux éléments majeurs qui engendrent des aquifères de type discontinu. Ces aquifères sont donc par essence difficiles à caractériser, car les extrapolations sont hasardeuses, et ce niveau de risque n'a pas encouragé les investigations. De plus, il y a encore à l'heure actuelle une grande méconnaissance de la structure profonde des Limagnes.

Les séquences sédimentaires telles que sables, grès, calcaires, conglomérats, constituent des réservoirs aquifères potentiels. Comme les formations sédimentaires sont souvent de type lagunaire, cela se traduit par des petites lentilles aquifères plus ou moins connectées entre elles, ou prisonnières de niveaux plus imperméables, et sans réel potentiel. La mixité des faciès (calcaires marneux, sables argileux, ...) peut aussi jouer sur les porosités et les perméabilités. La structure et la nature des aquifères jouent donc un rôle important dans leur potentialité.

Les principaux réservoirs intéressants pour les objectifs géothermiques sont, *a priori*, situés dans des formations détritiques arkosiques situées en profondeur, en bordure de bassin, en relation avec les failles (faille d'Aigueperse en particulier) qui affectent le socle cristallin et permettent les remontées d'eaux chaudes.

L'analyse bibliographique a également montré qu'il existe assez peu de documents précis sur les réservoirs potentiels des Limagnes. Les études et ouvrages concernent en majorité le réservoir sédimentaire du Stampien détritique. Sa variabilité tant horizontale que verticale, de faciès, d'épaisseurs, induit une réelle difficulté pour extrapoler des résultats. Les zones les plus favorables *a priori* sont situées en bordures du bassin, dans les zones arkosiques proches du contact avec les failles du socle.

Les fractures en distension des formations du socle constituent elles aussi, à la fois des réservoirs potentiels, et des vecteurs de remontées d'eaux chaudes. De nombreuses sources thermo-minérales sont ainsi positionnées au pied de la faille bordière occidentale de la Limagne d'Allier.

Au niveau de la prospection des réservoirs géothermiques, les formations détritiques du Stampien inférieur ont fait l'objet de travaux de reconnaissance par forage dans les années 1980 en Limagne d'Allier (Beaumont, Croix-Neyrat) pour le chauffage de logements.

Le forage de Beaumont 1 à Clermont-Ferrand, profond de 1 335 m, a montré une faible température au fond de l'ordre de 44 °C. Le débit instantané a été de 26 m<sup>3</sup>/h lors du premier essai, puis le deuxième essai a conduit à estimer la production à 1,5 m<sup>3</sup>/h. En définitive, le réservoir rencontré composé de sables argileux sur une faible épaisseur et d'arkoses très compactes, n'a pas permis d'obtenir un débit suffisant pour que le doublet géothermique soit réalisé.

Le forage de Les Vergnes 1 - La Croix Neyrat, localisé près de Riom et profond de 1 886 m, a rencontré une série détritique à dominance arkosique avec quelques intercalations argileuses ou marneuses. Ce forage a finalement traversé une puissante série à dominante argileuse avec des interstratifications de bancs de grès arkosique d'épaisseur réduite, et de sables fins à matrice argileuse. Au cours des essais de débitmétrie, une température de 98 °C a été mesurée dans le réservoir supérieur entre 1 535 et 1 565 m. Au-delà de cette profondeur, il n'est constaté aucun débit supplémentaire au débitmètre. En conclusion, le débit d'essai relativement faible et le

rabattement important et non encore stabilisé après 27 heures de pompage, ne permettaient pas d'envisager une exploitation industrielle.

### **Apport de la géochimie des fluides**

Les analyses géochimiques (éléments majeurs, traces, isotopes) ont pour but de cibler la source des fluides, l'identification des roches réservoirs, la température maximale atteinte dans les réservoirs profonds et les temps de résidence. Dans le domaine des eaux souterraines au sens large (froide, chaude, minérale...), l'utilisation d'outils géochimiques permet de différencier une eau de son environnement hydrogéologique.

Dans le cadre de cette étude, une synthèse bibliographique sur les caractéristiques des eaux thermales du Massif central en général, et sur les Limagnes en particulier, a été réalisée et a fait l'objet d'un rapport détaillé par Serra *et al.* (2003).

À partir de la composition chimique des fluides inventoriés, une estimation des températures profondes de ces eaux est proposée à l'aide des géothermomètres chimiques. Cette revue a donc pour principal objectif de rassembler les nombreuses données géochimiques disponibles dans la littérature sur les sources thermales et de proposer des éléments de réflexion sur les sites les plus favorables à partir d'arguments hydrogéochimiques.

Les données chimiques et isotopiques existantes dans la région des Limagnes ont été répertoriées au sein de 14 bases de données. Au total, 961 analyses ont été recensées sur la zone d'étude, celles-ci correspondent à 285 points d'eau répertoriés.

Les 591 analyses d'éléments majeurs qui ont une balance ionique comprise entre - 5 et + 5 %, ont été reportées dans le diagramme de Piper, ce qui permet de mettre en évidence les différents types d'eau en présence ainsi que leur variabilité au sein des entités géographiques. La plupart des sources présente un faciès bicarbonaté sodique. Le second faciès le plus représenté correspond au type chloruré calcique, avec en particulier la très grande majorité des échantillons de Châtelguyon situé sur la bordure ouest de la Limagne d'Allier. Les plus fortes minéralisations sont observées à *Vals les bains* avec deux eaux entre 9 et 9,5 g/l. Les eaux de *Vichy*, *Sainte-Marguerite* et *Châtelguyon* ont des minéralisations comprises entre 6 et 8 g/l. La grande hétérogénéité observée dans les familles chimiques tant pour les éléments majeurs que les éléments en traces peut être mise en relation avec les données géologiques locales des émergences, et la nature probable des réservoirs en profondeur.

Au niveau de la faille d'Aigueperse, le gaz carbonique de ces eaux carbogazeuses provient partiellement du dégazage de la croûte. Ces eaux ont acquis une signature d'eaux bicarbonatées chlorurées sodiques, relativement concentrées en magnésium. Les géothermomètres Na/K, Na-K-Ca, Na/Li, et Sr/K<sup>2</sup>, donnent des températures concordantes comprises entre 170 et 200 °C pour les eaux de la faille Aigueperse. Les géothermomètres Mg/K<sup>2</sup> et Mg/Li<sup>2</sup> prévoient des températures plus faibles variant de 70 à 130 °C. La répartition de ces températures montre que la plaine de la Limagne d'Allier au niveau de Riom présente les températures les plus élevées.

Les eaux de Châtelguyon ont un comportement qui traduit l'empreinte de la couverture sédimentaire, caractérisée par le jeu des éléments Ca, Mg, SO<sub>4</sub> et à un degré moindre Cl et Sr. Ces sources chlorurées calciques sont très fortement concentrées en Mg,

signe d'un mélange important avec des eaux d'origine superficielle ou d'une dissolution de phases minérales magnésiennes. Ces eaux sont de plus très pauvres en lithium, ce qui confirmerait le mélange avec des eaux superficielles. Leur température à l'émergence varie de 18 à 37 °C. Les géothermomètres Na/K, Na-K-Ca et Na/Li donnent des températures concordantes comprises entre 180 et 200 °C pour Châtelguyon.

Les eaux de Vichy-Saint-Yorre sont carbogazeuses, bicarbonatées sodiques. À Vichy, les températures d'émergence s'échelonnent entre 16 et 66 °C. Lors de leur remontée vers la surface, les eaux profondes sont considérablement altérées car elles traversent des roches sédimentaires. Les analyses chimiques étant très nombreuses, notre étude s'est focalisée sur les sources de Vichy. Celles-ci sont des eaux sodiques carbonatées, relativement pauvres en magnésium et qui par conséquent n'auraient pas subi de mélange important avec des eaux de surface. La température calculée avec le géothermomètre à quartz, donne une température moyenne de 100 °C.

L'ensemble des compositions chimiques observées dans les eaux jaillissant à la bordure ouest de la Limagne d'Allier est compatible avec une température profonde voisine de 200 °C. Au cours de la remontée, différentes réactions entre l'eau riche en CO<sub>2</sub> et la roche encaissante libèreraient Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> et parfois K<sup>+</sup> et déposeraient de la silice. Cette région serait entourée d'une zone à température moindre de l'ordre de 135 à 150 °C avec Vichy au nord-est.

### **Apport du Système d'Information Géographique**

L'ensemble des données présentées dans ce rapport a été implémenté dans un système d'information géographique (SIG) à l'aide du logiciel Arcview 8 (Lieutenant, 2003). Une procédure a été mise en œuvre de manière à mettre dans le même référentiel géographique le maximum d'informations géoscientifiques. De ce fait, les données thermiques (température, isotherme), les données de forage, la géologie de surface, les réseaux de failles connues, la position des sources, la position des profils sismiques, etc, ..., ont été rassemblés dans le même environnement logiciel de manière à pouvoir faire des combinaisons.

À partir de la base de données forage de Limagne d'Allier et de son interprétation en termes de réservoirs, les épaisseurs de niveaux réservoirs ont été cumulées pour chaque forage ayant atteint le socle, c'est-à-dire ceux qui traversent toute la pile sédimentaire.

Pour les 98 forages concernés, l'épaisseur des niveaux détritiques francs ou mixtes a été cumulée et répartie en 4 classes d'épaisseur (0-50 m, 50-150 m, 150-250 m, > 250 m). Connaissant la distribution des températures à une profondeur donnée, un croisement entre la température à 500 m et les gammes d'épaisseurs cumulées de réservoirs potentiels a été réalisé. Ce croisement entre ces classes d'épaisseurs et des valeurs de températures extrapolées à 500 m permet de mettre en évidence les secteurs géographiques les plus chauds et les plus épais, c'est-à-dire les plus intéressants au niveau géothermique.

Il en résulte que deux zones plus chaudes et possédant une épaisseur de réservoir importante s'individualisent : la première au sud de Gannat, la seconde au sud de Riom, avec des températures de 40° pour des épaisseurs de réservoirs supérieures à 250 m.

Dans le cadre de ce projet, où il s'agit de géothermie basse et moyenne énergie, l'intérêt du SIG est de mettre en évidence les zones possédant des capacités de réservoirs potentiels les plus importantes à des profondeurs les plus faibles possibles, pour des températures élevées. Le croisement des informations a permis de mettre en évidence deux zones privilégiées : la première située à 10 km au sud de Gannat et couvre une surface de 20 km<sup>2</sup>, et la seconde située à 5 km au sud de Riom couvre une surface de 9 km<sup>2</sup>, dont l'épaisseur de réservoirs dépasse 250 m, pour des températures supérieures à 35 °C.

En conclusion, la compilation des données disponibles et accessibles sur la zone des Limagnes présente donc un certain nombre de caractéristiques géologiques, thermiques et hydrogéologiques intéressantes du point de vue de la ressource géothermale. À l'échelle régionale, le Massif central en général et la zone des Limagnes en particulier apparaissent comme une zone d'anomalie géothermique anormalement chaude. Comme de nombreux bassins sédimentaires ceinturant les reliefs anciens, les dépôts de fonds de bassin correspondent à des formations détritiques du type sable, conglomérats ou grès susceptibles de posséder des propriétés réservoirs intéressantes (porosité, perméabilité). Cette région est également caractérisée par de nombreuses sources thermales carbogazeuses qui émergent sur les bordures faillées des bassins. L'ensemble de ces facteurs (température, formations détritiques, fluides, failles) est en faveur de circulations thermales dans le bassin et confirme l'intérêt, *a priori*, des Limagnes pour la géothermie basse, voire très basse, et moyenne énergie. Les tentatives d'exploration géothermique réalisées par le passé n'ont pas été très fructueuses. Les parties les plus profondes sont relativement mal connues car l'exploration pétrolière n'était pas orientée vers les formations les plus profondes. Il subsiste donc une certaine méconnaissance des fonds de bassin. Cette synthèse souligne également le rôle des failles (faille d'Aigueperse) comme drains potentiels et ouvre, par conséquent, de nouvelles perspectives de recherche.

## Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	17
<b>2. Présentation de la zone d'étude</b> .....	19
2.1. Quelle géothermie en Limagne ?.....	19
2.2. Pourquoi la zone des Limagnes ? .....	20
<b>3. La géologie</b> .....	23
3.1. Géologie de surface.....	23
3.1.1. Histoire géologique simplifiée des bassins nord Massif central.....	26
3.1.2. Le volcanisme de Limagne d'Allier .....	27
3.2. Géologie à partir des forages en Limagne d'Allier et de Loire.....	32
3.2.1. Schéma tectonique.....	34
3.2.2. Interprétation lithostratigraphique des forages et leur codage.....	35
3.2.3 Coupes géologiques structurales .....	37
3.2.4. Cartographie structurale de la Limagne d'Allier.....	45
3.2.5. Cartographie structurale de la fosse de Clermont-Ferrand - Riom.....	49
3.2.6. Principaux résultats d'après l'étude des forages .....	53
<b>4. La thermique</b> .....	55
4.1. Introduction.....	55
4.2. Les données thermiques dans les bases mondiales.....	55
4.3. Les autres données bibliographiques .....	57
4.4. Forages géothermiques en Limagne d'Allier .....	59
4.4.1. Le forage de Beaumont.....	59
4.4.2. Le forage de Les Vergnes - Croix-Neyrat.....	64
<b>5. La géophysique</b> .....	69
5.1. Introduction.....	69
5.2. La sismique réflexion en Limagne d'Allier .....	70
5.2.1. Les interprétations existantes.....	71

5.2.2. Retraitement des données sismiques.....	72
5.3. Les données de champs de potentiel.....	73
5.3.1. Données gravimétriques.....	73
5.3.2. Données aéromagnétiques.....	74
5.4. Données géophysiques diverses, études localisées.....	75
5.4.1. Dans le bassin de Limagne d'Allier.....	76
5.4.2. En domaine volcanique.....	77
5.5. Propriétés physiques et hydrologiques en forage.....	77
<b>6. L'hydrogéologie.....</b>	<b>79</b>
6.1. Objectifs de la synthèse hydrogéologique.....	79
6.2. Hydrogéologie des Limagnes.....	79
6.3. Synthèse bibliographique.....	80
6.3.1. Données générales extraites des notices des cartes géologiques au 1/50 000.....	80
6.3.2. Données sur les réservoirs.....	83
6.4. Conclusions sur les données hydrogéologiques.....	88
6.5. Les sources thermo-minérales.....	88
<b>7. La géochimie.....</b>	<b>91</b>
7.1. Introduction.....	91
7.2. Les données géochimiques des Limagnes.....	91
7.3. Les données des géothermomètres.....	96
<b>8. Le système d'information géographique.....</b>	<b>101</b>
<b>9. Conclusion.....</b>	<b>105</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>107</b>
<b>Annexe - Fiches de synthèse.....</b>	<b>113</b>

## Liste des figures

- Fig. 1 - Localisation géographique de la zone d'étude du projet COPGEN. Le cadre général correspond à la zone de synthèse élargie servant à la synthèse géoscientifique et la zone interne correspond à la zone focalisée sur laquelle sera réalisée le modèle 3D des réservoirs, le SIG et l'approche socio-économique..... 18
- Fig. 2 - Carte européenne des températures extrapolées à 5 km de profondeur d'après Hurtig *et al.*, 1991..... 21
- Fig. 3 - Extrait de la carte géologique au million et carte géologique simplifiée au niveau de la zone d'étude..... 25
- Fig. 4 - Coupe géologique W-E simplifiée de la Limagne d'Allier d'après la carte géologique au 1/50 000 de Clermont-Ferrand. F : failles normales ; 1 : grès arkosiques ; 2 et 3 : marnes ; 3 : calcaires ; 5 : basaltes..... 26
- Fig. 5 - Coupe théorique d'un diatrème pépéritique à remplissage lacustre montrant les relations entre les différentes unités. L'encart montre une série de profils illustrant les différents niveaux d'érosion (A = plateau de Gergovie ; B = Puy Giroux ; C = Puy de Crouel ; D = Montaudou (modifiée d'après de Goër de Herve, 1995). Les pentes internes du diatrème sont très exagérées. Elles sont généralement voisines de 70° en zone de socle et bien moindres dans les sédiments faiblement consolidés. .... 29
- Fig. 6 - Carte géologique simplifiée de la Chaîne des Puys illustrant les quelques événements récents qui se sont produits sur la bordure occidentale de la Limagne d'Allier (modifiée d'après Camus, 1975). .... 31
- Fig. 7 - Relations entre le volcanisme de la Chaîne des Puys et les pointements volcaniques récents de la Limagne d'Allier (modifiée d'après Camus, 1975). ... 32
- Fig. 8 - Synthèse des âges K-Ar et Ar-Ar du volcanisme de Limagnes s.s. .... 32
- Fig. 9 - Position des ouvrages ayant une profondeur supérieure à 100 m dans la zone d'intérêt. Les traits en bleu représentent les failles. .... 33
- Fig. 10 - Schéma structural de la Limagne d'Allier. Le tracé des failles provient des cartes géologiques au 1/50 000 de la région. .... 34
- Fig. 11 - Log géologique du forage CVG1 de Moulins et son codage d'après le tableau 1. .... 37
- Fig. 12 - Position des coupes géologiques en rouge passant par les forages dans le bassin d'Allier. .... 38
- Fig. 13 - Coupe géologique NW-SE située au nord du bassin de Moulins notée C1. .. 39

Fig. 14 - Coupe géologique NW-SE située au centre du bassin de Moulins, notée C2. ....	40
Fig. 15 - Coupe géologique W-E située au sud du bassin de Moulins, notée C3. ....	42
Fig. 16 - Coupe géologique située au sud du bassin de Moulins, notée C4. ....	43
Fig. 17 - Coupe géologique située au nord du bassin de Moulins, notée C5. ....	44
Fig. 18 - Carte du toit du socle noté S0. Les valeurs indiquées en rouge représentent les cotes NGF du toit du socle dans les forages. ....	45
Fig. 19 - Carte des corps détritiques liés à la séquence S1. Les valeurs indiquées en rouge représentent les cotes NGF du toit de la séquence S1 dans les forages. Les valeurs indiquées en bleu représentent l'épaisseur de la séquence S1. ....	46
Fig. 20 - Carte des corps détritiques liés à la séquence S2. Les valeurs indiquées en rouge représentent les cotes NGF du toit de la séquence S2 dans les forages. Les valeurs indiquées en bleu représentent l'épaisseur de la séquence S2. ....	47
Fig. 21 - Carte des corps détritiques liés à la séquence S3. Les valeurs indiquées en rouge représentent les cotes NGF du toit de la séquence S3 dans les forages. Les valeurs indiquées en bleu représentent l'épaisseur de la séquence S3. ....	48
Fig. 22 - Carte simplifiée du toit du socle dans le bassin de Clermont. Les valeurs indiquées en rouge représentent les cotes NGF au toit du socle. Les croix indiquent la position des forages dans la BSS. ....	49
Fig. 23 - Carte simplifiée des apports détritiques de la séquence S1 dans le bassin de Clermont. Les valeurs indiquées en rouge représentent les cotes NGF au toit de la séquence S1. Les valeurs indiquées en bleu représentent l'épaisseur de la séquence S1. Les traits jaunes indiquant la position des corps détritiques avec leur organisation en biseau (flèche). ....	50
Fig. 24 - Carte simplifiée des apports détritiques de la séquence S2 dans le bassin de Clermont. Les valeurs indiquées en rouge représentent les cotes NGF au toit de la séquence S2. Les valeurs indiquées en bleu représentent l'épaisseur de la séquence S2. Les traits jaunes indiquent la position des corps détritiques avec leur organisation en biseau (flèche). ....	51
Fig. 25 - Carte simplifiée des apports détritiques de la séquence S3 dans le bassin de Clermont. Les valeurs indiquées en rouge représentent les cotes NGF au toit de la séquence S3. Les valeurs indiquées en bleu représentent l'épaisseur de la séquence S3. Les traits jaunes indiquent la position des corps détritiques. ....	52
Fig. 26 - Données de flux de chaleur issues de la base mondiale (IHFC database, Pollack <i>et al.</i> , 1993). Ces données diffèrent légèrement de celles compilées par Vasseur (1982), car elles ne sont pas corrigées des effets de paléoclimatologie. ....	56

Fig. 27 - Données de gradient thermique issues de la base mondiale (IHFC database, Pollack <i>et al.</i> , 1993) (mêmes remarques que pour la figure 26). ...	57
Fig. 28 - Isothermes aux profondeurs de 500 m, 1 000 m et 1 500 m (Gable, 1978) reportées sur un fond géologique simplifié. ....	60
Fig. 29 - Températures et isothermes aux profondeurs de 500 m, 1 000 m et 1 500 m (Gable, 1978) reportées sur un fond géologique simplifié. ....	61
Fig. 30 - Carte des température extrapolées au toit du socle (Hérault, 1974). ....	62
Fig. 31 - Profil de température du 22 avril 1981 réalisé dans le forage de Beaumont 1, Clermont-Ferrand. ....	63
Fig. 32 - Profils de température (A, B) et de débitmétrie (C) réalisés dans les parties supérieure (0-1 550 m) et inférieure (1 440-1 885 m) du forage Les Vergnes 1, Croix-Neyrat. ....	65
Fig. 33 - Diagraphies Gamma Ray (A) et sonique (B) réalisées dans la partie profonde (1 450-1 885 m) du forage Les Vergnes 1, Croix-Neyrat. ....	67
Fig. 34 - Volume produit en fonction du temps dans le forage Les Vergnes 1, Croix-Neyrat. ....	68
Fig. 35 - Localisation des profils des quatre campagnes de sismique pétrolière dans la zone Clermont - Riom - Gannat. En jaune, l'extension du bassin. ....	70
Fig. 36 - Isobathes du toit du socle déduits des campagnes de sismique pétrolière réalisées en Limagne d'Allier, et dans une moindre mesure, de la gravimétrie (Morange <i>et al.</i> , 1971). ....	71
Fig. 37 - Exemple de carte extraite de Seisvision montrant le toit de l'isobathe de l'Éocène en Limagne d'Allier. En jaune, les profondeurs faibles (400 m), en violet, les profondeurs fortes (1 100 m). ....	72
Fig. 38 - Anomalie de Bouguer résiduelle sur la zone d'emprise de COPGEN. L'extension des bassins (anomalies négatives) est parfaitement identifiable. ....	74
Fig. 39 - Carte d'anomalies magnétiques des levés INAG-BRGM, réduite au pôle et « drapée » à 700 m au-dessus de la topographie. La réduction au pôle permet, en l'absence d'aimantation rémanente des roches, de s'affranchir de l'inclinaison du champ magnétique et de relocaliser les anomalies à l'aplomb des sources qui les génèrent. ....	75
Fig. 40 - Zone de Riom-Gannat : localisation et intensité du bruit sismique et sa corrélation avec des zones de faible résistivité (Horn et Stanudin, 1975). ....	76
Fig. 41 - Épaisseur du Stampien inférieur détritique en Limagne bourbonnaise. Les isopaques sont exprimées en mètre (Gable <i>et al.</i> , 1980). ....	85

Fig. 42 - Carte de localisation des principales sources de la zone d'étude reportée sur un fond géologique simplifié. ....	92
Fig. 43 - Carte de localisation simplifiée des sources regroupées dans 14 bases de données. ....	93
Fig. 44 - Diagramme de Piper des 591 données dont la balance ionique est comprise entre - 5 et + 5 %. ....	95
Fig. 45 - Histogrammes de distribution des minéralisations des eaux regroupées au sein des 14 bases de données. La carte superposée aux histogrammes montre la valeur modale de la salinité. ....	96
Fig. 46 - Températures des eaux thermales de la Limagne ouest calculées avec les géothermomètres Na/K, Na/Li, Na-K-Ca et Sr/K <sup>2</sup> (source Fontaine salée supprimée). ....	97
Fig. 47 - Températures des eaux thermales de la Limagne ouest calculées avec les géothermomètres Mg/K et Mg/Li. ....	98
Fig. 48 - Interpolation des épaisseurs cumulées des réservoirs potentiels pour les forages ayant atteints le socle. ....	102
Fig. 49 - Croisement entre les épaisseurs cumulées des niveaux réservoirs et les températures extrapolées à 500 m. ....	103

## **Liste des tableaux**

Tabl. 1 - Synthèse lithostratigraphique et codification des horizons réservoirs et non réservoirs dans le bassin. ....	36
Tabl. 2 - Caractéristiques des enregistrements diagraphiques mesurés dans le forage Les Vergnes - Croix-Neyrat. ....	64
Tabl. 3 - Données thermiques sur quelques forages de la Limagne bourbonnaise. ....	86
Tabl. 4 - Résultats des mesures pétrophysiques sur carottes de forages pétroliers. ....	86
Tabl. 5 - Synthèse des résultats sur les réservoirs entre Moulins et Vichy. ....	87
Tabl. 6 - Synthèse des résultats sur les réservoirs dans la zone des forages de Barberier 101 et Brout Vernet 101. ....	87
Tabl. 7 - Caractéristiques des sources thermo-minérales. ....	89
Tabl. 8 - Liste des paramètres géochimiques retenus au sein des bases de données. ....	94

# 1. Introduction

Dans le cadre d'une politique de relance des énergies renouvelables sur le territoire métropolitain, l'ADEME et le BRGM ont mis en place un projet méthodologique d'inventaire de la ressource géothermale au travers de la convention de recherche n° 05 02 037 signée le 29 octobre 2002. Ce projet qualifié COPGEN ou **CO**mpilation du **P**otentiel **G**éothermique **N**ational, s'est focalisé sur la zone des plaines de Limagnes, qui correspond géologiquement à une série de bassins tertiaires situés sur la bordure nord du Massif central (fig. 1).

Sous le qualificatif des plaines de Limagnes, on distingue en Auvergne :

- au nord-ouest, la Limagne d'Allier qui regroupe de l'amont vers l'aval, la Limagne de Brioude et d'Issoire au sud, la Grande Limagne ou Limagne de Clermont au centre et la Limagne Bourbonnaise au nord ;
- au nord-est, on parle de Limagne de Loire, qui regroupe le bassin de Roanne - Montbrison. Les Limagnes d'Allier et de Loire, sont séparées par les monts du Forez.

Le projet COPGEN a pour objectif de mettre au point une méthodologie d'inventaire du potentiel géothermique basse et moyenne énergie par la réalisation d'une application pilote, centrée principalement sur la Limagne d'Allier. Ce projet vise à démontrer comment les connaissances (nouvelles) acquises durant les deux dernières décennies, c'est-à-dire depuis les derniers inventaires réalisés dans cette région, ainsi que l'évolution des outils d'interprétation géophysique et géochimique et des logiciels de modélisation 3D permettent d'améliorer la connaissance du potentiel géothermique.

Ce projet vise donc à délimiter les zones qui apparaissent, *a priori*, les plus favorables pour l'implantation de forages géothermiques de basse et moyenne température, en croisant la ressource potentielle et les besoins. Il s'agit d'une phase de reconnaissance préalable à la sélection de zones qui seraient ultérieurement reconnues de façon plus approfondie.

Cet inventaire préliminaire s'appuie essentiellement sur des données déjà disponibles (géologiques, géophysiques, thermiques, hydrogéologiques, géochimiques, socio-économiques) et une acquisition limitée de nouvelles données en particulier en géochimie des fluides. Cette étude doit déboucher sur une évaluation du potentiel géothermique des Limagnes d'Allier, de Loire et de bassins tertiaires périphériques, ainsi que sur une proposition d'acquisition de données complémentaires (géophysique, forages) afin de cerner plus précisément le potentiel de certaines cibles.

Ce rapport présente, de manière exhaustive, les résultats de la phase de compilation des données du sous-sol et/ou des connaissances disponibles dans les différents domaines géoscientifiques, à savoir la géologie de surface et en forage, la géophysique d'infrastructure (gravimétrie-magnétisme) et la géophysique pétrolière (sismique), la thermique, l'hydrogéologie, et les connaissances sur la nature géochimique des fluides (sources thermales). De plus, la mise en place du Système



## 2. Présentation de la zone d'étude

### 2.1. QUELLE GÉOTHERMIE EN LIMAGNE ?

La réalisation de doublets géothermiques pour une exploitation des ressources basse et moyenne énergie du Bassin parisien et du Bassin aquitain remonte au moins à une vingtaine d'années. Ces développements ont reposé sur la connaissance acquise jusqu'au milieu des années 70 par l'exploration pétrolière (sismique et forage). Depuis cette époque, la connaissance géologique et sismique a considérablement progressé ainsi que les outils conceptuels de la modélisation géologique 3D. Ceci doit permettre l'identification des ressources présentes dans d'autres bassins sédimentaires pour lesquels les tentatives anciennes se sont généralement soldées par des échecs, en dépit de potentialités géothermiques élevées.

Par ailleurs, l'utilisation de la géothermie basse et moyenne enthalpie nécessite une proximité suffisante entre la ressource et les consommations énergétiques. Aussi, un inventaire des ressources géologiques doit-il s'accompagner d'un inventaire des besoins énergétiques classés selon leur typologie (chauffage d'immeubles, procédés industriels, usage agricole) et leur localisation, et tenant compte des contraintes (zones protégées). Enfin, les innovations technologiques ayant pris place depuis 25 ans peuvent dorénavant faire considérer comme exploitables des ressources qui auraient été négligées il y a 25 ans, faute de technologies d'exploitation appropriées.

Les Limagnes ont donc été choisies comme zone test car les besoins énergétiques y sont, *a priori*, diversifiés et un potentiel certain y est mis en évidence par les nombreuses sources thermo-minérales exploitées et par le gradient géothermique élevé. Plus précisément, trois zones seront étudiées : la Limagne d'Allier, la Limagne de Loire et le graben de Saint-Flour - le Malzieu. L'inventaire des ressources est néanmoins beaucoup plus complexe que dans une cible de type Dogger du Bassin parisien. En effet, dans ce type de bassin tertiaire adossé au Massif central, les principales difficultés sont :

- la présence de petits corps sédimentaires, quelquefois découpés par des failles conduisant à des aquifères de petites dimensions ;
- la présence de sédiments détritiques généralement arkosiques qui ont été le siège de phénomènes de dissolution et de recristallisation ;
- la présence de calcaires généralement marneux ayant des perméabilités médiocres ;
- une grande méconnaissance de la structure profonde des Limagnes ;
- et enfin, la possibilité de conflit d'usage.

Ces difficultés ont pour conséquence que la modélisation géologique a un rôle prépondérant, en particulier pour la délimitation des formations perméables. Notons enfin qu'on n'obtiendra pas le même niveau de connaissance en Limagne de Loire qu'en Limagne d'Allier, du fait que les données géophysiques et les sondages sont moins abondants en Limagne de Loire.

La synthèse pluridisciplinaire a donc été réalisée à deux niveaux :

- au niveau régional, avec la compilation et la recherche d'informations principalement géologiques, géophysiques et géochimiques dans une zone élargie (fig. 1) ;
- au niveau local, avec une synthèse plus focalisée sur la Limagne d'Allier dans laquelle on réalisera la réinterprétation de la sismique pétrolière, puis la modélisation géométrique des niveaux réservoirs et l'analyse des besoins socio-économiques en énergie (fig. 1).

Au niveau administratif, la zone d'intérêt correspond à une partie de la région Auvergne et couvre les départements de l'Allier (03) au nord et du Puy-de-Dôme (63) au sud.

## 2.2. POURQUOI LA ZONE DES LIMAGNES ?

La zone des Limagnes présente un certain nombre de caractéristiques géologiques, thermiques et hydrogéologiques intéressantes du point de vue de la ressource géothermale. À l'échelle régionale, sur la carte des températures extrapolées à 5 km de profondeur (Hurtig *et al.*, 1991), le Massif central en général et la zone des Limagnes en particulier apparaissent comme une zone d'anomalie géothermique anormalement chaude (fig. 2). Géologiquement, les Limagnes correspondent à des bassins tertiaires ou grabens qui appartiennent au rift ouest européen comme le fossé rhénan (Nehlig *et al.*, 1999 ; Michon et Merle, 1999a). Il s'agit donc d'une zone où le Moho se situe à une profondeur moindre, ce qui peut s'expliquer, en partie, par une augmentation locale des températures. La Limagne d'Allier est caractérisée par une activité volcanique tertiaire dans le bassin et quaternaire sur ces bordures (Chaîne des Puys), ce qui est également en faveur d'un stock thermique potentiel. Comme la plupart des bassins sédimentaires ceinturant les reliefs anciens, les dépôts de fonds de bassins correspondent à des formations détritiques de type sable, conglomérat ou grès susceptibles de posséder des propriétés réservoirs intéressantes (porosité, perméabilité). Cette région est également caractérisée par de nombreuses sources thermales carbogazeuses qui émergent sur les bordures faillées des bassins. L'ensemble de ces facteurs (température, grès, fluides) est en faveur de circulations thermales dans le bassin et confirme l'intérêt, *a priori*, des Limagnes pour la géothermie.

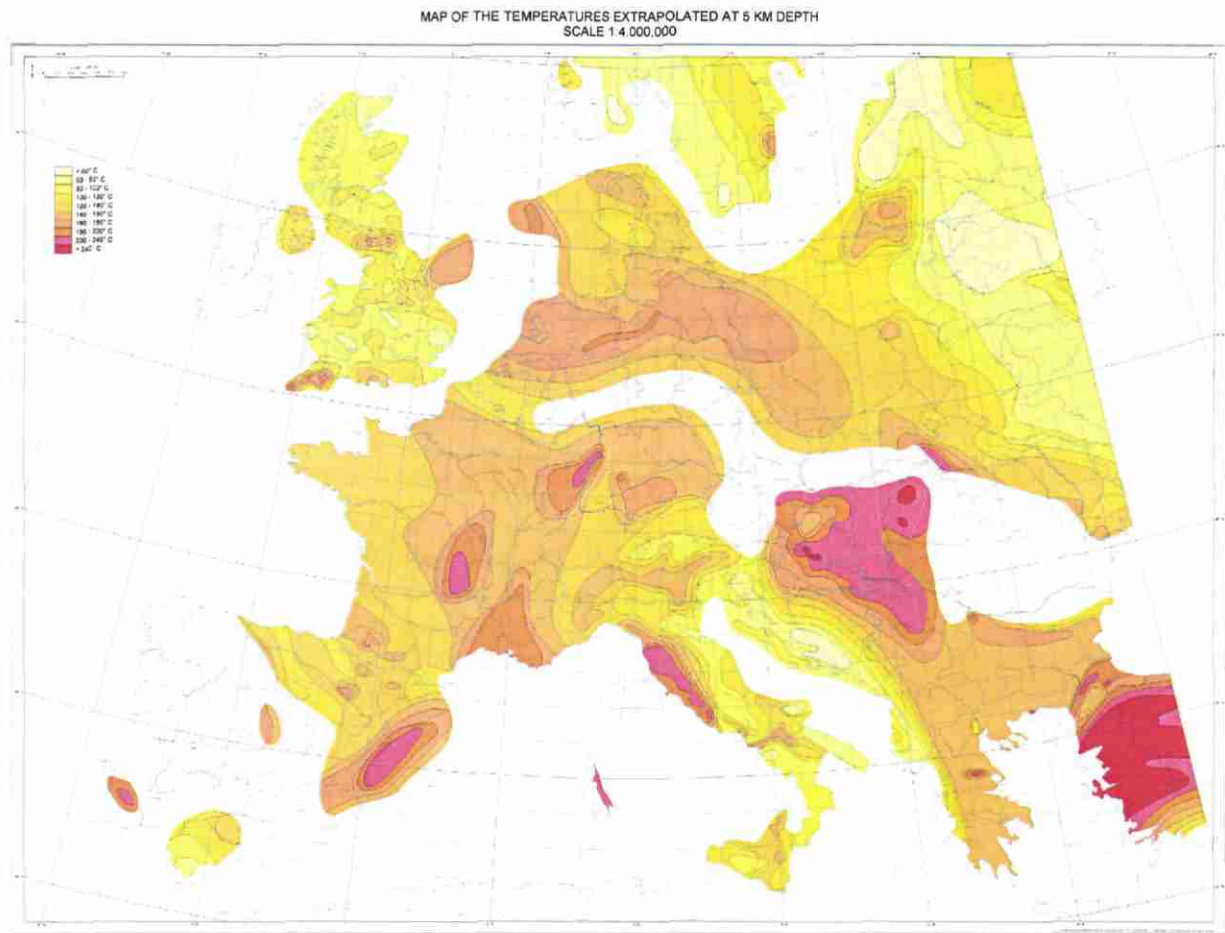


Fig. 2 - Carte européenne des températures extrapolées à 5 km de profondeur d'après Hurtig et al., 1991.



## **3. La géologie**

### **3.1. GÉOLOGIE DE SURFACE**

L'objectif des études géologiques est de préciser la paléoévolution régionale, l'histoire géologique, la géométrie, la lithologie et les propriétés physiques des corps sédimentaires en relation avec les formations du substratum et du volcanisme. Ces travaux vont permettre de caractériser les réservoirs de la ressource géothermale : corps détritiques et carbonatés, zones faillées, diatrèmes volcaniques.

**La zone étendue** est constituée, à l'est, de la Limagne de Loire, et à l'ouest, de la Limagne d'Allier, séparée par un bombement du socle qui forme les monts du Forez et les monts du Livradois. De plus, les petits bassins de Le Malzieu-Saint Flour ou bassins margeridiens, en position plus interne dans le Massif central, appartiennent également à cette zone étendue. Topographiquement, la région d'intérêt correspond à des dépressions subméridiennes d'altitude moyenne de 350 m bordées par des reliefs culminant à une altitude de 1 428 m à l'ouest (Puy de Dôme) et de 1 634 m à l'est (Pierre-sur-Haute). Ils constituent des zones favorables à l'infiltration, la recharge et l'alimentation des nappes par les circulations à grande échelle. Une carte géologique simplifiée synthétise les grands ensembles géologiques affleurant dans cette région (fig. 3).

**La Limagne d'Allier** est un fossé d'effondrement ou graben, compartimenté par des failles (fig. 4), orienté NS à NNE entre le plateau des Dômes à l'ouest et les monts de la Madeleine et du Forez à l'est. La zone d'étude, qui a une superficie d'environ 22 600 km<sup>2</sup>, est découpée par un réseau important de failles orientées NS, NNE, et NE-SW. Au sud de Clermont-Ferrand, de nombreux reliefs volcaniques correspondent à des points de sorties volcaniques. Il s'agit d'édifices ponctuels, essentiellement post-rift et post-remplissage sédimentaire. Les données de géologie de surface dont nous disposons correspondent à une extraction de la carte géologique au million (fig. 3). Dans le bassin tertiaire affleurent des formations dont l'âge varie de l'Oligocène au Pliocène ainsi que des formations sédimentaires du Pléistocène. Des pointements volcaniques d'âge Oligocène terminal et Miocène moyen, localisés plus au sud, recourent ces séries sédimentaires. Les horsts qui bordent le bassin sont constitués d'une part d'entités métamorphiques, magmatiques, volcano-sédimentaires et sédimentaires faisant partie du socle varisque (hercynien) du Massif central, et d'autre part, d'édifices volcaniques d'âge tertiaire à quaternaire, comprenant notamment les appareils de la chaîne des Puys, située au sein du plateau des Dômes. Le socle varisque constitue en outre le soubassement de la Limagne. La coupe géologique perpendiculaire au bassin (fig. 4) précise la succession des terrains de la Limagne d'Allier, au niveau de Clermont-Ferrand. Les terrains arkosiques, réservoirs géothermiques potentiels, sont situés en fond de bassin.

**La Limagne de Loire** ou plaine du Forez est également un fossé d'effondrement orienté NNW-SSE. Deux sous-bassins tertiaires, séparés par des formations carbonifères la composent : au nord, le bassin de Roanne et au sud, le bassin de Montbrison. Comme pour la Limagne d'Allier, ces sous-bassins à remplissage oligo-miocène sont ceinturés par des reliefs, constitués essentiellement de terrains cristallins

d'âge paléozoïque, limités par des failles bordières normales. Dans le bassin de Montbrison, des affleurements volcaniques miocènes sont également connus sur les bordures et à l'intérieur de la plaine.

Entre les parties méridionales des Limagnes d'Allier et de Loire se trouve le petit **bassin d'Ambert** d'orientation N-S et de remplissage oligocène, encastré dans le socle cristallin varisque entre les monts du Livradois à l'ouest et les monts du Forez à l'est.

Plus au sud, plusieurs petits bassins tertiaires ou **bassins margeridiens** (Saint-Flour, Le Malzieu, Neussargues) s'individualisent entre, d'une part, le volcan du Cantal et, d'autre part, le massif granitique de la Margeride (Nehlig *et al.*, 2001). La bordure orientale du Cantal vient buter sur un demi-graben oligocène qui s'étend de Neussargues (Cantal) au Malzieu (Lozère), limité par des accidents de direction NW-SE. Ces fossés margeridiens se subdivisent en trois sous-bassins, séparés par des seuils, dont le plus important est celui de Saint-Flour. Les dépôts sont aujourd'hui partiellement masqués par des coulées basaltiques postérieures, mais la succession stratigraphique exposée varie peu d'un bassin à l'autre.

**Le bassin de Saint-Flour** est caractérisé par une sédimentation essentiellement détritique. Les faciès calcaires restent très marginaux et principalement représentés par des concrétions pédogénétiques enrichies en quartz. La série débute par des argiles rutilantes à kaolinite, directement héritées de l'altération du socle gneissique, dont l'épaisseur varie de 25 à 50 m. Bien qu'azoïques, ces dépôts ont été attribués à la base de l'Oligocène inférieur (faciès Sannoisien) ; ils pourraient cependant résulter du remaniement de paléosols plus anciens, d'âge éocène. Des argiles graveleuses, bariolées, viennent localement raviner les argiles rutilantes, mais reposent le plus souvent directement sur le socle. Puissantes au maximum de 80 m, ces argiles montrent localement, vers leur sommet, l'intercalation de lentilles sableuses quartzo-feldspathiques et micacées, de quelques bancs gréseux à ciment carbonaté et de concrétions calcaréo-dolomitiques datés du Stampien.

Plus au nord, dans **le bassin de Neussargues**, seules sont connues les argiles bariolées qui, à l'inverse, apparaissent dilatées, cumulant des épaisseurs pouvant excéder 150 m.

Enfin, plus au sud, dans **le bassin de Malzieu**, des grès rouges à matrice kaolinique viennent directement coiffer le socle, témoignant du remaniement, sans doute précoce, d'anciens paléosols. L'essentiel de la sédimentation terrigène du bassin est cependant constitué par des argiles sableuses bariolées plus récentes, car contemporaines des dépôts « stampiens » du bassin de Saint-Flour. Ces derniers peuvent atteindre ici des puissances voisines de 100 m. Ces niveaux renferment, comme dans le bassin de Saint-Flour, des éléments arrachés au socle et un mélange de kaolinite et de montmorillonite. Sur la bordure occidentale du bassin (Saint-Léger-du-Malzieu), les dépôts s'amincissent fortement (quelques mètres seulement), passant à des argiles vertes, à lentilles calcaires, qui sont rapportées au « Sannoisien ». Les argiles sont surmontées par des meulières qui passent à des entablements de silex. Les relations stratigraphiques entre la série argilo-siliceuse et les argiles bariolées sont mal connues et encore débattues, mais il apparaît que la première unité vient combler des chenaux ravinant les unités antérieures.

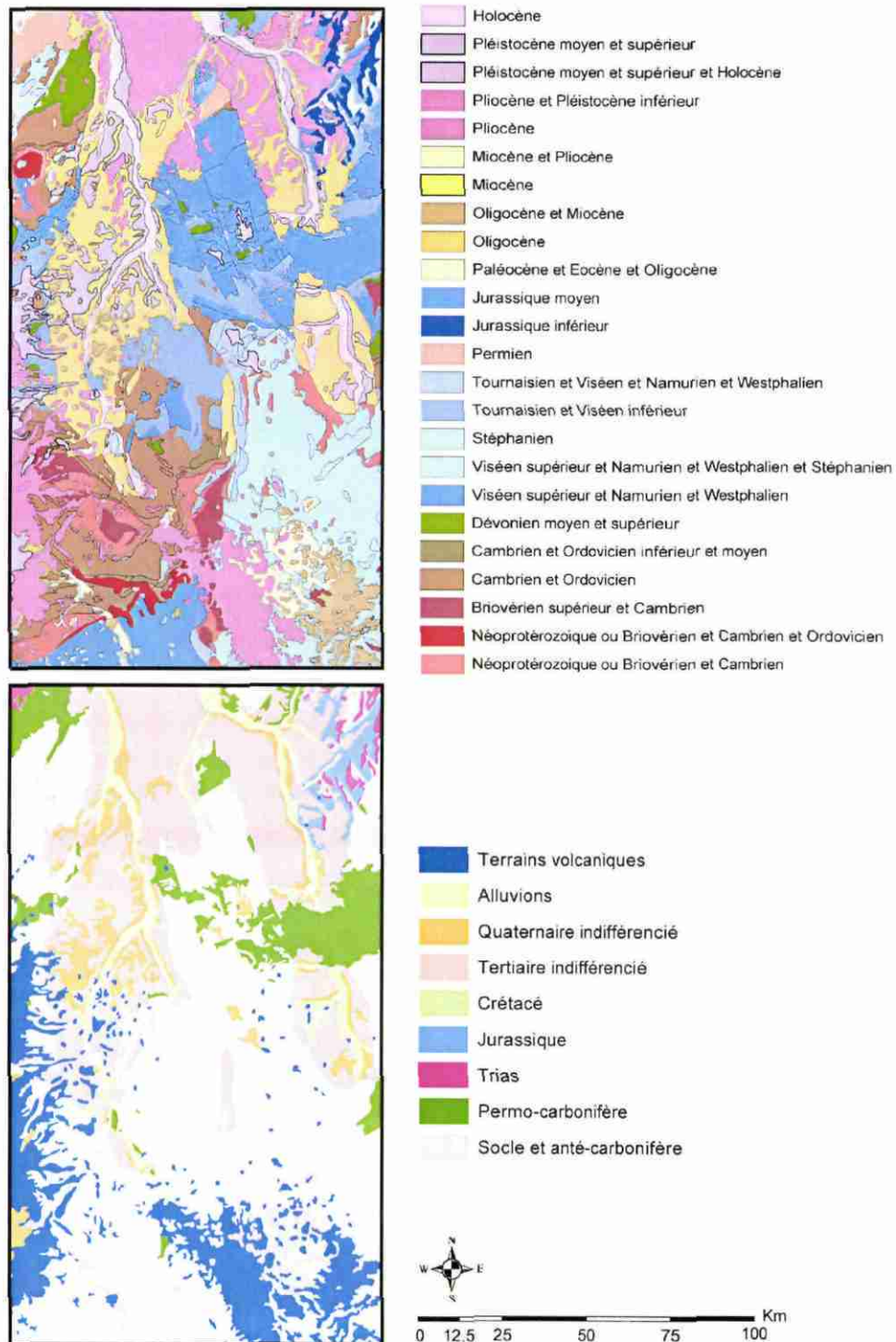
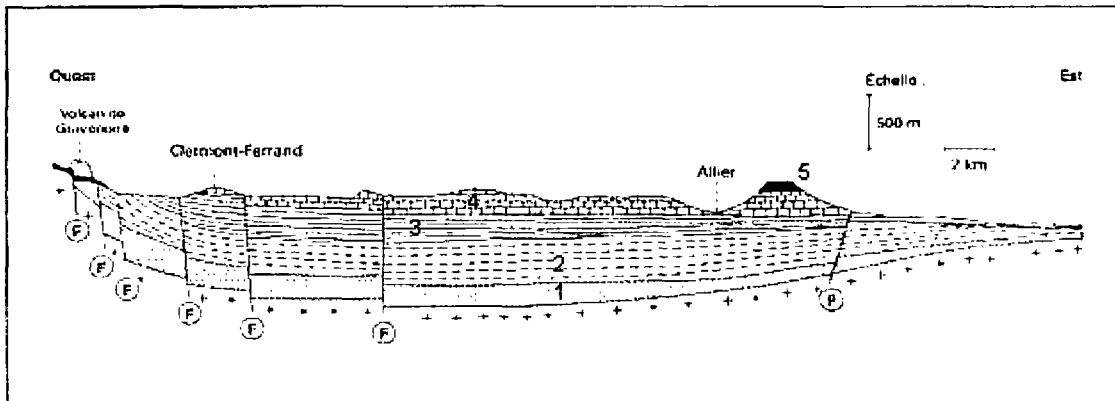


Fig. 3 - Extrait de la carte géologique au million et carte géologique simplifiée au niveau de la zone d'étude.



**Fig. 4 - Coupe géologique W-E simplifiée de la Limagne d'Allier d'après la carte géologique au 1/50 000 de Clermont-Ferrand. F : failles normales ; 1 : grès arkosiques ; 2 et 3 : marnes ; 3 : calcaires ; 5 : basaltes.**

### 3.1.1. Histoire géologique simplifiée des bassins nord Massif central

Les bassins tertiaires du Massif central appartiennent au rift ouest-européen initié à l'Éocène et mis en place à l'Oligocène durant la phase d'extension qui affecte la plateforme ouest-européenne en avant de la chaîne alpine. Contrairement aux structures très localisées et linéaires du type fossé rhénan, de nombreux grabens de taille et d'orientation variées (NNE-SSW à NE-SW, NW-SE), s'individualisent dans le Massif central. L'analyse combinée du MNT (Modèle Numérique de Terrain) et de données de terrain a montré que le nord du Massif central est caractérisé par un système de grabens et de horsts orientés N-S tandis que dans sa partie sud, ce sont les directions NW-SE et NE-SW qui dominent (Michon et Merle, 1999b ; 2001). Ces auteurs rapportent que l'histoire tertiaire et quaternaire du Massif central se caractérise par la succession de deux épisodes tectoniques : une extension E-W Oligocène, qui réactive les directions antérieures, et une surrection post-oligocène qui perturbe les bassins préalablement formés. Cette surrection est globalement parallèle à l'anomalie sismique sous-jacente mise en évidence par tomographie (Granet *et al.*, 1995) et interprétée comme une anomalie thermique profonde.

Les fossés de Limagnes, principalement localisés au nord du Massif central, se caractérisent par une évolution typique d'un rift passif et montrent (Merle et Michon, 2001) :

- une orientation subméridienne, une subsidence forte avec une sédimentation importante (> 3 000 m) ;
- une sédimentation active entre l'Éocène supérieur et l'Oligocène, réalisée au niveau de la mer comme en témoignent les incursions marines répétées ;
- un amincissement crustal important, jusqu'à 25 % dans le fossé de Limagne d'Allier ;
- un volcanisme dispersé et localisé à l'ouest, qui ne débute qu'à la fin de la phase de sédimentation pour s'amplifier au Miocène inférieur ;
- un second épisode magmatique qui démarre au Miocène supérieur. Cet événement ne coïncide pas avec un amincissement crustal mais est contemporain du soulèvement de la région.

Par ailleurs, ces fossés s'organisent selon un dispositif spatialement étalé sur près de 200 km selon la direction W-E par opposition aux autres bassins tertiaires du rift ouest européen du type fossé rhénan plus localisés. Ils sont limités à l'ouest par le sillon houiller et à l'est par la faille bordière du fossé de la Bresse. Au nord, il s'agit du système de Limagne d'Allier, du bassin d'Ambert et du bassin du Forez ou Limagne de Loire, et plus au sud, d'une série de petits bassins comme ceux de Saint-Flour et de Le Malzieu. Ces dépressions de taille variable séparées par des seuils résultent de la réactivation de systèmes de fractures tardi-hercyniennes de direction NW-SE au sud et NE-SW au nord. Ce dispositif en bassin est le siège d'une importante subsidence à l'Oligocène avec par exemple, 3 000 m de sédiments au niveau de Riom. On observe la mise en place de dépôts clastiques près des bordures et de sédiments argilo-carbonatés dans la partie plus centrale de la fosse. Les sédiments sont essentiellement lacustres ou palustres sous une faible tranche d'eau avec des évidences d'émersion (Briot *et al.*, 2001a). Durant la période principale de sédimentation, trois phases principales de rejeu de fractures hercyniennes sont identifiées par la présence de cycles sédimentaires (Briot *et al.*, 2001b). Cette activité est caractérisée par des dépôts fluviatiles à la base de nature détritique indiquant une forte activité tectonique, recouverts par des sédiments chimiques de nature carbonatée, lagunaires ou lacustres. Les cycles sont localement incomplets ou absents et se traduisent par de fortes variations d'épaisseur liées à des arrêts ou ralentissements de la subsidence. La première séquence, relativement régionale, datée de l'Éocène supérieur, est réduite en épaisseur dans le bassin d'Issoire, plus épaisse vers Riom (300 m), et encore plus épaisse au sud vers Brioude (600 m). La seconde séquence (Rupélien inférieur), surtout développée sur Riom (1 500 m), est caractérisée par des faciès carbonatés et évaporitiques. La troisième séquence (Rupélien supérieur-Aquitainien), est présente sur l'ensemble de la fosse et atteint un maximum de 600 m à Riom. Sa base est marquée par des incursions marines répétées (Briot *et al.*, 2001a). Dans le secteur Clermont-Riom, Briot *et al.* (2001b) soulignent le rôle prépondérant des accidents NS et NE-SW, comme celui de la faille d'Aigueperse, qui guident la subsidence. Au nord, à la limite Oligocène-Miocène, la sédimentation lacustre se cantonne à la Limagne bourbonnaise avec la mise en place de structures stromatolitiques. À partir du Burdigalien, les bassins lacustres se comblent et on assiste à une période d'érosion qui se caractérise par la mise en place d'un réseau fluviatile à écoulement vers le nord.

Durant la période de sédimentation, le volcanisme est peu développé. Ce n'est qu'à partir de l'Oligocène jusqu'à l'Actuel que le fossé des Limagnes connaît une intense activité volcanique avec la mise en place d'appareils essentiellement phréato-magmatiques et laviques.

### **3.1.2. Le volcanisme de Limagne d'Allier**

#### ***a) Introduction***

La surface du bassin sédimentaire effondré de la Limagne d'Allier présente, au sud de Clermont-Ferrand, de nombreux reliefs volcaniques qui correspondent, pour la plupart, à des points de sorties volcaniques. Il s'agit de plus de 230 édifices ponctuels dispersés (centres d'émission de coulée, maars, systèmes filoniens, diatrèmes, petits dômes) répartis sur 2 500 km<sup>2</sup>, essentiellement post-rift et post-remplissage sédimentaire. Ils sont principalement constitués de produits volcaniques massifs ou de

formations particulières appelées pépérites, importants par la superficie couverte. Ils se répartissent en deux épisodes principaux entre l'Oligocène terminal et le Miocène moyen avec de rares récurrences plio-quadernaires.

Le premier épisode (21-12 Ma), exprimé essentiellement dans le bassin sédimentaire, correspond aux éruptions qualifiées de « *génération Limagne* ». Le second, rapporté au Pliocène supérieur (3 Ma) est largement représenté en bordure du plateau des Dômes et dans la région de Couzes. Le volcanisme pépéritique est une caractéristique du volcanisme de Limagne. Il est attribué à un dynamisme explosif phréatomagmatique et se présente sous forme de granules de basalte dispersés dans une matrice pélitique.

### ***b) Pétrologie des produits volcaniques***

Les laves miocènes sont à dominante basaltique, de type moyennement à fortement alcalin, sodi-potassique. Elles sont représentées par des néphélinites, basanites, basaltes alcalins, trachybasaltes et téphrites, renfermant de nombreuses enclaves ultrabasiques (péridotites et pyroxénites) témoignant d'une origine très profonde du magma générateur.

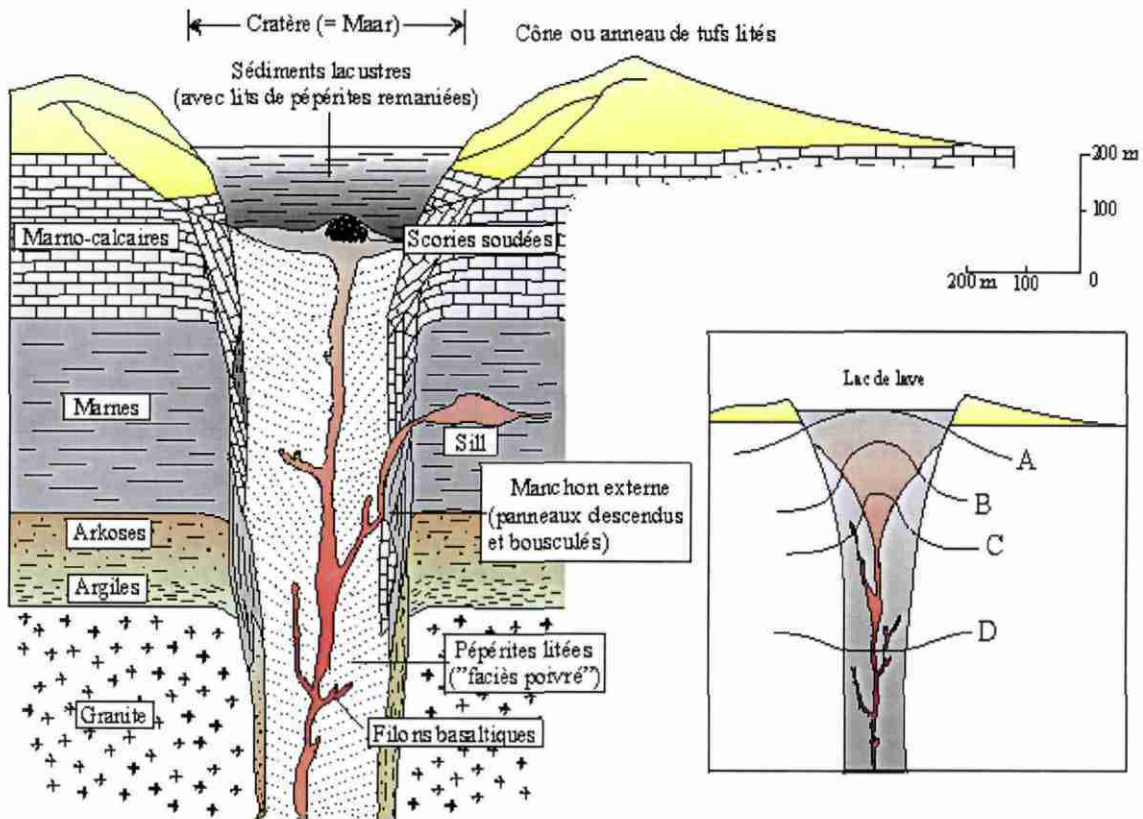
Les laves sont plus évoluées (série complète des basanites aux téphriphonolites et phonolites) dans le comté d'Auvergne, au sud-est de la Limagne de Clermont-Ferrand, qui se présente comme une province volcanique autonome. Les études minéralogiques et géochimiques, sur éléments majeurs et traces, ont montré que la série volcanique évoluait par cristallisation fractionnée, en deux étapes, sans contamination crustale (Cheguer, 1996).

### ***c) Les dynamismes éruptifs***

#### **• Le volcanisme pépéritique**

Le volcanisme pépéritique, attribué à un dynamisme explosif phréatomagmatique, comparable à celui des diatrèmes observés dans d'autres régions du monde, est fréquent en Limagne d'Allier. Les dépôts sont constitués de blocs, de graviers et de granules basaltiques baignés dans un ciment pélitique argilo-calcaire issu du substratum sédimentaire pulvérisé par l'éruption. Les dépôts peuvent être finement lités ou totalement désordonnés.

Postérieurement aux éruptions phréatomagmatiques, les dépôts peuvent être recoupés par des filons ou des sills qui peuvent parvenir à la surface et alimenter un cône de scories ou un lac de lave voire une coulée de lave. En revanche, lorsque l'alimentation magmatique cesse après les éruptions phréatomagmatiques alors le diatrème est généralement occupé par un lac d'eau progressivement ensédimenté (fig. 5).



**Fig. 5 - Coupe théorique d'un diatrème pépéritique à remplissage lacustre montrant les relations entre les différentes unités. L'encart montre une série de profils illustrant les différents niveaux d'érosion (A = plateau de Gergovie ; B = Puy Giroux ; C = Puy de Crouel ; D = Montaudou (modifiée d'après de Goër de Herve, 1995). Les pentes internes du diatrème sont très exagérées. Elles sont généralement voisines de 70° en zone de socle et bien moindres dans les sédiments faiblement consolidés.**

#### • Les éruptions laviques

Les éruptions laviques sont essentiellement représentées par de nombreuses éruptions locales dont il ne subsiste actuellement que des vestiges de lave, au relief inversé, des lacs de lave, des dykes, des culots ou cheminées déchaussées par l'érosion. Les laves émises par ces différents pointements sont surtout des basaltes et des basanites. Les produits différenciés sont rares, à l'exception d'une aire limitée du comté d'Auvergne (région de Vic-le-Comte située à 25 km au sud-est de Clermont-Ferrand), caractérisée par quelques dômes, dômes-coulées et protrusions de phonolites, de téphrites et de téphriphonolites.

#### **d) Chronologie du volcanisme**

Par rapport au remplissage sédimentaire de la Limagne, le volcanisme peut être subdivisé en trois phases principales : avant, pendant ou après (pré-rift, syn-rift, post-rift).

Le volcanisme du Massif central, à l'exception notable de la coulée des Vignes dans les Causses (Baubron *et al.*, 1978) débute essentiellement au Paléocène et se traduit par l'édification d'une dizaine de petits édifices à l'est du sillon houiller. Il s'agit essentiellement de necks et de dykes, et d'un maar (Menat). Ce volcanisme n'est pas directement connu en Limagne bien qu'il puisse être présent sous l'épaisse unité sédimentaire.

Le volcanisme syn-rift mis en place de l'Oligocène supérieur au Miocène inférieur est limité à la partie sud de la Limagne d'Allier et à la bordure ouest du graben de Montbrison (fig. 6 et 7). Ce volcanisme syn-sédimentaire se traduit par des intercalations de retombées volcaniques (olivines non altérées, pyroxènes et gouttelettes de verre) présentes localement dans la série sédimentaire grésocalcaire de la coupe de Sainte-Marguerite datée du Stampien (Devineau, 1996) soit autour de 30 Ma. Des intercalations pépéritiques apparaissent au niveau de Cournon et de Pont du Château dans les marnes gréseuses de l'Oligocène supérieur (Hourrière *et al.*, 1998) soit autour de 28-24 Ma.

Les données géologiques et radiométriques disponibles sur le volcanisme du bassin de Limagne indiquent sans ambiguïté que l'essentiel du volcanisme est postérieur à l'essentiel de la sédimentation et s'est effectué en deux épisodes, le premier de 21 à 12 Ma (Cheguer, 1996), correspondant aux éruptions qualifiées de « *génération Limagne* » essentiellement localisées dans le bassin sédimentaire, le deuxième, vers le Pliocène supérieur (3 Ma), largement représenté en bordure du plateau des Dômes et dans la région de Couzes (fig. 8).

Dans la Comté d'Auvergne, où le volcanisme est plus concentré, les premières éruptions correspondent à la mise en place de laves différenciées vers 21,2 $\pm$ 1,3 Ma (âges Ar/Ar ; Cheguer, 1996), les dernières manifestations sont représentées par des laves basaltiques. Sur la bordure occidentale de la Limagne d'Allier, les plateaux basaltiques de Gergovie, des Côtes de Clermont et de Chateauguy se sont mis en place entre 16 et 19 Ma (Chantepie, 1990).

Un volcanisme très récent contemporain de la Chaîne des Puys est présent sur la marge occidentale de la Limagne (fig. 7) : La Roche Noire (0,8 ou 1,2 Ma), les maars de Clermont (160 000 ans) et ceux de Saint-Hippolyte (90 000 ans).

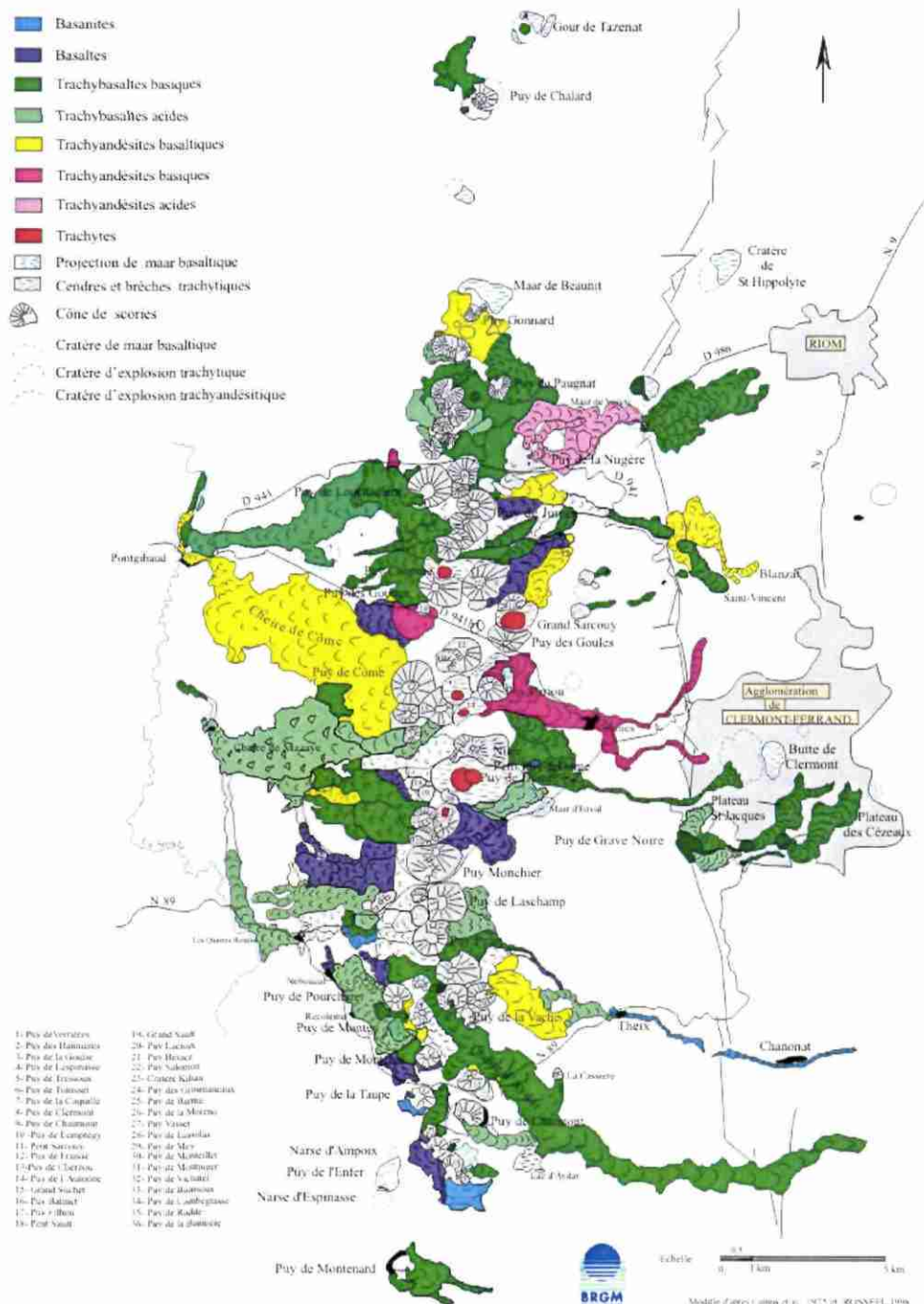


Fig. 6 - Carte géologique simplifiée de la Chaîne des Puy illustrant les quelques événements récents qui se sont produits sur la bordure occidentale de la Limagne d'Allier (modifiée d'après Camus, 1975).

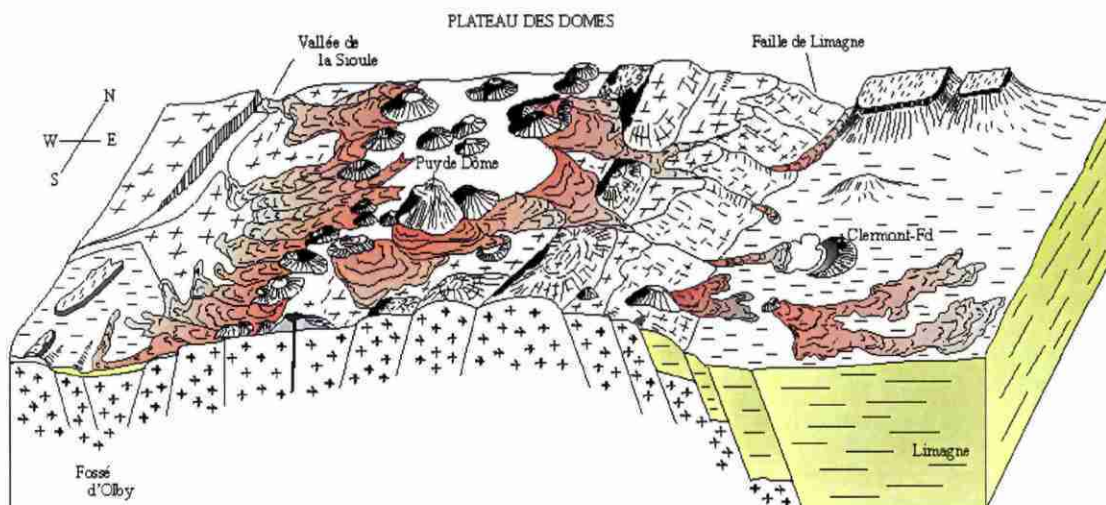


Fig. 7 - Relations entre le volcanisme de la Chaîne des Puys et les pointements volcaniques récents de la Limagne d'Allier) (modifiée d'après Camus, 1975).

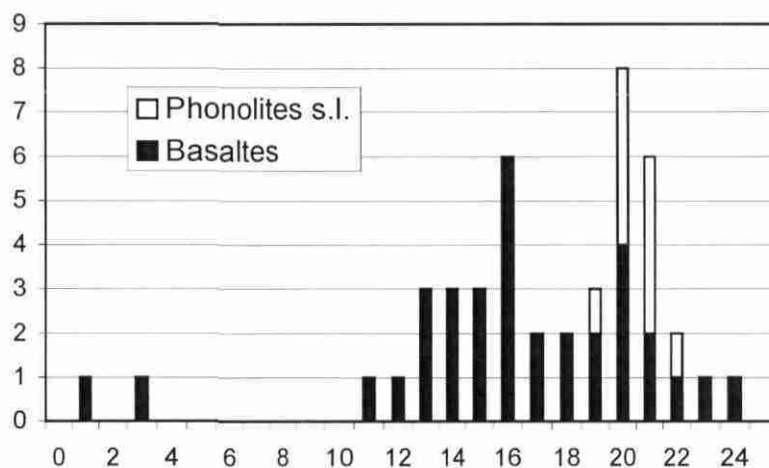
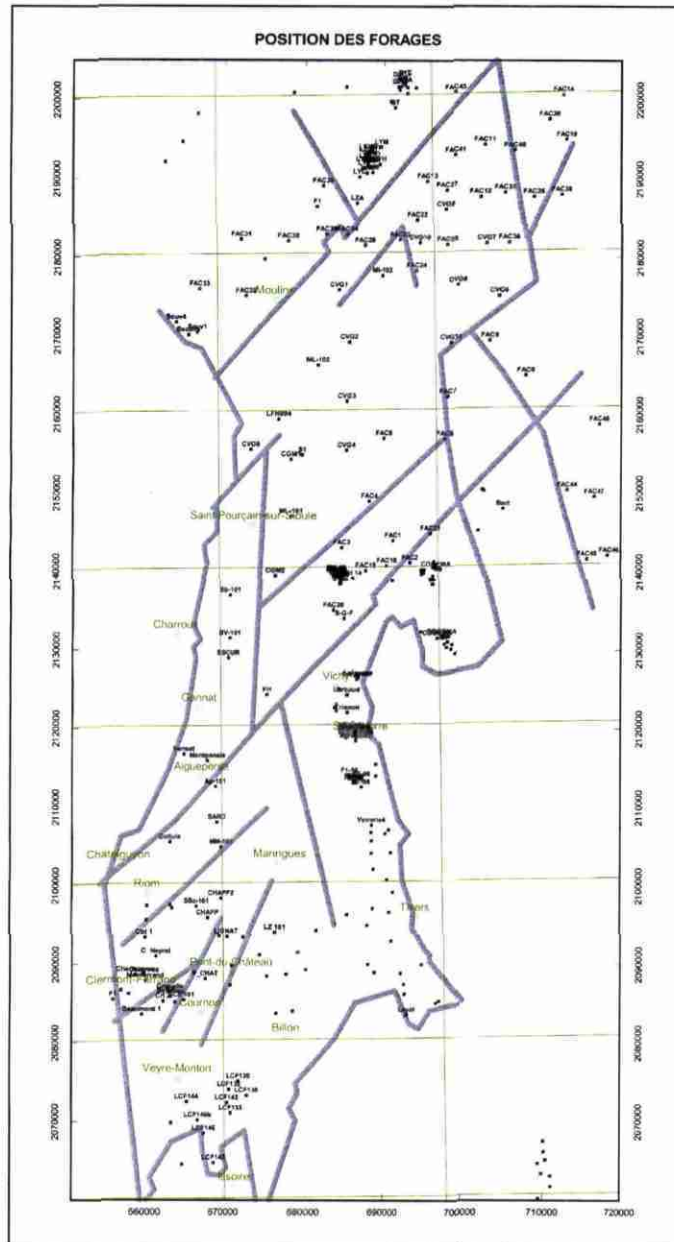


Fig. 8 - Synthèse des âges K-Ar et Ar-Ar du volcanisme de Limagnes s.s.

### 3.2. GÉOLOGIE À PARTIR DES FORAGES EN LIMAGNE D'ALLIER ET DE LOIRE

Les forages de profondeur supérieure à 100 m, ont été recherchés dans la Banque de données du Sous-Sol du BRGM (BSS), auprès de la COGEMA et de la Direction générale de l'énergie et des matières premières du ministère de l'Économie et des Finances (anciennement DHYCA). Pour quelques un d'entre eux, les coupes géologiques manquent, en particulier sur les bordures est et sud (fig. 9).



**Fig. 9 - Position des ouvrages ayant une profondeur supérieure à 100 m dans la zone d'intérêt. Les traits en bleu représentent les failles.**

La partie profonde du bassin, dans la zone clermontoise est renseignée partiellement sauf dans le secteur de Riom. Environ 400 ouvrages ont été identifiés dans la BSS et à partir des informations sur l'exploration de l'uranium (COGEMA) et pétrolière. Ces sondages recoupent tout le bassin depuis les formations du Quaternaire jusqu'au socle paléozoïque. Pour les forages dont nous disposons d'un rapport technique ou de coupe géologique voire de diagraphies, une ré-interprétation complète de la lithologie a été réalisée en termes de stratigraphie séquentielle. Elle permet d'individualiser des zones à lithologie variée (sables, argiles sableuses, carbonates, évaporites) dont la composition et la texture confèrent au milieu géologique des propriétés pétrophysiques (porosité) ayant un intérêt potentiel en terme de réservoir géothermique (perméabilité). La distribution des forages est

hétérogène. En effet, ils sont principalement concentrés dans les bassins d'Ambert, de Montbrison et d'Allier. Dans ce dernier bassin, ils sont davantage localisés sur la bordure est entre Vichy et Thiers, et sont relativement absents au sud de Clermont et à Gannat, et à l'ouest de Vichy. Il y a donc relativement peu d'ouvrages au sud de la faille d'Aigueperse dans la partie centre bassin (SW de Vichy) et au NE de Riom.

### 3.2.1. Schéma tectonique

La compilation des accidents structuraux (fig. 10) a été réalisée à partir de deux sources d'information :

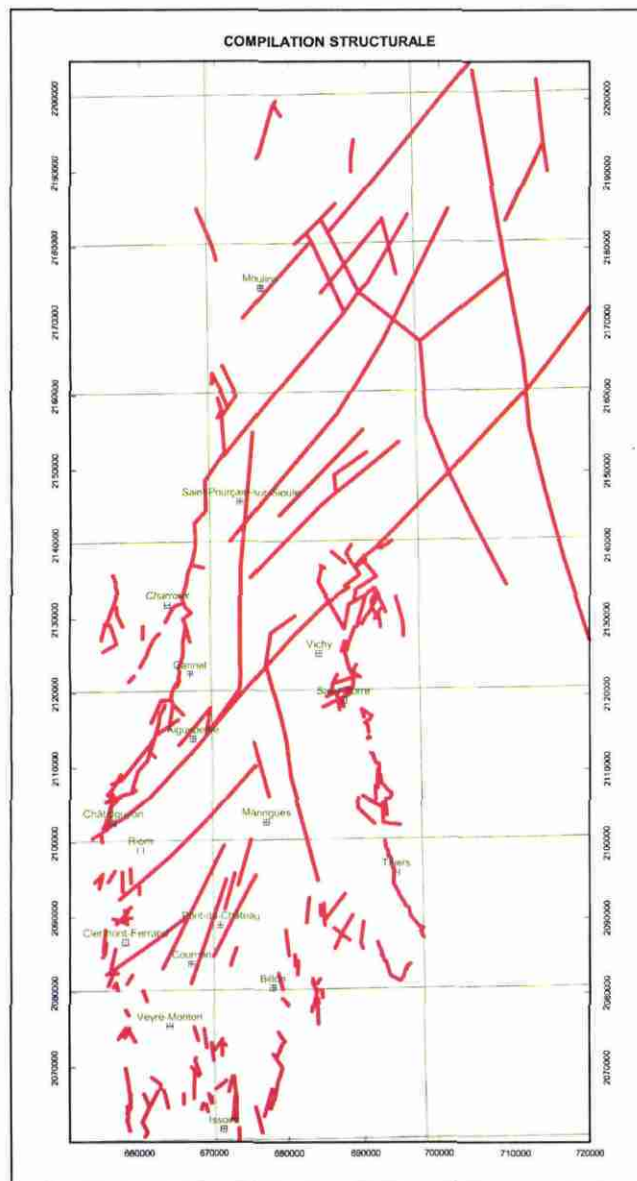


Fig. 10 - Schéma structural de la Limagne d'Allier. Le tracé des failles provient des cartes géologiques au 1/50 000 de la région.

1. Les failles affleurantes sont extraites des cartes géologiques au 1/50 000 du BRGM.
2. Les autres informations structurales sont extraites d'une synthèse, couvrant principalement le bassin de Moulins (rapport annuel 1980 COGEMA), reprenant un ensemble de forages et des données sismiques.

Ces données qui ne s'accordent que partiellement, devront faire l'objet d'une harmonisation. Quelques failles complémentaires sont introduites tenant compte des travaux de réinterprétation des forages. La sismique réalisés à l'occasion des recherches pétrolières, fait l'objet d'une étude en cours, elle apportera des informations principalement dans la fosse de Riom-Clermont.

### 3.2.2. Interprétation lithostratigraphique des forages et leur codage

Les coupes géologiques des forages sont interprétées et harmonisées selon une procédure commune. Cette procédure comporte un codage lithologique qui permet principalement l'élaboration du log géologique et éventuellement le tri sélectif par faciès. La lithologie est utilisée pour caler l'interprétation sismique.

Le codage lithostratigraphique permet de répertorier les formations selon l'âge et la composition lithologique (tabl. 1).

Lithologie	SEQ		STRA	FORMATION			
Alluvions			QUAT	ALLU			
Sable et argile du Bourbonnais			NEOGEN	19090			
<b>Toit de l'Aquitonien</b>			<b>S5</b>				
			<b>S5MIXT</b>				
Conglomérat et calcaire à phryganes	S5		AQUI	S5_CONG_CAPHY			
			<b>S5DET</b>				
Conglomérat vert ou bariolé	S5		AQUI	S5_CONG			
<b>Toit du Chatien</b>			<b>S4</b>				
Marne et calcaire à phryganes et oolithes	S4	C	CHAT	S4_MACAPHY	S4_CAPHY		
Marne localement sable vert, marne verte, argile	S4	B2	CHAT	S4b_MARN_S V	S4_MARN VERT	S4_ARGI	
			<b>S4MIXT</b>				
Marne et conglomérat verts à bariolés, marne et sable verts	S4	B2	CHAT	S4_MARN_CONG	S4_MARN_SBARIO	S4a_MARN_N_SV	S4_MARN_SV
			<b>S4DET</b>				
Sable et conglomérat verts à bariolés	S4	B2	CHAT	S4_SABL VERT	S4_CONG	S4_BARIO	
<b>Toit de l'Oligocène</b>			<b>S3</b>				
Marne verte, schiste papyracé, évaporite, argile et dolomie	S3	B1	RUP	S3_MARN VERT	S3_MARN_SCHI	S3_MARN_EVAP	S3_ARGI
			<b>S3MIXT</b>				

Marne et sable fin, bariolés localement marne et sable verts	S3	B2	RUP	S3_MARN_SBARIO				
Marne et sable verts, localement sable vert	S3		RUP	S3_MARN_SV				
Marne, sable et Conglomérat bariolés			RUP	S3_MARN_CONG	S3_MARN_CONG_SBARIO			
			<b>S3DET</b>					
Sable et conglomérat	S3		RUP	S3_SABLVERT_CONG	S3_BARIO	S3_SABLVERT		
<b>Toit de l'Éocène</b>			<b>S2</b>					
Marne et calcaire, évaporite, argile et dolomie	S2	A	EOMOY-SUP	S2_MACA	S2_MARN_SCHI	S2_MARN_EVAP	S2_MARN_VERT	S2_ARGI
			<b>S2MIXT</b>					
Marne et sable, verts ou bariolés	S2		EOCE	S2_MARN_SBARIO	S2_MARN_SV	S2_MARN_CONG		
			<b>S2DET</b>					
Sable et conglomérat, sable vert et bariolé, grossiers	S2		EOCE	S2_SABLVERT_CONG	S2_BARIO	S2_SABLVERT	S2_CONG	
<b>Toit de l'Éocène inférieur</b>			<b>S1</b>					
Marne et calcaire brun-beige, argile rouge	S1	A'	EOCE	S1_MACA	S1_MARN_VERT	S1_MARN_EVAP	S1_ARGI	
	S1		<b>S1MIXT</b>					
Sable fin et argile, bariolés	S1		EOCE	S1_SFİN_ARGI	S1_MARN_SBARIO	S1_MARN_SV	S1_MARN_CONG	
	S1		<b>S1DET</b>					
Sable et conglomérat, bariolés	S1		EOCE	S1_SABL_CONG	S1_SABLVERT	S1_BARIO		
<b>Toit du socle</b>			<b>S0</b>					
Socle			SOCL					

**Tabl. 1 - Synthèse lithostratigraphique et codification des horizons réservoirs et non réservoirs dans le bassin.**

L'âge est exprimé en terme d'étage stratigraphique depuis l'Éocène inférieur jusqu'à l'Aquitainien. La succession des faciès s'ordonne en cinq séquences lithostratigraphiques. Les sommets des séquences sont codés spécifiquement de manière chronologique (S1 à S5) ainsi que le toit du socle (S0). Chacune de ces séquences développe de la base vers le sommet : un terme détritico sableux et sablo-argileux bariolé ou vert, un terme intermédiaire mixte sablo-argileux et carbonaté, puis un terme sommital carbonaté, parfois évaporitique. Un exemple de forage situé dans la région de Moulins est présenté avec sa codification (fig. 11). Il montre que la séquence S3 est particulièrement développée dans ce secteur. Une base de données sur les forages a donc été construite et codifiée selon l'organisation des lithofaciès retenus dans le tableau 1.

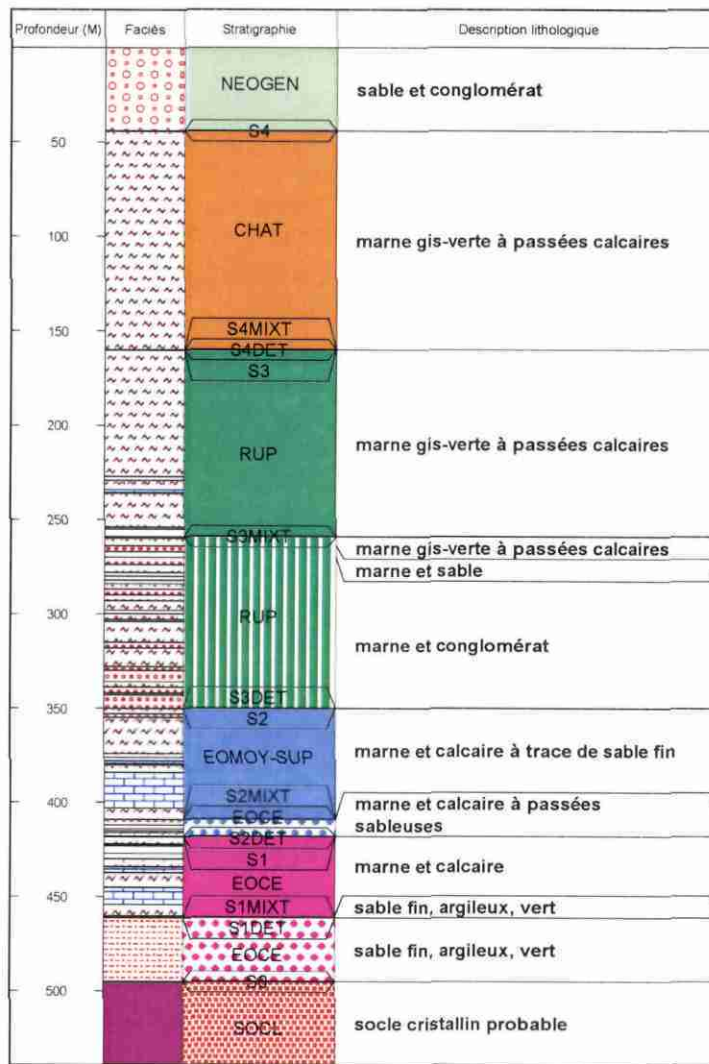
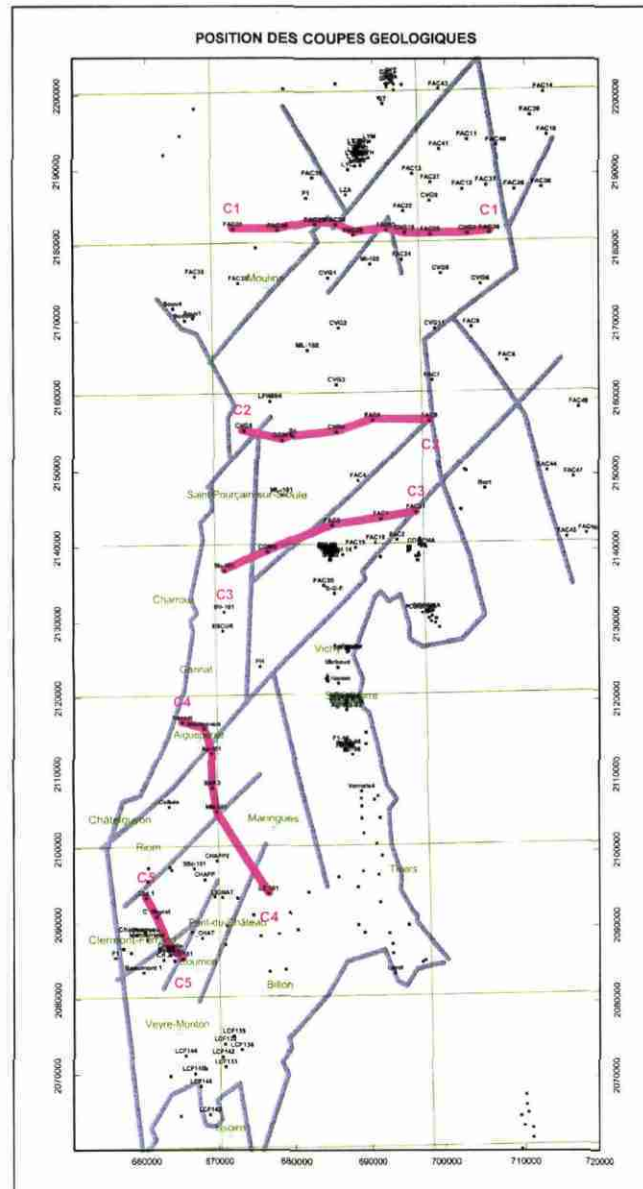


Fig. 11 - Log géologique du forage CVG1 de Moulins et son codage d'après le tableau 1.

### 3.2.3 Coupes géologiques structurales

Afin d'illustrer la morphologie du bassin et la distribution des séquences, des coupes transversales aux structures sont proposées (fig. 12).

Dans le même temps géologique, la distribution géographique des corps sédimentaires est soumise à la règle de la dominance des termes détritiques en bordure du bassin, liés à des apports fluviaux et à celle des termes carbonatés et évaporitiques au centre du bassin.



**Fig. 12 - Position des coupes géologiques en rouge passant par les forages dans le bassin d'Allier.**

La coupe C1 (fig. 13), établit dans le nord du bassin de Moulin, montre à l'ouest un plateau à faible profondeur, accidenté de failles à faible rejet. L'un des blocs montre un basculement antithétique. La fosse est sensiblement en position centrale, elle atteint une profondeur voisine de 800 m, le socle n'étant pas atteint. Les corps détritiques, arkosiques, éventuellement réservoirs sont très minces en bordure ouest, ils sont plus épais dans la fosse.

La coupe 2 (fig. 14) traverse la fosse, profonde de 8 à 900 m. Le bassin est asymétrique ; la zone profonde est située à l'est, à l'inverse de ce qui se passe dans le bassin de Clermont-Ferrand. La bordure orientale est marquée par une faille dont le rejet est de l'ordre de 150 à 200 m. Des biseaux de corps détritiques s'individualisent sur la bordure ouest.

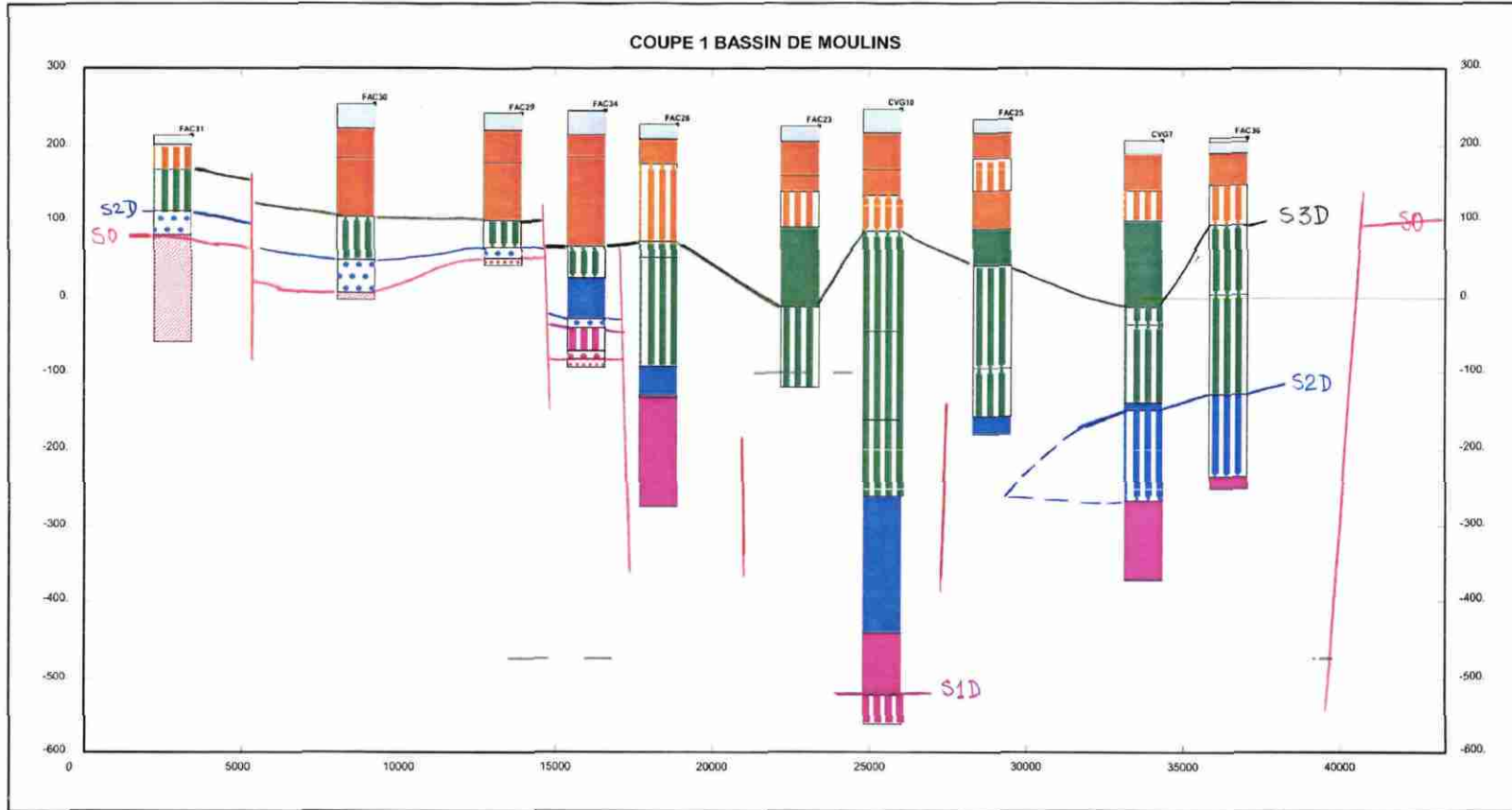


Fig 13 - Coupe géologique NW-SE située au nord du bassin de Moulins notée C1.

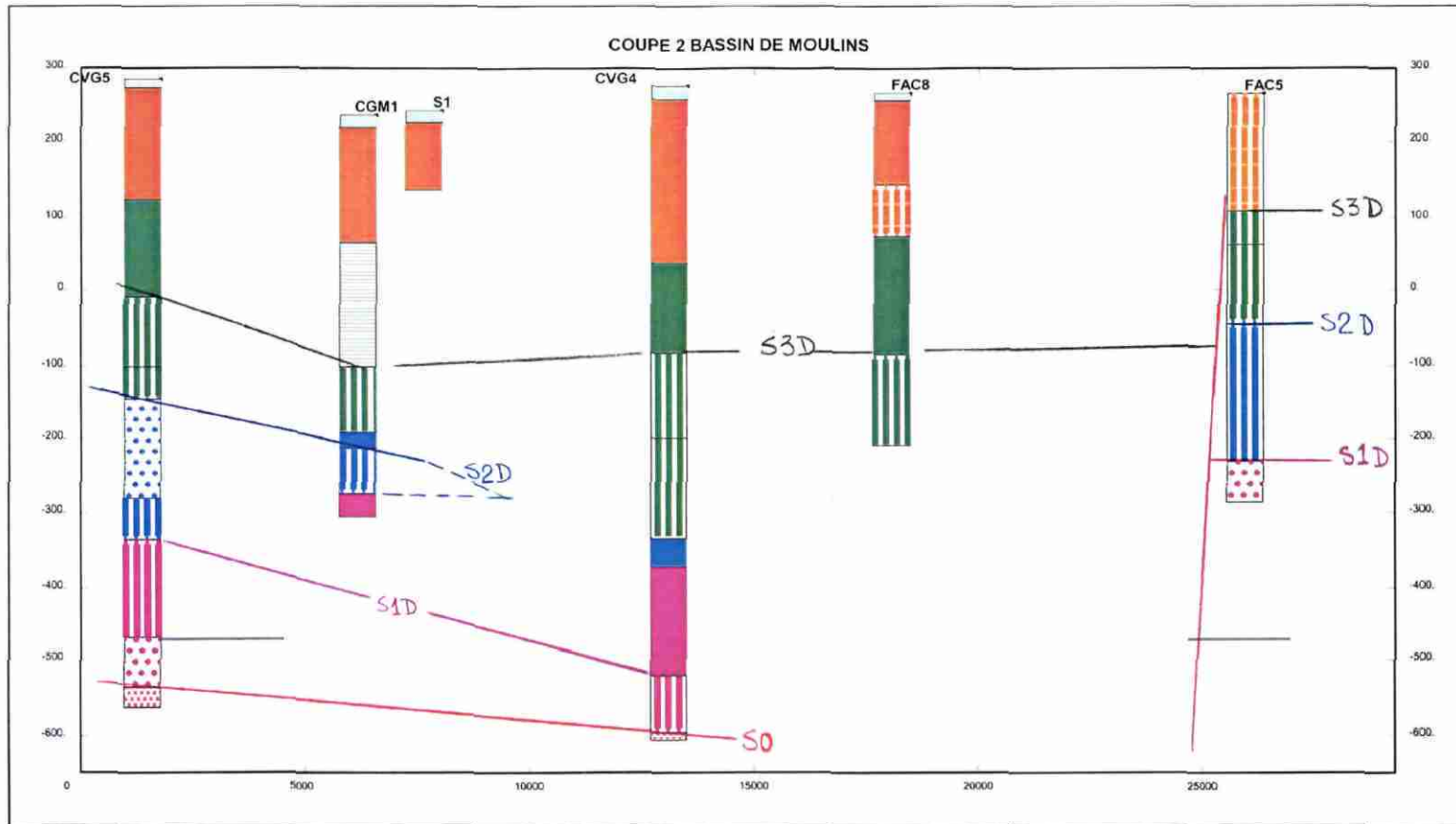


Fig. 14 - Coupe géologique NW-SE située au centre du bassin de Moulin, notée C2.

Dans la coupe 3, réalisée en zone intermédiaire entre le bassin de Moulins et celui de Clermont, la bordure ouest montre un panneau peu profond limité par la faille bordière du bassin lui-même (fig. 15). La subsidence maximale se manifeste au pied de la faille occidentale et le plongement des séries d'est en ouest est identique à celui de la Limagne de Clermont. Un grand corps détritique diachrone regroupant les termes S3, S2 et S1 se développe depuis la bordure est vers le centre du bassin en se réduisant d'épaisseur et en passant latéralement à des séries argilo-calcaires.

La coupe 4 intercepte la bordure ouest du bassin de Riom-Clermont-Ferrand, en recoupant perpendiculairement la faille d'Aigueperse (fig. 16). Cette faille est une structure majeure à l'échelle du Massif central. Elle délimite au nord le bassin de Clermont et montre un affaissement vertical de 800 m par rapport au panneau nord-ouest. Un second accident, encore mal positionné à ce stade de l'étude (interprétation de la sismique en cours), affaisse le bassin d'environ 1 500 m en une fosse étroite. À l'autre extrémité du profil, un autre accident provoque la remontée du socle et limite l'extension possible vers le sud-est de la fosse de Riom-Clermont. Le secteur de la fosse doit bénéficier des informations supplémentaires déduites de la sismique, en cours de dépouillement. La coupe montre un corps détritique, sous forme d'un cône de piémont jalonnant le pied de la faille d'Aigueperse. Un autre corps détritique important se développe sur le panneau oriental.

Dans la coupe 5, la partie sud de la fosse est reconnue à l'est de Clermont où le forage de la Croix-Neyrat (Les Vergnes 1) atteint le socle à la profondeur de 1 880 m. Un corps détritique épais de 500 m est reconnu sans que l'on puisse encore en tracer la géométrie précise (fig. 17). Là encore, l'exploitation de la sismique devrait améliorer cette image. La bordure sud-est de la fosse est assez bien marquée par plusieurs failles en relais provoquant une remontée du socle de 1 000 m vers Cournon.

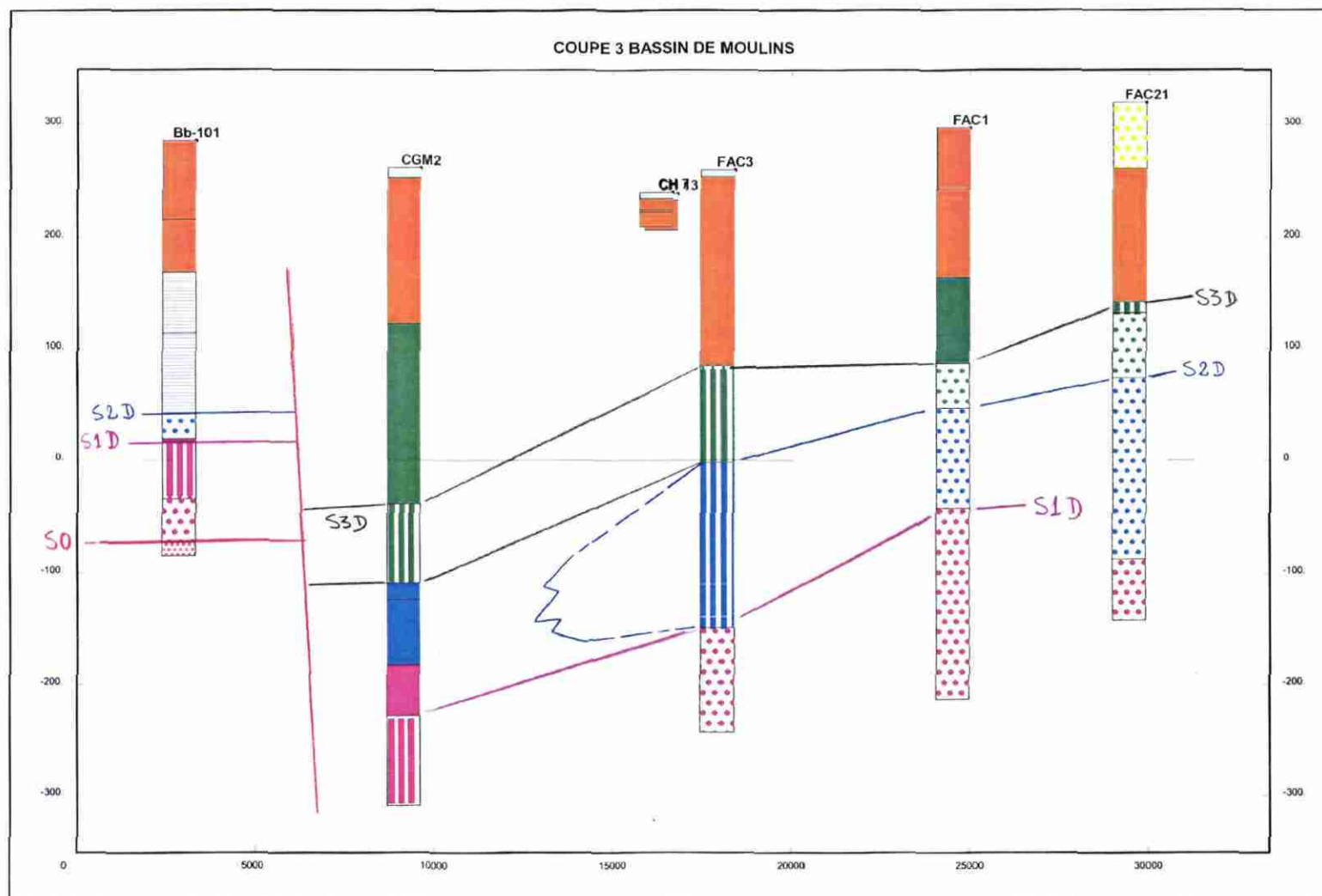


Fig. 15 - Coupe géologique W-E située au sud du bassin de Moulins, notée C3.

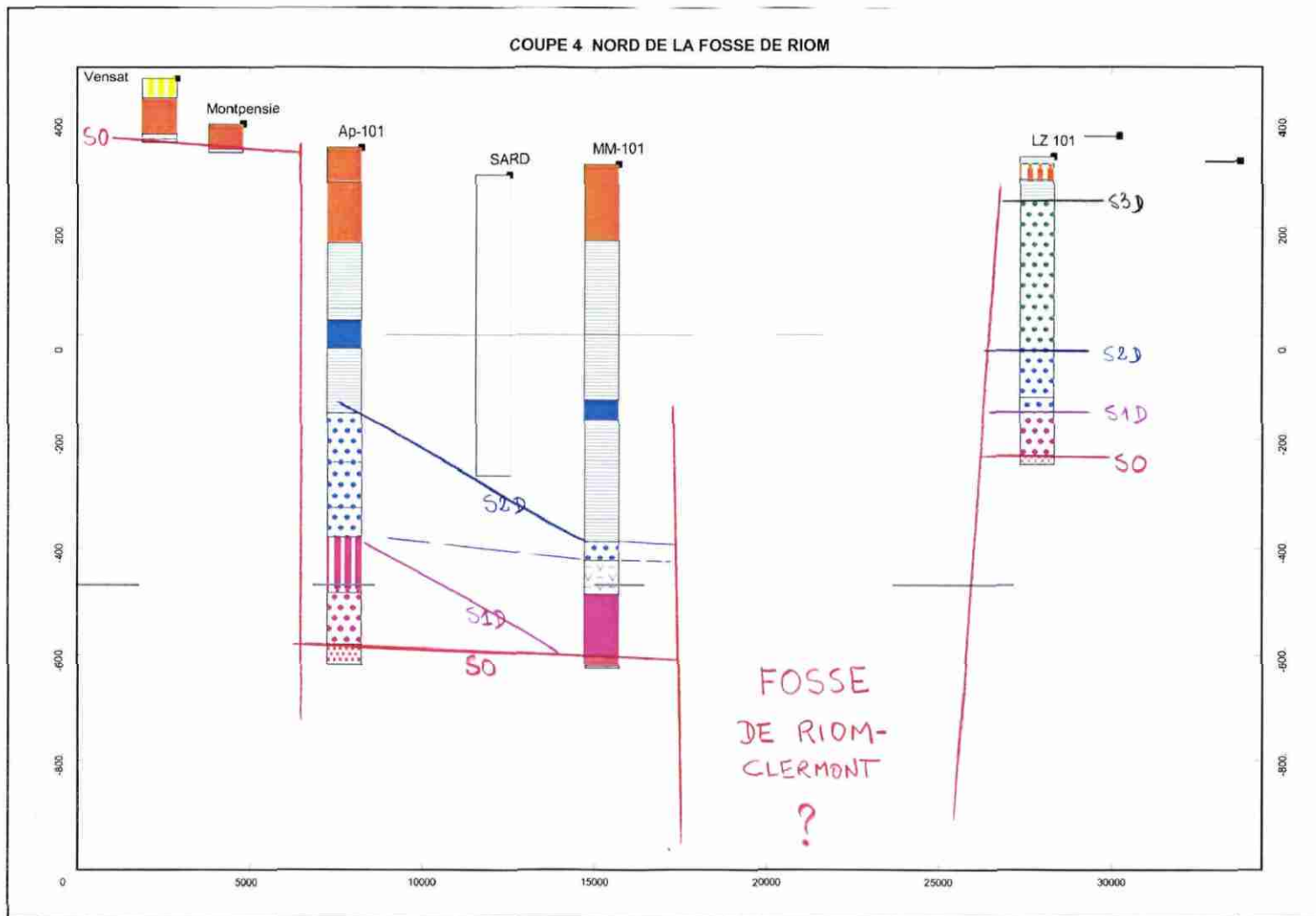


Fig. 16 - Coupe géologique située au sud du bassin de Moulins, notée C4.

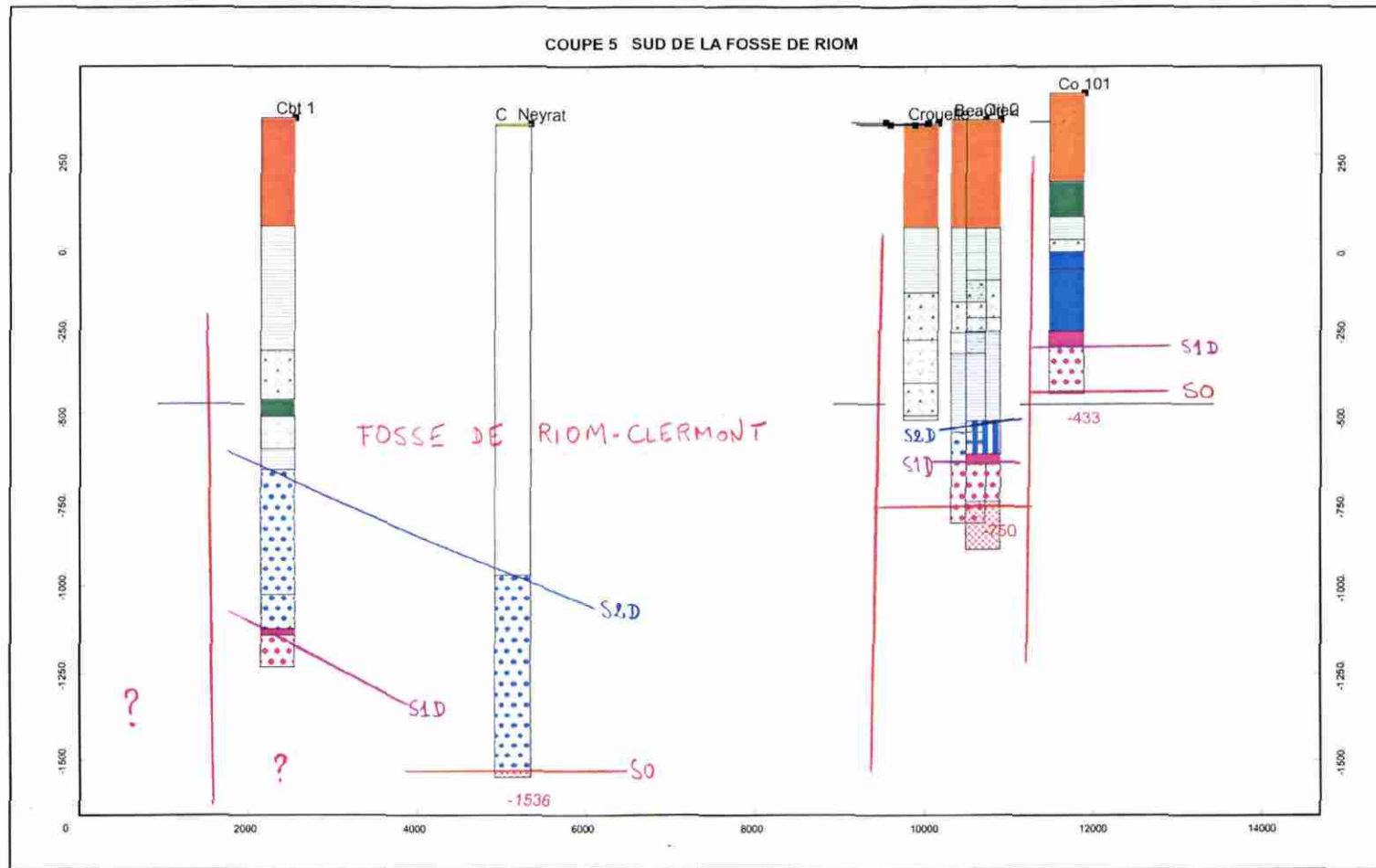


Fig. 17 – Coupe géologique située au nord du bassin de Moulins, notée C5.

### 3.2.4. Cartographie structurale de la Limagne d'Allier

Bien que le nombre de forages ayant atteint le socle soit relativement limité, des structures majeures s'individualisent. La Limagne d'Allier se décompose en deux bassins distincts : le bassin de Moulins au nord, orienté SW-NE et le bassin de Clermont au sud, orienté SN puis SW-NE (fig. 18).

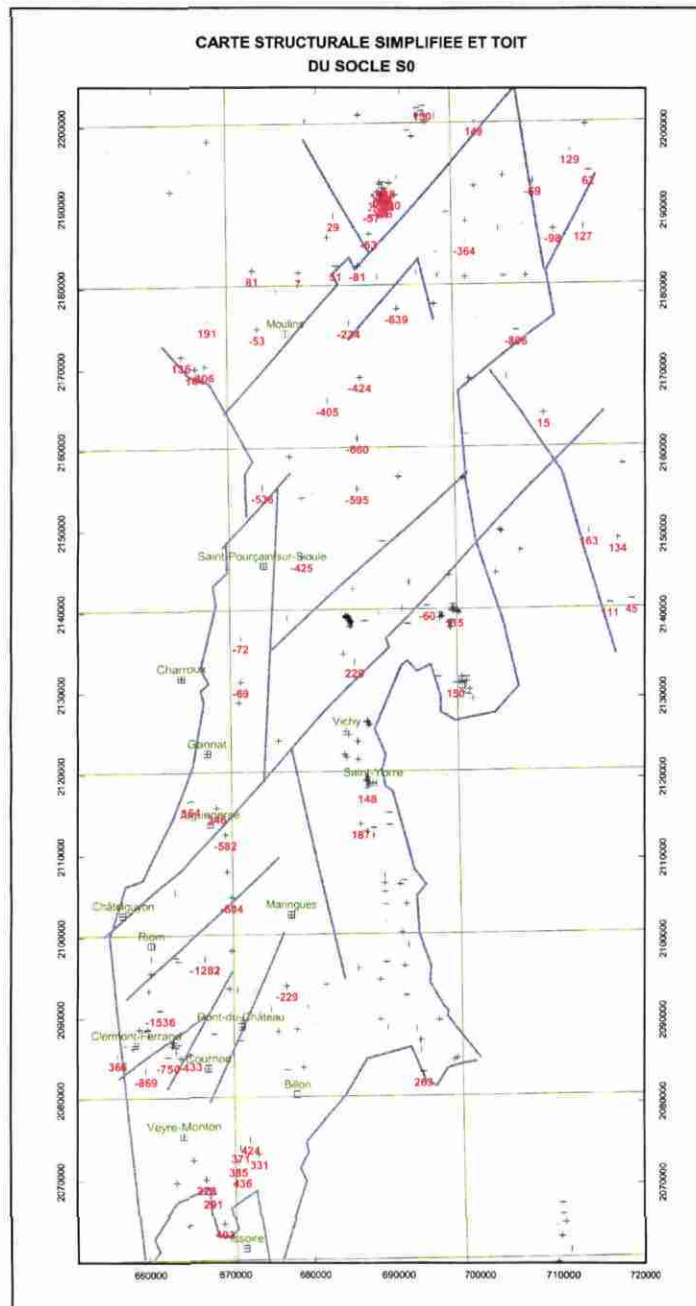
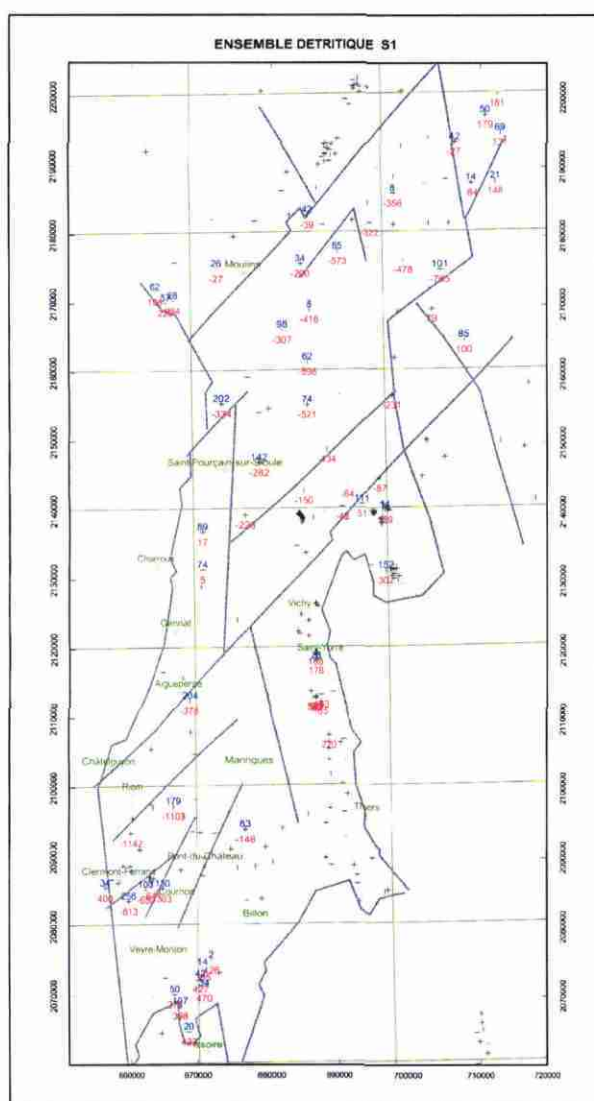


Fig. 18 - Carte du toit du socle noté S0. Les valeurs indiquées en rouge représentent les cotes NGF du toit du socle dans les forages.

Le bassin de Moulines montre une asymétrie avec une subsidence maximale à l'est et au sud. L'inverse s'observe dans le bassin de Clermont, l'affaissement maximum s'enregistre à l'ouest et une fosse très profonde est générée sur Clermont-Riom. Un seuil sépare les deux bassins, au nord de la faille d'Aigueperse et selon un tracé parallèle à celle-ci.

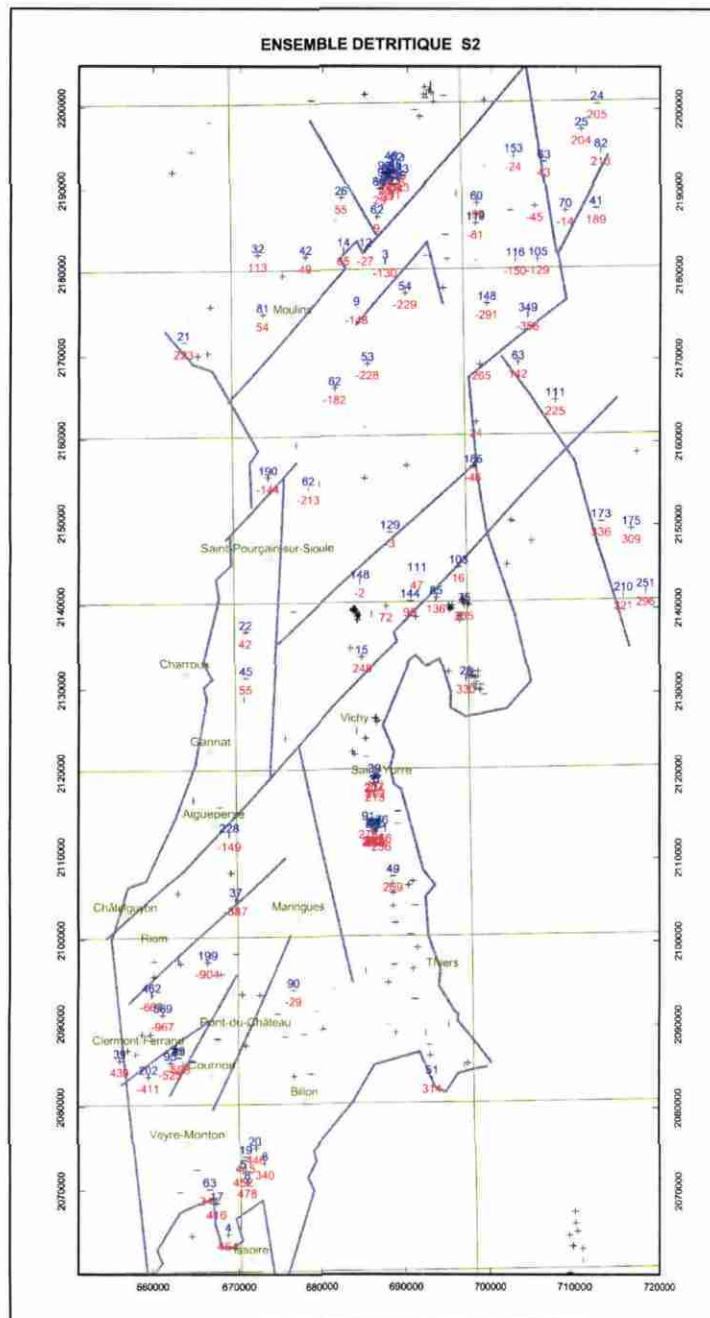
Les profondeurs maximales certifiées par forage sont de l'ordre de 1 000 m pour le bassin de Moulines et de 2 000 m pour le bassin de Clermont.

Les corps détritiques liés à la séquence S1 sont présents de façon systématique en partie profonde des bassins. Dans le bassin de Moulines, les épaisseurs maximales sont présentes au sud-ouest (100 à 200 m). Dans la fosse de Clermont, les épaisseurs varient de 100 à 250 m (fig. 19).



**Fig. 19 - Carte des corps détritiques liés à la séquence S1. Les valeurs indiquées en rouge représentent les cotes NGF du toit de la séquence S1 dans les forages. Les valeurs indiquées en bleu représentent l'épaisseur de la séquence S1.**

Dans le bassin de Moulines, les épaisseurs les plus importantes de faciès détritiques rapportés à la séquence S2, sont notées à l'est et au centre (100 à 350 m). Dans le bassin de Clermont, elles sont localisées dans la fosse (fig. 20). Les fortes épaisseurs soulignent principalement les secteurs à forte subsidence, elles correspondent à un paroxysme tectonique.



**Fig. 20 - Carte des corps détritiques liés à la séquence S2. Les valeurs indiquées en rouge représentent les cotes NGF du toit de la séquence S2 dans les forages. Les valeurs indiquées en bleu représentent l'épaisseur de la séquence S2.**

Dans le bassin de Moulins, la répartition des faciès détritiques de la séquence S3 est similaire à celle de la séquence S2. Dans le bassin de Clermont, le détritisme disparaît de la fosse au profit des séries évaporitiques (fig. 21). Des épandages sableux subsistent le long de la faille d'Aigueperse et sur le plateau de Lezoux.

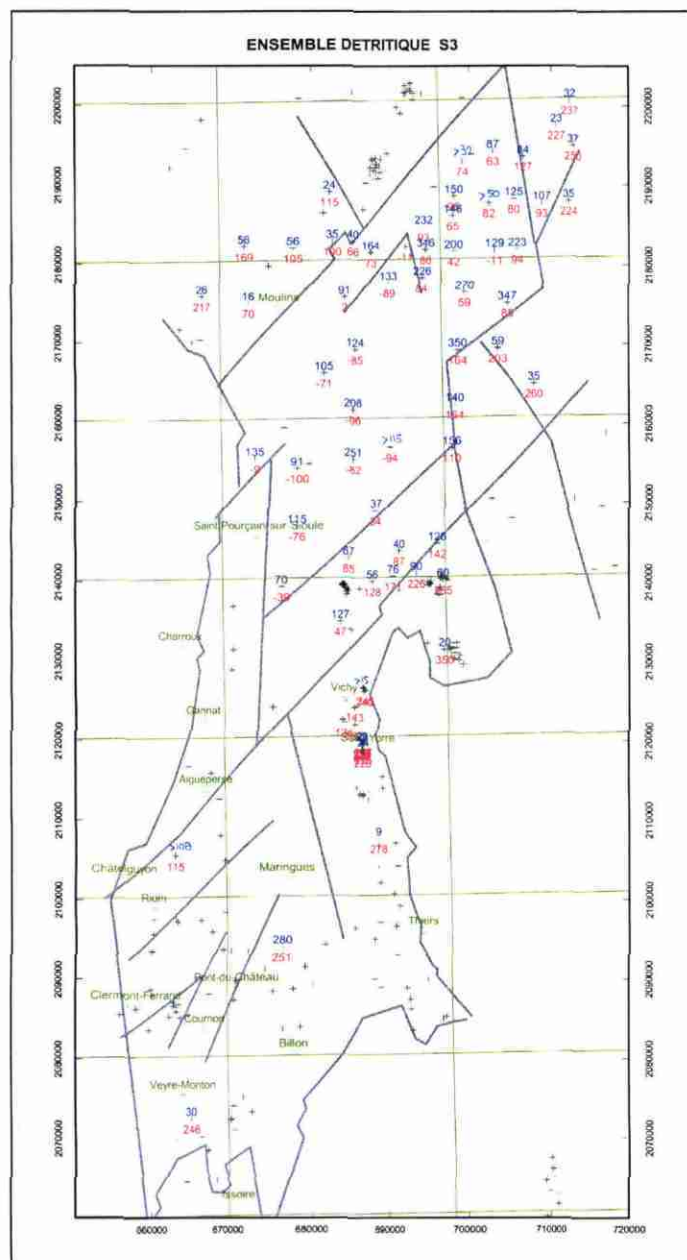
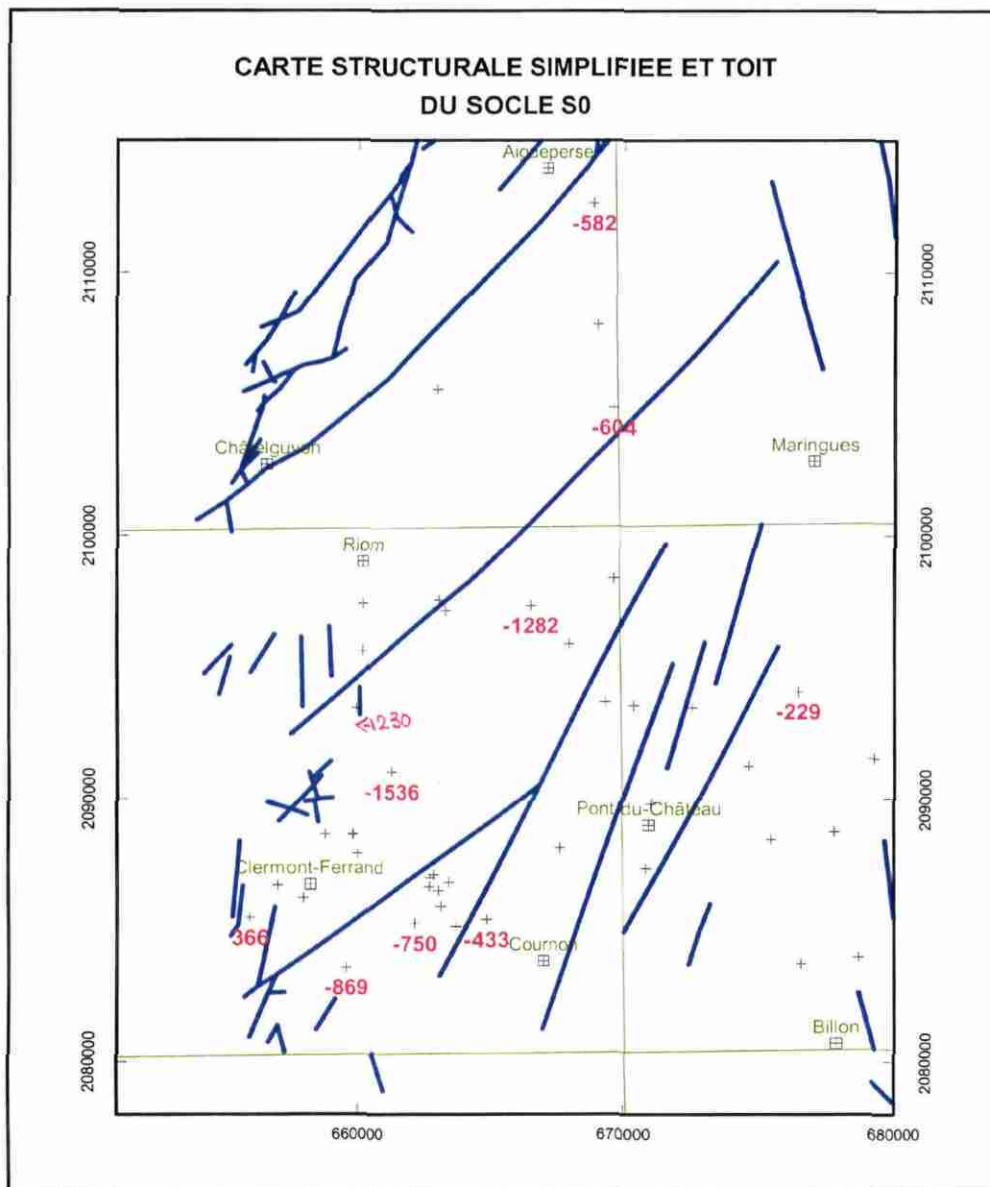


Fig. 21 - Carte des corps détritiques liés à la séquence S3. Les valeurs indiquées en rouge représentent les cotes NGF du toit de la séquence S3 dans les forages. Les valeurs indiquées en bleu représentent l'épaisseur de la séquence S3.

### 3.2.5. Cartographie structurale de la fosse de Clermont-Ferrand - Riom

Les forages ne permettent pas une reconnaissance complète de la partie basale du bassin, en particulier dans le secteur de Riom, qui n'est pas renseigné. Un schéma structural est toutefois proposé fig. 22 à partir de l'altitude du toit du socle. Ce schéma est susceptible d'être modifié après la prise en compte des données sismiques, en particulier en ce qui concerne le tracé de la faille SW-NE proposé comme limite N de la fosse.



**Fig. 22 - Carte simplifiée du toit du socle dans le bassin de Clermont. Les valeurs indiquées en rouge représentent les cotes NGF au toit du socle. Les croix indiquent la position des forages dans la BSS.**

L'analyse de la répartition du corps détritico s1, le plus profond, montre une répartition particulière, fortement influencée par les failles.

Le pied de la faille d'Aigueperse est bien marqué par un cône détritique. Dans la fosse de Clermont, les accumulations sont importantes en fond de fosse, là aussi en liaison probable avec les failles proches (fig. 23). La zone de Riom n'est pas renseignée. Au niveau de la remontée structurale orientale (Lezoux-Cournon), l'épaisseur de la série détritique S1 est plus réduite.

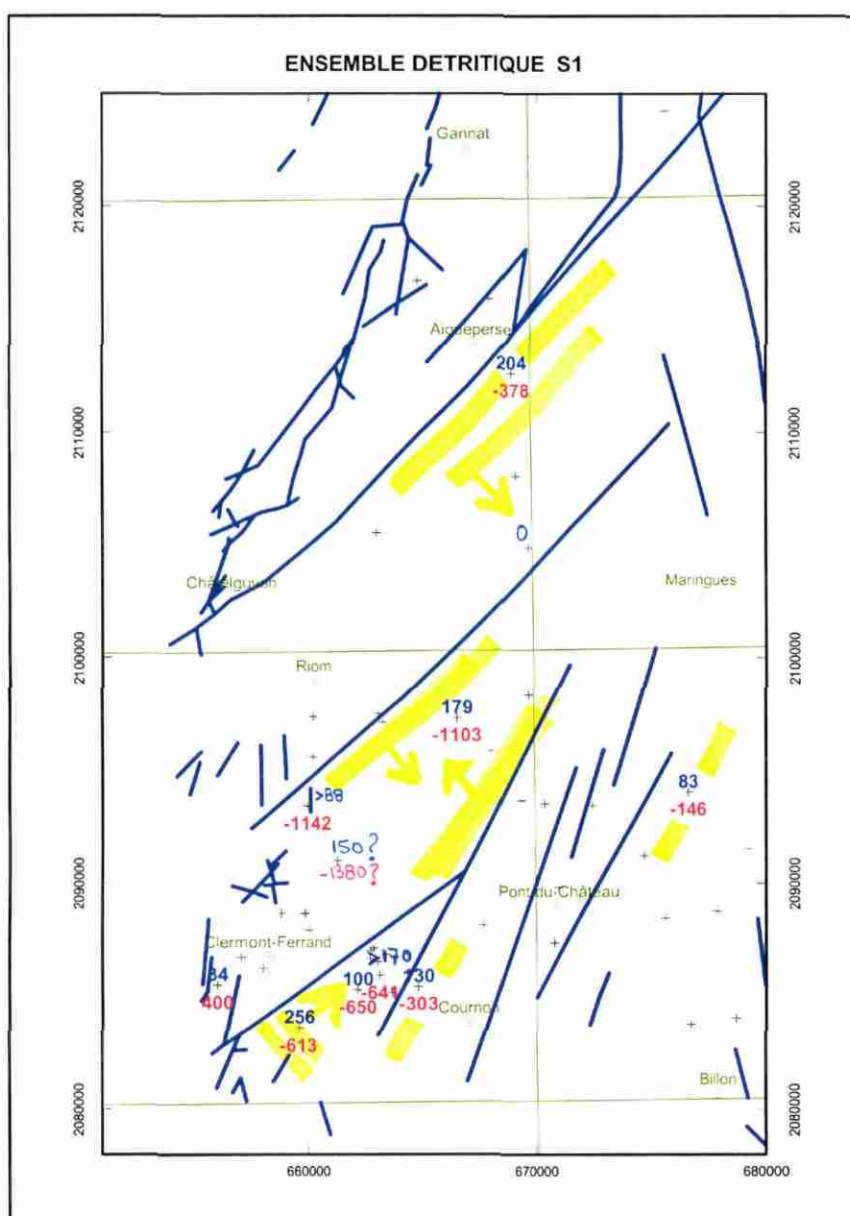
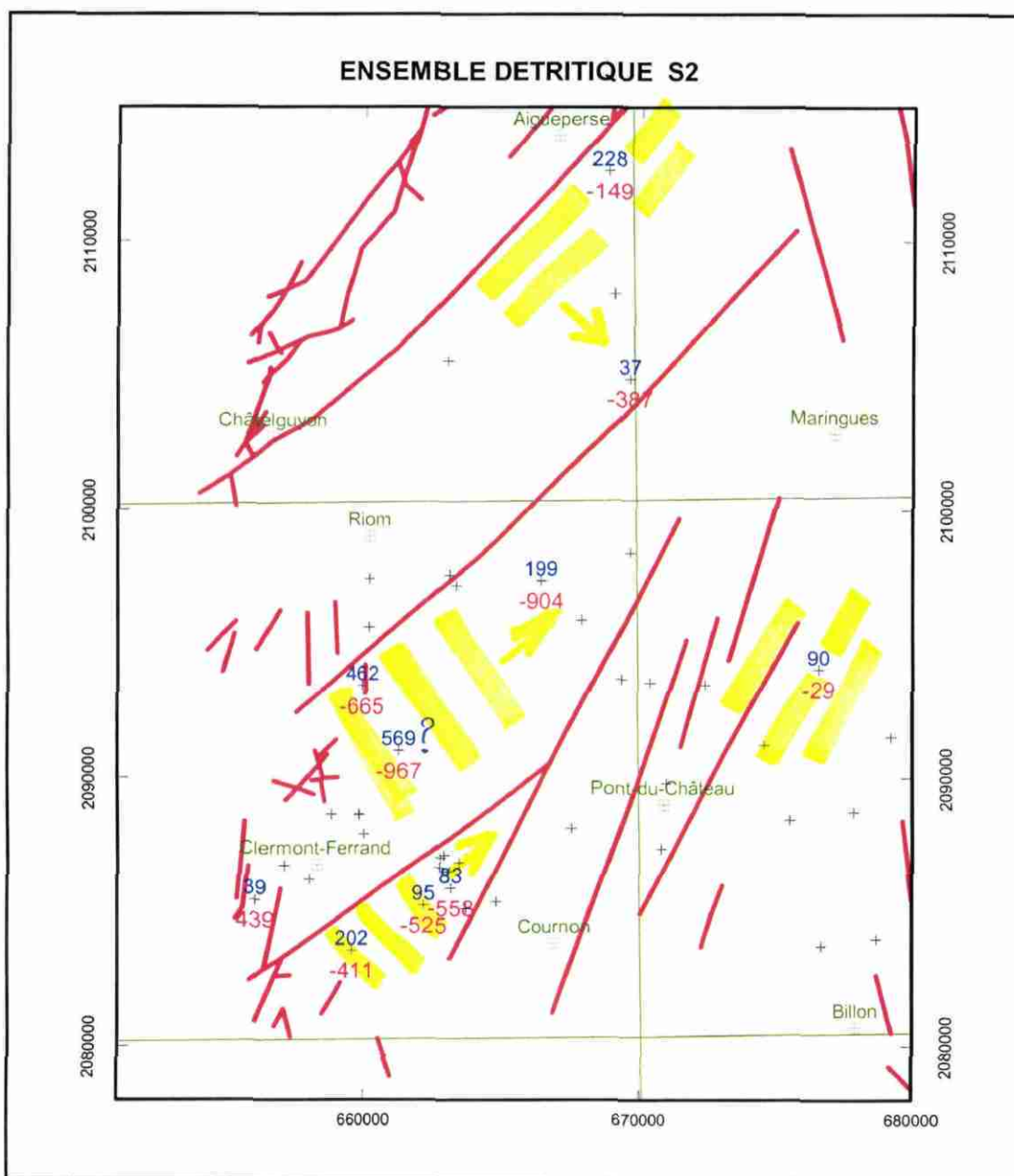


Fig. 23 - Carte simplifiée des apports détritiques de la séquence S1 dans le bassin de Clermont. Les valeurs indiquées en rouge représentent les cotes NGF au toit de la séquence S1. Les valeurs indiquées en bleu représentent l'épaisseur de la séquence S1. Les traits jaunes indiquant la position des corps détritiques avec leur organisation en biseau (flèche).

Le phénomène observé pour les dépôts détritiques de la séquence 1 est identique pour les corps détritiques de la séquence 2. Le cône détritique de la faille d'Aigueperse s'accroît, les deux corps détritiques S1 et S2 s'y superposent sans intercalaire marneux (fig. 24). Dans la fosse de Clermont, le corps détritique S2 se superpose également directement au S1, l'amincissement du corps du sud-ouest vers le nord-est pourrait indiquer le sens de l'apport.



**Fig. 24 - Carte simplifiée des apports détritiques de la séquence S2 dans le bassin de Clermont. Les valeurs indiquées en rouge représentent les cotes NGF au toit de la séquence S2. Les valeurs indiquées en bleu représentent l'épaisseur de la séquence S2. Les traits jaunes indiquent la position des corps détritiques avec leur organisation en biseau (flèche).**

Dans la séquence S3, la partie profonde du bassin ne reçoit plus d'apports détritiques, ces derniers sont remplacés par des carbonates et des évaporites (fig. 25).

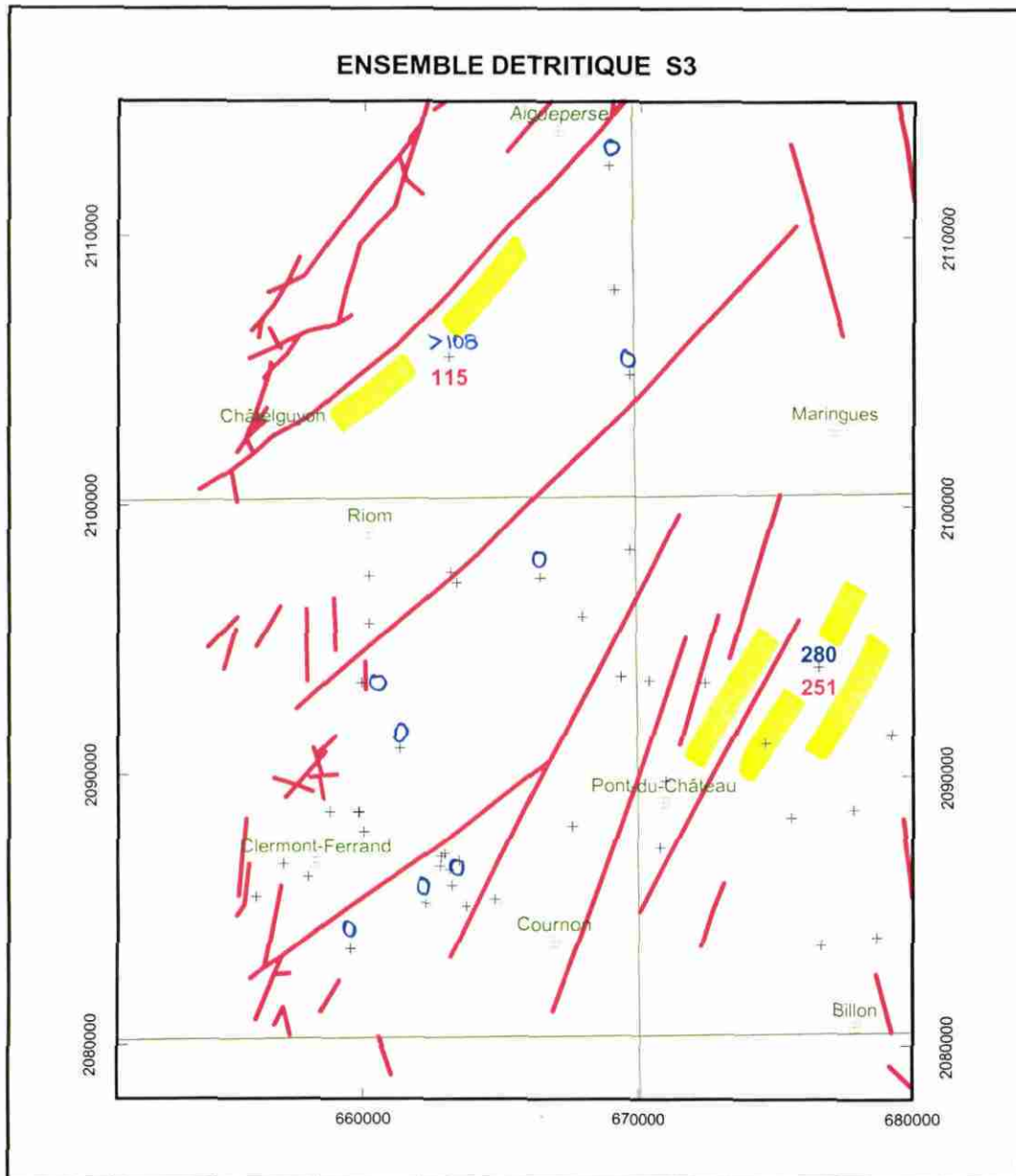


Fig. 25 - Carte simplifiée des apports détritiques de la séquence S3 dans le bassin de Clermont. Les valeurs indiquées en rouge représentent les cotes NGF au toit de la séquence S3. Les valeurs indiquées en bleu représentent l'épaisseur de la séquence S3. Les traits jaunes indiquent la position des corps détritiques.

### **3.2.6. Principaux résultats d'après l'étude des forages**

Au nord, le bassin de Moulins possède des horizons détritiques importants tant en épaisseur qu'en extension pour les trois séquences inférieures. Ces horizons sont séparés les uns des autres par des intercalaires argilo-carbonatés. La profondeur maximale du bassin est de 1 000 m.

Au sud, le bassin de Clermont est très fortement accidenté et la zone profonde se réduit à une ou plusieurs fosses étroites axées sur Clermont et Riom. Les corps détritiques appartiennent aux séquences 1 et 2 et sont directement superposés sans intercalaire marneux, constituant ainsi un réservoir potentiel très épais (4 à 500 m). Les profondeurs atteintes sont de 1 880 m au forage Croix-Neyrat.

Afin de compléter le modèle géologique, la recherche de données de forages supplémentaires, est en cours de recherche auprès de COGEMA en particulier au niveau de la bordure est de la Limagne d'Allier. Le traitement des données sismiques d'origine pétrolière, sur la zone clermontoise est également en cours. La compilation des données de forage et des principaux horizons marqueurs sismique devraient apporter des précisions sur la géométrie de l'ensemble détritique inférieur et surtout sur la géométrie des failles encadrant la fosse. Les surfaces des corps sédimentaires serviront de support à la construction du modèle géométrique 3D.



## 4. La thermique

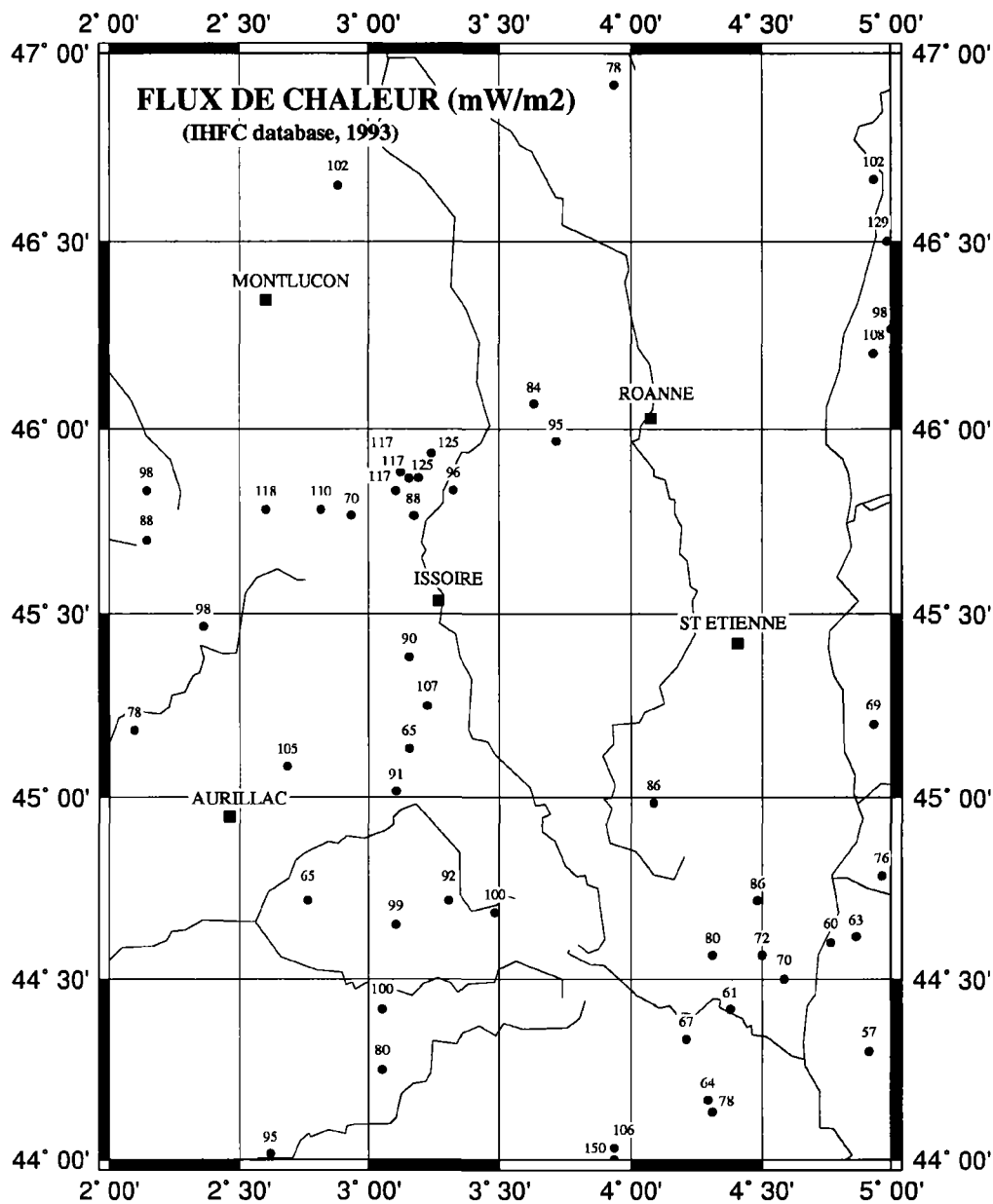
### 4.1. INTRODUCTION

Cette synthèse bibliographique sur les données thermiques de Limagne d'Allier et de sa périphérie doit permettre de faire le point sur les données de température et de flux de chaleur en profondeur connues dans cette région. Un rapport indépendant a été réalisé et l'ensemble de la synthèse est rassemblé par L. Guillou-Frottier dans Martelet *et al.* (2003). Cependant, les points majeurs de l'état des connaissances sur le régime thermique de la région étudiée sont résumés dans ce rapport. En Limagne d'Allier, les principaux réservoirs intéressants sont situés dans des formations détritiques arkosiques de bordures de bassin. Les données thermiques sont issues de deux origines distinctes, d'une part d'une base de données internationale ou *International Heat Flow Commission* et d'autre part d'une synthèse géothermique de la France (Gable, 1978). Plus ponctuellement, des données de température liées à des forages géothermiques réalisés dans les années 80, ont été retrouvées comme celles du forage Les Vergnes 1 ou Croix-Neyrat situé à proximité de Riom et celui de Beaumont situé dans la banlieue de Clermont-Ferrand.

### 4.2. LES DONNÉES THERMIQUES DANS LES BASES MONDIALES

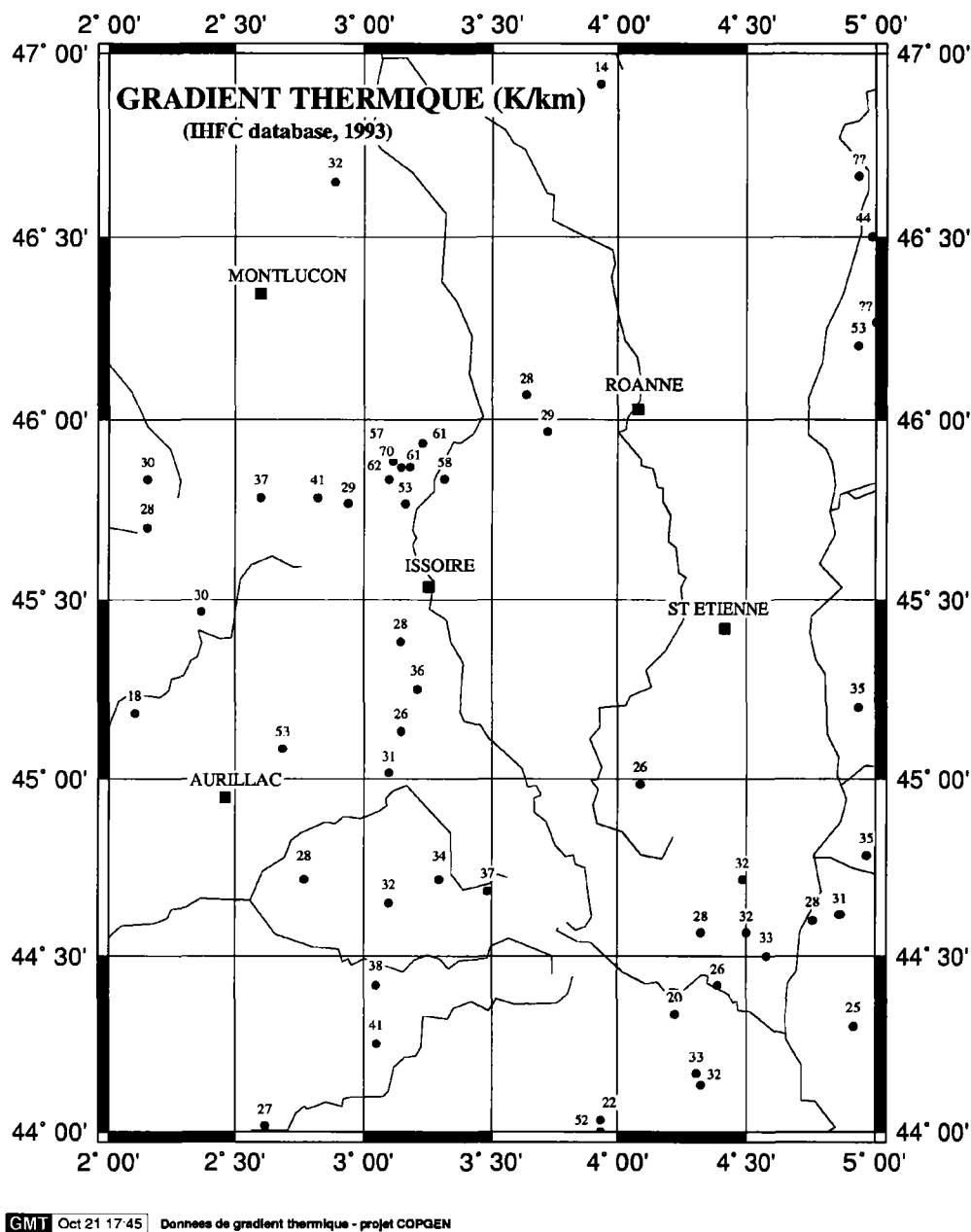
Dans un premier temps, la zone d'étude a été définie de façon à englober les Limagnes de Loire et d'Allier ainsi que les bassins de Saint-Flour et Le Malzieu. La zone a été délimitée par les coordonnées [2-5°E ; 44-47°N]. Les données de flux de chaleur de la base mondiale (IHFC database, Pollack *et al.*, 1993) pour le territoire concerné ont été rapatriées. 53 valeurs ont été obtenues pour le flux de chaleur et 51 pour le gradient thermique. Les données de gradient thermique et de flux de chaleur ont été reportées sur deux cartes (fig. 26 et 27). Notons de suite que les valeurs de la base IHFC ne tiennent pas compte des corrections liées aux effets climatiques. Les données sont corrigées des effets topographiques uniquement. La publication de Vasseur (1982) donne l'ensemble des valeurs de flux de chaleur en France, avec les deux corrections. Notons également que peu de forages profonds sont listés. Les 21 forages dépassant 1 000 m de profondeur n'ont généralement qu'une mesure de température : la correction à apporter à ces mesures BHT (*Bottom Hole Temperature*) n'est pas prise en compte dans cette base, contrairement au travail de Lucazeau et Vasseur (1989).

Ces données montrent que le gradient géothermique dans cette région est voisin de 60 °C/km, ce qui est presque le double du gradient géothermique moyen dans le Bassin parisien. Le flux de chaleur montre également de fortes valeurs, d'environ 120 mW/m<sup>2</sup>, ce qui est également le double de la moyenne pour un bassin.



GMT Oct 21 17:45 Données de flux de chaleur - projet COGEN

Fig. 26 - Données de flux de chaleur issues de la base mondiale (IHFC database, Pollack et al., 1993). Ces données diffèrent légèrement de celles compilées par Vasseur (1982), car elles ne sont pas corrigées des effets de paléoclimatologie.



**Fig. 27 - Données de gradient thermique issues de la base mondiale (IHFC database, Pollack et al., 1993) (mêmes remarques que pour la figure 26).**

### 4.3. LES AUTRES DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES

La synthèse de Gable (1978), faite à l'échelle de la France métropolitaine, rassemble près de 3 000 mesures de températures dont 98 % d'entre elles sont issues de forages pétroliers. À partir de ces données, des isothermes sont calculées à différentes profondeurs, restituées à l'échelle du million (Gable, 1978). Pour la région Massif central,

13 mesures seulement ont été portées sur les cartes et les profils thermiques correspondants ne sont pas repris dans le catalogue synthétique de Gable (1978). En revanche, la base de données de IHFC est mieux documentée car les mesures ont été effectuées après la parution de ce rapport. En effet, l'année de publication varie entre 1978 et 1983 pour les 53 valeurs trouvées. Toutefois, ce rapport inclue des cartes isothermes à différentes profondeurs (500, 1 000, 1 500, 2 000, 2 500 m) ainsi que le report de l'ensemble des mesures de température dans tous les forages, y compris les mesures uniques (BHT). L'auteur a utilisé l'interpolation et l'extrapolation pour obtenir une ou plusieurs valeurs intermédiaires. « *Par exemple, si une mesure est faite à 2 200 m dans un forage, on calculera par extrapolation la température à 2 500 m, à 1 500 m et 2 000 m* » (Gable, 1978, page 54). L'extrapolation autour d'un point de mesure est donc limitée à 1 000 m au-dessus et au-dessous.

Les cartes brutes des isothermes et de report des températures à différentes profondeurs issues de Gable (1978) sont présentées dans Martelet *et al.* (2003). Il faut bien garder à l'esprit que les isocontours (fig. 28) correspondent à un « modèle », puisqu'ils sont tracés à partir d'algorithmes utilisant une grille régulière et une méthode de lissage donnée. Dans le cas où la répartition spatiale des valeurs était trop disparate, les informations lithologiques ont guidé le contourage. C'est pour cela que nous montrons également (fig. 29) le report des températures, bien qu'un grand nombre de valeurs soit en réalité obtenu à partir d'interpolation ou d'extrapolation.

La carte à 500 m (fig. 28a, fig. 29a) montre des isothermes allongées selon un axe N20E, avec une isotherme maximale de 40 °C localisée sur la bordure ouest du fossé, entre Riom au sud et Saint-Pourçain-sur-Sioule au nord. Les valeurs de température les plus élevées (supérieures à 40 °C) sont localisées au nord de la zone, en accord avec le tracé des isothermes. Néanmoins, une comparaison détaillée entre les valeurs ponctuelles et les isothermes montre certains désaccords. Par exemple, nous trouvons un forage à 32 °C sur l'isotherme 40 °C, ou encore un forage à 21 °C situé entre les isothermes 30° et 35 °C. Une recherche spécifique sur l'origine de ces données anciennes n'a donné aucun résultat probant. Nous avons une complète méconnaissance de ces forages (absence de profils thermiques, absence de références ...), et nous ne savons pas non plus quelles ont été les règles précises utilisées pour obtenir l'allure générale des isothermes.

La carte à 1 000 m (fig. 28a, fig. 29a) montre également des isothermes allongées selon un axe N20E, avec une isotherme maximale de 80 °C localisée au nord-est de Gannat, c'est-à-dire plus interne au bassin. Nous observons un décalage sud-est par rapport à l'isotherme maximale à 500 m de profondeur. Cependant, il y a une meilleure corrélation entre les données ponctuelles et la carte des isothermes. Pourtant, au nord de Moulins, le toit du socle remonte de manière significative à une profondeur de moins de 100 m. De ce fait, les températures extrapolées à 1 000 m de profondeur ne sont plus dans les formations du bassin mais dans le socle sous-jacent. Là encore, nous avons des difficultés pour remonter aux données thermiques originales.

La carte à 1 500 m (fig. 28a, fig. 29a) montre des isothermes allongées selon un axe N35 °E. Cette modification de l'axe d'allongement peut être causée par l'influence de la faille d'Aigueperse orientée NE-SW. Par rapport aux isothermes maximales à 500 m et 1 000 m, l'isotherme 105 °C à 1 500 m est décalée vers le centre du bassin à l'est de Riom. À cette profondeur, nous notons encore des désaccords entre les données ponctuelles et les tracés des isothermes. Par exemple, à l'ouest de Vichy près de

Gannat, nous observons un forage à 117 °C sur la bordure. Ce point est surprenant car à notre connaissance, il n'y a pas d'ouvrages ayant atteint les 1 500 m de profondeur dans cette région. Pourtant, une carte ancienne des températures extrapolées au toit du socle (fig. 30) confirme que la région la plus chaude se situe autour de Riom (Hérault, 1974).

Pour conclure sur les données thermiques, nous avons peu d'informations sur l'origine des données, ainsi que sur les méthodes d'interpolation appliquées pour le calcul des isothermes. L'allure générale des isothermes est toujours la même, c'est-à-dire parallèle au bassin, bien que les données soient distribuées de manière hétérogène. En revanche, la position du maximum évolue spatialement du nord-est vers le sud. La zone la plus chaude correspond à des températures de 100 °C à 1 500 m de profondeur sur un axe Thuret - Clermont-Ferrand.

#### **4.4. FORAGES GÉOTHERMIQUES EN LIMAGNE D'ALLIER**

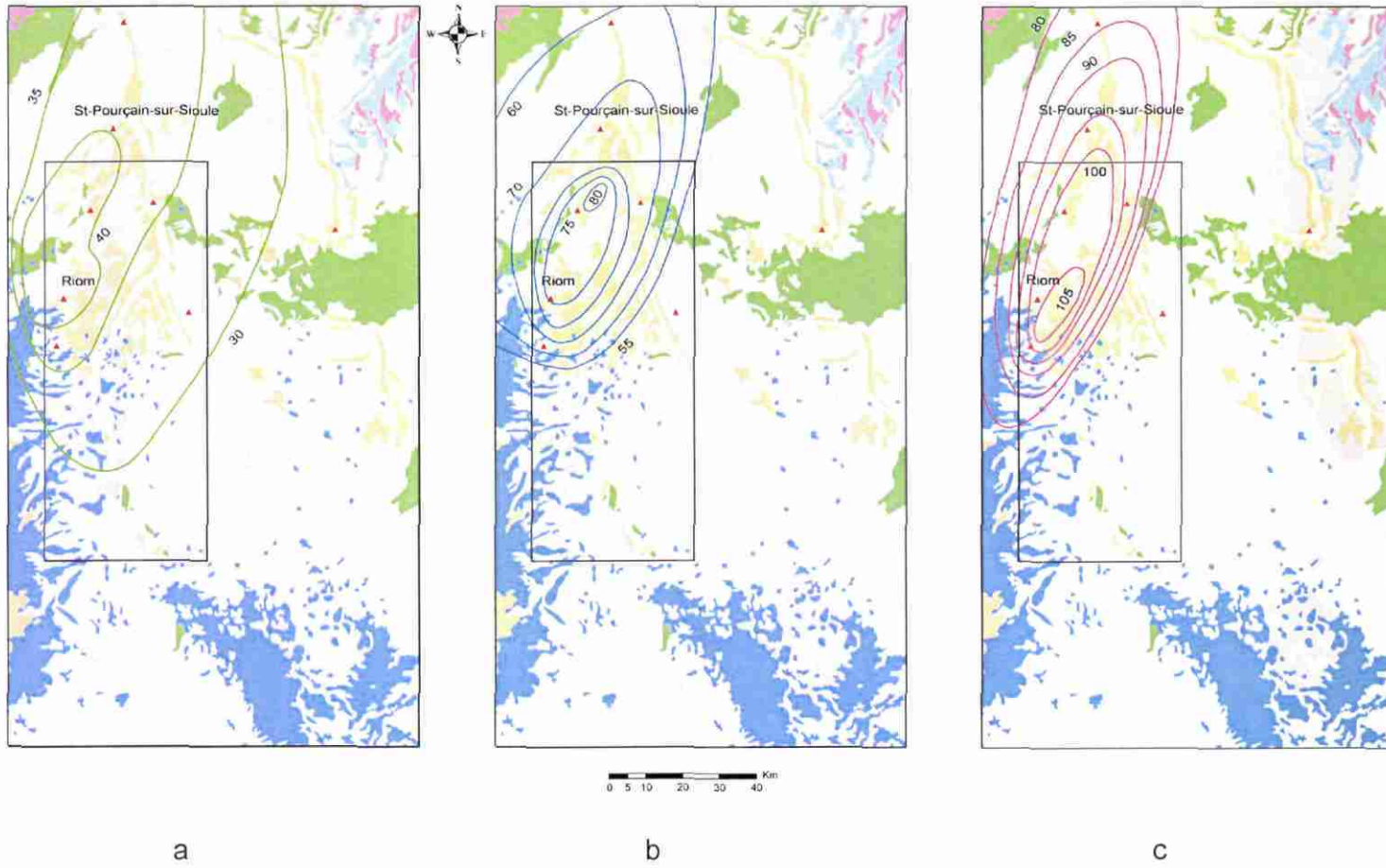
Deux forages géothermiques ont été réalisés dans les années 1980 en Limagne d'Allier par la compagnie Géotherma (Géoservice, 1979 ; Géotherma, 1981) : un forage dans la proche banlieue de Clermont, forage de Beaumont et un forage à proximité de Riom, forage de Les Vergnes dit Croix-Neyrat.

Au niveau des températures, le forage de Beaumont a donné une température fond de trou de 44,6 °C à 1 335 m de profondeur. Celui de Les Vergnes a donné une température de 107 °C à 1 886 m. Compte tenu des productivités faibles, aucun de ces forages n'a donné lieu à une exploitation géothermique.

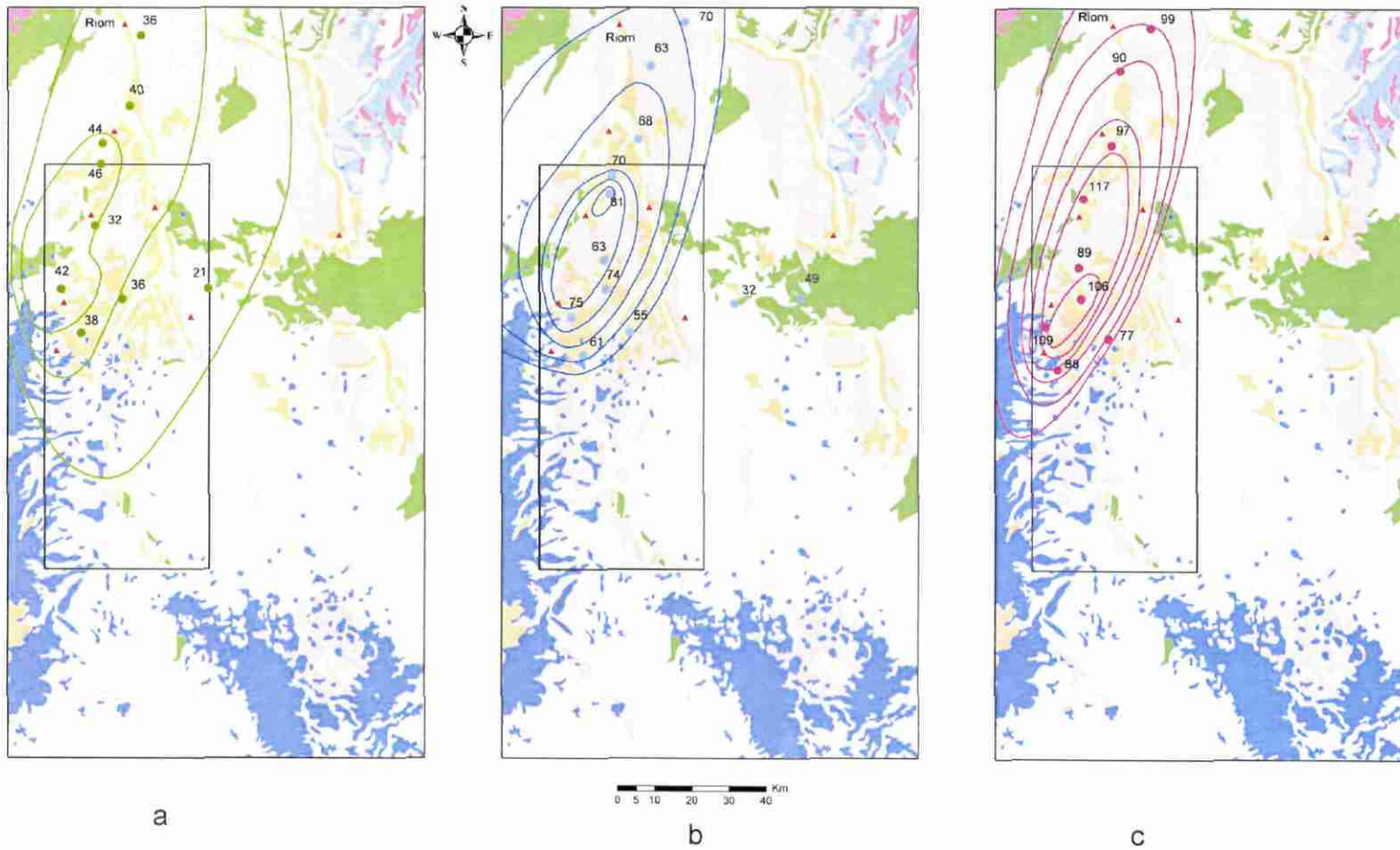
##### **4.4.1. Le forage de Beaumont**

Dans le cadre d'une étude destinée à l'exploration géothermique, des mesures de températures en continu ont été effectuées dans onze forages en France. L'analyse et l'interprétation des données sont présentées par Gable *et al.* (1982). Parmi ces onze sites, se trouve le forage de Beaumont situé à quelques kilomètres au sud de Clermont-Ferrand. Il s'agit d'un forage dévié dans sa partie profonde réalisé par Géotherma en 1979 et ayant atteint le socle granitique à une profondeur NGF de - 869 m. Un log de thermométrie a été effectué en avril 1981, c'est-à-dire deux ans après la fin du sondage ce qui permet de minimiser l'effet des perturbations thermiques liées à la foration.

L'objectif géothermique de ce projet était un doublet destiné à l'exploitation géothermique de la nappe du Stampien inférieur, pour le chauffage de logements. Le forage de Beaumont 1 a livré une production de 1,5 m<sup>3</sup>/h environ, pour une température au fond de l'ordre de 44,6 °C à 1 335 m. La température de fond correspondait à un gradient plutôt faible, de 2,88 °C/100m et les essais de production ont donné des débits insuffisants (cf. paragraphe 6 Hydrogéologie). De plus, le réservoir rencontré (sables argileux sur une faible épaisseur et arkoses très compactes), n'a pas permis d'obtenir un débit suffisant pour que le percement d'un second puits et la mise en place d'un doublet géothermique.



**Fig. 28 - Isothermes aux profondeurs de 500 m, 1 000 m et 1 500 m (Gable, 1978) reportées sur un fond géologique simplifié.**



**Fig. 29 - Températures et isothermes aux profondeurs de 500 m, 1 000 m et 1 500 m (Gable, 1978) reportées sur un fond géologique simplifié.**

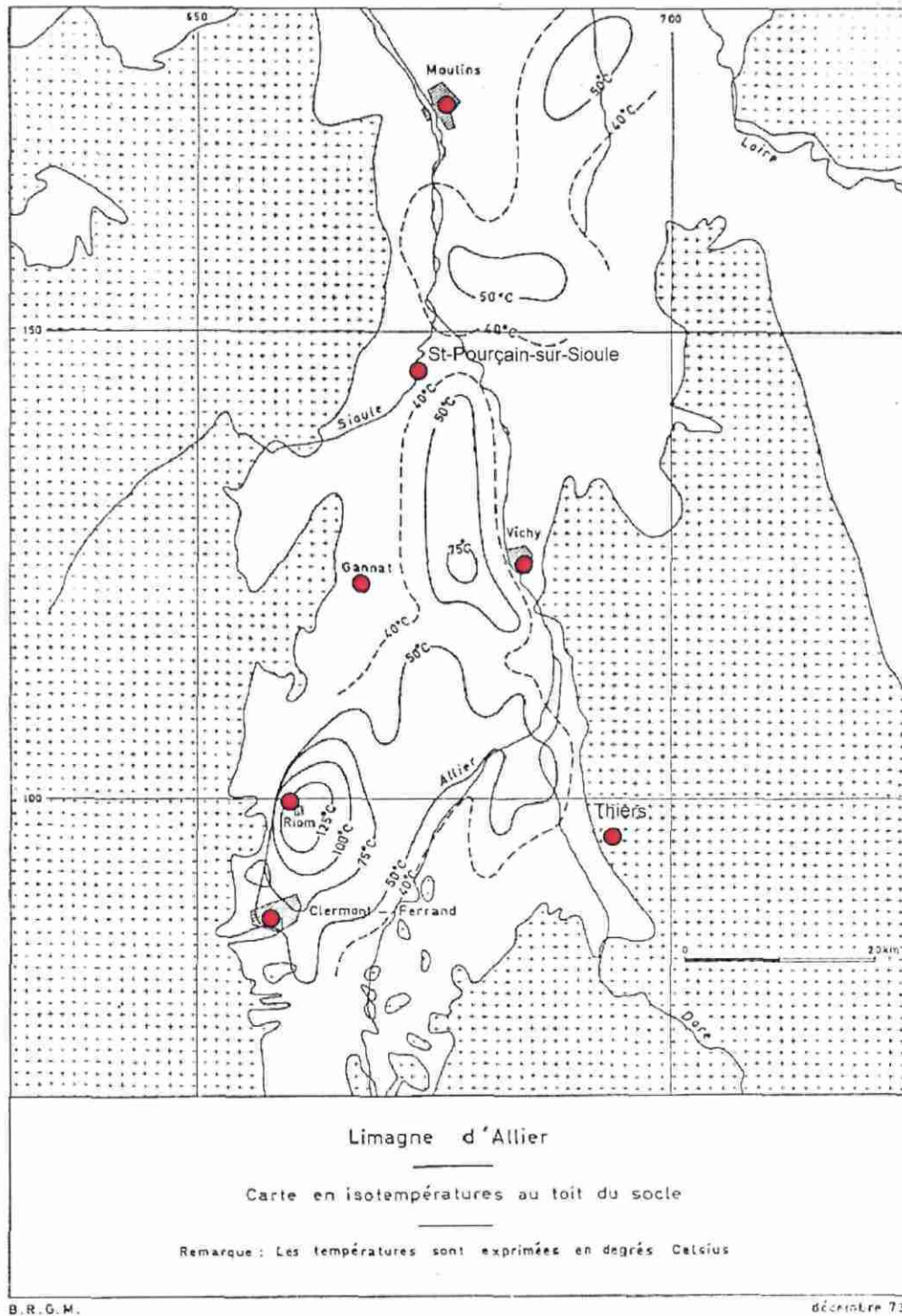
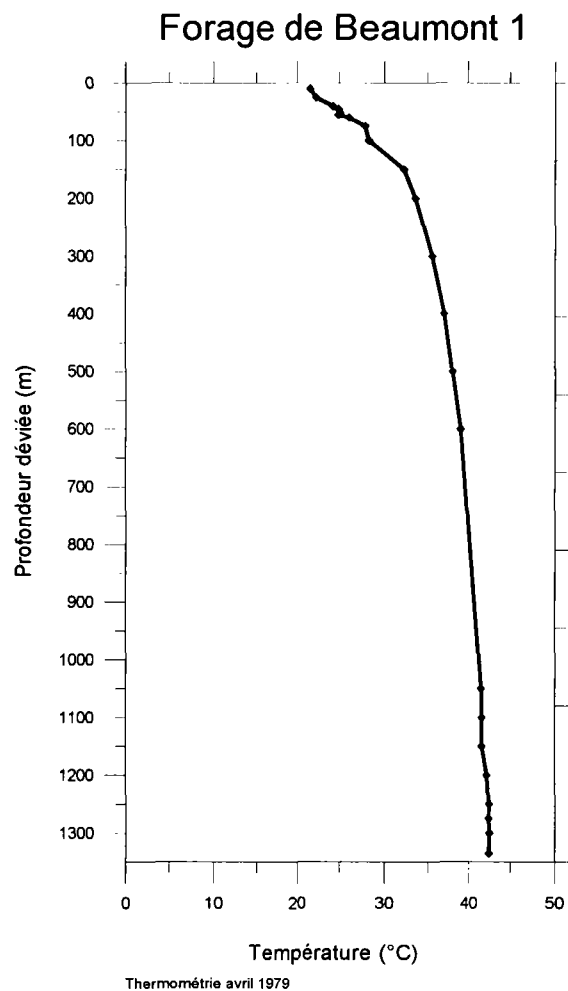


Fig. 30 - Carte des température extrapolées au toit du socle (Héroult, 1974).

L'allure générale du profil de température réalisé le 22 avril 1981 montre (fig. 31) :

- une première zone qui correspond à une augmentation régulière (linéaire) de la température avec la profondeur entre la surface et 300 m de profondeur environ ;
- une seconde zone entre 300 et 600 m de profondeur qui correspond à une diminution régulière du gradient thermique caractérisée par une courbure du géotherme ;
- une troisième zone entre 600 et le fond du puits, localisé à 1 335 m de profondeur, qui montre un gradient constant quasi nul. Le socle granitique avait été atteint à 1 283 m.



**Fig. 31 - Profil de température du 22 avril 1981 réalisé dans le forage de Beaumont 1, Clermont-Ferrand.**

Ce type d'allure peut être expliqué principalement de deux façons différentes (Guillou-Frottier *in* Martelet *et al.*, 2003). La première consiste à supposer un réservoir d'eau chaude au toit du granite, celui-ci étant fracturé et recouvert d'une formation imperméable. L'accumulation de chaleur par convection thermique au sein du réseau de

fractures au toit du réservoir se traduit par une diffusion thermique au sein de la formation imperméable. La diffusion s'estompant avec la distance verticale, le gradient revient progressivement vers une valeur d'équilibre. Cette valeur n'est pas pour autant la valeur d'équilibre représentative de la région étant donnée l'existence d'une perturbation locale (le réservoir). Autrement dit, le flux de chaleur que l'on mesure en surface peut être surévalué par rapport au régime thermique régional. La deuxième explication consiste à considérer la relation probable entre la géométrie du socle granitique et la trajectoire du forage. Si le forage est dévié de la verticale et qu'il s'approche d'une isotherme, elle-même guidée par la structure thermique du socle, alors, la température varie peu le long du profil. C'est l'explication proposée par les auteurs du rapport (Gable *et al.*, 1982), qui ont à leur disposition la géométrie du forage et des données gravimétriques apportant une connaissance sur la structure du socle de la Limagne d'Allier.

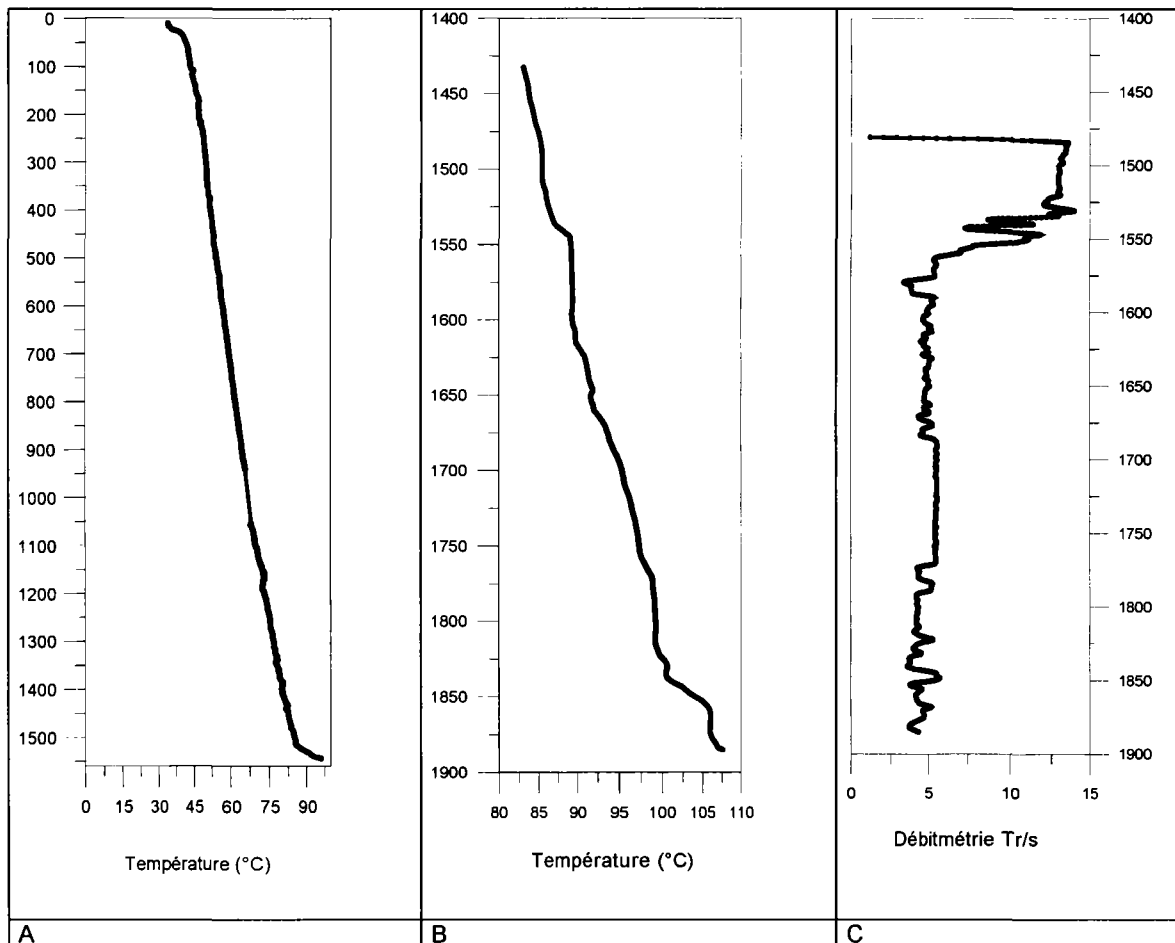
#### 4.4.2. Le forage de Les Vergnes - Croix-Neyrat

La société Géotherma a été chargée en 1981 de la maîtrise d'œuvre du forage Les Vergnes 1 dit Croix-Neyrat, en vue de la réalisation d'un doublet géothermique. Initialement, il était prévu que ce forage de production, profond de 1 886 m, rencontre une série détritique à dominance arkosique avec quelques intercalations argileuses ou marneuses. D'après le log chantier de Géoservices (1979), la foration a en réalité rencontré une puissante série d'âge Stampien, à dominante argileuse (argiles rouges et vertes) avec des silts interstratifiés de grès arkosiques d'épaisseur réduite, et de sables fins à matrice argileuse. Même le conglomérat de base à galets de granite, a finalement présenté une matrice argileuse complètement fermée. Le socle granitique a été rencontré à 1 883 m. Une série de logs nucléaires, électriques, soniques et hydrauliques (T°, débit) a été réalisée dans le forage Les Vergnes (tabl. 2). Grâce à la société Gaudriot qui nous a aimablement prêté ses archives papiers, une partie de ces diagraphies a été numérisée dans le cadre de l'étude : il s'agit des logs de température, de débitmétrie, nucléaires (gamma ray, densité) et acoustiques.

Compagnie	Log	Date	T°C fond trou	Côte début	Côte fin	Échelle
Dresser Atlas	Densilog, neutron gamma ray	20/07/1981	79	100	1 541	1/500, 1/200
Dresser Atlas	Température log	20/07/1981	96	105	1 541	1/500, 1/200
Dresser Atlas	BHC Acoustilog + caliper	20/07/1981	73	105	1 543	1/500, 1/200
Dresser Atlas	Dual Laterolog	20/07/1981	75	105	1 543	1/500, 1/200
Dresser Atlas	BHC Acoustilog + caliper	10/08/1981	89	1 460	1 881	1/500, 1/200
Dresser Atlas	Induction electrolog	10/08/1981	96	1 497	1 867	1/500, 1/200
Dresser Atlas	Acoustic cement log	11/08/1981	no data	125	1 497	1/500, 1/200
Dresser Atlas	Magnelog- caliper	11/08/1981	108	100	1 505	1/500, 1/200
Sogegler	Température + pression fc(tps)	25/08/1981	107	1 430	1 885	1/200
Sogegler	Flowmeter	25/08/1981	no data	1 490	1 653	1/500
Sogegler	Flowmeter	28/08/1981	no data	1 460	1 882	1/500
pas d'en tête	CBL Sonic	?	no data	100	1 500	1/200
Sogegler	Log Electric (SP, GR, IEL)	10/05/1981	no data	1 460	1 860	1/200

**Tabl. 2 - Caractéristiques des enregistrements diagraphiques mesurés dans le forage Les Vergnes - Croix-Neyrat.**

Deux profils de température ont été réalisés dans le forage Les Vergnes en 1981 (fig. 32). Le premier profil a été fait par Dresser Atlas entre le sol et 1 541 m de profondeur et a donné une température de fond de 96 °C. Ce profil qui se compose de deux parties linéaires, a été réalisé alors qu'un débit de 20 m<sup>3</sup>/h était enregistré, et donc que la température mesurée ne correspond pas directement à une température d'équilibre des formations. Entre la surface et 1 510 m de profondeur, le gradient géothermique est normal et se caractérise par une augmentation régulière de température de 33 °C par km. Comme souvent, le fond du puits montre une rupture de pente qui correspond à une forte augmentation de température de l'ordre de 10,5 °C pour les 35 derniers mètres (fig. 32A). Le second profil qui a été réalisé par Sogecler en août 1981 entre 1 430 et 1 885 m de profondeur, a donné une température de fond de 107 °C (fig. 32B). Le profil n'est pas aussi régulier même si la pente moyenne est élevée et correspond à un gradient géothermique de l'ordre de 54 °C/km. Dans le détail, il y a de nombreuses ruptures de pente sur le profil thermique avec des zones à gradient fort qui alternent avec des zones à gradient nul (1 510-1 590 m ; 1 750-1 800 m). La zone centrée sur 1 550 m de profondeur correspond à une zone aquifère où des circulations naturelles sont mises en évidence sur le log de débitmétrie (fig. 32C). Géologiquement, cet intervalle correspond à des formations détritiques de type grès.



**Fig. 32 - Profils de température (A, B) et de débitmétrie (C) réalisés dans les parties supérieure (0-1 550 m) et inférieure (1 440-1 885 m) du forage Les Vergnes 1, Croix-Neyrat.**

Une analyse plus détaillée des signatures thermiques qui permet de mieux définir les gradients thermiques stables, là où la circulation de fluide semble négligeable, est présentée dans Martelet *et al.* (2003). Le premier profil de température (fig. 32A) montre plusieurs zones où le gradient thermique peut être défini. Le deuxième profil (fig. 32B), plus perturbé, a été analysé à l'aide du profil de débitométrie (fig. 32C). Si l'on s'attache aux intervalles de profondeur où le profil de température reste stable (fig. 32A), il faut éliminer les deux premières centaines de mètres, où les perturbations de la surface (qu'il s'agisse de perturbations climatiques ou d'écoulements de fluide superficiel) modifient fortement le géotherme. De même, en profondeur, la température chaude obtenue en fond de trou semble anormale quand on prolonge le gradient stable du dessus. On peut confirmer ce choix en regardant le profil mesuré un mois après (fig. 32B), et où la température à 1 540 m de profondeur reste autour de 88-90°C. Dans l'intervalle 200-950 m, le gradient stable moyen est de 24,4 °C/km, et dans la partie profonde 1 050 -1 450 m, le gradient est de 37 °C/km. Si l'on tente de faire une moyenne sur l'ensemble des 1 550 m de mesures, on obtient un gradient de 28,5 °C/km. Le changement de pente observé entre 950 m et 1 050 m, pourrait être dû soit à un changement de lithologie, soit à un écoulement dans une fracture.

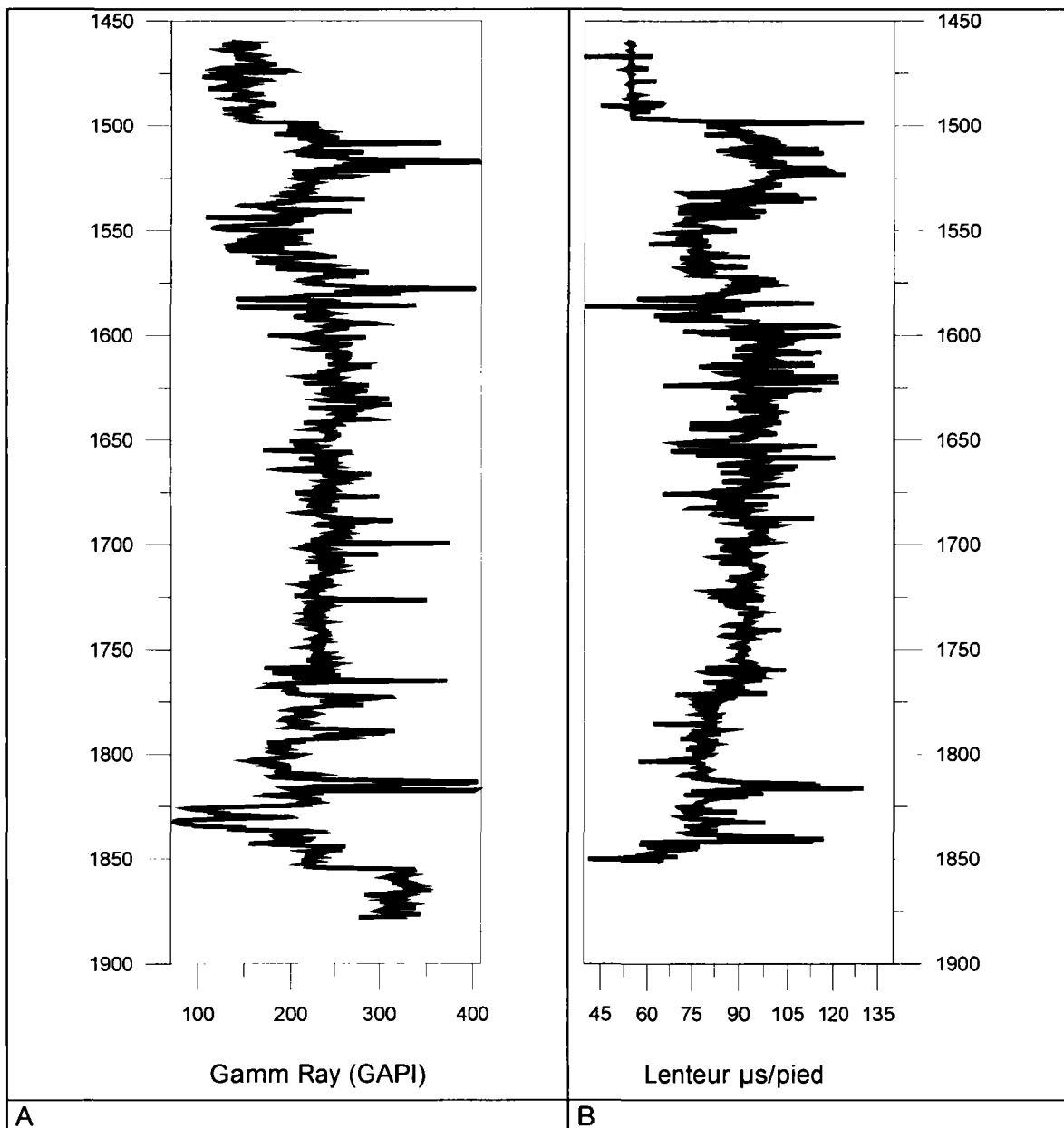
L'analyse détaillée des géothermes obtenus en 1981 (fig. 32) montre que les écoulements de fluide perturbent le profil, et qu'une augmentation régulière du gradient est obtenue, entre les premières centaines de mètres et le fond du forage (de 24 à 46 °C/km). Une telle variation doit s'expliquer non seulement par des effets hydrologiques mais également par des changements de conductivité thermique avec la profondeur. Afin de pouvoir estimer le gradient non perturbé, il est nécessaire de connaître non seulement la conductivité thermique des différentes formations, mais également la conductivité hydraulique des formations, leurs perméabilités et leurs diffusivités thermiques. Une partie de ces paramètres peut éventuellement être obtenue, par le biais des données de diagraphie, mais trop d'incertitudes sur les écoulements potentiels ne permettent pas une correction définitive du profil. La meilleure donnée qui serait utile d'acquérir, afin de mieux évaluer le rôle des circulations de fluide dans l'établissement des hautes températures, serait la mesure d'un nouveau profil thermique. Avec plus de vingt ans de décalage temporel entre les mesures, il serait alors possible d'estimer plus précisément l'équilibre thermique local.

La radioactivité naturelle et la lenteur des ondes P sont présentées sous forme de log en fonction de la profondeur (fig. 33). Le gamma ray est surtout sensible aux teneurs en argiles. On note une décroissance significative de la radioactivité dans la zone réservoir centrée sur 1 550 m de profondeur. On observe également une seconde zone appauvrie en argiles entre 1 820 et 1 840 m de profondeur. Le log géologique de chantier indique la présence de sables dans cet intervalle. Plus profondément, le gamma ray augmente, probablement en liaison avec la proximité du socle cristallin, plus riche en minéraux radioactifs. Entre 1 580 et 1 820 m, le gamma ray ne décroît que légèrement. Le log d'évolution verticale des lenteurs en fonction de la profondeur est relativement parallèle à celui de la radioactivité (fig. 33B). La zone réservoir vers 1 550 m est moins lente. Entre 1 600 et 1 810 m, les lenteurs sont relativement stables et décroissent légèrement.

Au cours des essais de production, il a été observé :

- en statique, une température de 88 °C au toit du réservoir supérieur (1 535-1 565 m), et une température de 109,5 °C au fond ;

- en dynamique, une température de 98 °C dans le réservoir supérieur, et quasi inchangée au fond avec une température estimée de 100 °C ;
- que seul le réservoir supérieur produit (fig. 32C). Il est formé de grès arkosiques à granulométrie hétérogène. Au-delà de cette profondeur, il n'est constaté aucun débit supplémentaire sur les logs de débitmétrie.



**Fig. 33 - Diagraphies Gamma Ray (A) et sonique (B) réalisées dans la partie profonde (1 450-1 885 m) du forage Les Vergnes 1, Croix-Neyrat.**

Une reprise des d'essais a été réalisée dans ce puits en mars 1984 par la ville de Clermont-Ferrand et en décembre 1984 par la société Géotherma. Au niveau thermique, la température maximale obtenue au fond du puits est de 115,6 °C avec une température au toit du réservoir supérieur de 99 °C.

Cette opération avait été stoppée en septembre 1981 sur un constat de semi échec. En effet, les conditions de températures c'est-à-dire un réservoir à 100 °C et une profondeur de 1 886 m, avaient été respectées. En revanche, le débit de production escompté à 100 m<sup>3</sup>/h, n'était pas atteint puisque seulement 20 m<sup>3</sup>/h avaient été produits pendant les essais. Les tests réalisés en décembre 1984 ont confirmé les températures observées trois ans auparavant. En effet, on observait même une légère augmentation au niveau thermique, avec 115,6 °C mesurés au lieu des 109,6 °C mesurés en 1981. En revanche, le débitmètre réalisé en 1984 est comparable à celui fait en 1981 avec une diminution significative de la production dans les niveaux producteurs caractérisés par un débit de 17 m<sup>3</sup>/h (fig. 34). Des carottes ont été prélevées dans les niveaux producteurs entre 1 517 et 1 522 m. Ces carottes n'ont pas encore été retrouvées.

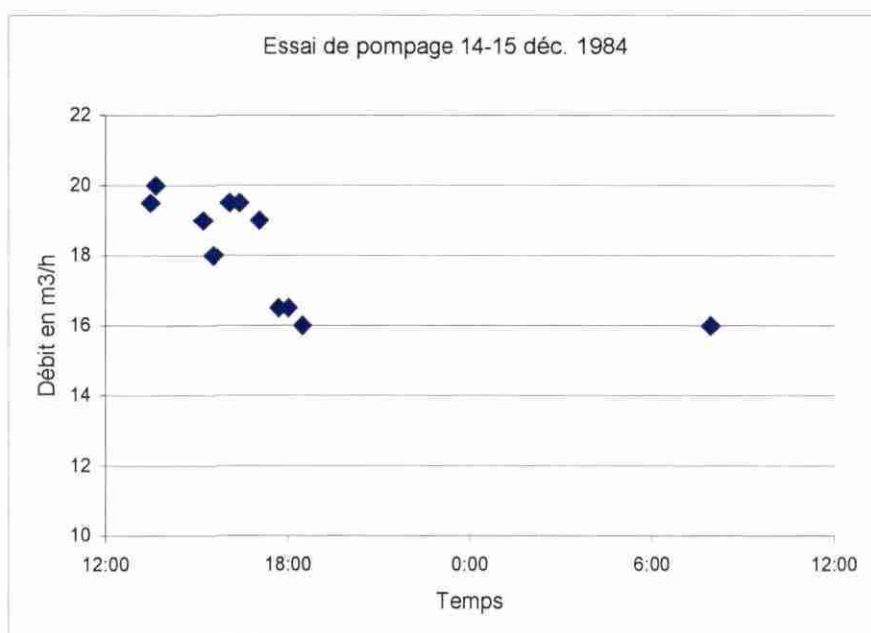


Fig. 34 - Volume produit en fonction du temps dans le forage Les Vergnes 1, Croix-Neyrat.

## 5. La géophysique

### 5.1. INTRODUCTION

La synthèse géophysique doit permettre de faire le point sur les données géophysiques diverses acquises (sismique, magnétisme, gravimétrie, méthodes électrique, magnétotellurique, du bruit sismique, données en forage...) et leurs interprétations, dans la région des Limagnes et à sa périphérie. Ce travail est réalisé en vue de montrer l'apport des différentes méthodes pour la mise en évidence de zones à potentiel géothermique. L'accent est également mis sur l'intérêt des différentes méthodes pour la caractérisation en profondeur des corps géologiques, du point de vue géométrique, mais aussi en ce qui concerne leurs propriétés physiques. Un rapport indépendant (Martelet *et al.*, 2003) a été réalisé qui regroupe et développe les éléments géophysiques de cette synthèse en y incluant les aspects thermiques. Les points majeurs de l'état des connaissances sur la couverture géophysique de la région étudiée sont résumés dans ce chapitre.

Une première synthèse a été réalisée en 1977 par le BRGM et la Commission Européenne (Stieltjes, 1977). Les données comme les études antérieures concernant la région des Limagnes sont souvent anciennes et restent disparates. Dans la mesure où COPGEN devait permettre la mise au point d'une méthodologie d'inventaire du potentiel géothermique basse et moyenne énergie sans acquisition importante de données, un premier travail a consisté à inventorier les données et la bibliographie disponibles, les réunir, et effectuer les retraitements qui s'avéraient nécessaires.

Les données géophysiques prises en compte lors de la phase de compilation de COPGEN sont :

- les **données de sismique** pétrolière qui permettent, à partir des réflecteurs interprétés, d'établir une trame structurale et géologique. Pour cela, la combinaison avec l'information lithostratigraphique et les diagraphies réalisées en forages est indispensable ;
- les données de champs de potentiels (**gravimétrie et magnétisme aéroporté**) qui devront permettre, par des approches indirectes, inverses ou de modélisation directe d'appréhender les grands traits de la structuration du bâti géologique. Pour qu'elles prennent tout leur intérêt, ces méthodes doivent être contraintes par la sismique et par des **mesures de densités et de susceptibilité** (ou de rémanence) ;
- des **données d'origines diverses** (méthodes électriques/électromagnétiques, méthode du bruit sismique,...) qui représentent des études locales mais que l'on ne doit pas négliger dans la mesure où elles permettent notamment de localiser en profondeur des zones de faille associées à des circulations de fluides ;
- des **données de forage** : paramètres physiques des roches à partir de diagraphies ou de mesures sur carottes, essais de pompage permettant d'évaluer la qualité des réservoirs *in situ*.

## 5.2. LA SISMIQUE RÉFLEXION EN LIMAGNE D'ALLIER

Trois grandes campagnes de sismique pétrolière (fig. 35) et une campagne COGEMA, qui reste assez mal connue car inédite, couvrent une part importante de la Limagne d'Allier. Ces campagnes permettent une imagerie qui s'étend depuis la sub-surface jusqu'au toit du socle.

La sismique réflexion permet, au droit des profils, d'imager les principaux niveaux sédimentaires sous la forme de réflecteurs, ainsi que leurs interruptions ou décalages par des accidents. Un réflecteur délimite deux milieux dont l'impédance acoustique diffère (produit de la vitesse des ondes sismiques par la densité du milieu). Cette propriété physique est également liée à la perméabilité, à la porosité et à la rhéologie du matériau.

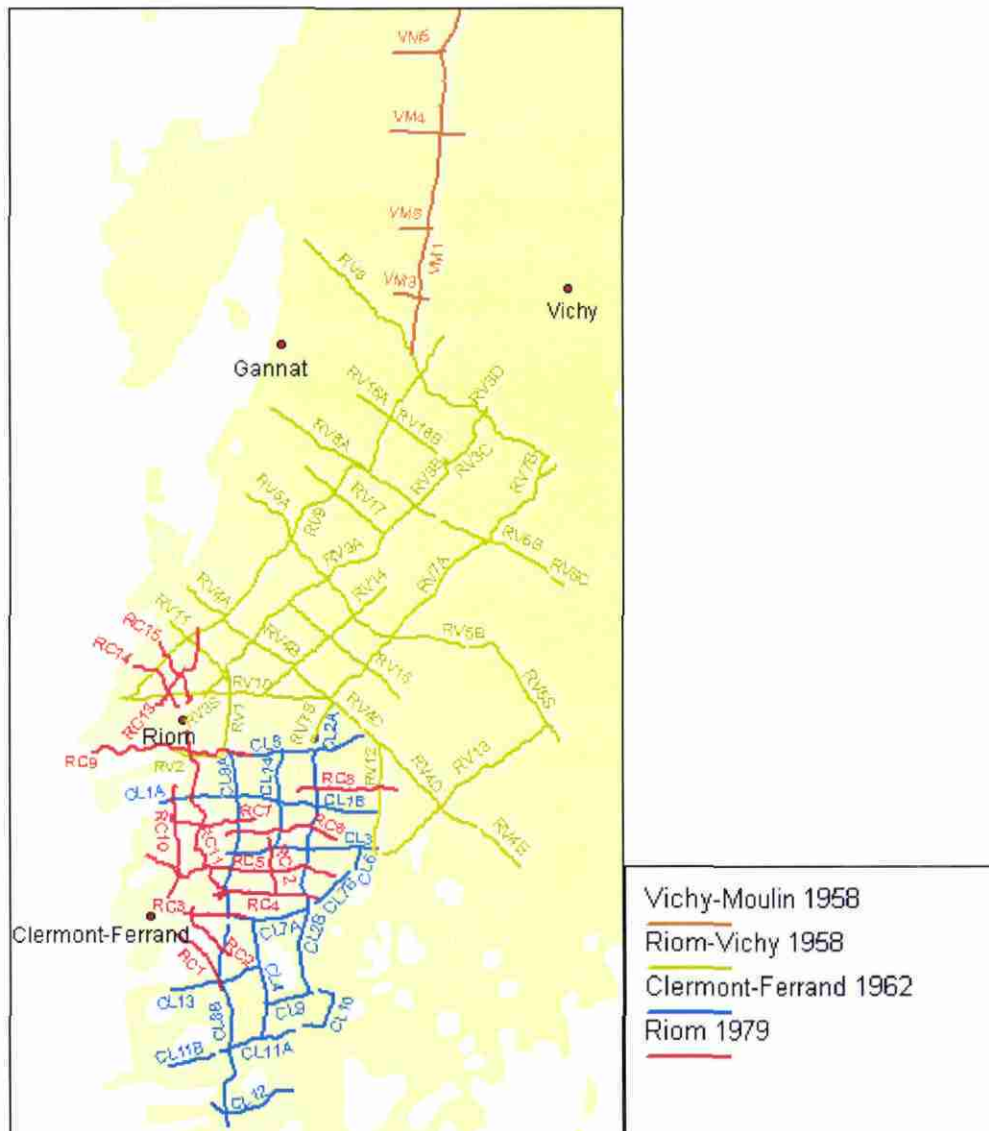


Fig. 35 - Localisation des profils des quatre campagnes de sismique pétrolière dans la zone Clermont - Riom - Gannat. En jaune, l'extension du bassin.

### 5.2.1. Les interprétations existantes

Chez les pétroliers comme à la COGEMA, les campagnes de sismique réflexion ont donné lieu à des interprétations et/ou synthèses partielles. Les principales caractéristiques géométriques du bassin de la Limagne d'Allier ont ainsi pu être établies, et en particulier la géométrie du toit du socle. En particulier, à l'échelle du bassin, relativement peu détaillé, une carte de synthèse du toit du socle a été publiée (Morange *et al.*, 1971). Les principales caractéristiques du bassin (fig. 36) sont : un approfondissement jusqu'à 2 500 m environ dans la fosse de Riom, à proximité de la bordure ouest du bassin, et une remontée graduelle en direction de l'est et du nord, dans des gammes de profondeur comprises entre 500 et 1 200 m en moyenne. Une forte dissymétrie E-W est donc mise en évidence.

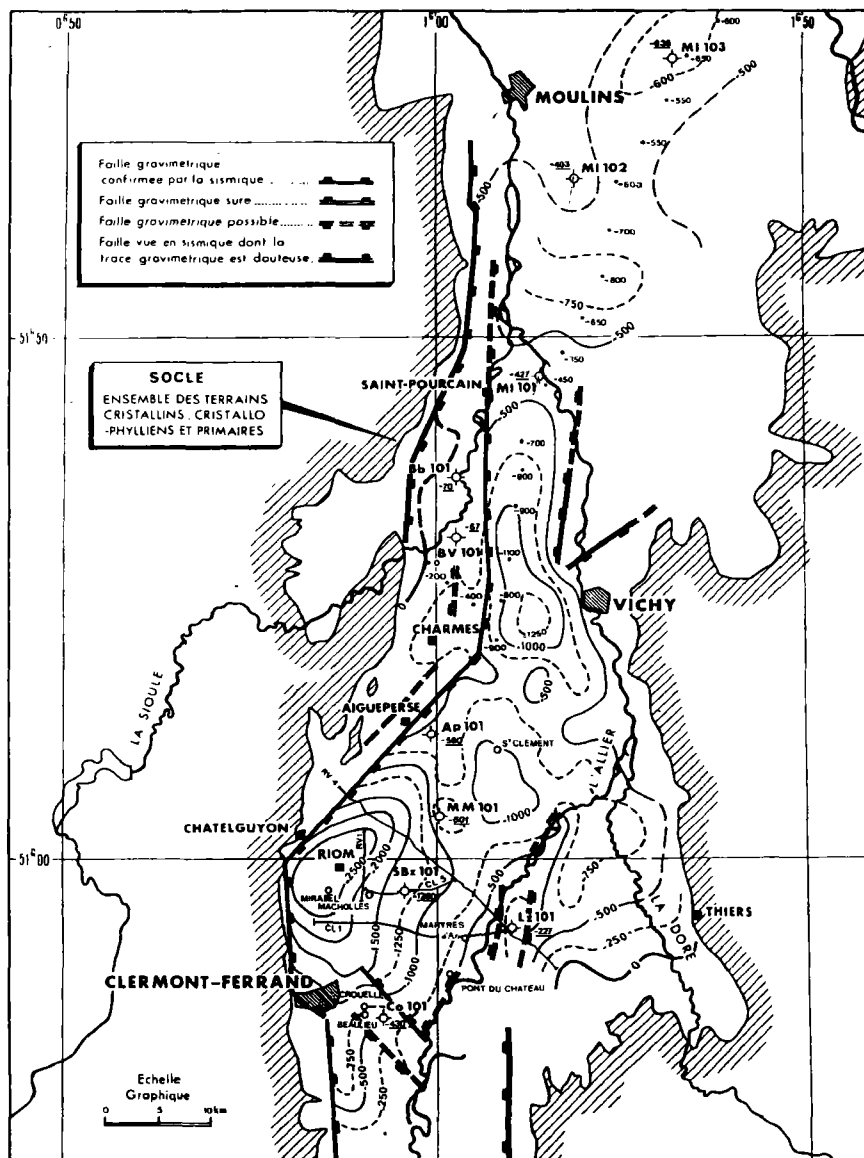


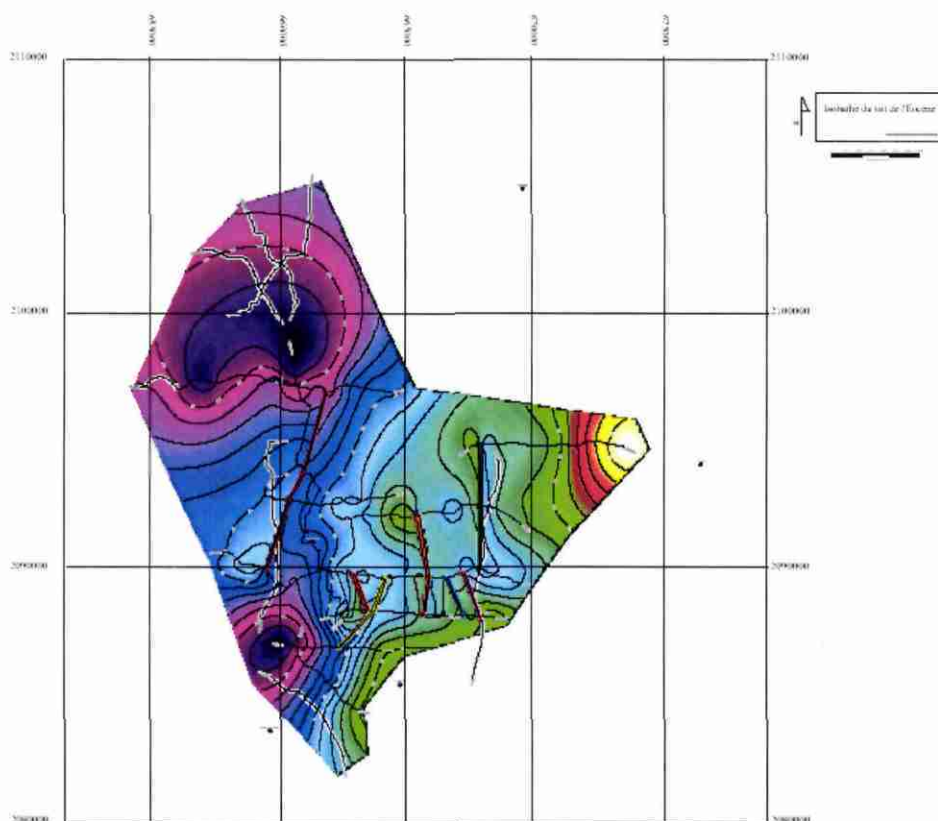
Fig. 36 - Isobathes du toit du socle déduits des campagnes de sismique pétrolière réalisées en Limagne d'Allier, et dans une moindre mesure, de la gravimétrie (Morange *et al.*, 1971).

## 5.2.2. Retraitement des données sismiques

À l'exception des profils sismiques COGEMA du nord de la Limagne d'Allier, dont nous n'avons récupéré que quelques documents interprétatifs, l'ensemble des coupes sismiques pétrolières a pu être rassemblé. Toutes figurent sous forme de coupes papier, dans les dossiers de fin de travaux des différentes campagnes pétrolières, archivées au titre du code minier. Bien que généralement peu lisibles, elles peuvent, au besoin, constituer un support de travail.

Par ailleurs, 26 profils localisés dans la zone Clermont-Riom et de bonne qualité ont pu être numérisés sous forme de coupes *stackées* au format SEG-Y. Après un prétraitement dans le logiciel Seismic Unix, elles ont été intégrées en 3D dans SeisVision, où le pointé de réflecteurs a été réalisé en 3D. Nous avons alors pointé un ensemble de réflecteurs interprétés indépendamment par l'analyse de l'ensemble des forages disponibles à l'échelle du bassin et repérés sur les diagraphies de forage de référence également numérisées.

Ainsi nous avons abouti à un ensemble de réflecteurs et de discontinuités sismiques cohérents pour l'ensemble de la zone que couvrent les profils numériques, et en accord avec la géologie vue en forage (fig. 37). Cette trame structurale constituera la base géométrique de la modélisation 3D prévue dans la zone Clermont-Riom.



**Fig. 37 - Exemple de carte extraite de Seisvision montrant le toit de l'isobathe de l'Éocène en Limagne d'Allier. En jaune, les profondeurs faibles (400 m), en violet, les profondeurs fortes (1 100 m).**

### **5.3. LES DONNÉES DE CHAMPS DE POTENTIEL**

Les données des champs de potentiel (gravimétrie et magnétisme aéroporté) permettent, par l'intermédiaire des contrastes de densité et d'aimantation des roches, d'appréhender les principales caractéristiques géométriques du bâti géologique. De par son caractère intégrant encore plus prononcé que le champ magnétique, le champ de pesanteur rend possible une imagerie à l'échelle crustale. Au premier ordre, ces méthodes définissent principalement l'interface socle - bassin, mais aussi des hétérogénéités internes au bassin. Pour réduire les incertitudes inhérentes à la méthode, des contraintes indépendantes (sismique, forages, ...) sont nécessaires. De même, l'information sur les densités et propriétés magnétiques des roches, accessible en forage, est fondamentale pour la modélisation de ces données.

Pour l'ensemble de la zone d'intérêt de COPGEN, la couverture gravimétrique doit permettre de mener des modélisations à une échelle compatible avec la problématique de la structuration des bassins et de leurs implications sur le potentiel géothermique.

Sur le graben de Saint-Flour - Le Malzieu, les données acquises pour COPGEN permettent de préciser l'anomalie liée au bassin, mais son faible remplissage sédimentaire ne génère qu'une anomalie de faible amplitude, sans doute difficile à modéliser.

Sur la Limagne d'Allier en revanche, l'anomalie gravimétrique négative engendrée par le bassin est très significative (fig. 38) et son interprétation en terme de structuration du bassin peut être encore affinée par l'analyse des gradients.

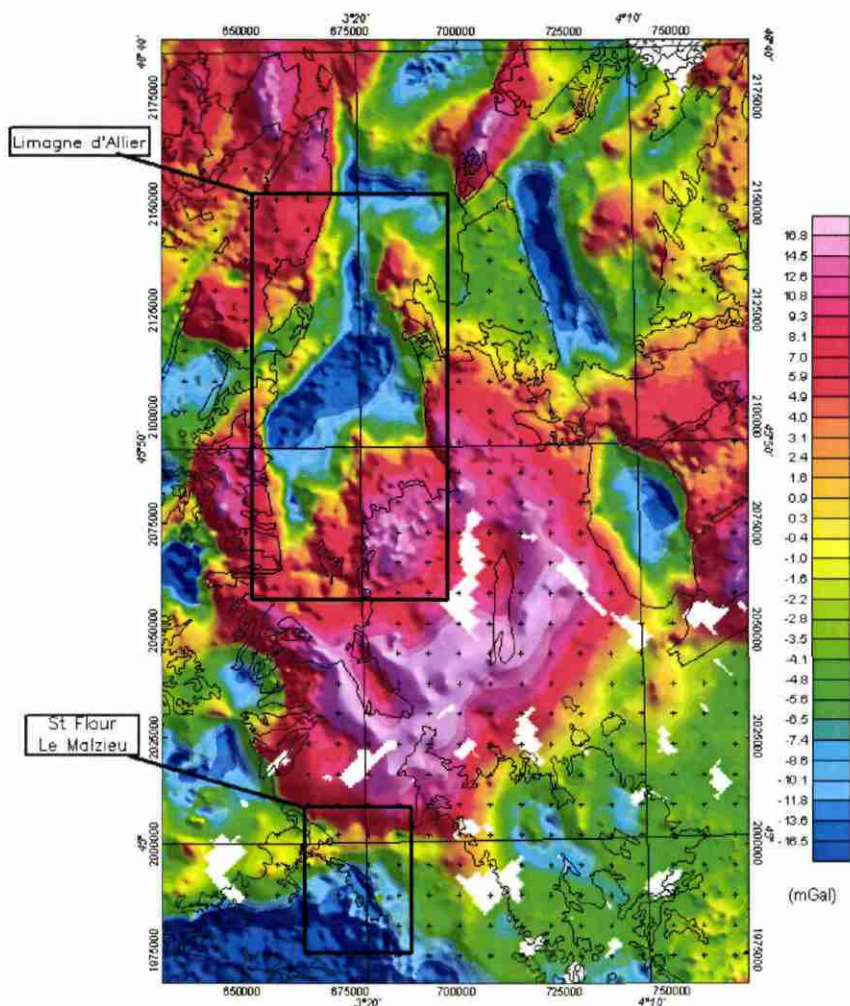
Le magnétisme, en association avec la gravimétrie, peut permettre d'individualiser et de caractériser la nature de corps non-affleurants.

Contrainte par les données de forages, la gravimétrie doit permettre d'affiner notre connaissance de l'interface socle – bassin et de l'étendre aux zones non couvertes par la sismique. La gravimétrie peut éventuellement, à partir des mesures de densités disponibles, en relation avec la connaissance géologique, la sismique et le magnétisme, permettre de caractériser la nature du socle sous le bassin.

#### **5.3.1. Données gravimétriques**

Les données gravimétriques compilées dans le cadre de COPGEN proviennent pour l'essentiel de la BGF (Banque Gravimétrique Française) hébergée et gérée par le BRGM. La zone de Saint-Flour - Le Malzieu, initialement très peu couverte, a fait l'objet d'un levé spécifique pendant la durée de COPGEN dans le cadre d'un autre projet de recherche géophysique du BRGM, METPHY (méthodes géophysiques).

La figure 38 présente la carte d'anomalie de Bouguer résiduelle, couvrant la zone d'emprise de COPGEN. Cette carte reflète l'ensemble des contrastes de densités qui existe sous la surface topographique. Elle apparaît très cohérente avec la géologie : les anomalies négatives sont associées aux bassins et aux granites, les anomalies positives se localisent à l'aplomb des unités de socle et volcaniques.

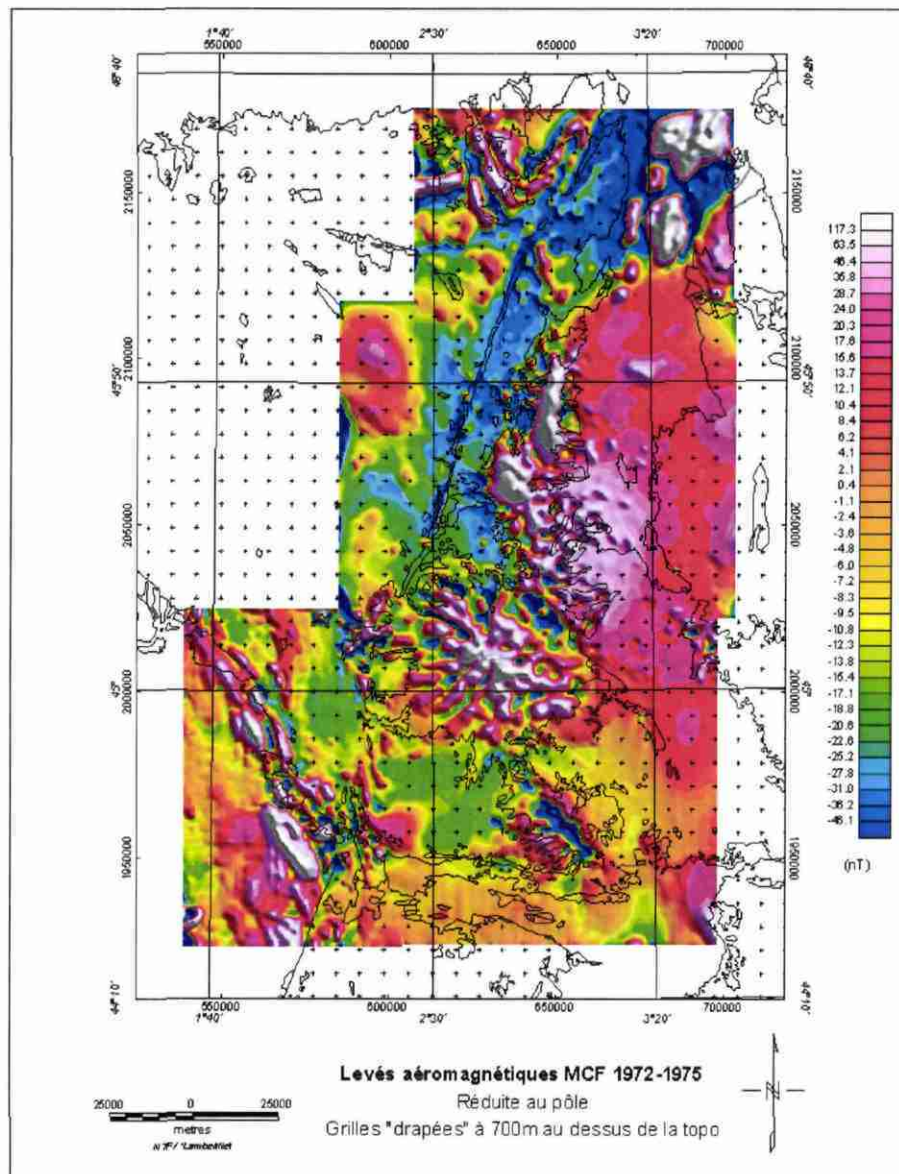


**Fig. 38 - Anomalie de Bouguer résiduelle sur la zone d'emprise de COPGEN. L'extension des bassins (anomalies négatives) est parfaitement identifiable.**

### 5.3.2. Données aéromagnétiques

Seules les données aéromagnétiques acquises lors des levés INAG/BRGM de 1972 et de 1975 peuvent présenter un intérêt à l'échelle de travail de COPGEN. Elles s'étendent depuis la Limagne d'Allier jusqu'à l'Aubrac, incluant les principales zones d'intérêt de COPGEN.

La figure 39 présente la compilation des levés de 1972-1975 sous forme d'anomalies magnétiques réduites au pôle et « drapées » à 700 m au-dessus de la topographie. Dans la zone de Clermont-Riom, des anomalies locales de faible amplitude sont visibles, qui reflètent sans doute la présence de matériel volcanique intercalé dans le bassin. Plus au nord, entre Vichy et Moulins, on observe de fortes anomalies certainement associées à la nature magnétique du socle sous le bassin.



**Fig. 39 - Carte d'anomalies magnétiques des levés INAG-BRGM, réduite au pôle et « drapée » à 700 m au-dessus de la topographie. La réduction au pôle permet, en l'absence d'aimantation rémanente des roches, de s'affranchir de l'inclinaison du champ magnétique et de relocaliser les anomalies à l'aplomb des sources qui les génèrent.**

#### 5.4. DONNÉES GÉOPHYSIQUES DIVERSES, ÉTUDES LOCALISÉES

En dehors des grandes campagnes de sismique, gravimétrie et magnétisme aéroporté, nous avons pu recenser dans la région d'intérêt de COPGEN quelques études géophysiques ayant pour cible des objectifs pétroliers ou géothermiques. Ces études généralement assez localisées, mettent en œuvre des techniques géophysiques telles que l'électrique, la magnéto-tellurique ou le bruit sismique. Elles ont l'intérêt d'être

applicables en domaine de socle comme dans le sédimentaire. Elles peuvent apporter, dans des zones mal couvertes ou mal contraintes par d'autres méthodes des informations intéressantes, en particulier concernant la présence de fluides en relation avec des accidents.

#### 5.4.1. Dans le bassin de Limagne d'Allier

En Limagne, dans la zone de Clermont-Riom, les résultats de sondages électriques et de l'étude du bruit sismique ont été combinés (Horn et Stanudin, 1975). Nous avons ainsi mis en évidence, dans la zone repérée par la lettre A (fig. 40), une concordance entre conductivité et bruit sismique accru. Cette zone est par ailleurs localisée sur un accident (comme les autres zones de fort bruit sismique d'ailleurs), ce qui permet, au moins localement, de présager des effets de circulations profondes de fluides à la faveur d'accidents géologiques.

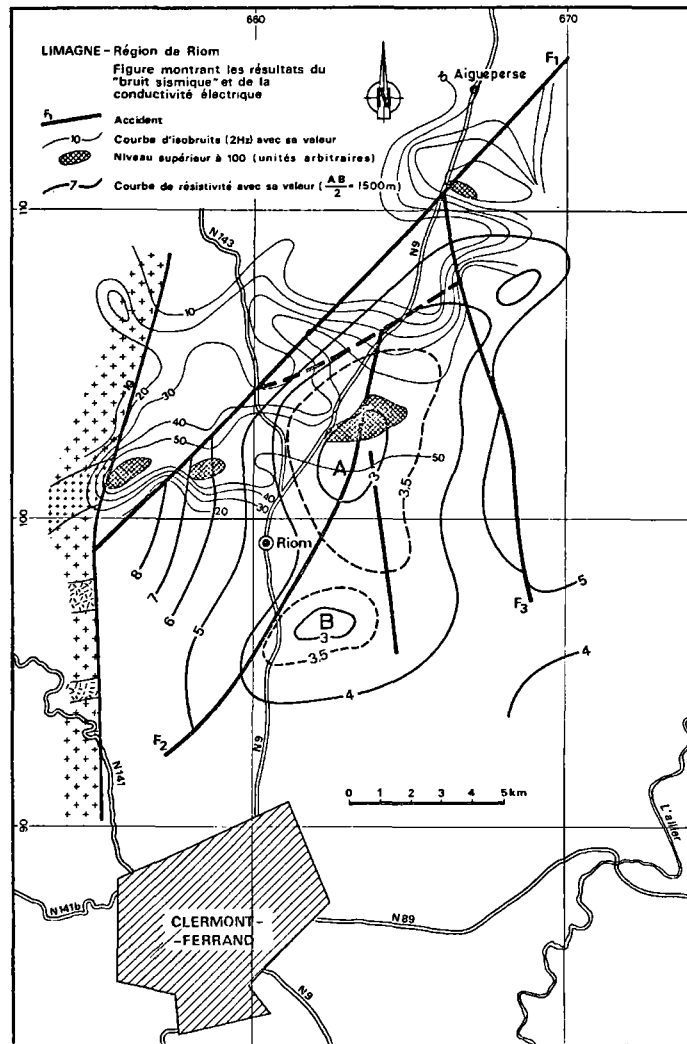


Fig. 40 - Zone de Riom-Gannat : localisation et intensité du bruit sismique et sa corrélation avec des zones de faible résistivité (Horn et Stanudin, 1975).

#### 5.4.2. En domaine volcanique

Au début des années 80, dans le cadre de prospections géothermiques de moyenne et haute enthalpie concentrées sur les domaines volcaniques du Massif central, la chaîne des Puys, le Cézallier et le Mont-Dore ont fait l'objet d'investigations géophysiques pluridisciplinaires.

1. Sous la Chaîne des Puys un ensemble de campagnes de géophysique (électrique, magnétique différentiel, magnétotellurique) ont été réalisées pour rechercher une éventuelle chambre magmatique à faible profondeur (3-5 km). Les résultats obtenus sont cohérents, mais négatifs du point de vue géothermique. La possibilité d'une chambre plus profonde que 5 à 10 km a été évoquée.
2. Dans le Cézallier, à partir de données audiomagnétotelluriques pour l'essentiel (Aucel, 1987), des éléments pour la compréhension des circulations hydrothermales en domaine de socle fissuré, par détection d'anomalies conductrices, ont été mis en relation avec les zones d'émergence (Demange *et al.*, 1984). Il n'y a pas de réservoir hydrothermal important dans le socle du Cézallier, mais les résultats suggèrent l'existence d'un milieu fissuré au sein duquel peuvent percoler les fluides, de manière identique à ce qui a été reconnu dans le forage de Chassole.
3. Dans la région du Mont-Dore, une étude géophysique multi méthode a été réalisée en vue de mettre en évidence une structure de type caldeira et une activité géothermique associée éventuelle, dont Varet *et al.* (1980) font la synthèse. On a ainsi pu nettement mettre en évidence une zone d'effondrement, en cartographier les limites et donner les principales caractéristiques de son remplissage. À l'époque, une zone apparemment favorable à la géothermie avait été ciblée pour forage au sein de la caldeira.

#### 5.5. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET HYDROLOGIQUES EN FORAGE

Les mesures de paramètres physiques des roches (densité, porosité, perméabilité) dont on dispose sur la zone d'étude proviennent de déterminations sur carottes ou d'estimations à partir de diagraphies. Compte tenu du nombre restreint de mesures disponibles et de la variabilité latérale rapide des faciès sédimentaires du bassin, la généralisation de ces mesures sur de grandes étendues est extrêmement peu fiable. Pour caractériser correctement d'éventuels aquifères du point de vue de leurs propriétés physiques, de nouveaux sondages seraient nécessaires, peu de carottes ayant été extraites des sondages existants, leur conservation étant hypothétique et ces carottes ayant généralement déjà fait l'objet d'une détermination de paramètres physiques.

Quelques mesures de paramètres hydrologiques (perméabilité, transmissivité) des formations réservoir potentielles ont été réalisées *in situ* lors d'essais de pompages ou de mise en production de certains forages. Les résultats principaux de ces tests sont décrits au paragraphe 6.3.2. « Données sur les réservoirs ».

De manière générale, les niveaux détritiques du Stampien constituent les principaux horizons réservoir visés jusqu'à présent. Les porosités qui y ont été observées sont souvent significatives (jusqu'à 25-30 %). En revanche, les perméabilités sont généralement médiocres, de l'ordre du milliDarcy, atteignant exceptionnellement plusieurs dizaines de milliDarcy.

La variabilité des horizons détritiques, tant horizontale que verticale, de faciès, d'épaisseurs, induit une réelle difficulté pour extrapoler les mesures obtenues jusqu'ici. Dans l'avenir, sans doute faudrait-il privilégier les zones localisées sur des accidents qui favorisent le drainage et des interactions avec le socle chaud.

## **6. L'hydrogéologie**

L'hydrogéologie est assez largement contrôlée par la géométrie des grands accidents structuraux et des unités géologiques. Beaucoup de formations sont lagunaires, ce qui se traduit par de petites couches perméables dont il est important de savoir si elles sont connectées ou pas, si elles sont isolées dans des niveaux imperméables. Même si le sujet est trop amont pour des modélisations hydrodynamiques, qui requerraient des essais de pompage, il est important d'acquérir le maximum de connaissances sur les facteurs hydrodynamiques.

### **6.1. OBJECTIFS DE LA SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE**

Pour présenter un potentiel intéressant, les réservoirs à objectifs géothermiques doivent présenter des caractéristiques favorables au niveau :

- de la productivité, liée à des paramètres hydrodynamiques (épaisseurs et extension des réservoirs, porosité efficace, perméabilité, recharge des aquifères) ;
- de la température de l'eau.

Les objectifs de cette synthèse hydrogéologique sont donc de recenser les principales caractéristiques des réservoirs connus ou supposés en s'appuyant sur la synthèse géologique effectuée dans le cadre de ce projet, et à partir d'une étude bibliographique sur les aquifères basse et moyenne énergies dans la région des Limagnes, de ses bordures, et des bassins de Saint-Flour et du Malzieu.

### **6.2. HYDROGÉOLOGIE DES LIMAGNES**

L'hydrogéologie des Limagnes est assez largement contrôlée par la géométrie des grands accidents structuraux. L'hétérogénéité verticale et latérale du remplissage sédimentaire des Limagnes (variations latérales de faciès entre la bordure et le centre du bassin, variations de puissance), associée avec les jeux de horsts et grabens qui ont affecté le Massif central à la fin du Miocène, sont deux éléments majeurs qui engendrent des aquifères de type discontinu. Ces aquifères sont donc par essence difficiles à caractériser, car les extrapolations sont hasardeuses, et ce niveau de risque n'a pas encouragé les investigations (Maget, 1983). De plus, il y a encore à l'heure actuelle une grande méconnaissance de la structure profonde des Limagnes.

Les séquences sédimentaires telles que sables, grès, calcaires, conglomérats, constituent des réservoirs aquifères potentiels. Comme les formations sédimentaires sont souvent de type lagunaire, cela se traduit par des petites lentilles aquifères plus ou moins connectées entre elles, ou prisonnières de niveaux plus imperméables, et sans réel potentiel. La mixité des faciès (calcaires marneux, sables argileux, ...) peut aussi jouer sur les porosités et les perméabilités. La structure et la nature des aquifères jouent donc un rôle important dans leur potentialité.

Les principaux réservoirs intéressants pour les objectifs géothermiques sont, *a priori*, situés dans des formations détritiques arkosiques situées en profondeur, en bordure de bassin, en relation avec les failles (faille d'Aigueperse en particulier) qui affectent le socle cristallin et permettent les remontées d'eaux chaudes.

### 6.3. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

#### 6.3.1. Données générales extraites des notices des cartes géologiques au 1/50 000

Des données générales sur l'hydrogéologie des Limagnes, extraites de différentes notices des cartes géologiques au 1/50 000 (fig. 1), sont présentées ci-dessous.

##### a) Grande Limagne, Limagne d'Allier

*Feuille de Montmarault, n° 620* : les terrains sédimentaires sont plus ou moins perméables, mis à part les faciès les plus marneux : grès, grès carbonatés, sables plus ou moins argileux, calcaires plus ou moins argileux, calcarénites et silts calcaires perméables, enfin et surtout bancs ou lentilles de calcaires concrétionnés à phryganes et/ou algues formant des masses épaisses de 3 à 5 m, généralement très fissurées, avec parfois ébauche de dissolution karstique.

Les sources observées se situent pour la plupart à l'extrême bordure des sédiments de Limagne, ou au contact du socle : Bransat, Cesset et, sur la couverture stampienne, on note des petites sources vers Tignat. Une source importante fait exception, celle du lavoir de Bellevue, au pied de Chareil-Cintrat, au sud-est, en relation probable avec un niveau de calcaires concrétionnés.

*Feuille de Saint-Pourçain-sur-Sioule, XXVI-28, n° 621* : les sables et argiles de la Limagne bourbonnaise ne présentent que peu d'intérêt au point de vue hydrogéologique dans les limites de la feuille. Quelques puits d'une profondeur maximale de 1,5 m exploitent ce niveau aquifère.

Les nappes profondes peuvent exister dans les niveaux sableux intercalés dans les dépôts carbonatés oligocènes, mais les aléas possibles liés à la qualité chimique, les débits, et l'alimentation de ces nappes sont des éléments défavorables à une prospection de cette ressource.

*Feuille de Gannat, XXV-29, n° 645* : les possibilités aquifères des formations oligocènes, *a priori* assez peu favorables, sont en fait mal connues ; il n'y a que quelques puits traditionnels (avec une profondeur maximale de l'ordre de la dizaine de mètres) exploitant des nappes contenues dans des niveaux localement plus sableux, avec des débits généralement faibles, de l'ordre de 1 l/s. À Jenzat, un groupe de trois sources thermo-minérales non exploitées peut être rattaché au bassin hydrominéral de Vichy. Ces sources ont un faciès bicarbonaté sodique, elles sont légèrement carbo-gazeuses, ont un débit assez faible, et une température de 21 °C.

*Feuille de Maringues, XXVI-30, n° 670* : sables et argiles ne présentent que peu d'intérêt au point de vue hydrogéologique. Des nappes profondes peuvent exister dans les niveaux sableux ou les dépôts calcaires oligocènes, mais elles sont difficilement

décelables et exploitables : un forage de 96 m implanté à Chauprillade ne fournit que 0,5 m<sup>3</sup>/h. Sur cette feuille se trouvent les sources du bassin de Vichy-Saint-Yorre et de Châteldon :

- les sources du bassin de Vichy émergent des formations marneuses ou marno-sableuses des Limagnes. Dans ces formations très peu perméables sont disséminées des lentilles de sable (appelées « filons » par les exploitants d'eaux minérales), qui peuvent avoir une bonne perméabilité, et permettre à l'eau minérale qui remonte le long des failles du substratum cristallin de s'accumuler ;
- dans la vallée du Vauziron, deux groupes de sources émergent du granite fracturé, à proximité de la faille qui sépare le socle du sédimentaire. Il s'agit d'une part des sources de Châteldon – Montagne qui sont froides et radioactives, et d'une part des sources de Sergentale et Vécou, qui sont froides et carbo-gazeuses.

*Feuille de Le Mayet-de-Montagne, XXVII-30, n° 671* : quelques sources thermo-minérales sont captées à Laprugne (10 °C, radioactives), Saint-Alban-les-Eaux (de 13 à 17 °C, très carbo-gazeuses), Renaison (carbo-gazeuses), et font partie de la province des eaux bicarbonatées sodiques. Elles seraient liées à des failles provoquées par des accidents du socle.

*Feuille de Thiers, XXVI-31, n° 694* : les formations sédimentaires tertiaires se rencontrent sous un faciès mixte (calcaires marneux, marnes sableuses, sables argileux,...). Des grès arkosiques occupent le fond du bassin d'effondrement. Les possibilités aquifères de ces formations sont mal connues, deux forages profonds pour la recherche d'hydrocarbures (Pont-du-Château) ou de calcaires bitumeux (Dallet) donnent peu d'indications sur les paramètres hydrauliques. Les sources minérales sur la feuille de Thiers sont assez nombreuses :

- Thiers ;
- Courpière : sources froides sortant le long d'une faille rectiligne NW-SE, marquant la séparation entre les granites de l'avancée nord du massif de Saint-Dier à l'ouest, et les sédiments oligocènes à l'est ;
- Sermentizon : source froide au sein du granite de Saint-Dier ;
- Glaine-Montaigut : deux sources minérales froides ;
- Joze : trois sources minérales gazeuses d'un bon débit ;
- Les Martres-d'Artières : un forage exécuté en 1919 (maintenant comblé) fut appelé « le geyser des Martres-d'Artières », car l'eau, captée à 415 m de profondeur, jaillissait à plus de 15 m du sol, avec une température de 31 °C.

*Feuille de Brioude, XXVI-34, n° 766* : le bassin de Brioude est un fossé d'effondrement remblayé par des sédiments détritiques dans lesquels s'intercalent quelques niveaux carbonatés (Limagne de Brioude). Le sondage de Cohade, implanté à l'altitude 415 m, a traversé 358 m de sédiments avant de toucher le socle constitué de sédiments houillers. Les formations oligocènes argilo-sableuses ou calcaro-gréseuses, de perméabilité variée mais habituellement faible, recèlent quelques nappes peu étendues à forte minéralisation, donnant naissance à des sources autrefois captées, aujourd'hui abandonnées.

Diaclasés et fissurés, très perméables, les basaltes constituent des aquifères remarquables fortement développés vers le sud. Au sud-est, dans la dépression de Paulhaguet, un horizon intermédiaire constitué de dépôts oligocènes et villafranchiens sépare le socle des coulées volcaniques. Les sédiments argilo-sableux oligocènes et les alluvions plio-villafranchiennes forment un niveau perméable où les eaux souterraines ayant traversées les basaltes s'accumulent en donnant naissance aux sources infra-basaltiques. Au sud de Couteuges, ces alluvions plio-villafranchiennes extrêmement argileuses sont suffisamment imperméables pour constituer le toit d'une nappe en charge emmagasinée dans une ancienne coulée sous-jacente (résultats fournis par le forage de Bannat, sur la feuille de Langeac n° 790, dont le débit est de 14 l/s).

*Feuille de Chaudes-Aigues, n° 813* : les ressources en eau souterraine sont réparties dans les formations cristallines, volcaniques et sédimentaires. Les basaltes diaclasés et fissurés peuvent représenter des aquifères intéressants : coulées superposées intercalées d'un horizon argilisé imperméable, ou coulées reposant directement sur le socle granitique. Les formations sédimentaires miocènes, sont représentées par des sables à Chailles, et ont été exploitées par puits, dont la plupart sont maintenant abandonnés, l'aquifère étant peu productif et vulnérable aux pollutions.

La feuille de Chaudes-Aigues comporte de nombreuses sources thermales et minérales.

## **b) Limagnes de Loire**

*Feuille de Charlieu, n° 648* : les terrains tertiaires ont un faciès de sable grossier en bordure du socle et pourraient offrir un certain potentiel aquifère. Vers le centre du bassin, ces dépôts, dont l'épaisseur pourrait atteindre 400 m, sont à dominante argileuse avec alternance irrégulière de passages sableux qui contiennent peut-être une petite ressource (cf. au sud, feuille de Roanne n° 672, le forage de n° BSS 672-2X-0009, qui produit 20 000 m<sup>3</sup>/an pour un usage industriel).

## **c) Bassins de Saint-Flour - Le Malzieu**

Le graben de Saint-Flour est orienté NW-SE et est comblé par une série sédimentaire dont la puissance est de 150 m au maximum. Au niveau géologique, les formations sédimentaires oligocènes du fossé de Saint-Flour, qui reposent sur le socle gneissique, sont constituées d'argiles rouges d'altération (Sannoisien), d'argiles graveleuses bariolées (Stampien), d'argiles claires à concrétions calcaires (Stampien) et d'argiles vertes (Stampien supérieur). Les sédiments mio-pliocènes sont essentiellement des sables. Des intercalations volcaniques miocènes à pliocènes (basaltes, basanite, cendres, lahar) associées au fonctionnement du strato-volcan du Cantal, sont intercalées dans les sédiments tertiaires.

Au niveau hydrogéologique, les sédiments oligocènes du graben de Saint-Flour, ou graben de la Margeride, présentent *a priori* deux caractères défavorables. D'une part des faciès argileux imperméables y prédominent très largement. D'autre part, la tectonique post-oligocène a morcelé le graben en une mosaïque de petits blocs, mettant à jour des affleurements de socle cristallin ou des argiles bariolées. Dans ce contexte, la circulation des eaux profondes est imprévisible (notice de la carte géologique de Saint-Flour). La seule émergence thermo-minérales de la feuille Saint-Flour est

localisée sur le réseau de failles NW-SE dans l'alignement du graben de la Margeride. Cette source (Coren-les-Eaux) est froide, de faible débit (5 l/mn), très minéralisée (7 g/l) et de type chloro-bicarbonaté-sodique.

Au niveau hydrogéologique, il n'est pas fait mention de potentialités hydrogéologiques, mêmes médiocres, dans les sédiments du fossé de Le Malzieu. Dans ce graben orienté NNW-SSE, les sédiments oligocènes, épais de 3 à 10 m, reposent directement sur le socle granite. Ces sédiments détritiques sont essentiellement des grès, des arkoses et des poudingues.

### **6.3.2. Données sur les réservoirs**

Un des réservoirs cibles qui a fait l'objet de recherches géothermiques dans les années 1980, est constitué par les **formations détritiques du Stampien inférieur**, et se localise sur la bordure ouest du bassin de Limagne d'Allier.

#### *Forage de Beaumont 1 (63) - N° BSS 06937X0000/Beaum 1*

Des investigations ont été menées en 1979 sur la ZAC de Masage à Beaumont (63), pour la réalisation d'un doublet destiné à l'exploitation géothermique de la nappe du Stampien inférieur, pour le chauffage des logements (Géoservices Hydrologie, 1979).

Le forage de Beaumont 1, forage de production, dévié de 60° et profond de 1 335 m, a permis une production de 1,5 m<sup>3</sup>/h environ, pour une température au fond de l'ordre de 44 °C. Le débit instantané a été de 26 m<sup>3</sup>/h lors du premier essai, puis le deuxième essai a conduit à estimer la production à 1,5 m<sup>3</sup>/h. La température de fond correspondait à un gradient plutôt faible, de 2,88 °C/100 m. De plus, le réservoir rencontré composé de sables argileux sur une faible épaisseur et d'arkoses très compactes, n'a pas permis d'obtenir un débit suffisant pour que le doublet géothermique soit rentable. En effet, il aurait fallu atteindre un débit minimum de 325 m<sup>3</sup>/h pour que l'opération se poursuive et que le second forage de réinjection soit réalisé.

#### *Forage Les Vergnes, La Croix Neyrat (63) - N° BSS 06933X0145/S*

Des investigations ont été menées en 1981, pour la réalisation d'un doublet géothermique à Clermont-Ferrand (Géotherma, 1981). Il était prévu que ce forage de production de Les Vergnes 1 - La Croix Neyrat, profond de 1 886 m, rencontre une série détritique à dominance arkosique avec quelques intercalations argileuses ou marneuses. Ce forage a finalement traversé une puissante série à dominante argileuse, argiles rouges et vertes, et silts micacés très fins avec interstratification de bancs de grès arkosique d'épaisseur réduite, et de sables fins à matrice argileuse. Même le conglomérat de base à galets de granite, de diamètre estimé de 50 cm à 1 m, a finalement présenté une matrice argileuse complètement fermée. Le socle granitique a été rencontré à 1 880 m, pour les 1 800 à 2 000 m estimés. De plus, la productivité espérée de l'ordre de 100 m<sup>3</sup>/h n'a pas été mesurée :

- un premier essai de pompage a donné un débit de 9 m<sup>3</sup>/h, croissant jusqu'à 30 m<sup>3</sup>/h, puis se stabilisant entre 18 et 22 m<sup>3</sup>/h. La transmissivité est de 1,10 D.m ;
- après un décolmatage du fond par traitement chimique, aucune amélioration n'a été observée, et le débit oscillait entre 21,5 et 23,4 m<sup>3</sup>/h, pour une température en tête de puits de 73 °C. La transmissivité mesurée est de 1,56 D.m. après 12 heures de pompage, ce qui reste faible.

Au cours de ces essais, il a été observé :

- une température en statique de 88 °C au toit du réservoir supérieur, et de 109,5 °C au fond, et en dynamique, de 98 °C dans le réservoir supérieur, et inchangée au fond (la température estimée au fond était 100 °C) ;
- seul le réservoir supérieur (1 535 - 1 565 m) produit. Il est formé de grès arkosiques à granulométrie hétérogène. Au-delà de cette profondeur, il n'est constaté aucun débit supplémentaire au débitmètre.

Compte tenu des résultats qui n'étaient pas satisfaisants, ce forage a été fermé le 2 septembre 1981. Cependant, des essais ont été de nouveau réalisés sur ce forage, en mars 1984, par la ville de Clermont-Ferrand, et en décembre 1984 par la société Géotherma. Après 27 heures de pompage, les résultats suivants ont été obtenus :

- température maximale dans le puits de 115,6 °C ;
- température au toit du réservoir supérieur de 99 °C ;
- débit d'essai oscillant entre 20 et 16 m<sup>3</sup>/h ;
- transmissivité de 0,6 D.m.

En conclusion, le débit d'essai relativement faible, et le rabattement important et non encore stabilisé après 27 heures de pompage, ne permettaient pas d'envisager une exploitation du forage pour une exploitation industrielle.

Pendant les essais de pompage sur le forage en 1981, un programme de surveillance des sources thermo-minérales de Royat-Chamalières avait été mis en place afin de détecter une interaction éventuelle (Mercier-Batard, 1985). Un enregistrement en continu de la source Eugénie à Royat avait eu lieu au cours de la mise en production du forage, mais il n'a pas mis en évidence de relation directe entre ces deux ouvrages.

#### *Forage de Cébazat (63)*

Compte tenu des résultats géologiques et géothermiques obtenus sur le forage de Les Vergnes, Géotherma a proposé de financer la surveillance du forage pétrolier de Cébazat, réalisé par Eurafrep (Géotherma, 1982). Situé à moins de 3 km au nord-ouest du forage de Les Vergnes, et profond de 1 580 m, ce forage était intéressant car il devait permettre la comparaison des séries sédimentaires du Stampien détritiques rencontrées. Aussi, deux carottes et un essai de débit ont été réalisés sur ce forage. La température atteinte à 1 580 m était de 94 °C. Il apparaît environ 125 m cumulés de réservoirs potentiels, entre 1 130 et 1 530 m de profondeur, variant de 4,50 à 26 m d'épaisseur, et avec des qualités irrégulières. Des mesures de perméabilité - porosité effectuées sur carottes ont confirmé que certains de ces niveaux étaient intéressants :

- porosités variant de 13 à 26 %, pour une moyenne de 18 %,
- perméabilités variant de 3 à 25 mD, avec quelques niveaux particulièrement perméables.

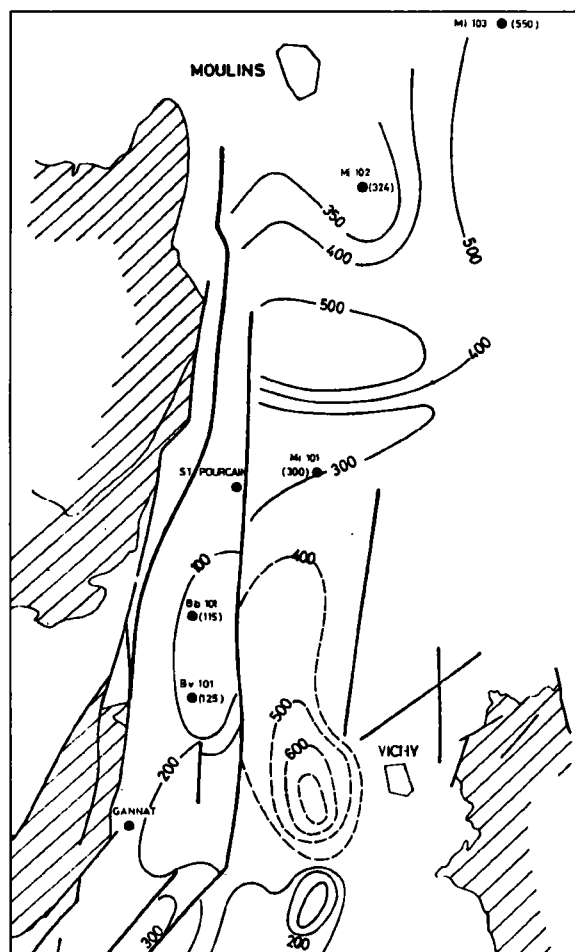
En conclusion, il s'avérait que la série avait une plus grande épaisseur de niveaux franchement détritiques (125 m à Cébazat, contre 44 m à Les Vergnes), avec des porosités plus importantes. Les essais de débit étaient trop courts pour véritablement concerner un rayon d'action suffisant pour caractériser la formation. Cependant, ils ont permis de préciser que les perméabilités restaient encore médiocres. En revanche, les

gammes de températures atteintes, sont les mêmes dans les deux puits à 1 550 m de profondeur.

*Inventaire des ressources géothermiques dans le département de l'Allier (03)*

En 1980, la société nationale pour l'application de la géothermie GéoChaleur avait confié au BRGM un inventaire des ressources géothermiques dans le département de l'Allier. L'étude des ressources a concerné les formations poreuses du Stampien inférieur détritique de la Limagne Bourbonnaise (Gable *et al.*, 1980). La carte des épaisseurs du détritique a été établie à partir de l'analyse de logs géologiques pétroliers (fig. 41, tabl. 3). L'analyse des diagraphies électriques (PS, résistivité) et nucléaires (Gamma Ray, neutron) a permis de situer au sein des formations stampiennes, des niveaux réservoirs sableux ou calcaires :

- quatre niveaux réservoirs plus ou moins continus avaient été différenciés entre les forages Moulines 101, 102, et 103. Un niveau réservoir continu existe à la base du Stampien inférieur détritique ;
- deux niveaux seulement sont distingués entre les forages de Barberier 101 et Brout-Vernet 101.



**Fig. 41 - Épaisseur du Stampien inférieur détritique en Limagne bourbonnaise. Les isopaques sont exprimées en mètre (Gable *et al.*, 1980).**

Forage	N° BSS	Profondeur (m)	Température (°C)	Gradient géothermique (°C/100m)
Moulins 101	06216X0001/S	673,9	50	5,9
Moulins 102	05986X0001/S	647,4	43	5,1
Moulins 103	05984X0001/S	886	60	5,6
Barberier 101	06461X0001/S	367,5	32	6,0
Brout-Vernet 101	06461X0002/S	392,4	38	7,0
Aigueperse 101	06694X0002/Ap-101	965,1	60	5,2

**Tabl. 3 - Données thermiques sur quelques forages de la Limagne bourbonnaise.**

Des mesures de perméabilités et porosités sur carottes ont été effectuées sur des échantillons des puits de Moulins 101 et 102 (tabl. 4). Les valeurs de perméabilités restent faibles et la porosité atteint des valeurs importantes de 25 %.

Réservoir	Moulins 102			Moulins 101		
	Profondeur (m)	Porosité (%)	Perméabilité (mD)	Profondeur (m)	Porosité (%)	Perméabilité (mD)
1	Pas de mesures			Pas de mesures		
2	415,5	8,5	0,09	Pas de mesures		
	418	14,5	0,12			
3	497	22,0	0,5	493	26	
	498	25,0	0,6	494	23	
4	Pas de mesures			Pas de mesures		

**Tabl. 4 - Résultats des mesures pétrophysiques sur carottes de forages pétroliers.**

Des essais ont également été effectués dans les forages de Moulins 101, 102 et 103 pour déterminer les venues d'eau :

- pour le réservoir n° 1, les tests menés sur un peu plus d'une heure montrent des arrivées d'eau de débit de l'ordre de 1,65 m<sup>3</sup>/h pour Moulins 101 entre 392,5 et 406,7 m, et 1,65 m<sup>3</sup>/h pour Moulins 102 entre 308,2 et 322,0 m ;
- pour le réservoir n° 2, le test sur Moulins 102, entre 407,2 et 421,0 m, a montré un débit de l'ordre de 5,4 m<sup>3</sup>/h ;
- le réservoir n° 3 n'a pas été testé, et le test sur le réservoir n° 4 a été défectueux.

Quatre niveaux aquifères ont donc été recensés entre Moulins et Vichy, avec la profondeur maximale du dernier niveau inférieure à 1 000 m, et une température ne dépassant pas 57 °C. Les perméabilités mesurées sur carottes sont médiocres et les résultats des cours essais *in situ* effectués montrent des débits relativement faibles. Il faut néanmoins relativiser ces résultats d'essais sur carottes qui ne caractérisent que très localement les formations. Les résultats synthétiques de cette étude sont donnés dans les tableaux 5 et 6.

Niveau réservoir	Profondeur (m)	Épaisseur (m)	Lithologie	T (°C)	Porosité (%)	Perméabilité (mD)
1	300-500	30-100	Sables plus ou moins marneux	25-38	18-27	-
2	450	10-30	Sables arkosiques plus ou moins marneux	32	8,5-14,5	0,1-0,2
3	500-750	30-100	Calcaires plus ou moins crayeux	35-48	22-25	0,5-0,6
4	590-940	40-100	Sables et graviers, niveaux argileux	40-57	15-24	-

**Tabl. 5 - Synthèse des résultats sur les réservoirs entre Moulins et Vichy.**

Niveau réservoir	Profondeur (m)	Épaisseur (m)	Lithologie	T (°C)	Porosité (%)	Perméabilité (mD)
Sup.	220-280	20	Sables plus ou moins argileux	21-24	18-23	-
Inf.	250-310	20-30	Calcaires plus ou moins gréseux	23-26	19-25	-

**Tabl. 6 - Synthèse des résultats sur les réservoirs dans la zone des forages de Barberier 101 et Brout Vernet 101.**

#### Formations cristallines

Des études plus locales ont été menées dans ce bassin de l'Allier, et notamment, celle concernant l'évaluation du potentiel en eau géothermale sur la commune de Villebret. Cette commune est contiguë à celle de Nérès-les-Bains, et l'analogie de morphologie et de géologie avait conduit à une étude de potentialité, avec approches géologique et structurale, et géochimique (Jeambrun *et al.*, 1986). La commune de Villebret se situe essentiellement sur des terrains métamorphiques disposés en coin entre les massifs granitiques de Nérès au nord-est, et de Saint-Genest à l'ouest. L'extrémité méridionale du bassin d'effondrement tertiaire du val du Cher atteint la commune dans sa partie nord. Ces dépôts sidérolithiques sont sablo-argileux verdâtres à jaunâtres fréquemment panachés de rouge, très mal classés, des quartz mal roulés en formant les éléments grossiers.

L'étude structurale a fait apparaître plusieurs familles de failles majeures et de linéaments. L'inventaire des points d'eau n'avait révélé que la source de Chante-Alouette, réputée pour ne jamais geler. Elle était utilisée autrefois comme lavoir, même en hiver.

Dans la région de Villebret-Nérès-Montluçon, les potentialités seraient à rechercher dans le socle. Les fractures ouvertes des granites de direction nord-sud, et nord-ouest - sud-est, sont les plus favorables car elles ont joué en distension, et sont à l'origine de la formation du bassin d'effondrement de la Limagne du Cher. L'étude met en évidence plusieurs zones où il faut mener des investigations, situées au nord-est de la commune, zones où l'hydrogéochimie a permis d'établir une relation entre les eaux de la commune et celles du système hydrothermal de Nérès-les-Bains.

Les fractures du socle sont également à l'origine des sources thermales de Bourbon l'Archambault, dans le département de l'Allier. En 1985, le BRGM a suivi les travaux de reconnaissance et de mise en exploitation de quatre forages (Berthier *et al.*, 1985). Il s'agissait d'établir un bilan pour le système hydrothermal. Le granite de Bourbon est affecté de plusieurs types de fractures, dont certaines en distension provoquent des fractures ouvertes telle que celle observable au fond du puits de la source des Trois Puits, avec une épaisseur de 20 à 25 cm, une extension latérale visible de 40 à 50 cm, et un allongement minimum de 5 m. Ce réseau de fissures fait du granite de Bourbon un milieu fissuré et perméable, et productif en eaux thermales. Le forage F4 était implanté à proximité de la source des trois Puits pour la recapter. La mise en production de ce forage a provoqué l'assèchement du puits thermal après une dizaine d'heures de pompage à 60 m<sup>3</sup>/h sur F4. Le forage F1 pouvait produire de 30 à 50 m<sup>3</sup>/h d'eau thermo-minérale, mais en provoquant un rabattement sur la source des Trois Puits.

#### **6.4. CONCLUSIONS SUR LES DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES**

L'analyse bibliographique a montré qu'il existe assez peu de documents précis sur les réservoirs potentiels des Limagnes.

Les études et ouvrages concernent en majorité le réservoir sédimentaire du Stampien détritique. Sa variabilité tant horizontale que verticale, de faciès, d'épaisseurs, induit une réelle difficulté pour extrapoler des résultats. Les zones les plus favorables *a priori* sont situées en bordures du bassin, dans les zones arkosiques proches du contact avec les failles du socle.

Les fractures en distension des formations du socle constituent elles aussi, à la fois des réservoirs potentiels, et des vecteurs de remontées d'eaux chaudes. De nombreuses sources thermo-minérales sont ainsi positionnées au pied de la faille bordière occidentale de la Limagne d'Allier.

#### **6.5. LES SOURCES THERMO-MINÉRALES**

La synthèse sur les caractéristiques de sept sources thermo-minérales exploitées dans la région Limagnes-Massif central a permis de proposer un schéma hydrogéologique peu contraint mais dans lequel les circulations mettent en jeu le socle et leur bassin sus-jacent. Il s'agit des sources ou des groupes de sources de Vichy, Chaudes-Aigues, Châtelguyon, Royat-Chamalières, Chateauneuf-les-Bains, Bourbon-l'Archambault et Nérès-les-Bains (ann. 1, tabl. 7). Ces sources sont généralement localisées sur des zones de faiblesse (failles, zones fracturées) d'importance locale à régionale. Les eaux météoriques s'infiltrent sur les reliefs bordant les bassins ou sur les zones de socle fracturé qui représentent des aires de recharge. Ces eaux circulent dans les zones profondes des bassins au travers de formations poreuses et/ou fracturées ou dans les socles profonds via les failles ou les cheminées volcaniques jusqu'à 4 à 5 km de profondeur où elles y acquièrent leur température. Ensuite, ces eaux chaudes remontent à la faveur de failles régionales pour émerger aux interfaces couverture-socle.

*Inventaire du potentiel géothermique des Limagnes : compilation des données*

Site	Sour ce	Géologie	Failles	Gaz	T°C max	Débit m <sup>3</sup> /h	Type Eaux	Traces	Schéma hydrogéologique
Vichy	200	Bordure graben tertiaire de Limagne d'Allier	Failles N-S, NE-SW	CO <sub>2</sub>	73	1 à 15	Bicarbonaté sodique	F, Li, Fe, As, B, Pb, Al	Incertain. Dans la partie SW du bassin, les eaux remonteraient du socle avec du CO <sub>2</sub> par failles puis circulations latérales dans le détritique du fossé et émergence sur bordure orientale. Circulation Ouest-Est
Chaudes-Aigues	25	Socle métamorphique, granite, micaschistes	Failles NW-SE, N-S, filons quartz	CO <sub>2</sub>	79,9	60	Bicarbonaté sodique	As, B	Incertain. Infiltration d'eaux superficielles des plateaux volcaniques jusqu'à 5000 m grâce aux cheminées volcaniques et remontée par fractures. Durée du trajet en siècles.
Châtelguyon	9	Bordure graben tertiaire de Limagne d'Allier, granite fracturé	Failles	CO <sub>2</sub>	35,5	50 à 60	Carbonaté chloruré sodique calcique et magnésien	Fe, B, F, As, Sr	Incertain. Eaux s'infiltrent sur granites fracturés jusqu'à 5 km. Remontée par failles avec dépôts de calcite, aragonite, travertins, hydroxydes fer, silice
Royat-Chamalières	5	Bordure graben tertiaire de Limagne d'Allier	Failles	CO <sub>2</sub>	32,5	2 à 80	Bicarbonaté sodique	Sr, Ba, AS, F, Fe, Li, B	Eaux remontent par failles et circulent dans les arkoses de la base du Tertiaire
Chateauf-neuf-les-bains	18	Contact granite/tuf	Failles N-S et NE-SW	CO <sub>2</sub>	44,1	2.6 à 4.1	Bicarbonaté sodique	F, Li, As, B, Ba, Sr, Mn, Fe	Sources dans granite localisées sur accident N-S et NE-SW.
Bourbon l'Archambault	2	Interface granite/grès permien	Failles N-S, E-W, filons quartz, sulfure	CO <sub>2</sub> - NO <sub>2</sub>	53	40	Bicarbonaté chloruré sodique	F, Li, Fe, B, Pb, Zn, Sr, Mn	Source à l'intersection de structures NE-SW
Néris-les-Bains	3	Granite	Failles NNE-SSW, N-S, NW-SE	CO <sub>2</sub> - NO <sub>2</sub>	53	4 à 48	Chloruré et bicarbonaté sodique	Li, Fe, Mn, Sr, F	Infiltration d'eaux météoriques dans granite fracturé jusqu'à 4,5 km. Remontée par zones fracturées.

**Tabl. 7 - Caractéristiques des sources thermo-minérales.**



## 7. La géochimie

### 7.1. INTRODUCTION

Les analyses géochimiques (éléments majeurs, traces, isotopes) ont pour but de cibler la source des fluides, l'identification des roches réservoirs, la température maximale atteinte dans les réservoirs profonds et les temps de résidence. Dans le domaine des eaux souterraines au sens large (froide, chaude, minérale...), l'utilisation d'outils géochimiques permet de différencier une eau de son environnement hydrogéologique.

Dans le cadre du projet COPGEN, une synthèse bibliographique sur les caractéristiques des eaux thermales du Massif central en général, et sur les Limagnes en particulier, a été réalisée et a fait l'objet d'un rapport détaillé par Serra *et al.* (2003).

À partir de la composition chimique des fluides inventoriés, une estimation des températures profondes de ces eaux est proposée à l'aide des géothermomètres chimiques. Cette revue a donc pour principal objectif de rassembler les nombreuses données géochimiques disponibles dans la littérature sur les sources thermales et de proposer des éléments de réflexion sur les sites les plus favorables sur des arguments hydrogéochimiques.

Le domaine géographique étudié couvre les départements de l'Allier, de la Loire, de la Haute-Loire, du Puy-de-Dôme, du Cantal, du Rhône et de l'Ardèche (fig. 42). Les données chimiques et isotopiques existantes dans la région des Limagnes ont été répertoriées au sein de 14 bases de données, réparties géographiquement : Chaudes-Aigues, Margeride, Mont-Dore, Sainte-Marguerite, Cézallier, Vals-les-bains, Vichy, Châtelguyon, Royat, Faille Aigueperse, Bourbon-Lancy, Chateauneuf-les-Bains, Bourbon-l'Archambault et Nérès-les-Bains (fig. 43). Au total, 961 analyses ont été recensées sur la zone d'étude, celles-ci correspondent à 285 points d'eau répertoriés. Les principaux paramètres physico-chimiques (majeurs, traces, isotopes) sont listés dans le tableau 8.

### 7.2. LES DONNÉES GÉOCHIMIQUES DES LIMAGNES

Les 591 analyses d'éléments majeurs qui ont une balance ionique comprise entre - 5 et + 5 %, ont été reportées dans le diagramme de Piper, ce qui permet de mettre en évidence les différents types d'eau en présence ainsi que leur variabilité au sein des entités géographiques (fig. 44). Les autres données ont une balance ionique en dehors de l'intervalle - 5 et + 5 % soit à cause d'une analyse chimique erronée, soit par absence d'une analyse chimique. La plupart des sources présente un faciès bicarbonaté sodique (Vichy, Cézallier, Vals-les-Bains, Chaudes-Aigues, Royat, Margeride, Chateauneuf-les-Bains, Sainte-Marguerite). Le second faciès le plus représenté correspond au type chloruré calcique, avec en particulier la très grande majorité des échantillons de Châtelguyon situé sur la bordure ouest de la Limagne d'Allier. Deux échantillons de la base de Chateauneuf-les-Bains présentent exactement les mêmes caractéristiques. Le faciès sulfaté calcique n'est représenté que par deux échantillons de la base de Vichy. Le faciès chloruré sodique est représenté par les eaux des régions de Bourbon-l'Archambault, Bourbon-Lancy, et une partie des eaux de la région du Mont-Dore. Les eaux de Nérès-les-Bains se situent à la limite des faciès sulfaté sodique et bicarbonaté sodique.

Carte des sources en Limagne

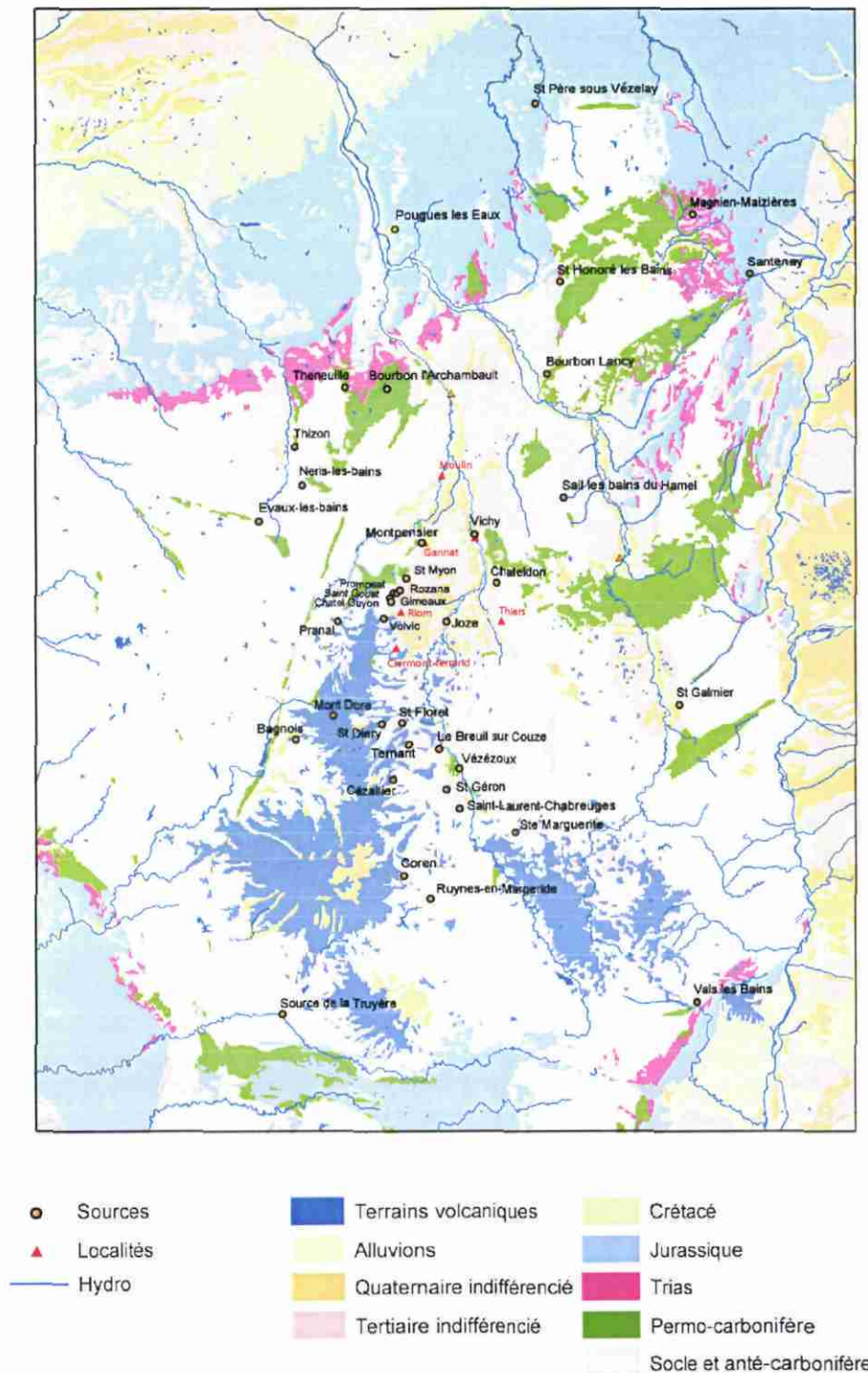


Fig. 42 - Carte de localisation des principales sources de la zone d'étude reportée sur un fond géologique simplifié.

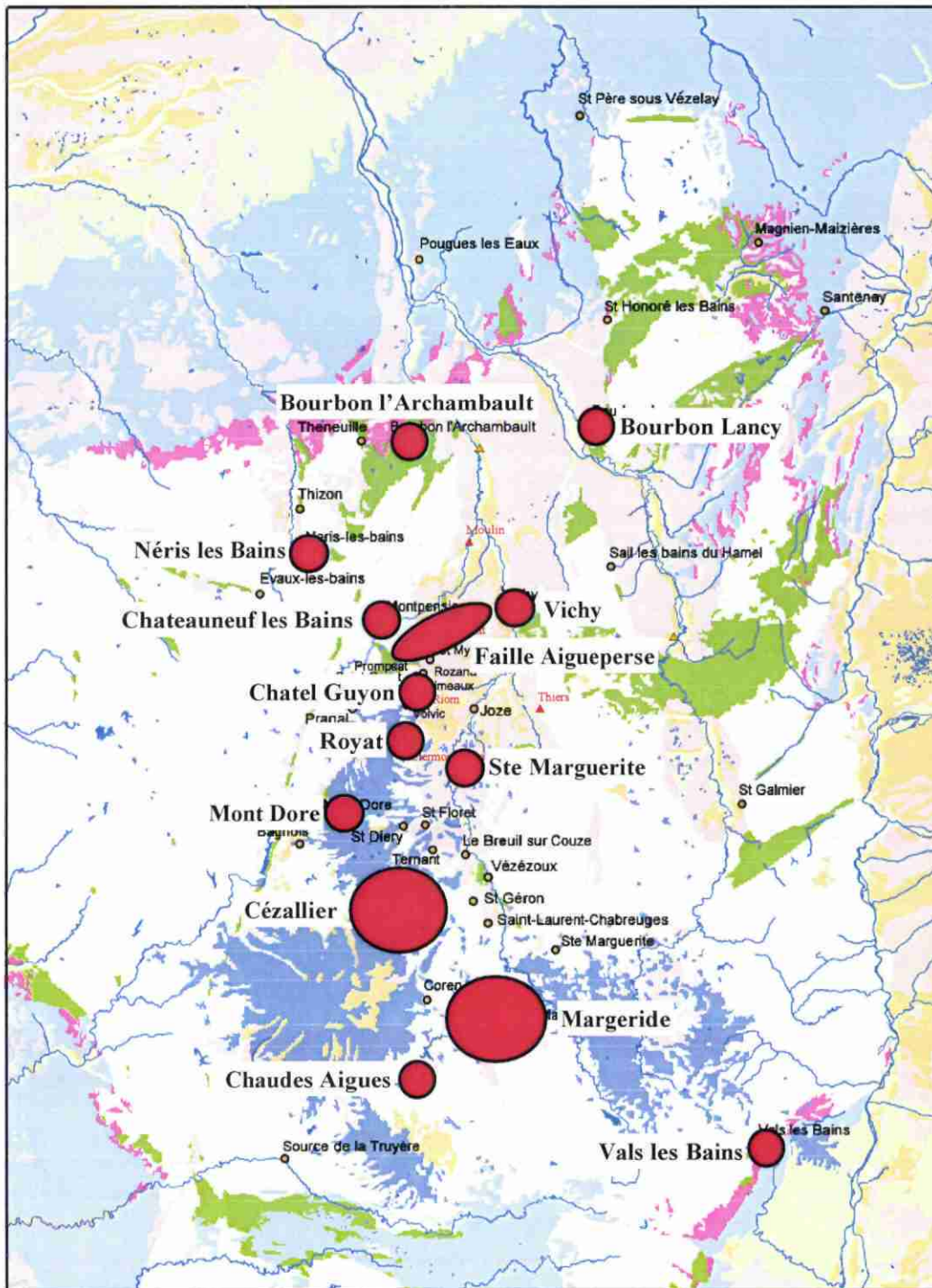
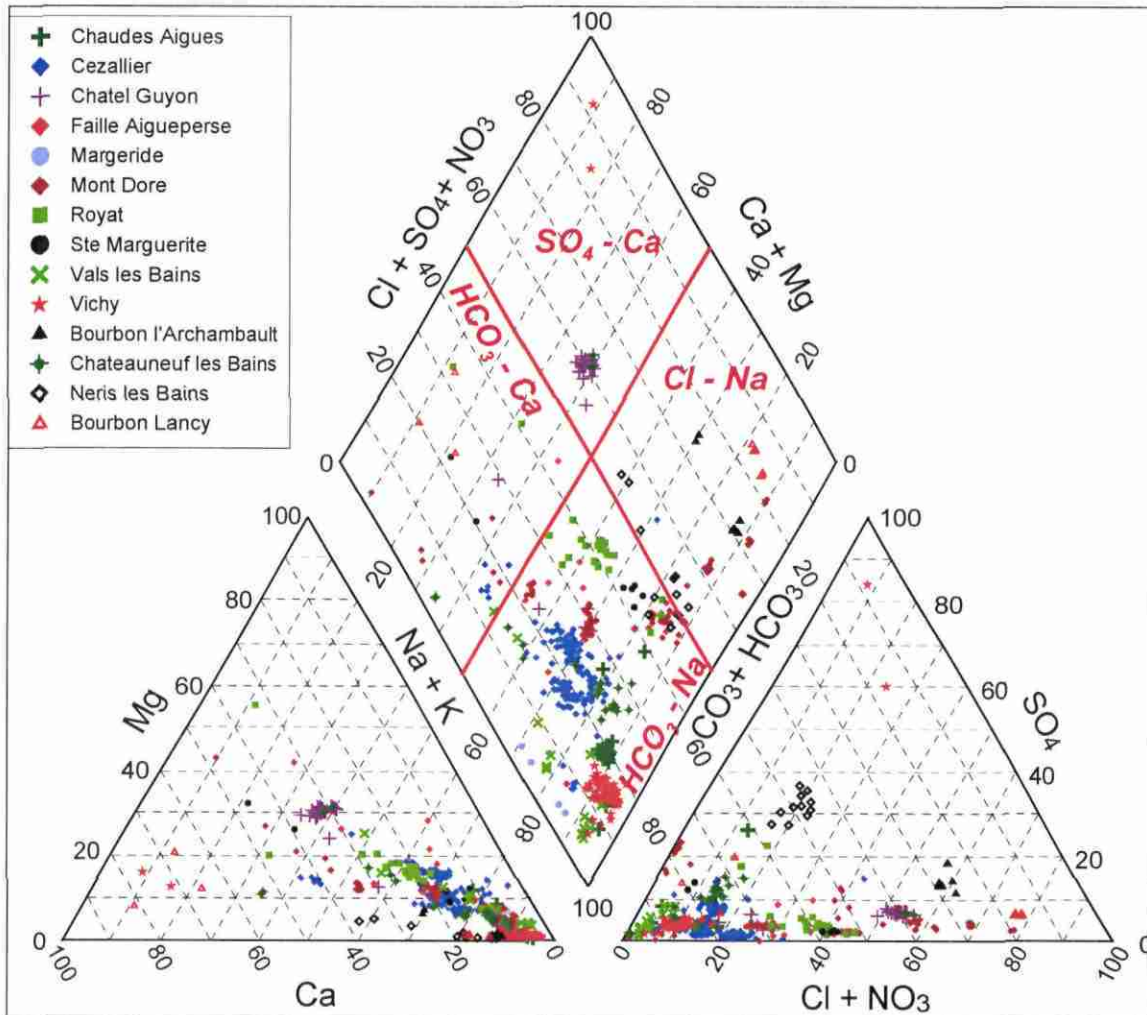


Fig. 43 - Carte de localisation simplifiée des sources regroupées dans 14 bases de données.

Type de renseignement	Détail des paramètres		
Géographie	Localisation sur les feuilles IGN 1/25 000 et 1/50 000 Altitude		
Paramètres physico-chimiques	Température Conductivité pH Potentiel Redox (Eh) Oxygène dissous		
Éléments majeurs	Ca Na K Mg	SiO <sub>2</sub>	Cl SO <sub>4</sub> HCO <sub>3</sub> NO <sub>3</sub>
Éléments traces	Li Sr F B PO <sub>4</sub> Br I Al As Fe Mn Rb Cs Ba	Ti V Cr Co Ni Cu Zn Ga Ge Se Zr Nb Mo Cd Sn Sb Te Hf Ta Hg Pb U Th	La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu
Analyses isotopiques	$\delta^{18}\text{O}$ (H <sub>2</sub> O) $\delta^2\text{H}$ (H <sub>2</sub> O) $\delta^{18}\text{O}$ (SO <sub>4</sub> ) $\delta^{11}\text{B}$ $\delta^{13}\text{C}$	<sup>3</sup> H	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr <sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd

**Tabl. 8 - Liste des paramètres géochimiques retenus au sein des bases de données.**

La teneur en ions (TDS, *Total Dissolved Solids*) traduit la minéralisation totale d'une eau, c'est-à-dire sa teneur en sels dissous. Elle se calcule en faisant la somme de tous les ions présents en solution. Dans cette étude, toutes les analyses ne sont pas exhaustives. Il faut donc utiliser les paramètres communs à toutes les analyses pour pouvoir comparer les données entre elles. Seules, les analyses de majeurs sont toujours présentes : Ca, Na, K, Mg, Cl, SO<sub>4</sub> et HCO<sub>3</sub>. Ainsi, le lithium qui peut constituer un composant important de la minéralisation n'a pas été pris en compte car l'analyse n'est pas systématiquement disponible.



**Fig. 44 - Diagramme de Piper des 591 données dont la balance ionique est comprise entre - 5 et + 5 %.**

Les plus fortes minéralisations sont observées à *Vals-les-bains* avec deux eaux entre 9 et 9,5 g/l. Les eaux de *Vichy*, *Sainte-Marguerite* et *Châtelguyon* ont des minéralisations comprises entre 6 et 8 g/l. Le TDS des sources par zone géographique est représentée sous forme d'histogramme. Certaines régions présentent des histogrammes de distribution de TDS très homogènes (fig. 45) Il s'agit des eaux de *Bourbon-Lancy*, *Bourbon-l'Archambault*, *Chaudes-Aigues*, *Sainte-Marguerite*, *Vichy*, *Châtelguyon* et *Néris-les-Bains*.

La grande hétérogénéité observée dans les familles chimiques tant pour les éléments majeurs que les éléments en traces peut être mise en relation avec les données géologiques locales des émergences, et la nature probable des réservoirs en profondeur.

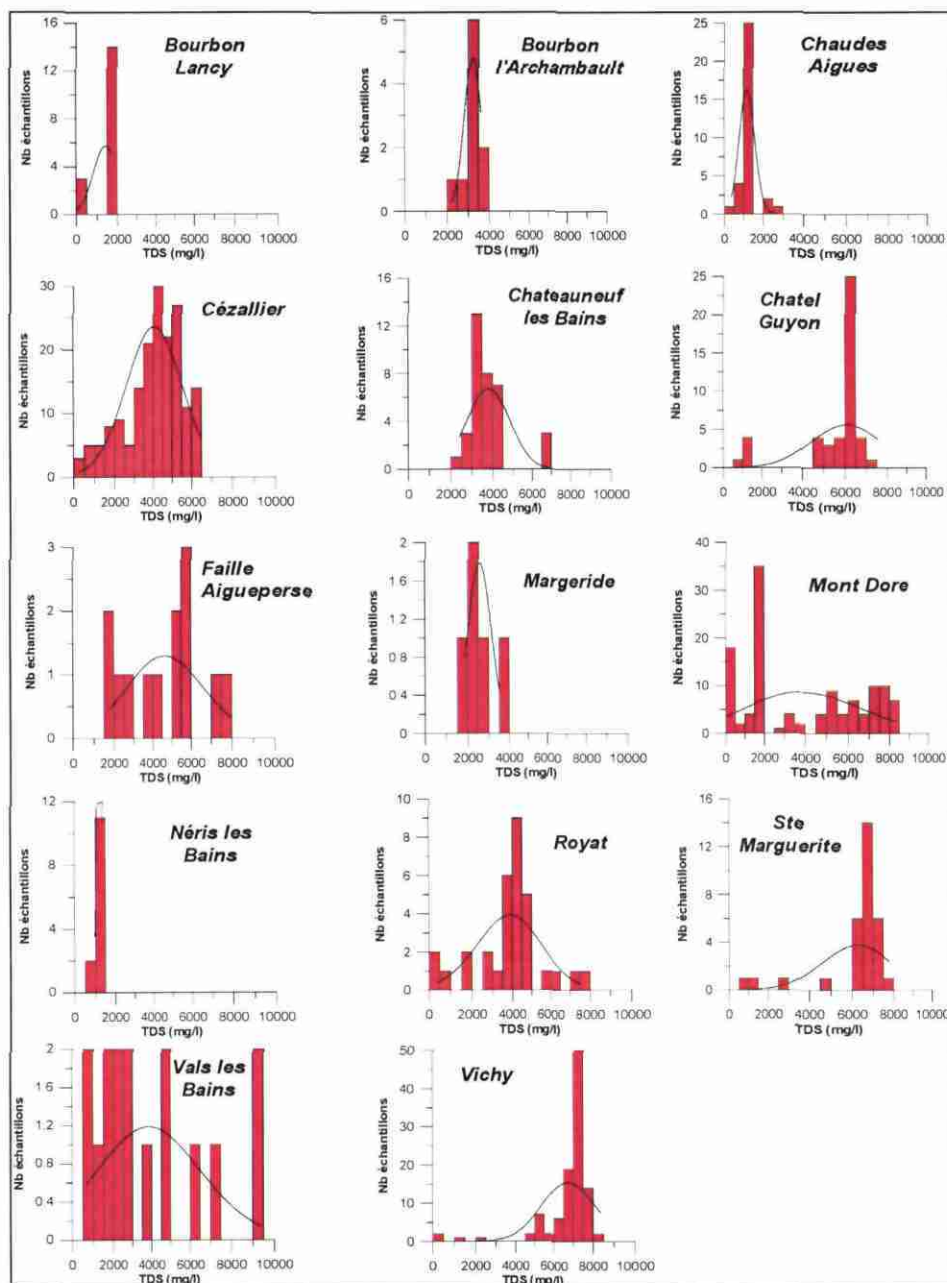


Fig. 45 - Histogrammes de distribution des minéralisations des eaux regroupées au sein des 14 bases de données. La carte superposée aux histogrammes montre la valeur modale de la salinité.

### 7.3. LES DONNÉES DES GÉOTHERMOMÈTRES

Différents géothermomètres ont été utilisés pour recalculer les températures des fluides (Serra *et al.*, 2003). Les figures 46 et 47 mettent évidence des systèmes profonds de températures différentes selon le mode de calcul de ces températures.

Au niveau de la **Faïlle d'Aigueperse**, le gaz carbonique de ces eaux carbogazeuses provient partiellement du dégazage de la croûte (Baubron *et al.*, 1979). Ces eaux ont acquis une signature d'eaux bicarbonatées chlorurées sodiques (Fouillac et Michard, 1979 ; Baubron *et al.*, 1979 ; Fouillac, 1983 ; Criaud et Fouillac, 1986 ; Négrel *et al.*, 1997), relativement concentrées en magnésium. Les géothermomètres Na/K (Michard, 1979), Na-K-Ca (Fournier et Truesdell, 1973), Na/Li (Michard, 1979), et Sr/K<sup>2</sup> (Michard, 1990), donnent des températures concordantes comprises entre 170 et 200 °C pour les eaux de la Faïlle Aigueperse qui s'accordent avec l'estimation faite par Fouillac et Michard (1979) qui les prévoyait entre 180 et 220 °C (fig. 46). Il y a, tout de même, une exception pour les eaux de Joze dont la température estimée est de l'ordre de 300 °C. Les géothermomètres Mg/K<sup>2</sup> et Mg/Li<sup>2</sup> prévoient des températures plus faibles variant de 70 à 130 °C (fig. 47). La répartition de ces températures montre que la plaine de la Limagne d'Allier au niveau de Riom présente les températures les plus élevées (Baubron *et al.*, 1979). Michard (1979) pense que la Limagne d'Allier occidentale constitue, de Beauregard à Augnat, un immense champ de potentialités intéressantes.

Les températures calculées pour **Saint-Galmier**, seule source référencée dans la Limagne de Loire, sont trop disparates (29 - 183 °C) pour qu'on puisse discuter de leur valeur. Il faudrait disposer de plus de références dans cette zone géographique.

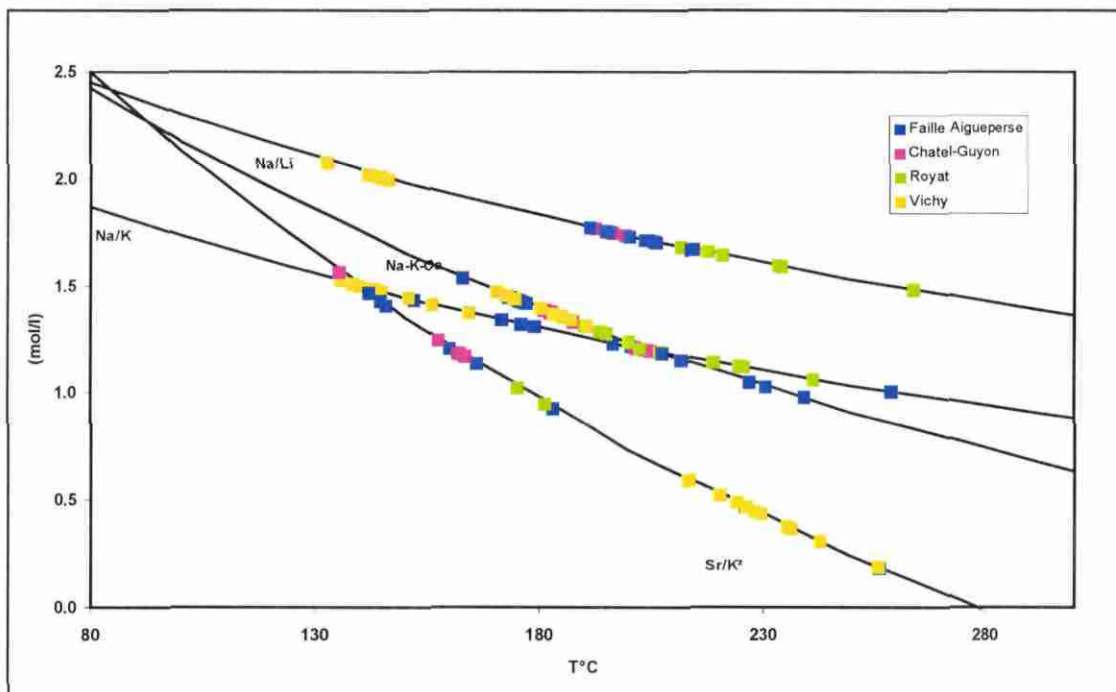


Fig. 46 - Températures des eaux thermales de la Limagne ouest calculées avec les géothermomètres Na/K, Na/Li, Na-K-Ca et Sr/K<sup>2</sup> (source Fontaine salée supprimée).

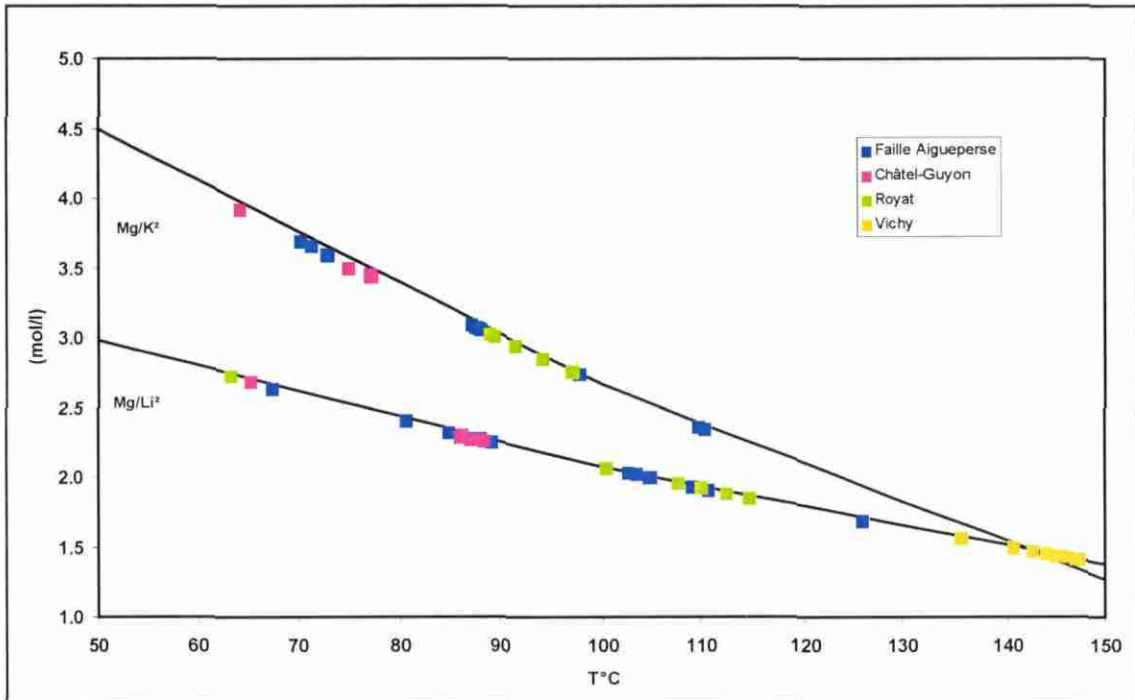


Fig. 47 - Températures des eaux thermales de la Limagne ouest calculées avec les géothermomètres Mg/K et Mg/Li.

Les eaux de **Châtelguyon** ont un comportement qui traduit l'empreinte de la couverture sédimentaire, caractérisée par le jeu des éléments Ca, Mg, SO<sub>4</sub> et à un degré moindre Cl et Sr (Baubron *et al.*, 1979). Ces sources chlorurées calciques sont très fortement concentrées en Mg, signe d'un mélange important avec des eaux d'origine superficielle ou d'une dissolution de phases minérales magnésiennes. Ces eaux sont de plus très pauvres en lithium, ce qui confirmerait le mélange avec des eaux superficielles. Leur température à l'émergence varie de 18 à 37 °C (Pomerol et Ricour, 1992). Les géothermomètres Na/K (Michard, 1979), Na-K-Ca (Fournier et Truesdell, 1973) et Na/Li (Michard, 1979) donnent des températures concordantes comprises entre 180 et 200 °C pour Châtelguyon (fig. 46). L'équilibrage en profondeur de l'eau avec un minéral calcique carbonaté ou sulfaté, ou lors de son trajet vers la surface, va rendre l'utilisation du géothermomètre Na-K-Ca impossible pour les eaux de Châtelguyon (Baubron *et al.*, 1979). La forte corrélation observée pour les eaux de Châtelguyon entre Ca et Mg conduit à penser que la dissolution de la dolomite pourrait être un des facteurs prépondérants réglant les concentrations en Ca et Mg. Il est donc dangereux de tenir compte de la température Na-K-Ca dans ces conditions. Cette remarque tient également pour les géothermomètres faisant intervenir le magnésium dont les températures estimées varient de 65 à 90 °C (fig. 47). En conclusion, la température estimée par les thermomètres Na/K et Na/Li est d'environ 200 °C pour les eaux de Châtelguyon.

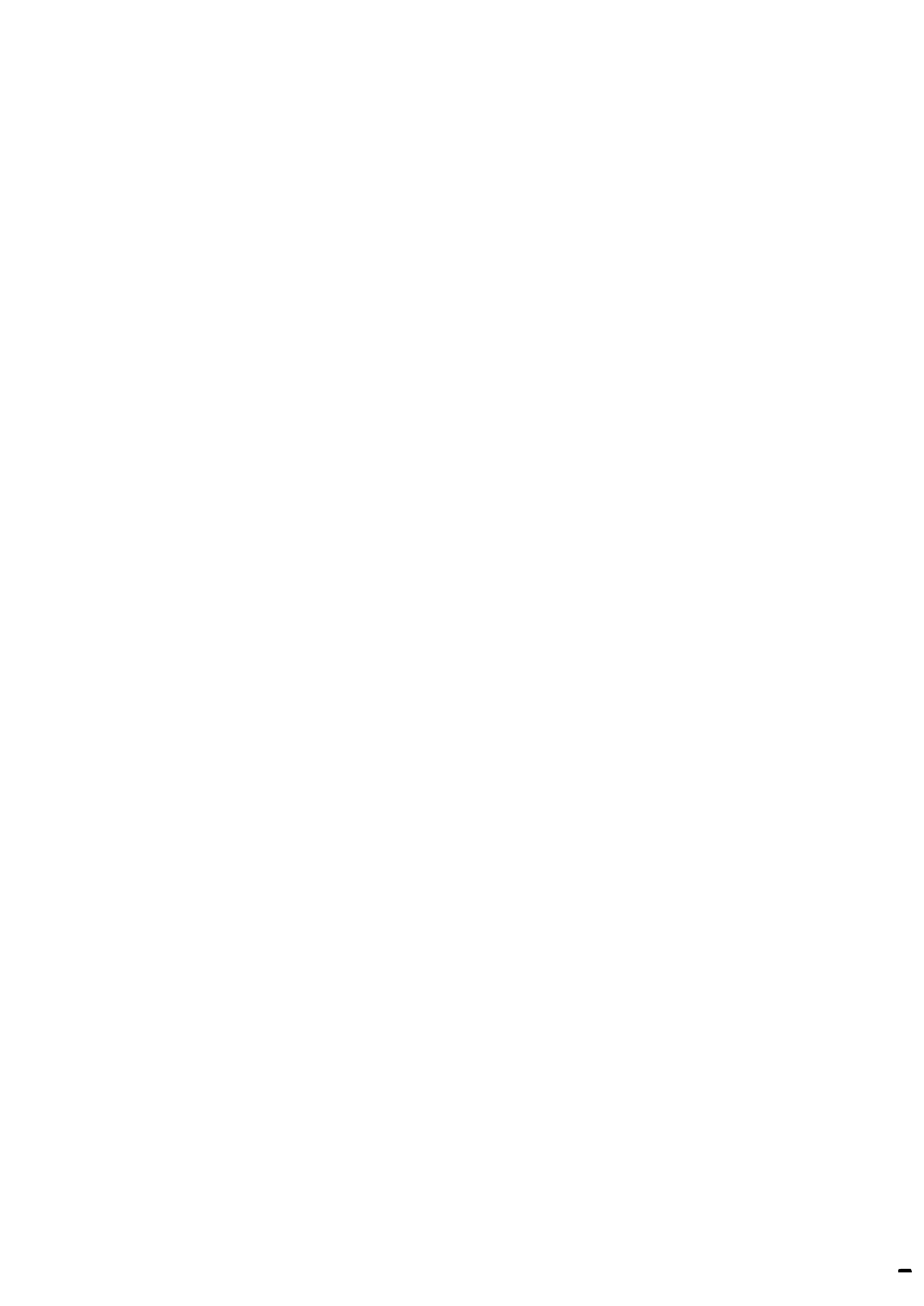
Les eaux de **Vichy-Saint-Yorre** sont carbogazeuses, bicarbonatées sodiques. À Vichy, les températures d'émergence s'échelonnent entre 16 et 66 °C (Pomerol et Ricour, 1992). Lors de leur remontée vers la surface, les eaux profondes sont considérablement altérées car elles traversent des roches sédimentaires (Michard *et al.*, 1976). Les analyses

chimiques étant très nombreuses, notre étude s'est focalisée sur les sources de Vichy : Chomel, Lucas, Grande Grille, Larbaud, Célestins, Dôme, Lys et les sources de Saint-Yorre : Agréable III, Louis Armand et Jade (Michard *et al.*, 1976). Celles-ci sont des eaux sodiques carbonatées, relativement pauvres en magnésium et qui par conséquent n'auraient pas subi de mélange important avec des eaux de surface. La température calculée avec le géothermomètre à quartz, défini par Fournier (1977), donne une température moyenne de 100 °C.

Les géothermomètres Na/K (Michard, 1979), Na-K-Ca (Fournier et Truesdell, 1973) et Na/Li (Michard, 1979) estiment des températures comprises entre 150 et 190 °C. Les températures estimées à l'aide du géothermomètre Mg/Li<sup>2</sup> sont de l'ordre de 140 °C (fig. 46).

Fouillac et Michard (1981) ont compilé des analyses chimiques faites par Michard *et al.* (1976) et ils ont recalculé la température des eaux à la lumière du géothermomètre Na/Li. Précédemment, ils avaient estimé alors la température moyenne à 145 °C. En appliquant le géothermomètre Na/Li développé par Michard (1990), les températures de ces mêmes sources sont augmentées de 10 °C et rejoignent l'ordre de grandeur estimé pour ces sources compris entre 155 et 180 °C. Les températures obtenues par Michard (1979) sont concordantes entre elles : 135 °C pour le géothermomètre à calcédoine et le Na/K, et 145 °C pour le Na/Li. Le thermomètre Na/Li, très peu sensible aux interactions eau-roche lors de la remontée du fluide doit être ici particulièrement utile. En effet, ces interactions sont particulièrement importantes dans ces eaux très riches en CO<sub>2</sub>.

L'ensemble des compositions chimiques observées dans les eaux jaillissant à la bordure ouest de la Limagne d'Allier est compatible avec une température profonde voisine de 200 °C (Fouillac et Michard, 1979). Au cours de la remontée, différentes réactions entre l'eau riche en CO<sub>2</sub> et la roche encaissante libèreraient Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> et parfois K<sup>+</sup> et déposeraient de la silice. Cette région serait entourée d'une zone à température moindre de l'ordre de 135 à 150 °C : Vichy (Michard *et al.*, 1976) au nord-est, Châteauneuf au nord-ouest, La Bourboule (Michard *et al.*, 1978) à l'ouest et Saint-Géron Vezézoux au sud-sud-est.



## **8. Le système d'information géographique**

L'ensemble des données présentées dans ce rapport a été implémenté dans un système d'information géographique (SIG) à l'aide du logiciel Arcview 8 (Lieutenant, 2003). Une procédure a été mise en œuvre de manière à mettre dans le même référentiel géographique le maximum d'informations géoscientifiques. De ce fait, les données thermiques (température, isotherme), les données de forage, la géologie de surface, les réseaux de failles connues, la position des sources, la position des profils sismiques, etc, ..., ont été rassemblés dans le même environnement logiciel de manière à pouvoir faire des combinaisons.

À partir de la base de données forage de Limagne d'Allier et de son interprétation en termes de réservoirs, les épaisseurs de niveaux réservoirs ont été cumulées pour chaque forage ayant atteint le socle, c'est-à-dire ceux qui traversent toute la pile sédimentaire.

Pour les 98 forages concernés, l'épaisseur des niveaux détritiques francs ou mixtes (fig. 48) a été cumulée et répartie en quatre classes d'épaisseur (0-50 m, 50-150 m, 150-250 m, > 250 m). Connaissant la distribution des températures à une profondeur donnée, un croisement entre la température à 500 m et les gammes d'épaisseurs cumulées de réservoirs potentiels a été réalisé. Une interpolation par la méthode de pondération par l'inverse de la distance des épaisseurs a été réalisée de manière à déterminer schématiquement le rayon d'influence des données de forage (fig. 48). Le croisement entre ces classes d'épaisseurs et des valeurs de températures extrapolées à 500 m permet de mettre en évidence les secteurs géographiques les plus chauds et les plus épais, c'est-à-dire les plus intéressants au niveau géothermique (fig. 49). Il en résulte que deux zones plus chaudes et possédant une épaisseur de réservoir importante s'individualisent : la première au sud de Gannat, la seconde au sud de Riom, avec des températures de 40° pour des épaisseurs de réservoirs supérieures à 250 m (fig. 49).

Dans le cadre de ce projet, où il s'agit de géothermie basse et moyenne énergie, l'intérêt du SIG est de mettre en évidence les zones possédant des capacités de réservoirs potentiels les plus importantes à des profondeurs les plus faibles possibles, pour des températures élevées. Le croisement des informations a permis de mettre en évidence deux zones privilégiées : la première située à 10 km au sud de Gannat et couvre une surface de 20 km<sup>2</sup>, et la seconde située à 5 km au sud de Riom couvre une surface de 9 km<sup>2</sup>, dont l'épaisseur de réservoirs dépasse 250 m, pour des températures supérieures à 35 °C.

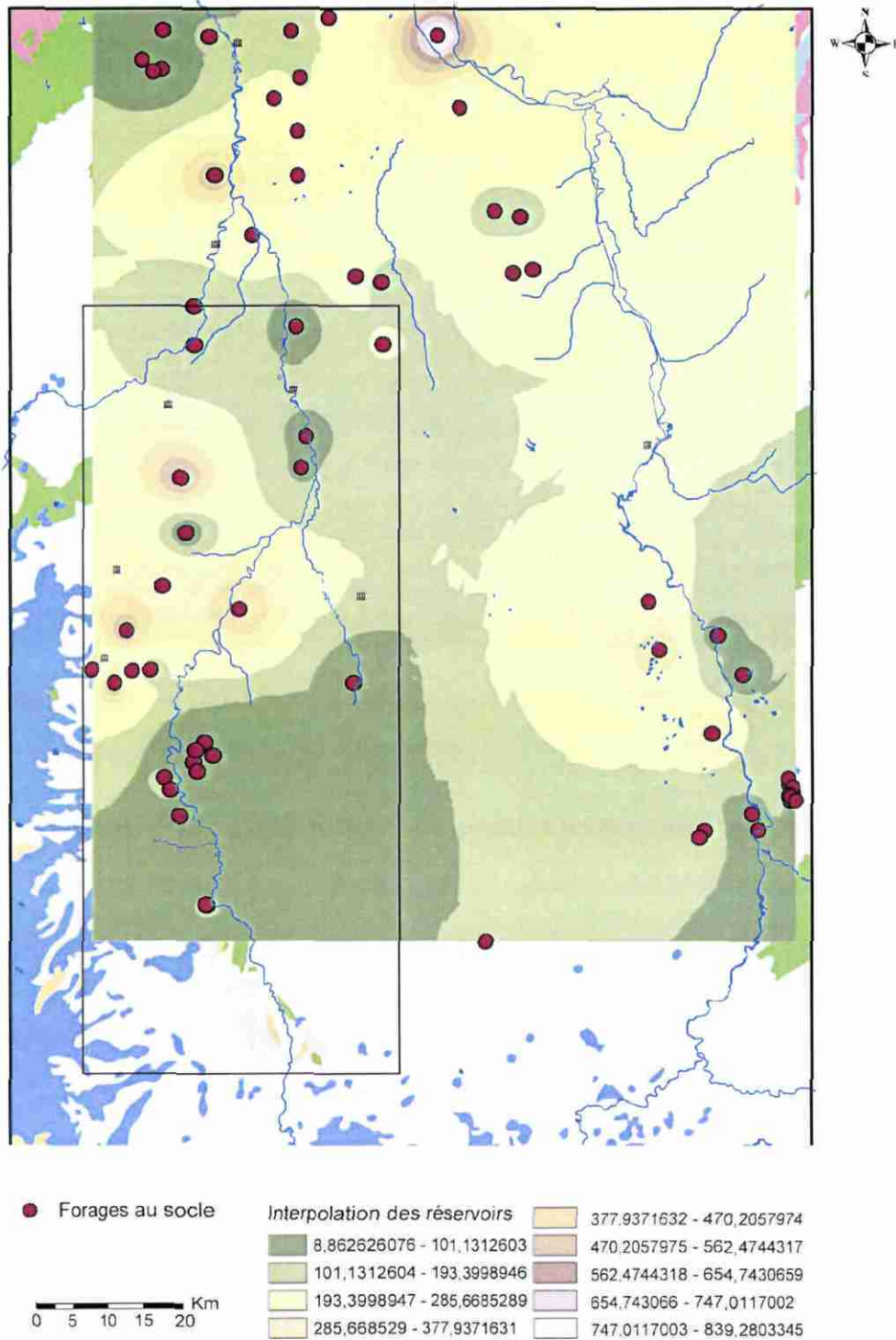


Fig. 48 - Interpolation des épaisseurs cumulées des réservoirs potentiels pour les forages ayant atteint le socle.

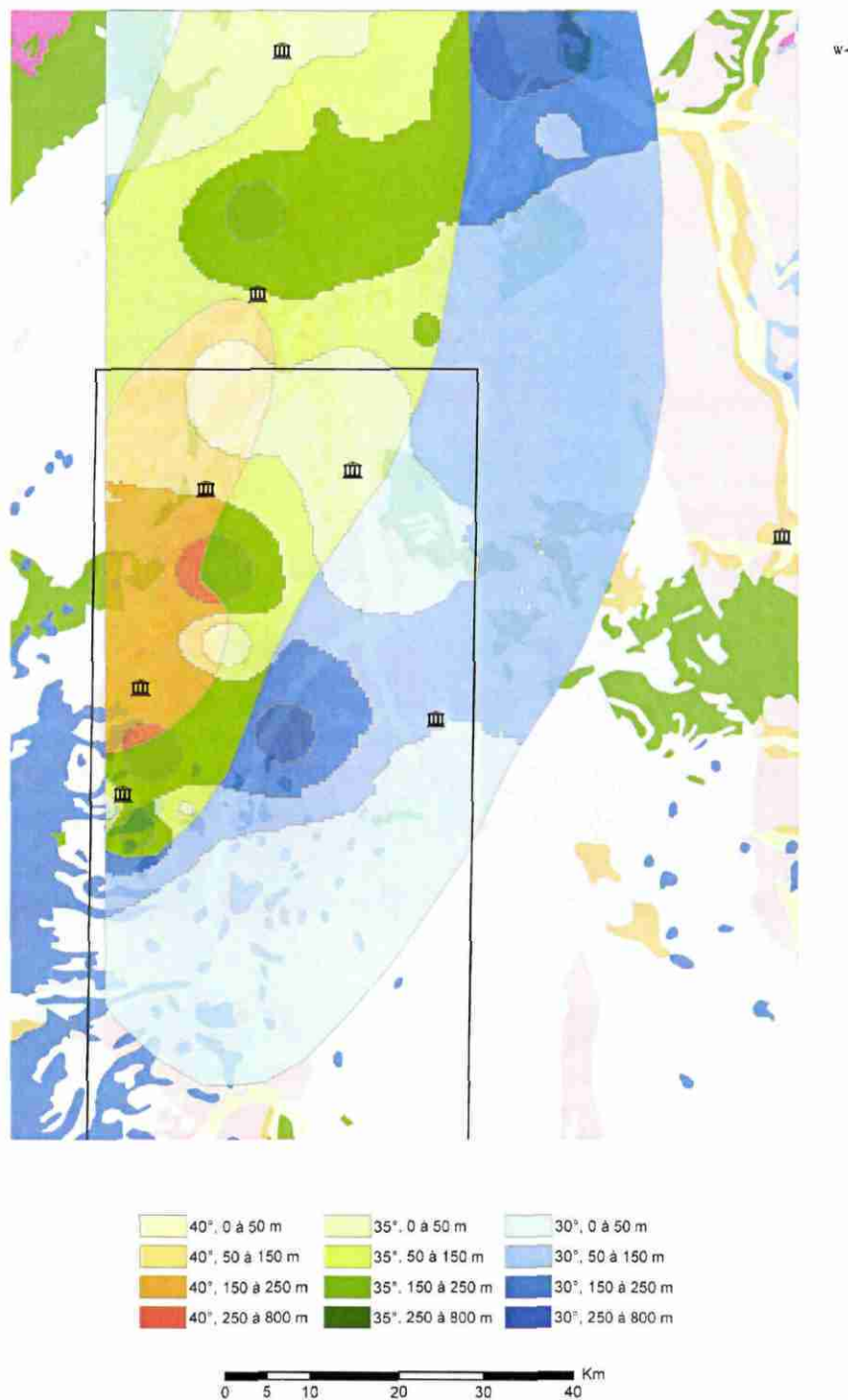


Fig. 49 - Croisement entre les épaisseurs cumulées des niveaux réservoirs et les températures extrapolées à 500 m.



## 9. Conclusion

Ce rapport rassemble et compile les données, les connaissances et les informations scientifiques en géologie, thermique, géophysique, hydrogéologie et géochimie des fluides disponibles dans les régions des Limagnes (Allier, Loire) et dans quelques petits bassins tertiaires du Massif central (Saint-Flour, Le Malzieu). Cette synthèse « papier » permet de faire le bilan sur les potentialités géothermiques de ce secteur. La réinterprétation des forages de Limagne d'Allier en terme de réservoirs va servir de support à la suite du projet qui consiste à modéliser dans le bassin, la géométrie des enveloppes des corps détritiques plus ou moins faillés avec l'aide de la sismique.

Cette compilation des données disponibles et accessibles sur la zone des Limagnes présente donc un certain nombre de caractéristiques géologiques, thermiques et hydrogéologiques intéressantes du point de vue de la ressource géothermale. À l'échelle régionale, le Massif central en général et la zone des Limagnes en particulier apparaissent comme une zone d'anomalie géothermique anormalement chaude. Comme de nombreux bassins sédimentaires ceinturant les reliefs anciens, les dépôts de fonds de bassin correspondent à des formations détritiques du type sable, conglomérats ou grès susceptibles de posséder des propriétés réservoirs intéressantes (porosité, perméabilité). Cette région est également caractérisée par de nombreuses sources thermales carbogazeuses qui émergent sur les bordures faillées des bassins. Les géothermomètres donnent des températures également intéressantes. L'ensemble de ces facteurs (température, formations détritiques, fluides, failles) est en faveur de circulations thermales dans le bassin et confirme l'intérêt, *a priori*, des Limagnes pour la géothermie basse et moyenne énergie. Cependant, les tentatives d'exploration géothermique réalisées par le passé n'ont pas été très fructueuses, en particulier parce que les parties les plus profondes du bassin, généralement détritique, étaient relativement mal connues. En effet, l'exploration pétrolière, peu dense, n'avait pas été orientée vers la recherche de réservoirs profonds. Il subsiste donc une certaine méconnaissance des fonds de bassin. Cette synthèse souligne également le rôle des failles (faille d'Aigueperse) comme drains potentiels et ouvre, par conséquent, de nouvelles perspectives de recherche.



## **Bibliographie**

- Aucel M. (1987) - Étude du socle fissuré du Cézallier par la méthode audiomagnétotellurique. Thèse de l'Université Paris VII, 132 p.
- Baubron J-C., Defaut B., Demange J., Maury R. (1978) - Une coulée sous-marine d'âge jurassique moyen dans les Causses : le basalte alcalin des Vignes (central français). *C.R. Acad. Sc.*, t. 287, p. 225-227.
- Baubron J.C., Bosch B., Degranges P., Leleu M., Marcé A., Rissler J.J., Sarcia C. (1979) - Recherches géochimiques sur les eaux thermales de la bordure ouest de la Limagne, *Bull. Minér.* 102, p. 676-683.
- Berthier F., Mercier-Batard F., Barrat J.M., lundt F. (1985) - S.A. des thermes de Bourbon l'Archambault (Allier). Compte-rendu des travaux de reconnaissance et de mise en exploitation d'ouvrage. Bilan et interprétation du système hydrothermal. Rap. BRGM 85 SGN 311 AUV.
- Briot D., Poidevin J.L., Hugueney M. (2001a) - Apports de l'étude isotopique Sr et Nd des sédiments cénozoïques de Limagne à la compréhension du fonctionnement du rift du Massif central français. *Bull. de la Société Géologique de France*, vol. 172, n° 1, pp. 17-24.
- Briot D., Poidevin J.L., Leyrit H., Gonord H., Gerbe M.C. (2001b) - Les fossés d'effondrement tertiaires. *Géologues* 130/131, p. 59-65.
- Camus G. (1975) - La chaîne des Puys. Étude structurale et volcanologique. Annales scientifiques de l'université de Clermont, 318 p.
- Chantepie M. (1990) - Le volcanisme basaltique miocène et pliocène dispersé dans la région de Clermont-Ferrand et sur le plateau des Dômes. Étude pétrologique et géochronologique. Implications volcanologiques et morpho-tectoniques. Mémoire de DEA, Univ. de Clermont-Ferrand, 38 p.
- Cheguer L. (1996) - Les laves miocènes de la Limagne d'Allier et des plateaux bordiers (Massif central français). Caractérisation d'une série magmatique alcaline sous-saturée (basanite-phonolites) associée à un rift intracontinental. Thèse d'université, Clermont-Ferrand.
- Criaud A., Fouillac C. (1986) - Étude des eaux thermo minérales carbogazeuses du Massif central Français. I. Potentiel d'oxydo-réduction et comportement du fer, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50, p. 525-533.
- Devineau K. (1996) - Dynamique d'un rift intracontinental : enregistrement par les variations isotopiques Sr-Nd dans la fraction détritique des sédiments. Mém. DEA Univ. Clermont II, 29 p.
- Demange J., Puvilland P., Aucel M. (1984) - Reconnaissance géothermique haute énergie dans la région du Cézallier. Rap. BRGM 84 SGN 023 GTH.

- Fouillac C. (1983) - Chemical geothermometry in CO<sub>2</sub>-rich thermal waters. Example of the French Massif central. *Geothermics*, 12, n° 2/3, p. 149-160.
- Fouillac C., Michard G. (1979) - Estimation des températures des réservoirs alimentant les sources thermales de la Limagne. *C. R. Acad. Sc.* 289, p. 289-292.
- Fouillac C., Michard G. (1981) - Sodium/Lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. *Geothermics*, 10, n° 1, p. 55-70.
- Fournier R.O. (1977) - Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 5, p. 41-50.
- Fournier R.O., Truesdell A.H. (1973) - An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, p. 1 255-1 275.
- Gable R. (1978) - Acquisition et rassemblement de données géothermiques disponibles en France. Rap. BRGM n° 78 SGN 284 GTH.
- Gable J., Foucher J.C., Batard F. (1980) - Inventaire des ressources géothermiques dans le département de l'Allier. Rap. BRGM 80 SGN 390 AUV.
- Gable R., Foucher J.C., Menjot A., Philip J.M., Roignot G. (1982) - Mesures, analyse et interprétation de profils thermiques. Application à la détermination indirecte des températures *in situ*. Rap. BRGM 82 SGN 413 GTH.
- Géoservices (1979) - Forages d'exploitation géothermique Beaumont (mars-avril 1979) - Fascicules I et IV.
- Géotherma (1981) - Forage d'exploitation géothermique de Clermont-Ferrand (Les Vergnes I) (juin-septembre 1981). Conséquence des incidents survenus en cours de réalisation et imputables à des difficultés d'ordre géologique, novembre 1981.
- Géotherma (1982) - Comité Géothermie. Forage de Cébaza. Rap. des travaux (Surveillance géologique et géothermique), février 1982.
- Goër de Herve A. (1995) - Les volcans d'Auvergne : la Limagne. Volcanisme et volcans d'Auvergne, la dépêche scientifique du parc, n° 8/9 mars 1995.
- Granet M., Stoll G., Dorel J., Achauer U., Poupinet G., Fuchs K. (1995) - Massif central (France): new constraints on the geodynamical evolution from teleseismic tomography, *Geophys. J. Int.*, 121, p. 33-48.
- Hérault J.-P. (1974) - Utilisation de l'énergie géothermique pour le chauffage urbain dans la région Auvergne. Rap. BRGM n° 74 SGN 317 GTH.
- Horn R., Stanudin B. (1975) - La géophysique appliquée aux recherches géothermiques en Limagne « étude méthodologique ». Rap. BRGM 75 MET GPH 17, 24 p.
- Hourrière F., Leyrit H., Bessonneau D., Bulteau J.F., Dervin T. (1998) - Âge, genèse et évolution des diatrèmes pépéritiques de Limagne (Massif central. 17<sup>e</sup> R.S.T., 131 p.).

- Hurtig E., Cermak V., Haenel R., Zui V. (1991) - Geothermal Atlas of Europe, Hermann Haack Verlagsgesellschaft mb H, 156 p.
- Jeambrun M., Mercier-Batard F., Michaely B., Turland M. (1986) - Évaluation du potentiel en eau géothermale sur la commune de Villebret (Allier). Rap. BRGM 86 SGN 541 AUV., septembre 1986.
- Lieutenant N. (2003) - Mise en place d'un SIG évolutif dans le cadre d'un inventaire du potentiel géothermique. Mémoire de DESS université d'Orléans - BRGM, 49 p.
- Lucazeau F., Vasseur G. (1989) - Heat flow density data from France and surrounding margins, *Tectonophysics*, 164, p. 251-258.
- Maget P. (1983) - Synthesis on "low enthalpy" geothermal resources in France: scientific and economic applications. In Conference on European geothermal update; third international seminar on the results of EC Geothermal Energy Research, Munich, Federal Republic of Germany, Nov. 29-Dec. 1, 1983.
- Martelet G., Guillou-Frottier L., Bitri A., Serrano O., Perrin J., Genter A. (2003) - Méthodologie de l'inventaire géothermique de la Limagne : projet COPGEN, Compilation des données géophysiques. Rap. BRGM RP-52667.
- Mercier-Batard F. (1985)- Contrôle des sources thermo minérales de Royat à l'occasion du forage géothermique de la Croix de Neyrat à Clermont-Ferrand (Puy de Dôme. Rapport final. Rap. BRGM 85 SGN 646 AUV, décembre 1985.
- Merle O., Michon L. (1999) - La formation du rift du Massif central : une nouvelle hypothèse de travail, *In Volcanismes, sédimentations et tectoniques cénozoïques périalpin*. Documents du BRGM n° 291, p. 39-40.
- Merle O., Michon L. (1999) - Interprétation tectonique du rift du Massif central, *Géologues* 130/131, p. 92-94.
- Michard G. (1979) - Géothermomètres chimiques. Bull. du BRGM (2<sup>e</sup> série), Section III, n° 2, p. 183-189.
- Michard G. (1990) - Behaviour of major elements and some trace elements (Li, Rb, Cs, Sr, Fe, Mn, W, F) in deep hot waters from granitic areas. *Chem. Geol.*, 89, p. 117-134.
- Michard G., Fouillac C., Evrard M., Lambret B. (1978) - Acquisition des ions alcalino-terreux par les eaux thermales carbogazeuses. *Earth and Planetary Science Letter*, 41, p. 170-174.
- Michard G., Ouzounian G., Fouillac C., Sarazin G. (1979) - Contrôle des concentrations d'aluminium dissous dans les eaux des sources thermales. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, p. 147-155.
- Michard G., Stettler A., Fouillac C., Ouzounian G., Mandeville D. (1976) - Subsuperficial changes in chemical composition of the thermomineral waters of Vichy basin. *Geothermal implications. Geoch.*, J. 10, p. 155-161.

- Michon L., Merle O. (1999a).- Programme de l'excursion "Rift de la Limagne", *In Volcanismes, sédimentations et tectoniques cénozoïques péri alpins*. P. Nehlig coord. Documents du BRGM n° 291, 134 p.
- Michon L., Merle O. (1999b) - Structuration tertiaire et quaternaire du Massif central : Analyse du MNT et données de terrain *In Volcanismes, sédimentations et tectoniques cénozoïques périalpins*, P. Nehlig coord. Documents du BRGM n° 291, p. 41-42.
- Michon L., Merle O. (2001) - The evolution of the Massif central rift: spatio-temporal distribution of the volcanism. *Bulletin de la Société Géologique de France*, t. 172, n° 2, p. 201-211.
- Morange A., Héritier F., Villemin J. (1971) - Contribution de l'exploration pétrolière à la connaissance structurale et sédimentaire de la Limagne, dans le Massif central, Symposium J. Jung : Géologie, géomorphologie et structure profonde du Massif central français, Clermont-Ferrand, ed. Plein Air Service, Clermont-Ferrand.
- Négrel P., Fouillac C., Brach M. (1997) - Occurrence of mineral water springs in the stream channel of the Allier River (Massif central, France): chemical and Sr isotope constraints. *J. of Hydrology* 203, p. 143-153.
- Nehlig P. et coll. (1999) - Volcanismes, sédimentations et tectoniques cénozoïques périalpins, document BRGM n° 291.
- Nehlig P., Fréour G., Huguet D., Leyrit H., Maroncle J.L., Roger J., Roig J.Y., Surmely F., Vidal N., Thiéblemont D. (2001) - Notice explicative, carte géologique de France (1/50 000), feuille Murat (788), Orléans BRGM, 269 p.
- Pollack H.N., Hurter S., Johnson J.R. (1993) - Heat flow from the Earth's interior: analysis of the global data set, *Rev. Geophys.*, 31, p. 267-280.
- Pomerol C., Ricour J. (1992) - Terroirs et thermalisme; les eaux minérales françaises, Documents du BRGM, Orléans, 288 p.
- Serra H., Petelet-Giraud E., Négrel Ph. (2003) - Inventaire du potentiel géothermique de la Limagne : projet COPGEN. Synthèse bibliographique de la géochimie des eaux thermales et estimation des températures profondes de ces eaux. Rap. final, Rap. BRGM RP-52587.
- Stieltjes L. (1977) - Évaluation du potentiel géothermique du Massif central français, Rap. BRGM RR-00797-FR, 77, SGN, 594, GTH.
- Varet J., Stieltjes L., Fouillac C., Gérard A. (1980) - Prospection géothermique intégrée dans le massif du Mont-Dore, Rap. BRGM 80 SGN 150 GTH.
- Vasseur G. (1982) - Synthèse des résultats de flux géothermique en France, *Ann. Géophys.*, 38, 2, p. 189-201.

- Carte géologique de la France au 1/50 000 - Feuille de Brioude, XXVI-34, n° 766.
- Carte géologique de la France au 1/50 000 - Feuille de Charlieu, n° 648.
- Carte géologique de la France au 1/50 000 - Feuille de Chaudes-Aigues, n° 813.
- Carte géologique de la France au 1/50 000 - Feuille de Gannat, XXV-29, n° 645.
- Carte géologique de la France au 1/50 000 - Feuille de Le Mayet-de-Montagne, XXVII-30, n° 671.
- Carte géologique de la France au 1/50 000 - Feuille de Maringues, n° XXVI-30.
- Carte géologique de la France au 1/50 000 - Feuille de Montmarault, n° 620.
- Carte géologique de la France au 1/50 000 - Feuille de Roanne, n° 672.
- Carte géologique de la France au 1/50 000 - Feuille de Saint-Flour, n° 789.
- Carte géologique de la France au 1/50 000 - Feuille de Saint-Pourçain-sur-Sioule, XXVI-28, n° 621.
- Carte géologique de la France au 1/50 000 - Feuille de Sauges, n° 814.
- Carte géologique de la France au 1/50 000 - Feuille de Thiers, XXVI-31, n° 694.
- Carte géologique de la France au 1/50 000 - Feuille d'Issoire, XXVI-32, n° 718.



**ANNEXE**

**Fiches de synthèse  
des sources thermo-minérales**



## VICHY

**Activité** : thermalisme et embouteillage.

**Situation des sources** : limites du périmètre de protection des sources du bassin de Vichy (15 600 ha environ, 19 communes).

**Les sources** : plus de 200 sources connues et répertoriées, dont près des 3/4 sont situées le long de l'Allier, à cheval sur les limites des communes de Saint-Yorre, Saint-Priest-Bramefont et Saint-Sylvestre-Pragoulin.

**Origine** : eaux météoriques, acquérant leur thermalité et minéralisation en profondeur. Pour le CO<sub>2</sub>, constituant à 99 % le gaz associé aux eaux minérales, l'origine profonde magmatique et l'origine de décarbonatation sédimentaire peuvent être évoquées.

**Contexte géologique et tectonique** : l'histoire géologique du bassin de Vichy débute au Cambrien supérieur avec la mise en place de granite. Se développe alors une fracturation nord/sud. De l'ère secondaire jusqu'à l'Éocène, une intense pénéplanation a probablement affecté les roches cristallines. Au cours de l'Éocène, un fossé d'effondrement d'orientation nord/sud se met en place lors des premiers glissements alpins avec des comblements sédimentaires d'âge, de nature et de puissance variées. Les mouvements de subsidence se ralentissent à partir du Miocène. Au Plio-Quaternaire, une forte érosion fluviale, l'activité de certaines failles (de direction N-S et NE-SO) ainsi que des processus de dégradation périglaciaire confèrent au bassin son modelé actuel.

**Schéma de circulation des eaux** : elles remonteraient avec le CO<sub>2</sub> du socle par des failles N-S et NNO-SSE, au sud-ouest du bassin (une hypothèse propose une alimentation du système au niveau de la Chaîne des Puys), pour emprunter les horizons tertiaires sablo-gréseux (circulation latérale des eaux de l'ouest vers l'est). Selon les émergences, elles se mélangeraient (ou pas) de manière plus ou moins importantes aux aquifères de subsurface.

**Données hydrochimiques** : toutes les eaux sont bicarbonatées sodiques, gazeuses, de minéralisation et de température très variables. Ces variations sont le résultat de la coexistence probable à l'intérieur du Bassin de Vichy de deux phénomènes distincts : à partir d'une ou de plusieurs alimentations profondes, supposées chaudes et minéralisées, l'eau minérale peut se refroidir par conduction (échange thermique avec les éponges : cas d'Abrest et Vichy) ou évoluer par mélange avec d'autres eaux (Saint-Yorre, Saint-Priest, Saint-Sylvestre Mariol et Cusset).

Nom de la source (commune)	Débit exploité (m <sup>3</sup> /h)	T (°C)	Conductivité (µS/cm)	Gaz
LARDY (VICHY)	8,9	18,5	7 072	CO <sub>2</sub>
DOME (ABREST)	0,72	65,5	5 692	CO <sub>2</sub>
ANTOINE (BELLERIVE- SUR-ALLIER)	29	73	5 180	CO <sub>2</sub>
BOUSSANGE (BELLERIVE- SUR-ALLIER)	15,3	42,9	6 490	CO <sub>2</sub>
NOUVELLE ROCHE CLAIRE (MARIOL)	4	14,6	3 580	CO <sub>2</sub>

Nom de la source (commune)	Anions et cations majeurs en mg/l							Date analyse	Éléments traces
	Ca	Mg	Na	K	SO <sub>4</sub>	Cl	HCO <sub>3</sub>		
LARDY (VICHY)	198	40	1 970	159	190	415	5 414	14/02/1979	F, Li, Fe, As
DOME (ABREST)	49,3	9	1 877	108	183	342	4 529	14/02/1979	Li
ANTOINE (BELLERIVE- SUR-ALLIER)	32	8,6	1 690	82	197	319	3 940	05/10/1994	Al, As, B, Pb
BOUSSANGE (BELLERIVE- SUR-ALLIER)	132	10,2	1 980	99	211	386	4 799	05/10/1994	Al, As, B, Pb
NOUVELLE ROCHE CLAIRE (MARIOL)	23,7	5,1	1 033	69,5	115	158	2 557	14/02/1979	Fe, As

**État des connaissances** : incertitudes géologiques, structurales, incertitudes quant à l'origine et les caractéristiques de circulation des eaux, quant à la nature et l'origine des apports d'eau de mélange, quant à l'origine et les mécanismes de différenciation physique et chimique des différents groupes d'eau que l'on peut observer dans le bassin. Les analyses chimiques sont peu nombreuses.

## CHAUDES-AIGUES

**Activité** : thermalisme.

**Situation des sources** : commune de Chaudes-Aigues.

**Les sources** : 25 environ, situées en fond ou en flanc de vallée, suivant le cours du ruisseau « le Remontalou ».

**Origine** : eaux météoriques, acquérant leur thermalité et minéralisation en profondeur.

**Contexte géologique et tectonique** : le socle primaire a deux composantes : vers le sud et l'est, le granite de l'Aubrac ou du sud de la Margeride, vers le nord et l'ouest, les roches métamorphiques, schistes cristallins et gneiss de l'ouest de la Margeride. Sur ce socle s'est édifié le volcanisme des monts du Cantal. Au niveau de Chaudes-Aigues, les roches en place sont constituées essentiellement par du granite et des micaschistes recoupés par des filons de microgranites ou de quartz, témoins de la tectonique qui a affecté le site (NW-SE et NS), qui favorisent la remontée des eaux qui acquièrent ainsi une minéralisation spécifique.

**Schéma de circulation des eaux** : dernière hypothèse en cours : infiltration des eaux superficielles des plateaux volcaniques situés au NW de Chaudes-Aigues ; descente en profondeur, jusqu'à 5 000 m, à la faveur des nombreuses cheminées volcaniques qui ont « transpercé » le sous-bassement des schistes cristallins, où elles atteignent les hautes températures facilitant la mise en solution des éléments minéraux ; remontée dans les plans de fracture sous l'effet de l'allègement de densité par la température et le gaz dissous provenant du socle avec mélange avec des eaux superficielles. Les hautes températures résiduelles aux émergences (70 à 80 °C) et les débits artésiens notables indiquent une circulation rapide à la remontée. La durée du trajet souterrain est à évaluer en siècles.

**Données hydrochimiques** : la température est constante au droit de chaque émergence mais variable de l'une à l'autre (entre 40 et 80,5 °C), la conductivité moyenne des eaux est de l'ordre de 1 300 à 1 325 µS/cm, les teneurs en CO<sub>2</sub> dissous varie de 0 à 13 %.

Nom de la source	Débit exploité (m <sup>3</sup> /h)	T (°C)	Conductivité (µS/cm)	Gaz
PAR (du)	66	79,9	1282	CO <sub>2</sub>
BAN	60,5	75,4	1285	CO <sub>2</sub>

Nom de la source	Anions et cations majeurs en mg/l							Date analyse	Éléments traces
	Ca	Mg	Na	K	SO <sub>4</sub>	Cl	HCO <sub>3</sub>		
PAR (du)	21,8	6,8	278	29,6	22,2	77,8	708	17/04/2002	As, B
BAN	21,9	6,9	275	29,2	22,4	79,8	706	17/04/2002	As, B

**État des connaissances** : incertitudes sur l'origine et l'hydrodynamisme des eaux thermales. Les analyses chimiques, assez peu nombreuses, ont été complétées lors de l'étude BRGM SGR-AUV en 2002 (cf. rap. RP 51722 édité dans le cadre du CPER Thermalisme Auvergne).

## CHÂTELGUYON

**Activité** : thermalisme.

**Situation des sources** : commune de Châtelguyon.

**Les sources** : les sources émergent le long du ruisseau du Sardon ou, de part et d'autre dans la syéno-diorite. Neuf sources sont exploitées.

**Origine** : eaux météoriques, acquérant leur thermalité et minéralisation en profondeur.

**Contexte géologique et tectonique** : le site est en bordure de la plaine d'effondrement de la Limagne. Les sources exploitées émergent d'un sous-sol granitique présentant de nombreuses failles d'orientations diverses et de nombreux filons de quartz ou de calcite. Les roches présentes sont des anatexités et des granites à biotite avec inclusions de synodiorite.

**Schéma de circulation des eaux** : non identifié entièrement : infiltration des eaux météoriques sur les massifs voisins granitiques largement fracturés; en profondeur, l'eau atteint 140-180 °C. La profondeur est estimée à 5 km. Pendant le temps de séjour de durée inconnue, l'eau acquiert sa minéralisation par l'interaction entre l'eau et la roche. Le gaz carbonique, d'origine profonde, favorise ce phénomène ; le circuit ascendant est constitué de zones fortement tectonisées, aussi appelées « tronc thermal ». Dans la zone proche de la surface, plusieurs mécanismes sont mis en jeu et provoquent des incidences sur les conditions d'émergence et les caractéristiques physico-chimiques de l'eau : d'une part la baisse progressive de la température et de la pression entraîne un dégazage, la formation de dépôts de calcite et d'aragonite formant une carapace de traversins, de dépôts d'hydroxydes de fer et d'autres métaux, de silice avec silicification des fissures, et d'autre part, le mélange avec des eaux superficielles provoquent une dilution des eaux entraînant une vulnérabilité de la ressource.

**Données hydrochimiques** : les eaux des sources sont chimiquement très voisines (type carbonaté chloruré sodique calcique et magnésien).

Nom des sources (forages)	Débit exploité (m <sup>3</sup> /h)	T (°C)	Conductivité (µS/cm)	Gaz
CARNOT	60		8 170	CO <sub>2</sub>
LOUISE	60		7 990	CO <sub>2</sub>
AUBIGNAT	50	35,5	8 100	CO <sub>2</sub>

Le forage CARNOT produisait après foration 90 m<sup>3</sup>/h d'eau par artésianisme naturel.

Nom des sources	Anions et cations majeurs en mg/l							Date analyse	Éléments traces
	Ca	Mg	Na	K	SO <sub>4</sub>	Cl	HCO <sub>3</sub>		
CARNOT	680,5	382	866	94,3	358,6	2 063,4	2 507,1	02/03/1992	Fe, B, F, As, Sr
LOUISE	656,5	385,1	873	89,6	351,5	2 021,7	2 439	09/03/1993	Fe, B, F, As, Sr
AUBIGNAT	655	384,7	882	90,4	356,5	2 028,6	2 482,7	09/03/1993	Fe, B, F, As, Sr

**État des connaissances** : l'intégralité du circuit hydrothermal n'est pas identifiée avec précision.

## ROYAT

**Activité** : thermalisme.

**Situation des sources** : communes de Royat et de Chamalières.

**Les sources** : trois sources sur Royat et deux autres sur Chamalières.

**Origine** : eaux météoriques, acquérant leur thermalité et minéralisation en profondeur.

**Contexte géologique et tectonique/schéma de circulation des eaux** : l'eau remonte par les failles bordière du bassin d'effondrement de la Limagne, traverse les terrains arkosiques qui constituent le sédimentaire de base du bassin et émerge à travers les terrains de couverture qui sont constitués de laves, d'éboulis, de sédiments récents et de travertins déposés par les anciennes émergences.

**Données hydrochimiques** : les eaux du bassin de Royat peuvent être réparties en trois groupes : les plus minéralisées (Eugénie, Auraline et Saint-Mart) qui présentent des compositions très voisines les unes des autres, une eau de minéralisation moyenne (Grottes Rouges) à l'amont et en bordure du gisement, la moins minéralisée (César).

Nom de la source	Débit exploité (m <sup>3</sup> /h)	T (°C)	Conductivité (µS/cm)	Gaz
EUGÉNIE	80	32,5	4 890	CO <sub>2</sub>
AURALINE	25	31	4 930	CO <sub>2</sub>
CÉSAR	2	26,6	777	CO <sub>2</sub>
GROTTES ROUGES	50	26,8	3 380	CO <sub>2</sub>
SAINT-MART	13	28	4 340	CO <sub>2</sub>

	Anions et cations majeurs en mg/l							Date analyse	Éléments traces
	Ca	Mg	Na	K	SO <sub>4</sub>	Cl	HCO <sub>3</sub>		
EUGÉNIE	251	112	740	83	104	805	2 074	19/01/1994	Sr, Ba, As, F, Fe, Li, B
AURALINE	26,9	121,7	894	109,2	113,2	875	2 245	26/09/1994	Sr, Ba, As, F, Fe, Li, B
CÉSAR	92,6	23,6	61,4	16,85	96,1	58	323	26/09/1994	Sr, Ba, As, F, Fe, Li
GROTTES ROUGES	197,5	94,5	438	54	88,6	477,2	1 440	25/02/1993	Sr, Ba, As, F, Fe, Li, B
SAINT-MART	730	107,3	730	90,2	99	765	1 940	26/09/1994	Sr, Ba, As, F, Fe, Li, B

**État des connaissances** : le contexte géologique est connu depuis longtemps, les analyses assez nombreuses.

## CHÂTEAUNEUF-LES-BAINS

**Activité** : thermalisme et embouteillage.

**Situation des sources** : commune de Châteauneuf-les-Bains.

**Les sources** : dix-huit sources dont les sources des Grands Bains (eaux thermales) et la source du Rocher (embouteillage). Plusieurs forages récents ont été réalisés pour les deux usages de ce site.

**Origine** : eaux météoriques, acquérant leur thermalité et minéralisation en profondeur.

**Contexte géologique et tectonique/schéma de circulation des eaux** : les sources sont localisées sur un grand accident NS qui met en contact les roches cristallines de type granite et des formations de tufs du Carbonifère. Cette faille est recoupée par une série de cassures NE/SW, dont certaines ont joué en failles normales. Ces fractures ouvertes par les distensions tectoniques tertiaire et actuelle ont permis des circulations d'eaux profondes.

**Données hydrochimiques** : eaux à faciès bicarbonaté sodique et carbo-gazeux.

Nom de la source	Débit exploité (m <sup>3</sup> /h)	T (°C)	Conductivité (µS/cm)	Gaz
FORAGE F1	4,1	44,1	4 640	CO <sub>2</sub>
FORAGE F2	2,1	37,4	4 620	CO <sub>2</sub>
BAIN TEMPÉRÉ	3,2	35	4 620	CO <sub>2</sub>
LEFORT	2,2	34,1	3 668	CO <sub>2</sub>
PETIT ROCHER	2,6	29,2	3 096	CO <sub>2</sub>

Nom de la source	Anions et cations majeurs en mg/l							Date analyse	Éléments traces
	Ca	Mg	Na	K	SO <sub>4</sub>	Cl	HCO <sub>3</sub>		
FORAGE F1	122,6	41,3	1 032	6,9	265	219	2 575	12/04/2001	F, Li, As, B, Ba, Sr, Mn, Fe
FORAGE F2	110,2	36,1	963,9	62,2	329	266	2 508	12/04/2001	F, Li, As, B, Ba, Sr, Mn, Fe
BAIN TEMPÉRÉ	116,7	40	1 039	64,8	323	282	2 538	12/04/2001	F, Li, As, B, Ba, Sr, Mn, Fe
LEFORT	87,2	27,6	838,9	48,8	335	294	1 953	12/04/2001	F, Li, As, B, Ba, Sr, Mn, Fe
PETIT ROCHER	120	28,2	700	40,2	198	201	1 903	27/06/1981	

**État des connaissances** : très limité – Une consultation des données recueillies lors des dernières investigations (forages) permettraient peut-être de disposer d'informations complémentaires. Cette consultation nécessite de se rapprocher des exploitants, ce qui devrait se faire très prochainement (en 2003) dans le cadre du projet CPER Thermalisme mené par le SGR-AUV.

## BOURBON-L'ARCHAMBAULT

**Activité :** thermalisme.

**Situation des sources :** commune de Bourbon l'Archambault, en pleine agglomération.

**Les sources :** une source et un forage.

**Origine :** eaux météoriques, acquérant leur thermalité et minéralisation en profondeur.

**Contexte géologique et tectonique :** la commune se situe sur une boutonnière de socle granitique émergeant de la couverture de terrains sédimentaires permians. Ce massif granitique (faciès du granite de Montmarault) présente la particularité d'avoir été intensément déformé en masse comme un corps plastique, ce qui lui donne une structure étirée. Il a subi par la suite une déformation cassante qui a provoqué de nombreuses fractures ouvertes permettant une circulation d'eau. Ce réseau de fractures est de dimensions diverses, en partie interconnectées, d'orientations principales nord-sud et est-ouest. La couverture sédimentaire est uniquement composée par des terrains permians (Autunien), composée d'argiles avec quelques bancs de grès et de calcaires gris et des passées schisteuses. Ces grès sont affectés par des minéralisations en rapport avec la fracturation de direction majoritairement subméridienne : filons avec quartz, fluorine verte ou violette, pyrite, blende, mispickel, barytine.

**Schéma de circulation des eaux :** la source des « Trois Puits » se trouve à l'intersection d'une vallée de direction SW-NE et d'une faille ouverte subverticale. L'eau minérale apparaît donc dans une dépression en empruntant sur quelques dizaines de mètres avant d'émerger, un chenal plus ou moins ramifié situé dans une fracture.

**Données hydrochimiques :** cette eau présente une minéralisation moyenne, d'une bonne stabilité dans le temps avec prédominance du sodium pour les cations et des chlorures pour les anions. Les teneurs en fluor, lithium, bore et strontium sont relativement élevées et le manganèse est aussi élevé que le fer. La faible teneur en tritium confirme l'origine ancienne de l'eau. À noter la double composition des gaz dissous.

Nom de la source	Débit exploité (m <sup>3</sup> /h)	T (°C)	Conductivité (µS/cm)	Gaz
TROIS PUIITS (source)	40	53	4 270	CO <sub>2</sub> et NO <sub>2</sub>
TROIS PUIITS EST (forage)	36	53,8	4 270	CO <sub>2</sub> et NO <sub>2</sub>

Nom de la source	Anions et cations majeurs en mg/l							Date analyse	Éléments traces
	Ca	Mg	Na	K	SO <sub>4</sub>	Cl	HCO <sub>3</sub>		
TROIS PUIITS	110	6	959	60	313	1 015	854	19/08/1987	F, Li, Fe
TROIS PUIITS EST	102	6,7	1 000	54,5	319	1 056	883	29/10/1987	B, Pb, Zn, Li, Fe, Sr

**État des connaissances :** très limité en ce qui concerne le schéma précis de circulation des eaux. Peu d'analyse disponible.

## NÉRIS-LES-BAINS

**Activité :** thermalisme.

**Situation des sources :** commune de Nérès-les-Bains.

**Les sources :** une source, deux forages.

**Origine :** eaux météoriques, acquérant leur thermalité et minéralisation en profondeur.

**Contexte géologique et tectonique :** les sources émergent du granite, Nérès se situant au centre du « granite intrusif de Nérès ». Ce granite à plusieurs aspects : jusqu'à 60 m de profondeur, il s'agit d'un granite rose à grains moyens, avec de rares filons de microgranite rouge ; au-delà de 60 m, le granite devient gris et plus dur, les zones faillées sont nombreuses, marquées par un tapissage de calcite attestant de la circulation d'eau minérale. On met en évidence trois directions tectoniques principales : N 135°, N 20° (failles ouvertes) et N 180°, suivies par le réseau hydrographique.

**Schéma de circulation des eaux :** il n'est pas totalement identifié, mais le schéma suivant peut être proposé : infiltration des eaux météoriques sur le massif granitique et métamorphique largement fracturé ; en profondeur, l'eau atteint une température de 150 à 170°, la profondeur atteinte est estimée à 4 500 mètres ; le circuit ascendant est constitué par des zones fracturées ou fortement tectonisées aussi appelées tronc thermal. Dans la zone d'approche de la surface, plusieurs mécanismes sont mis en jeu et provoquent des incidences sur les caractéristiques physico-chimiques de l'eau : remontée rapide (ou directe) ou plus lente (ou circuit plus long) induisant des différences de températures des émergences. La particularité de ce site est de n'avoir qu'une seule émergence « naturelle » ou zone d'émergence bien identifiée à la source César, selon un axe NW-SE et diffusant très peu dans les terrains proches de la surface.

**Données hydrochimiques :** eaux très peu minéralisées de type chloruré et bicarbonaté sodique. Unicité chimique de la ressource, mais variation de température d'une source à l'autre. À noter la présence de germanium et de béryllium rarement signalés dans les eaux minérales, notamment celles du Massif central.

Nom de la source	Débit exploité (m <sup>3</sup> /h)	T (°C)	Conductivité (µS/cm)	Gaz
CÉSAR	48	53	1 310	CO <sub>2</sub> et NO <sub>2</sub>
PERASSIER	4	20,5		CO <sub>2</sub> et NO <sub>2</sub>
MAGNOLIA	15	33		CO <sub>2</sub> et NO <sub>2</sub>

Nom de la source	Anions et cations majeurs en mg/l							Date analyse	Éléments traces
	Ca	Mg	Na	K	SO <sub>4</sub>	Cl	HCO <sub>3</sub>		
CÉSAR	38	1,3	328	17,2	274	113	476	21/09/1994	Li, Fe, Mn, Sr, F
PERASSIER	60,4	2,3	319	15,6	326	116	518,5	08/1994	Li, Fe, Mn, Sr, F
MAGNOLIA	90,1	8,2	174	15	228	94	366	12/1987	Li, Fe, Mn, Sr, F

**État des connaissances :** le schéma de circulation des eaux n'est pas totalement identifié. Les analyses sont assez nombreuses.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

**Service connaissance et diffusion de l'information géologique**

3, avenue Claude-Guillemain

BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34