



Géosciences de surface (Hydrologie–Hydrogéologie)

Nouveaux éléments sur la structure et le fonctionnement hydrogéologique du plateau basaltique de l'Aubrac (Massif central, France). Première évaluation des potentialités en eau souterraine

Pierre-Yves Bourlier^{a,1}, Patrick Lachassagne^{b,*}, Jean-François Desprats^c, Emmanuel Gille^d

^a Centre d'études géographiques, université de Metz, Île du Saulcy, 57045 Metz cedex, France

^b BRGM, Service Eau/RMD, 1039, rue de Pinville, 34000 Montpellier, France

^c BRGM, Service « Aménagement et Risques naturels », 1039, rue de Pinville, 34000 Montpellier, France

^d Centre d'études géographiques, université Paul-Verlaine de Metz, île Saulcy, 57045 Metz cedex, France

Reçu le 1^{er} août 2004 ; accepté après révision le 25 janvier 2005

Disponible sur Internet le 31 mars 2005

Présenté par Ghislain de Marsily

Résumé

En milieu volcanique, la qualité de la connaissance géologique aux différentes échelles est de première importance pour l'évaluation des potentialités en eau souterraine des aquifères et pour leur mise en valeur. Des investigations géologiques et hydrogéologiques (synthèse des données existantes, observations géologiques de terrain, reconstitution de la morphologie du substratum infra-volcanique, jaugeages, hydrogéologie de terrain, etc.) ont été mises en œuvre au sein du plateau basaltique de l'Aubrac (Massif central, France). Elles permettent de préciser la structure et le fonctionnement hydrogéologique, très peu connu jusqu'à présent, de cet empilement de formations volcaniques, à dominante lavique, d'une superficie d'environ 450 km², reposant sur un substratum principalement plutonique et métamorphique. Cet ensemble se révèle constituer un aquifère aux potentialités d'importance régionale, dont la ressource en eau souterraine est actuellement très largement sous-exploitée. Les résultats obtenus permettent de proposer des zones et stratégies de prospection prioritaire. **Pour citer cet article : P.-Y. Bourlier et al., C. R. Geoscience 337 (2005).**

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : py.bourlier@wanadoo.fr (P.-Y. Bourlier), p.lachassagne@brgm.fr (P. Lachassagne), jf.desprats@brgm.fr (J.-F. Desprats), gille@zeus.univ-metz.fr (E. Gille).

¹ Adresse actuelle : 9B, rue des Trois Maisons, 88400 Gérardmer, France.

Abstract

New elements on the structure and hydrogeological functioning of the Aubrac basaltic plateau (Massif Central, France). First evaluation of the groundwater potentialities. In volcanic areas, the quality of the geological data at the various scales is of paramount importance for the estimation of aquifer potentialities and thus for groundwater exploitation. Geological and hydrogeological investigation (synthesis of existing data, field geological observations, reconstruction of the infra-volcanic morphology, stream gauging, field hydrogeology, etc.) have been performed on the 450-km² Aubrac basaltic plateau (Massif Central, France). These results allow us to specify the hydrological structure and functioning of this volcanic plateau that were quite unknown before. It is mainly constituted by the piling up of lava flows resting on a plutonic and metamorphic substratum. This volcanic unit constitutes an aquifer of regional importance whose groundwater resources are currently underexploited. These results allow us to delineate zones and strategies for priority hydrogeological prospecting. *To cite this article: P.-Y. Bourlier et al., C. R. Geoscience 337 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Aquifère volcanique ; Basaltes ; Entablement basaltique ; Géologie ; MNT ; Géophysique ; Hydrologie–hydrogéologie ; Sources ; Jaugeages ; Aubrac ; Massif central ; France

Keywords: Volcanic aquifer; Basalts; Geology; DEM; Geophysics; Hydrology–hydrogeology; Springs; Gauging; Aubrac; French Massif Central; France

Abridged English version

1. Introduction – Objectives

The Aubrac plateau (Massif Central, France) is highly representative of the regions made up of volcanic rocks lying over a granitic and metamorphic basement. The hydrogeological framework of this area being quite unknown, the main objectives of the present work were to specify the geological and hydrogeological structure of this volcanic plateau, and to determine whether or not it would hold significant potentialities in term of groundwater resource.

2. The Aubrac volcanic plateau

The Aubrac volcanic plateau, 450 km² in area, is located in the southwestern part of the French Massif Central (Fig. 1). Reaching 1469 m amsl, edged by the Margeride plateau and dominating the Lot and the Truyère Rivers, it constitutes a well individualised massif. The mean annual rainfall is about 1400 mm.

3. Methodology – Main results

3.1. Structure of the Aubrac volcanic aquifers

3.1.1. Main volcanic formations

The Aubrac plateau is primarily composed of the piling up, during a very short period (ca 250 000

years), during the Upper Tortonian (7.5 Myr), of basaltic lava flows resulting from a Hawaiian type effusive dynamism [10]. During the Quaternary, Aubrac underwent two major phases of glaciation, with the building up of a plateau ice cap, whose erosive action is considered as minor [25].

In Aubrac, most of the volcanic rocks are lava flows (Fig. 2). They are characterised by both an interstitial porosity (in clinker and scoria levels), and fracture porosity (flow structure, thermal shrinkage cracks...), which frequently confer to them a columnar jointing. They can also be affected by tectonic fracturation permeability. The ejecta products are scarce. They form scoria cones, where a significant porosity may have been preserved; volcanic tuffs are associated to rare maar-type structures.

The Aubrac Plateau has been submitted, during about 4 Myr, during the Miocene, to conditions favouring weathering (fersiallisation) [10]. Nevertheless, considering the brevity of the volcanic episode, the volcanic formation has only slightly been affected by the weathering.

3.1.2. Hydrodynamic properties of the volcanic formations

Due to the lack of exploration or water well in the Aubrac area, no hydrodynamic data is available. Nevertheless, field observations (geology: mostly fissured and/or vuggy basalts, very often unweathered; hydro-

ogy and hydrogeology: hydrogeological context of the volcanic springs, stream sinks or water inflows from the aquifers to the rivers, etc.) demonstrate that the Aubrac volcanic formations, and particularly the lava flows, display a good to very good permeability.

3.1.3. Geological structure of the volcanic formations

Most of the Aubrac volcanic formation poured out within palaeovalleys whose substratum may either be the plutonic or metamorphic basement or older volcanic formations (Fig. 2). The palaeovalleys were quite deep on the southern and western flanks of the plateau as a consequence of the retrogressive erosion of the Lot River, which appears to have been acting prior to, contemporaneously with and later than the deposit of the volcanic rocks. The palaeovalleys are quite shallow on the eastern side of the plateau (Margeride plateau). These palaeovalleys most likely comprise local favourable hydrogeological structures: thick volcanic formations, potentially permeable and saturated with water.

3.1.4. Reconstruction of the infra-volcanic basement morphology at the whole Aubrac scale

The methodology comprised the main following steps:

- (i) integration, within a Geographic Information System (GIS), of the 50-m-resolution Digital Elevation Model (DEM) [11] (Fig. 4);
- (ii) digitalisation and interpolation of the isopach map [26] (Fig. 3) elaborated from an aeromagnetic survey and the previous works of [3],
- (iii) subtraction to the DEM of the isopach map data.

The infra-volcanic basement morphologic map was then iteratively improved, mainly through the integration of geological cross sections elaborated within the palaeovalleys peripheral to the massif. The gradual reduction of the inconsistencies allowed to progress, step by step, towards the heart of the volcanic plateau (Figs. 5 and 6).

The morphology of the infra-volcanic basement (Fig. 6) shows a coherent structure:

- the infra-volcanic surface is globally northwesterly dipping,

- the northwestern and central parts of the plateau comprise remarkable depressions, that may have a tectonic origin:
 - a northwestern zone, without deep palaeovalleys, bounded by a N135°E palaeohill oriented towards the southwest; this palaeodepression is shifted toward the northeast as compared to the present topographic high;
 - the Bès valley, which extends below the Aubrac plateau within a large depression.

As a consequence, the Aubrac plateau appears to hold thick volcanic deposits (200 to 300 m), particularly below its eastern slope. These quite large areas (some tens of square kilometres) constitute very favourable hydrogeological structures.

3.2. Functioning of the Aubrac volcanic aquifers

3.2.1. Inventory of the springs and determination of their emerging context

Eighty-nine springs have been identified. Most of the low discharge ones (a few litres per minute or less) are emerging from superficial formations (morainal formations, peat bog, etc.). The highest discharge springs are inter- (33 springs) or infra- (23 springs) basaltic flow springs. The high low-water discharge of the volcanic springs confirms the good hydrodynamic properties of the volcanic formations.

3.2.2. Spatial variations of the low water discharge of the streams

Differential gauging within small watersheds (5 to 10 km²) showed that they are characterised by high low-water specific discharges (more than 10 l s⁻¹ km⁻²). It confirms the existence of significant aquifers. Moreover, the specific discharges are characterised by sharp spatial variations. Partial stream sinks and important inflows to the streams are very common and can be linked to the local geological and hydrogeological properties.

4. Conclusions and prospects

The hydrogeological properties of the Aubrac plateau are similar to those of other volcanic formations of similar lithology in France or in the world. Mostly constituted by lava flows, they display good

hydrodynamic properties and they hold specific structures that may store large volumes of groundwater. They thus constitute an aquifer of regional importance.

Two types of hydrogeological targets may be prospected:

- superficial wells (< 100 m), targeting favourable palaeovalley-type structures, may provide about 10 to 100 m³ h⁻¹ per well;
- deeper wells (200 to 300 m), crosscutting the whole volcanic pile, within infra-volcanic depressions, preferably on the eastern flank of the Aubrac massif where the volcanic formations may have little interactions with the streams, could provide several 100 m³ h⁻¹ per well.

1. Introduction – Objectifs

La région de l'Aubrac, compte tenu de sa structure géologique (substratum plutonique et métamorphique, partiellement recouvert de formations volcaniques plus récentes), est représentative de nombreux secteurs du Massif central français. Elle est jusqu'à présent relativement peu connue du point de vue hydrogéologique.

En dehors des secteurs comprenant des formations volcaniques, cette région est confrontée à des problématiques de ressources en eau semblables à celles d'autres zones de socle (Massif central, Bretagne, etc.). Les communes sont quasi exclusivement alimentées par des sources, de faible débit (voisin de 1 m³ h⁻¹ en étiage), et dont l'étiage coïncide avec les périodes de forte consommation : estivale, lorsque la fréquentation touristique est maximale, et hivernale, lors des périodes sèches d'hiver, durant lesquelles les troupeaux sont à l'étable [20]. Les forages sont susceptibles de fournir des débits plus importants, mais qui excèdent rarement 5 à 10 m³ h⁻¹ [16,17,19].

Par comparaison, les aquifères volcaniques connus en France (chaîne des Puys, Velay, etc.) ou dans le monde [1,4-6,13,20] sont susceptibles de fournir des débits beaucoup plus importants. Le débit des sources atteint plusieurs dizaines de mètres cubes par heure voire, dans certains forages très favorables, plusieurs centaines de mètres cubes par heure.

Le présent projet avait pour principaux objectifs, d'une part, de préciser la structure géologique et hydrogéologique du plateau volcanique de l'Aubrac et,

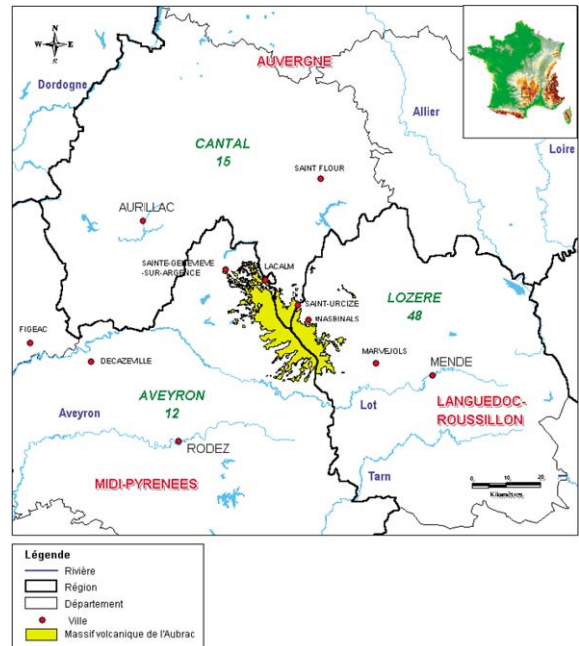


Fig. 1. Carte de localisation géographique du plateau volcanique de l'Aubrac.

Fig. 1. Location of the Aubrac volcanic plateau. Legend: river, region, department, city, Aubrac volcanic massif, cross section (Fig. 2).

d'autre part, d'en déduire s'il présente des potentialités significatives en termes de ressources en eau souterraine.

2. Le plateau volcanique de l'Aubrac

Le plateau volcanique de l'Aubrac se situe dans la partie sud-ouest du Massif central (Fig. 1). Il constitue un massif bien individualisé, d'une superficie d'environ 450 km², d'une trentaine de kilomètres d'allongement (NW–SE) et d'une largeur d'environ 10 km, culminant à 1469 m NGF. Il domine, à l'est, le plateau de la Margeride, d'altitudes comprises entre 1000 et 1200 m environ, et les vallées du Lot au sud et de la Truyère au nord, profondément incisées. Il est bien arrosé par les précipitations (pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 1200 et 1600 mm, avec un gradient altitudinal marqué et des effets de fœhn, pluviométrie efficace voisine de 600 à 700 mm). L'occupation du sol est dominée par l'activité agricole (pâturages–élevage bovin) et par des secteurs boisés (feuillus et résineux).

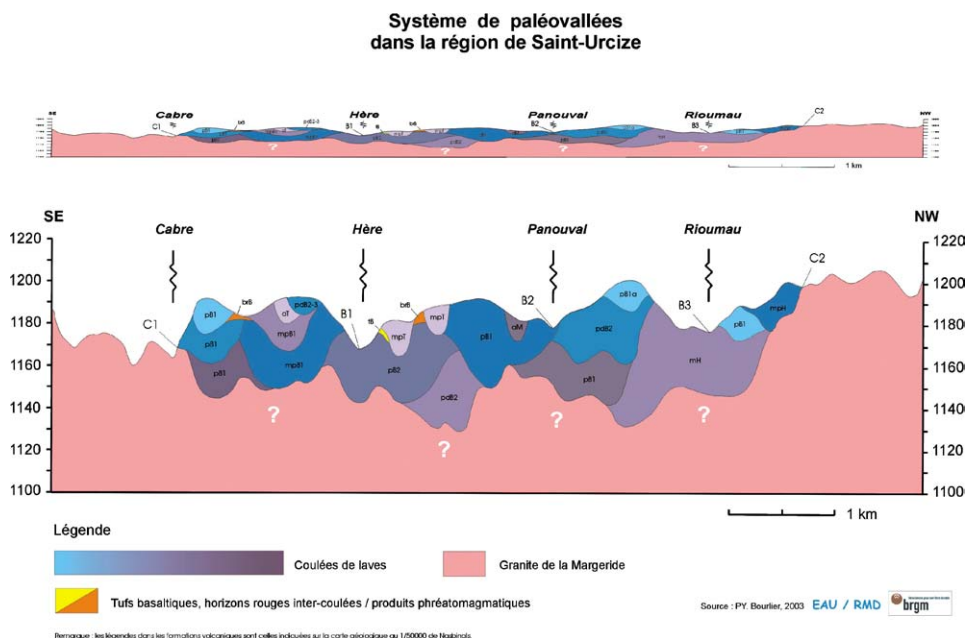


Fig. 2. Coupe géologique illustrant la géométrie du système de paléovallées de la région de Saint-Urcize (voir localisation sur la Fig. 1).

Fig. 2. Geological cross section within the palaeovalleys of the Saint-Urcize area (see location in Fig. 1). Legend: lava flows; basaltic tuffs, reddish interflow levels/phreatomagmatic products; Margeride granite.

Les communes (plateau volcanique s.s. et régions de socle voisines) font face à des besoins croissants en eau liés à l'augmentation (modeste) de la population, mais aussi et surtout au développement de la fréquentation touristique. Cette augmentation de l'attractivité de la région est liée, pour une part, à la proximité de l'axe autoroutier A75.

Le plateau volcanique de l'Aubrac est donc susceptible de constituer une région d'intérêt significatif du point de vue de sa ressource en eau souterraine. Actuellement, la pression anthropique étant relativement faible, les eaux de surface et souterraines, peu minéralisées, présentent généralement une bonne qualité physico-chimique et ne font pas l'objet de menaces significatives.

3. Méthodologie – Principaux résultats

Le projet a mis en œuvre des moyens les plus légers possibles : synthèse des connaissances, géologie de terrain, reconstitution de la morphologie du substratum infra-volcanique, jaugeages, hydrogéologie de terrain, etc.

3.1. Structure des aquifères volcaniques de l'Aubrac

3.1.1. Principales formations volcaniques

Le plateau de l'Aubrac est essentiellement composé d'un empilement de coulées de laves basaltiques dues à un dynamisme effusif de type hawaïen [10]. Ces formations volcaniques se sont, pour l'essentiel, mises en place au cours d'une période très courte (environ 250 000 ans), au Tortonien supérieur (7,5 Ma).

L'Aubrac a connu, pendant près de 4 Ma, au Miocène principalement, un climat propice à la fersiallisation [9]. Cette altération sous climat chaud et humide a pu influencer le modelé général du massif (arrondissement et aplanissement des reliefs). Compte tenu de la brièveté de l'épisode volcanique, ces processus d'altération ont néanmoins assez peu affecté la masse de l'empilement volcanique.

Au Quaternaire, l'Aubrac a subi deux phases majeures de glaciation (Riss et Würm), avec mise en place d'une calotte glaciaire (*ice cap*). Les formations superficielles de type glaciaire sont donc très représentées au sein du massif. Cependant, l'action érosive d'une calotte glaciaire de plateau, très statique, est considérée comme peu efficace [25]; celle-ci peut

même jouer un rôle protecteur vis-à-vis de l'érosion fluviale.

La quasi-totalité du plateau volcanique de l'Aubrac est couverte par la cartographie géologique à 1:50 000 [8,9,24,28]. Ces cartes, scannées et géoréférencées (cf. Fig. 1), ont permis l'élaboration d'une carte géologique synthétique.

Les coulées de laves sont nettement majoritaires (exemple sur la Fig. 2). Elles présentent une porosité d'interstices, au sein des niveaux scoriacés de toit et base de coulée, et une porosité de fissures (figures de flux, fentes de retrait thermique, etc.), qui leur confèrent fréquemment un débit en orgues ou en dalles. Elles montrent, de manière très localisée, des vides, du fait de la présence de tunnels de lave et/ou de moules externes de troncs d'arbre. Elles peuvent être dotées d'une perméabilité de fracture (fractures d'origine tectonique, liées au tassement différentiel, etc.). Cependant, la cartographie géologique ne mentionne que quelques rares failles affectant les formations volcaniques et aucun indice de terrain de ce type n'a été observé. Néanmoins, les formations superficielles (morainiques en particulier) masquent fréquemment les terrains volcaniques et il n'a pas été procédé à une recherche spécifique de tels indices sur le terrain.

Les projections volcaniques sont subordonnées. Elles se présentent sous la forme :

- de tufs volcaniques (dynamisme explosif hydro-magmatique de type « maar »), souvent lités, généralement indurés, peu voire non poreux. Très peu de structures de type « maar » sont actuellement identifiées en Aubrac. Néanmoins, en règle générale, les maars sont fréquents au sein des plateaux basaltiques [2]. Ils y constituent des structures favorables du point de vue hydrogéologique [2,22] ;
- de cônes de scories (dynamisme de type « strombolien »), plus représentés en Aubrac. Ils semblent montrer une porosité plus importante que celle des tufs.

Certaines autres formations volcaniques sont localement présentes : dykes, intrusions, lac de laves, etc.

À l'affleurement, les formations volcaniques sont, en règle générale, peu à non altérées.

3.1.2. Propriétés hydrodynamiques des formations volcaniques

En l'absence de forage, aucune donnée spécifique à l'Aubrac n'a pu être recueillie. Cependant, les éléments bibliographiques sont nombreux. Ainsi, si le basalte massif est très peu perméable, la perméabilité de laves saines comprenant des niveaux scoriacés de toit et de base de coulée et/ou de la fissuration peut atteindre des valeurs de l'ordre de 4×10^{-2} à $6 \times 10^{-1} \text{ ms}^{-1}$ (voir par exemple [7,12,15]).

Les observations de terrain (basaltes fissurés et/ou bulleux, souvent très sains) permettent donc d'envisager que les formations volcaniques de l'Aubrac, et plus particulièrement les laves, présentent une bonne perméabilité. Par ailleurs, les observations hydrologiques réalisées dans le secteur de Saint-Urcize (sources, mais aussi et surtout pertes ou venues d'eau significatives au sein des cours d'eau, en particulier au droit de certaines coulées de lave ; cf. §3.2), confirment ces fortes perméabilités potentielles.

3.1.3. Structure géologique des formations volcaniques

Les données bibliographiques, cartographiques et les observations de terrain confirment que la plupart des formations volcaniques de l'Aubrac se sont mises en place au sein de structures de type « paléovallée », dont le substratum est composé, soit du socle, soit de formations volcaniques antérieures (voir exemple sur la Fig. 2). Dans le second cas, il est en général plus délicat d'identifier la géométrie des paléovallées, sauf à mettre en œuvre des reconnaissances (géologiques en particulier) détaillées.

Les paléovallées sont significativement incisées sur les versants ouest et sud du massif, en raison de l'érosion régressive liée au Lot, qui apparaît comme à la fois préexistante, contemporaine et postérieure au volcanisme (les incisions postérieures au volcanisme se placent en général de part et d'autre des paléovallées et génèrent ainsi des structures en inversion de relief). Cette observation est conforme au contexte de surrection généralisée que subissait le Massif central au Miocène (Burdigalien et Tortonien), qui s'accompagnait d'une forte incision par le réseau hydrographique [9, 23,27]. Les paléovallées sont moins profondes sur le versant est du massif (plateau de la Margeride).

Une analyse de détail de la structure géologique des paléovallées permettra d'y trouver des structures

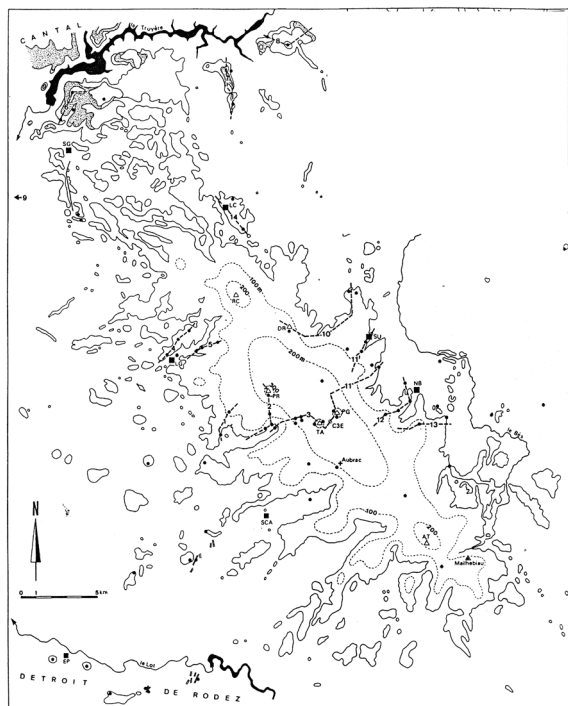


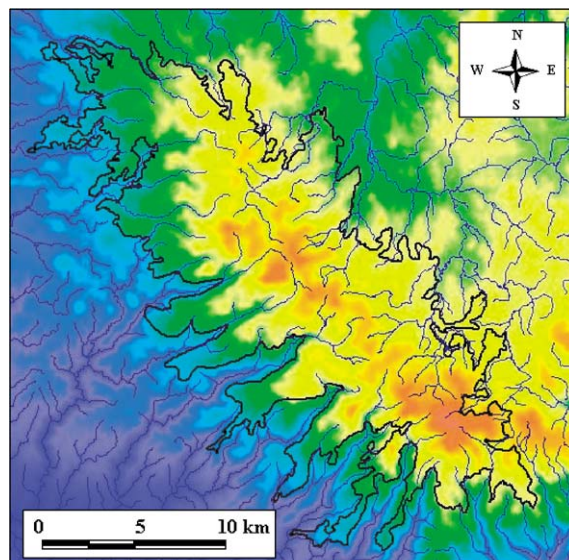
Fig. 3. Carte isopaque des formations volcaniques de l'Aubrac (d'après [26]) (épaisseurs en mètres). Localités : **SG**, Sainte-Geneviève-sur-Argence; **LC**, Lacalm; **LG**, Laguiole; **SU**, Sainte-Urcize; **Na**, Nasbinals; **A**, Aubrac; **SCA**, Saint-Chély-d'Aubrac; **EP**, Espalion. Principaux sommets : **RC**, roc de Cayla; **DR**, Le Drelrier; **PR**, puech de Roussillon; **TA**, truc d'Aubrac; **PG**, puy de la Gudette; **C3E**, col de la Croix-des-Trois-Évêques; **AT**, puech d'Alte Teste.

Fig. 3. Isopach map of the Aubrac volcanic formations (from [26]) (thickness in metres). Town and villages: **SG**, Sainte-Geneviève-sur-Argence; **LC**, Lacalm; **LG**, Laguiole; **SU**, Sainte-Urcize; **Na**, Nasbinals; **A**, Aubrac; **SCA**, Saint-Chély-d'Aubrac; **EP**, Espalion. Principal summits: **RC**, roc de Cayla; **DR**, Le Drelrier; **PR**, puech de Roussillon; **TA**, truc d'Aubrac; **PG**, puy de la Gudette; **C3E**, col de la Croix-des-Trois-Évêques; **AT**, puech d'Alte Teste.

locales favorables du point de vue hydrogéologique : épaisseurs significatives de formations volcaniques potentiellement perméables et saturées en eau.

3.1.4. Reconstitution de la morphologie du substratum infra-volcanique

La connaissance de la morphologie du substratum des formations volcaniques aide à localiser des secteurs où des épaisseurs importantes de produits volcaniques perméables sont présentes. À l'échelle de l'en-



Altitudes (en m)

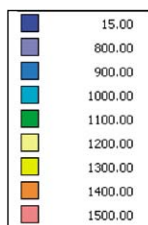


Fig. 4. Topographie actuelle du plateau de l'Aubrac (MNT, d'après [11]). Le trait noir figure la limite d'extension des formations volcaniques, les traits bleus, le réseau hydrographique.

Fig. 4. Present topography of the Aubrac volcanic plateau (DEM, from [11]). Elevation (in metres). The black line represents the limits of the volcanic formations, and the blue lines, the river network.

semble du massif, cette connaissance permet d'orienter les prospections hydrogéologiques.

Colin [3], puis Roux et Sénard [26] ont respectivement proposé une esquisse schématique de la morphologie du substratum infra-volcanique et une carte isopaque des formations volcaniques (Fig. 3); ces derniers travaux intègrent l'interprétation d'un lever aéromagnétique. Les auteurs montrent que le substratum infra-volcanique est une surface diversifiée, légèrement pentée d'est en ouest, et que la dissymétrie morphologique régionale préexistait au volcanisme.

La méthodologie mise en œuvre dans le cadre du travail de recherche a compris les principales étapes suivantes :

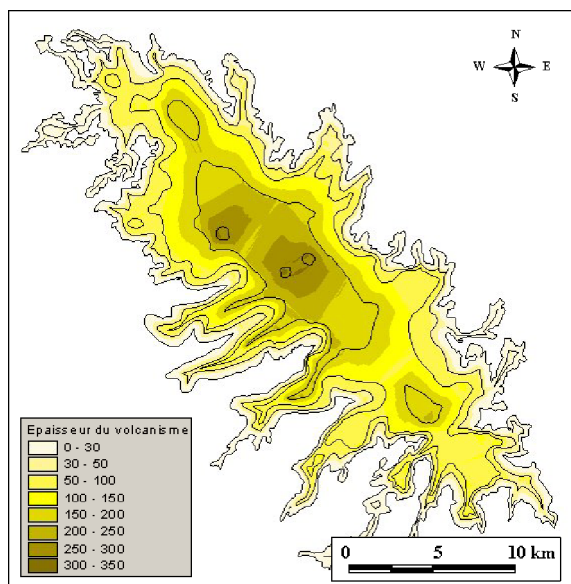
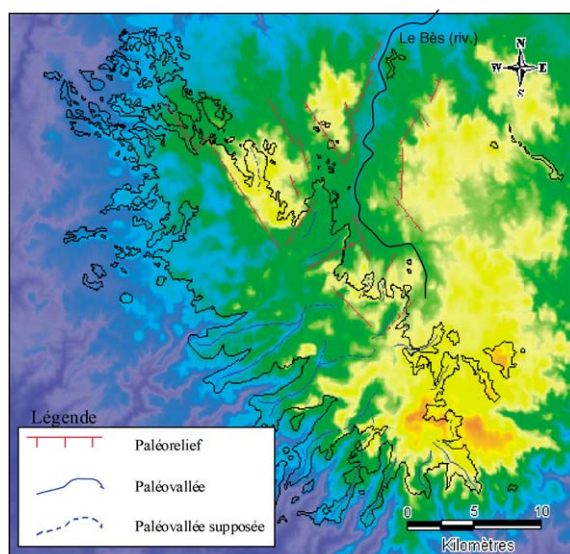


Fig. 5. Carte isopaque révisée des formations volcaniques de l'Aubrac.

Fig. 5. Revised isopach map of the Aubrac volcanic formations. Legend: thickness in metres.

- (i) intégration, sous système d'information géographique (SIG), du modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN [11] à 50 m de résolution (Fig. 4), de précision inframétrique en Z ;
- (ii) digitalisation et interpolation de la carte isopaque établie par Roux et Sénaud [26] selon le même maillage que celui du MNT ;
- (iii) soustraction, au MNT IGN, des données issues de la carte isopaque.

La carte de la morphologie du substratum infra-volcanique a ensuite été améliorée progressivement, de manière itérative : la carte isopaque disponible [26] était peu précise au droit des principales paléovallées. La principale voie suivie pour l'amélioration de la morphologie infra-volcanique a donc consisté, sur la base de coupes géologiques sériées au droit des paléovallées, dont la morphologie est bien définie du fait de la bonne cartographie du contact formations volcaniques sur socle, à y affiner le modèle isopaque. Ce premier travail a mis en évidence des incohérences morphologiques immédiatement en amont de ces digitations. La résorption de ces incohérences a permis de progresser, de proche en proche, jusqu'au cœur du plateau volcanique, aussi bien d'ouest en est que d'est en



Altitudes (en m)

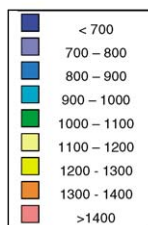


Fig. 6. Carte révisée de la morphologie du substratum des formations volcaniques de l'Aubrac.

Fig. 6. Revised map of the Aubrac infra-volcanic basement morphology. Legend of the elevations similar to Fig. 4. Palaeohill, palaeovalley, inferred palaeovalley.

ouest (et, dans une moindre mesure, à partir des paléovallées situées au sud-est et au nord-ouest du massif) et de réduire les incertitudes du modèle originel (Figs. 5 et 6).

En raison de la brièveté de l'épisode volcanique, la configuration géologique la plus communément rencontrée en Aubrac est celle d'un empilement de coulées, comprenant des migrations latérales consécutives, mais pas de surcreusement important entre plusieurs coulées successives assurant le remplissage d'un même système de paléovallées (cf. Fig. 2 et [9]). De ce fait, la méthodologie adoptée n'introduit pas de biais aux nouvelles cartes élaborées. Leur précision est maximale au sein d'une grande partie centrale et sud du plateau de l'Aubrac, dans le secteur où les paléovallées forment des digitations bien définies. La précision

est a priori moindre dans sa partie nord (substratum constitué principalement par le bassin oligocène de Graissac–Sarrans), qui comprend moins de paléovallées.

La morphologie du substratum infra-volcanique (Fig. 6) montre une structure cohérente :

- dans son ensemble, la surface infra-volcanique est pentée du sud-est vers l'ouest et le nord-ouest. Deux pôles d'altitude élevée s'individualisent au sud-est, d'une part, et au nord, d'autre part, mais dans une moindre mesure ;
- certaines aires montrent un relief en creux, elles sont remarquables dans les parties nord-ouest et centrale du massif. Des directions tectoniques sont très probablement à l'origine de ces structures :
 - zone nord-ouest : déprimée, elle ne présente pas de paléovallées très incisées. Elle est bordée par un paléorelief N135°E environ à regard vers le sud-ouest, déporté vers le nord-est par rapport au faite topographique actuel. Il s'étend vers le sud, depuis l'extrémité nord du massif, sur environ les deux tiers de sa longueur. À son extrémité sud, il semble limité par une structure similaire, d'orientation SW–NE. Compte tenu de son orientation, similaire à de grandes structures régionales (graben de la Margeride en particulier) et de la présence d'un substratum au moins partiellement composé de bassins oligocènes, il est probable que ce paléorelief correspond à une ou plusieurs failles normales, ayant joué au moins à l'Oligocène ;
 - la vallée du Bès, orientée NNE–SSW, semble se prolonger sous le plateau de l'Aubrac. Ainsi, dans la région de Saint-Urcize, les séries volcaniques prennent place dans une large dépression entre deux ensembles granitiques surélevés.

La morphologie générale du substratum des formations volcaniques suggère l'existence de structures déprimées d'extension importante. Il en résulte la présence, en particulier sous le versant est du massif, de fortes épaisseurs de formations volcaniques – jusqu'à 300 m –, que la morphologie de surface ne laisse pas soupçonner. Ces domaines, d'extension importante (plusieurs kilomètres carrés à quelques dizaines de kilomètres carrés), constituent des structures très favorables du point de vue hydrogéologique.

3.2. Fonctionnement des aquifères volcaniques de l'Aubrac

3.2.1. Recensement des sources et contexte d'émergence

Quatre-vingt-neuf sources ont été recensées au sein du plateau volcanique, sur la base des données disponibles au sein de la Banque de données du sous-sol du BRGM (<http://www.brgm.fr>) et de la cartographie à 1:25 000. Certaines d'entre elles ont fait l'objet d'une caractérisation de leur contexte d'émergence par des observations de terrain.

La majorité des sources, à très faible débit d'étiage (quelques litres par minute, voire moins), correspondent à l'exutoire de formations superficielles (formations morainiques, tourbes, etc.). Les sources à plus fort débit (souvent plus de 1 l s^{-1}) en étiage, sont aussi bien des sources « intercoulées » (33 sources recensées), issues d'un niveau perméable (toit ou de base de coulée en général) reposant sur des formations moins perméables (paléosol, coulée massive, etc.), que des sources « infrabasaltiques » (23 sources recensées), situées à l'interface entre le socle et les formations volcaniques. Le débit significatif de ces sources en étiage confirme les bonnes propriétés hydrodynamiques des formations volcaniques.

Ces sources, particulièrement celles présentant les plus forts débits, constituent actuellement la principale source d'alimentation en eau des communes du massif.

3.2.2. Évolution spatiale des débits d'étiage des cours d'eau

La réalisation de jaugeages différentiels au sein de petits bassins versants volcaniques (5 à 10 km^2) a montré leur fort débit spécifique d'étiage ($10 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ en moyenne), significativement plus élevé qu'au sein de bassins versants de socle situés dans un contexte similaire (moins de $1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ [18]). Ceci montre l'existence d'aquifères qui assurent un soutien significatif du débit d'étiage des cours d'eau.

Les débits spécifiques montrent une très forte variabilité spatiale, avec des zones de pertes partielles et des zones d'alimentation importantes des cours d'eau par les aquifères, qui peuvent être corrélées à la géologie (alternance de formations perméables et imperméables) et à l'hydrogéologie (charges hydrauliques au sein des différents aquifères).

4. Conclusions et perspectives

L'apport de la connaissance géologique aux différentes échelles est de première importance pour la compréhension de la structure hydrogéologique des aquifères volcaniques et l'évaluation de leurs potentialités. Les formations volcaniques de l'Aubrac ne se distinguent donc pas des autres ensembles volcaniques de nature lithologique similaire. Elles présentent des propriétés assez proches de celles du plateau basaltique du Devès [21]. Composées majoritairement de laves, elles montrent de bonnes propriétés de perméabilité, des structures – des paléovallées ou dépressions, mais aussi potentiellement des maars – susceptibles de renfermer des volumes d'eau importants et une aptitude très significative à la recharge par les précipitations. Elles constituent donc, sans aucun doute, un ensemble aquifère d'importance à l'échelle de la région considérée, pouvant faire l'objet, non plus seulement d'une économie de cueillette (recueil du débit de débordement des sources), mais d'une gestion active au moyen de forages.

Dans la perspective d'une mise en valeur, deux types de cibles hydrogéologiques peuvent être prospectées :

- des *cibles superficielles* (forages de profondeur inférieure à 100 m), visant des maars ou des structures de type « paléovallée » favorables – formations volcaniques à dominante de laves, d'une épaisseur localement importante, saturées en eau, bien rechargées. Ces structures pourraient être recherchées au moyen d'investigations géologiques et hydrogéologiques (localisation des sources, jaugeages différentiels, etc.) détaillées et de prospections géophysiques de subsurface (panneaux électriques par exemple). Les débits attendus pourraient se situer dans une fourchette de 10 à 100 m³ h⁻¹ par forage. Il conviendra de privilégier des sites peu susceptibles d'interactions fortes avec les cours d'eau ou les sources, afin de préserver les débits d'étiage ;
- des *cibles plus profondes* (forages pouvant atteindre 300 m de profondeur), recoupant l'ensemble de l'empilement volcanique, dans les secteurs déprimés du substratum, de préférence sur le versant est du massif, où ces formations sont peu susceptibles de montrer des interactions si-

gnificatives avec les cours d'eau. La localisation de ces secteurs favorables pourrait être précisée à partir de la cartographie du substratum proposée au sein de ce travail, au moyen de géologie de terrain (éviter des zones hydrothermalisées ou injectées tardivement), en réinterprétant les données aéroportées disponibles (aéromagnétisme en particulier), en utilisant les mesures gravimétriques existantes (voir [14] par exemple) et en réalisant des prospections géophysiques profondes. Les forages pourraient donner des débits de l'ordre de plusieurs centaines de m³ h⁻¹ par ouvrage. Il conviendra alors tout particulièrement de préciser et de quantifier les modalités de renouvellement des eaux exploitées.

Remerciements

Les travaux de recherche ont été réalisés sur crédits de recherche du BRGM dans le cadre du projet de recherche « Structure et fonctionnement des aquifères de socle et volcaniques » (projet 03EAUR04). Nous remercions tout particulièrement la direction de l'Agriculture et de la Forêt de l'Aveyron (M. Bousquet) pour la communication de données, P. Rocher et Clotilde Bertin (BRGM, SGR Auvergne), F. Tilloloy (BRGM, SGR Midi Pyrénées) pour leur aide et conseils, ainsi que les deux relecteurs, B. Blavoux et G. de Marsily.

Références

- [1] B. Blavoux, P. Lachassagne, M. Livet, Hydrogéologie des aquifères volcaniques, in : Eaux souterraines de la France, AIH, BRGM, Paris (sous presse).
- [2] P. Boivin, M. Livet, Les anneaux de tufs enfouis : une nouvelle cible pour la recherche de ressources en eau en terrain volcanique. L'exemple des captages de Vourzac (Devès, Massif central français), C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA 332 (2001) 761–767.
- [3] F. Colin, Étude géologique du volcanisme basaltique de l'Aubrac (Massif central français), thèse d'État, université de Clermont-Ferrand, 1966, Mém. BRGM n°62, 1971.
- [4] J.V. Cruz, M.O. Silva, Hydrogeologic framework of Pico Island, Azores, Portugal. Hydrogeol. J. 9 (2) (2001) 177–189.
- [5] E. Custodio, Geohidrologia de terrenos e islas volcanicas, Instituto de Hidrologia, Centro de Estudios Hidrograficos, Madrid, 1978, 303 p.
- [6] E. Custodio, Hydrologia Subterranea, Omega, Barcelone, Espagne, 1983.

- [7] E. Custodio, L. Lopez Garcia, E. Amigo, Simulation par modèle mathématique de l'île volcanique de Ténériffe (Canaries, Espagne), *Hydrogéologie* 2 (1988) 153–167.
- [8] A. Goër de Herve, Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille d'Entraignes-sur-Truyère, 836, BRGM, Orléans, 2001.
- [9] A. Goër de Herve, J.-P. Couturié, Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille Nasbinals, 837, BRGM, Orléans, 1994.
- [10] A. Goër de Herve, J.-C. Baubron, J.-M. Cantagrel, J. Makhoul, Le volcanisme de l'Aubrac (Massif central) : un bref épisode basaltique (250 000 ans) au Miocène supérieur, *Géol. France* 4 (1991) 3–14.
- [11] IGN, Modèle numérique de terrain, Extraits de BD ALTI, 1994.
- [12] K. Jawaheer, V. Proag, Groundwater aquifers of Mauritius, *Hydrogéologie* 2 (1988) 125–134.
- [13] J.-L. Join, J. Coudray, Caractérisation géostructurale des émergences et typologie des nappes d'altitude en milieu volcanique insulaire (île de la Réunion), *Geodyn. Acta* 6 (4) (1993) 243–254.
- [14] D. Khattach, P. Keating, E.M. Mili, T. Chennouf, P. Andrieux, A. Milhi, Apport de la gravimétrie à l'étude de la structure du bassin des Triffa (Maroc nord-oriental) : implications hydrogéologiques, *C. R. Geoscience* 336 (2004) 1427–1432.
- [15] H. Kulkarni, S.B. Deolankar, A. Lalwani, J. Bijoy, S. Pawar, Hydrogeological framework of the Deccan basalt groundwater systems, west-central India, *Hydrogeol. J.* 8 (2000) 368–378.
- [16] P. Lachassagne, R. Wyns, Structure et fonctionnement des aquifères de socle : résultats récents acquis en Margeride (Lozère), in : (« Eau souterraine » (numéro spécial)), *Revue de l'Agence de l'eau Adour-Garonne* (2002) 24–26.
- [17] P. Lachassagne, R. Wyns, Structure et fonctionnement des aquifères de socle, in : *Eaux souterraines de la France*, AIH, BRGM (sous presse).
- [18] P. Lachassagne, J.-L. Izac, V. Petit, P. Weng, 00EAU01. Hydrogéologie des aquifères discontinus. Ressources en eau Margeride ouest. Forages de reconnaissance et pompages d'essai au sein des aquifères de socle. Synthèse des résultats du volet « socle » du projet, Rapport BRGM n° RP-50871, 2001.
- [19] P. Lachassagne, R. Wyns, P. Bérard, T. Bruel, L. Chéry, T. Coustand, J.-F. Desprats, P. Le Strat, Exploitation of high-yield in hard-rock aquifers: Downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones, *Ground Water* 39 (4) (2001) 568–581.
- [20] P. Lachassagne, M. Cruchet, D. Lebon, T. Adin, Structure hydrogéologique des îles basaltiques anciennes : apport d'une campagne de reconnaissance hydrogéologique à Mayotte (Comores, France), *Bull. Soc. géol. France* (soumis).
- [21] M. Livet, Hydrogéologie des aquifères volcaniques du Devès, in : *Eaux souterraines de la France*, AIH, BRGM (sous presse).
- [22] M. Livet, B. Blavoux, D. d'Arcy, A. Mischellany, Capture et emmagasinement sous coulée au site volcanique de Beaunit (Puy-de-Dôme), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 330 (2000) 47–52.
- [23] L. Michon, O. Merle, The evolution of the Massif Central rift: spatio-temporal distribution of the volcanism, *Bull. Soc. géol. France* 172 (2) (2001) 201–211.
- [24] P. Rocher, Carte géologique de la France à 1:50 000, feuille de Espalion, 861, BRGM, Orléans (en cours de levé).
- [25] J. Rouire, C. Rousset, Causses, Cévennes, Aubrac, Guides géologiques régionaux, Masson, Paris, 1980, 190 p.
- [26] J. Roux, G. Sénaud, Le lever aéromagnétique Massif central 1975 : étude de quelques anomalies caractéristiques liées au volcanisme et au socle, thèse 3^e cycle, université Clermont Ferrand-2, 1978.
- [27] M. Séranne, H. Camus, F. Lucazeau, J. Barbarand, Y. Quinif, Surrection et érosion polyphasées de la bordure cévenole. Un exemple de morphogenèse lente, *Bull. Soc. géol. France* 173 (2) (2002) 97–112.
- [28] H. Traineau, Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille de Saint-Geniez-d'Olt, 860, BRGM, Orléans (en cours de levé).