

COLLOQUE INTERNATIONAL – DIJON 2006

GESTION DES GRANDS AQUIFERES

Communications par des membres des Amis des Sources :

- Philippe Crochet : Darcy 91
- Michel Lepiller : Darcy 97
- Pierre de Bretizel : Darcy 04

Résumés

DARCY 91

Exemple d'un suivi piézométrique en milieu urbain. Suivi de la nappe des sables astiens sur la ville de Montpellier en vue de l'analyse des niveaux de hautes eaux

Philippe CROCHET

ANTEA. 1025 rue Henri Becquerel, 34 000 Montpellier, France, p.crochet@antea-ingenierie.fr

La ville de Montpellier a engagé en 1996 des études pour la remise en navigabilité du Lez, petit fleuve côtier traversant l'agglomération, avec comme objectif la création d'un port à Montpellier (Port Marianne). Ce projet nécessite un rehaussement de la ligne d'eau du Lez qui peut modifier les niveaux de la nappe contenue dans les sables altiers. Afin de quantifier cet impact, un modèle hydrodynamique multicouche incluant les relations nappe - rivière a été réalisé de façon à intégrer les différents facteurs hydrogéologiques mis en jeu.

Les sables astiens sont largement présents sur la ville de Montpellier. Cette formation, épaisse d'environ 50 m, repose sur les marnes Imperméables du Plaisancien et s'ennoie sous les cailloutis du Villafranchien au Sud. Sa faible perméabilité $2 \cdot 10^{-6}$ à 10^{-5} m/s) en fait un aquifère médiocre ne présentant pas d'intérêt pour l'alimentation en eau potable. Il existe sous le Lez un horizon d'alluvions graveleuses plus perméables mais dont l'extension et l'épaisseur (0,5 m à 1 m) sont très limitées.

Après avoir été calé en régime permanent, le modèle hydrodynamique a été utilisé pour diverses simulations qui ont permis, d'une part d'évaluer le relèvement de la nappe suivant différents scénarios d'aménagement (notamment vis-à-vis de la cote de rehausse du Lez), d'autre part de définir des mesures compensatoires.

Les résultats de ces calculs ont permis de mettre en évidence des secteurs sensibles aux remontées de nappe sur l'agglomération montpelliéraine. Aussi, afin de disposer de chroniques de référence permettant de mieux apprécier la situation actuelle et l'impact du projet après réalisation des travaux, la mairie de Montpellier a souhaité disposer d'un réseau de surveillance de la nappe sur ces zones. Sept ouvrages réalisés en rive droite du fleuve ont ainsi fait l'objet d'un suivi en continu des niveaux de la nappe entre 1997 et 2003. Les niveaux de hautes eaux peuvent être appréciés directement à partir de ces données, ou après mise en œuvre d'un modèle hydrologique global qui permet de reconstituer par simulation, après calage de: niveaux observés, une chronique piézométrique sur une période suffisamment longue.

Les résultats obtenus peuvent être utilisés pour différentes applications :

- ❖ valeur de références opposables en cas de contentieux sur l'impact de projets d'aménagement sur les niveaux de la nappe,
- ❖ conception d'ouvrages souterrains (cas notamment des parkings souterrains de la nouvelle mairie de Montpellier qui doit être construite en bordure du Lez).

Cet exemple montre l'intérêt des réseaux de surveillance piézométrique en milieu urbain sur des aquifères secondaires vis-à-vis de leurs potentialités pour l'alimentation en eau potable, mais qui doivent être pris en compte dans le cadre de projets d'aménagement comprenant des infrastructures souterraines atteignant la nappe.

Références

Braneyre M., Crochet Ph., 1996 - Port Marianne - Etude complémentaire de faisabilité pour la remise en navigabilité du Lez - Synthèse de l'étude hydrogéologique. rapport ANTEA A 7202, 29 p.

Schwartz I., Poirot N., Barthélemy Y., 2005 - Nouvelle Mairie de Montpellier - Modélisation hydrodynamique du quartier de la Grappe pour évaluer l'impact sur les eaux souterraines des aménagements de la nouvelle Mairie, rapport ANTEA A 33407, 41 p.

DARCY 97

Etude hydrogéologique (France) de la partie ouest du Causse de Sauveterre (France)

Bernard BLAVOUX¹, Stéphane BRUSSET² Laurent BRUXELLES³, Laurent DANNEVILLE⁴, Michel LEPILLER⁵, Alain MANGIN⁶, Pierre MARCHET⁷

1 Université d'Avignon, laboratoire d'hydrogéologie, Faculté des Sciences, 33 rue Louis Pasteur 84000 Avignon (France) - bernard.blavoux@univ-avignon.fr

2 Laboratoire des Mécanismes et Transferts en Géologie, UMR 5563 UR 154 CNRS université Paul Sabatier IRD, 14, avenue Edouard Belin - 31400 Toulouse (France) - stephane.brusset@lmtg.obs-mip.fr

3 INRAP et UMR 8555 "Centre d'Anthropologie" - ZA des Champs Pinsons - 13 rue du négoce - 31650 Saint-Orens-de-Gameville (France) – laurent.bruxelles@inrap.fr

4 Parc Naturel Régional des Grands Causses, 71 Bd de l'Ayrolle, BP 126 12101 Millau Cedex (France) – laurent.danneville@parc-grands-causses.fr

5 Polytech'Orléans - Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans, 8, rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans Cedex 2 (France). Institut des Sciences de la terre d'Orléans, U.M.R. 6113 CNRS - Université d'Orléans – michel.lepiller@univ-orleans.fr

6 Laboratoire Souterrain du CNRS, 09200 Moulis (France) – mangin@ism.cnrs.fr

7 Agence de l'Eau Adour-Garonne, 90 rue du Férétra 31078 Toulouse Cedex (France) - pierre.marchet@eau-adour-garonne.fr

A hydrogeological study was carried out on the whole west part of the Causse de Sauveteurs (France) by the Parc des Grands Causses.

Geochemistry, geomorphology, tectonics, and of course quantitative hydrogeology brought many results for a comprehensive approach of this territory, in order to allow the implementation of the mandatory protection perimeters for drinking water resources.

Dans le cadre de la protection et de la gestion patrimoniale de la ressource en eau, une étude hydrogéologique a été menée, sous l'impulsion du Parc naturel régional des Grands Causses, sur une unité .

karstique cohérente : le Causse de Sauveterre dans sa partie ouest (Causse de Sévèrac, Causse du Massagros et ses avant-causses).

Différents spécialistes ont apporté leur contribution à une approche pluridisciplinaire.

La détermination des bassins d'alimentation des sources importantes a ainsi impliqué la géologie (stratigraphie, analyse structurale et microstructurale : plans de drainage), la géomorphologie (formes karstiques de surface), dont les résultats ont été confrontés avec les éléments fournis par le bilan hydrologique, l'hydrochimie sur la nature du réservoir et les traçages.

Les mêmes disciplines ont été mises en œuvre pour la connaissance de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et de l'importance de la ressource exploitable au moyen de l'analyse :

- ❖ des chroniques de débits (distributions des débits classés fournissant des indices de présence de pertes, de trop pleins et de réserves ; analyses corrélatoires et spectrales et par ondelettes permettant l'évaluation de l'effet mémoire, du temps de régulation et de l'hydrogramme unitaire), des crues, décrues et tarissements (analyse des hydrogrammes fournissant des valeurs de paramètres caractéristiques du fonctionnement de la zone d'infiltration et de l'importance de la zone noyée), ...
- ❖ des données hydrochimiques (amplitude des variations, distribution des fréquences de conductivités et des éléments majeurs marqueurs géologiques et marqueurs anthropiques, analyses en composantes principales, utilisation des concentrations de silice comme indice de remplissage détritique ; temps de séjour de l'eau dans le système...)

- ❖ de la géologie (lithologie, variations de faciès, géométrie du réservoir, densité et directions préférentielles de la fracturation, remplissage des cavités karstiques)
- ❖ de la géomorphologie
- ❖ des traçages et en particulier de l'analyse des caractéristiques du transit des traceurs (quantité de traceur restituée, temps de séjour et vitesse du transit, forme de la distribution des temps de séjour, informations fournies par l'évaluation de la section apparente des drains et des volumes d'eau tracés et écoulés avant le début de la restitution)

L'incidence des activités humaines, évaluée à partir de la détermination des activités polluantes existantes ou potentielles (domestiques, agricoles, industrielles, routières, décharges habilitées ou sauvages...) a été croisée avec l'analyse des données hydrochimiques, celle des formations superficielles et les résultats hydrogéologiques (caractéristiques de la zone d'infiltration, degré de karstification, caractéristiques du transit fournies par les traçages. Cela a conduit à une carte simplifiée de vulnérabilité constituant un outil d'aide à la décision pour l'aménagement du territoire. Des propositions de zones de protection ont été formulées pour la mise en place des périmètres de protection réglementaires des sources captées pour l'alimentation humaine, contribution qui fera partie du dossier soumis à l'avis de l'hydrogéologue agréé.

Des propositions sont également faites (aménagement, coûts..) afin de diminuer l'impact d'activités polluantes.

Tectonique et eaux souterraines des Alpes de Nice – Atlas des Sources

(Présentation de l'ouvrage)

This book displays the results of a 10 years research program performed by « les Amis des Sources » geologists in the southern Alps.

The aim was to bring exhaustive data about groundwater distribution and control by tectonics.

Geomorphological analysis and interpretation by means of digital satellite and air photo processing was the basic tool for geological mapping and field work. It was completed by an inventory of springs occurrences, considered as groundwater surface showings.

Botanical observations were also performed by the Association « Musée Virtuel de la Nature », as a complementary method to locate springs in remote mountain areas.

The main new feature highlighted during this campaign is a dense fracturing and faulting network within a region previously considered as mostly folded, according to local geological maps.

Over a 1200 km² surface, 560 new tectonic structures are outlined, controlling 22 deep aquiferous systems including 8 karstic ones. 228 springs occurrences are described.

This makes the « Alpes de Nice » a distinct tectonic and hydrogeological entity within the Alpine Range and from the neighbouring provençal and ligure domains.

The « Alpes de Nice » include : northwards, parts of paleozoic and crystalline basement terrains of the Mercantour range ; southwards, mesozoic limestones-dolomites-shales series belonging to the provençal domain and paleogen sandstones-shales series belonging to the alpine domain.

The faulting-fracturing pattern outlined here results from the stacking in the same area of two major compressive phases : one, north-south oriented, during Miocene (Styrian phase), the other, northeast- southwest oriented, during Pliocene-Quaternary (Rhodanian phase). Distensive structures, mainly gravity faults and collapses, occur alternatively between the compressive phases and are still active, according to the present time seismic activity.

The result of these successive stress is a highly tectonized block bounded by two major lineaments linking the inner alpine zone (Briançonnais) with the outer alpine zone (Préalpes maritimes) :

- *The Vesubie lineament* stretches from the frontier crest at Mt Clapier in the Mercantour Range to the alluvial plain of the lower Var river. Following approximately a northeast- south-west path, it consists successively of major tectonic structures : the Gordolasque valley gravity fault, the Pont de Véséou strike slip fault, the Lantosque pull-apart diapiric system, the « saut des Français » gravity fault, the La Roquette strike slip fault which cut off the quaternary deposits of the Lower Var valley.
- *The Roya lineament* stretches from the frontier crest at Mt Marguareis, east of the Mercantour Range to the seashore near Nice City. Following a path roughly parallel to the Vesubie one, it consists successively of major tectonic structures : the Refrei faulted syncline axis, the Bergue gravity fault, the Breil gravity fault, the Lavina pull-apart diapiric system, the Perus strike slip fault, the Sospel pull-apart diapiric system, the 18 km long Sainte Thècle strike slip fault which probably continues offshore along an underwater canyon down the continental slope.

Between these two lineaments, the following tectonic groups occur :

- *Dominating the seashore between Nice and Menton*, a succession of thrust faults makes jurassic limestones overlapping upper cretaceous marls (Mt Agel range), more or less in parallel with the coast line. This system is cross-cut by strike slip and gravity faulting such as the Col d'Eze faults group and the Tête de Chien- La Turbie fault, the whole being largely dismantled by late collapsing.
- *Westward, in the Mt Férier Range*, north-south tectonic direction is dominating with major structures : the St Blaise pull-apart diapiric zone, the Aspremont strike slip fault, the Tourette-Levens strike slip fault, the Mt Férier gravity fault which is probably ante-miocen, according to disconformities of lutetian deposits in the Paillon Valley.
- *Eastward, in the Mt Baudon-Mt Braus area*, northwest-southeast thrust faulting crosscut by numerous strike slip faults is the dominant tectonic type.
- *The central part of the prealpine zone* (« Arc de Nice ») is a large paleogen syncline diagonally crosscut all over by a northwest-south-east thrust fault from the Vésubie valley (Mt Roccassiera) to the coastal range (Mt Gorbio), near Menton. The syncline northern margin is in contact with Mercantour basement, showing up here slabbing and repulsing structures between the Vesubie valley and the western slopes of the upper Roya valley.

- *The Mercantour uplift ending to the southeast* is largely due to a succession of gravity faults stepping crystalline basement and permian formation down the Roya valley, between Saorge and the Tende Pass. The most important are the Mt Bego fault, the Lac Vert fault, The Casterino fault, the Viévolà Fault.
- *The north-east edge of the « Alpes de Nice »* is the Mt Marguareis Range at the head of Réfrei valley. It is part of a large anticline, mostly developed along the italian side, overlapping southward paleogen series(flysch series) of the Réfrei valley. The heart of this structure is a jurassic-cretaceous limestone formation which is the most important karst in this region.

These tectonic datas that we have collected highlight a better understanding on groundwater networks, underground flowing and springs occurrences distribution :

In the prealpine zone (« Arc de Nice »), the most important groundwater resource is in the Paillon basin : the aquifer is the upper Jurassic limestones, partly karstified and dolomitized. It is partly sealed from surface by the Cenomanian black shales. The groundwater flow, running southward, is controlled by two major faults : the Férion fault collecting surface waters from the eastern slopes of Mt Férion Range and the Sainte Thècle fault collecting surface waters from the northwest foothills of Mt Agel Range. An important outlet of this karst system is offshore, close to the coast line, at Pissarelles springs (east of Nice) : his flow rate reaches 100 l/s. Another important outlet occur inshore : The Sainte Thècle springs with a 120 l/s flow rate.

Two other jurassic karst systems occur along the coast with offshore outlets : The Larvotto springs (Monaco) controlled by the jurassic collapses of Mt Agel southern slopes (flow rate : 49 l/s) and the Cabbé springs controlled by the La Rocca thrust fault on eastern foothills of Mt Agel (flow rate : 200 l/s).

Karst systems occur as well inside the Jurassic-Trias carbonate beds surrounding the Mercantour paleozoïc nucleus at the northern part of the Alpes de Nice. Here, the sedimentary formations are strongly dislocated by slabbing from the basement, thus inducing karstic dissolutions. The main outlets emerging out of these karsts are the Fournes spring (flow rate : 30 l/s) in the Vésubie valley and, in the upper Roya valley, the SteCatherine borehole (flow rate : 24 l/s), the Tornou springs (flow rate : 10 l/s), the Viévolà spring (flow rate : 50 l/s). East of the Col de Tende, groundwaters of the Marguareis Karst highlands spring out northward and eastward in the italian valleys of the Pesio and the Tanaro.

Along the Mercantour main ridge, numerous outlets spring out from cristalline rocks, paleozoïc conglomerates and siltstones where groundwaters flowing is controlled by distensive fracturing. Most of them are cold waters such as the Lac Vert de Fontanalbe group (flow rate : 15 l/s), the Causega spring (flow rate : 30 l/s), the Pilon spring (flow rate : 70 l/s), the Gaisses spring (30 l/s).

In the Berthemont valley, near Roquebillère, occur the only hot springs known in the Alpes de Nice. Here, where two deep faults cross over, water temperature comes to 27° C with a 47 l/s flow rate in boreholes.

Tectonique et eaux souterraines des Alpes de Nice – Atlas des Sources

Dans cet ouvrage sont exposés les résultats d'un programme de recherches tectoniques et hydrogéologiques dans les Alpes du Sud, effectué de 1994 à 2005 par le groupe Géologie de l'Association « Les Amis des Sources ».

L'objectif était de collecter le maximum d'informations sur la distribution des eaux souterraines et leur contrôle par les structures tectoniques.

L'analyse géomorphologique et la photo-interprétation d'images numériques satellitaires et aériennes ont été les outils de base du travail de cartographie structurale et d'observations sur le terrain. Un inventaire des sources, considérées comme les indices de surface des eaux souterraines, a complété ce programme.

Des observations botaniques par l'Association du « Musée Virtuel de la Nature » ont également été utilisées comme méthode complémentaire pour localiser les sources dans les zones montagneuses isolées.

La principale découverte, au cours de ce programme, est la présence d'un réseau serré de failles et de fractures dans une région considérée auparavant comme principalement plissée, selon les cartes géologiques locales.

Sur un territoire de 1200 km², 560 structures tectoniques nouvelles ont été mises en évidence, contrôlant 22 systèmes aquifères profonds dont 8 de nature karstique. 228 sources ont été inventoriées.

Les Alpes de Nice apparaissent ainsi comme une entité tectonique et hydrogéologique de l'Arc Alpin distincte des domaines voisins provençaux et ligures, englobant, au nord, les terrains cristallins et paléozoïques de la Chaîne du Mercantour, au sud, la série calcaréo-marneuse du Mésozoïque provençal et la série gréso-schisteuse du Paléogène alpin.

La structuration en failles et fractures mise en évidence ici est issue du jeu successif de deux phases compressives majeures : l'une, d'âge Miocène (Phase Styrienne), orientée nord-sud ; l'autre, d'âge Pliocène-Quaternaire (Phase Rhodanienne), orientée nord-est sud-ouest. Des structures de distension, telles que failles gravitaires et hémicycles d'effondrement, se sont mises en place entre ces phases de compression et sont encore actives étant donné l'activité sismique actuelle.

Le résultat de ces contraintes successives a généré un bloc très déformé encadré par deux linéaments majeurs reliant la zone alpine interne (Briançonnais) et la zone alpine externe (Mercantour et Préalpes maritimes) :

- *Le linéament de la Vésubie* s'étend depuis la crête frontalière au Mt Clavier, dans le massif du Mercantour, jusqu'à la plaine alluviale de la basse vallée du Var. Orienté suivant une direction générale nord-est sud-ouest, il aligne les structures tectoniques majeures suivantes : La faille gravitaire de la Gordolasque, le décrochement du Pont de Véséou, le système distensif avec extrusion diapirique de Lantosque, la faille gravitaire du Saut des Français, le décrochement de La Roquette qui recoupe les dépôts quaternaires de la basse vallée du Var.
- *Le linéament de la Roya* s'étend depuis la crête frontalière au Mt Marguareis, à l'est du massif du Mercantour, jusqu'au littoral à l'est de Nice. Orienté suivant une direction plus ou moins parallèle à celle du linéament de la Vésubie, il aligne les structures tectoniques majeures suivantes : la flexure synclinale du Réfrei, la faille gravitaire de Bergue, la faille gravitaire de Breil, le système distensif avec extrusion diapirique de la Lavina, le décrochement du Pérus, le système distensif avec extrusion diapirique de Sospel, la faille décrochante de Sainte Thècle, longue de 18 km qui se prolonge probablement au delà du littoral par un canyon sous-marin entaillant le talus continental.

Entre ces deux linéaments, on observe les groupes tectoniques suivants :

- *Dominant le littoral entre Nice et Menton*, une succession de failles font chevaucher les calcaires jurassiques sur les marno-calcaires crétacés (massif du Mt Agel), parallèlement à la ligne de rivage. Ce système chevauchant est recoupé par des décrochements et des ruptures gravitaires tels que le faisceau faillé du Col d'Eze et la faille de la Tête de Chien- la Turbie, l'ensemble étant en cours de démantèlement par de vastes effondrements tardifs.
- *A l'ouest, dans le chaînon du Mt Férion*, la direction tectonique nord-sud est dominante avec les structures majeures suivantes : le système distensif avec extrusion diapirique de St Blaise, le décrochement d'Aspremont, le décrochement de Tourette-Levens, la faille gravitaire du Mt Férion, dont l'âge est probablement anté-Miocène du fait de la présence de discordances dans les dépôts lutétiens de la vallée du Paillon.
- *A l'est, dans le secteur du Mt Baudon et du Mt Braus*, dominant les chevauchements accompagnés de décrochements transverses.
- *La partie centrale de la zone préalpine (« Arc de Nice »)* est occupée par une vaste cuvette synclinale de sédiments paléogènes qui est recoupée diagonalement par une longue ligne chevauchante, de direction nord-ouest sud-est, entre la vallée de la Vésubie (Mt Roccassiera) et le chaînon littoral près de Menton (Cime de Gorbio). La bordure septentrionale de ce synclinal, proche du socle du Mercantour, est déformée par d'importants décollements au niveau de la base du Mésozoïque, entre la vallée de la Vésubie et le versant occidental du bassin de la haute Roya.

- *Le dôme du Mercantour s'abaisse en gradins vers le sud-est*, par des failles gravitaires jusque dans le fond de la vallée de la haute Roya, entre Saorge et le Col de Tende. Les plus importantes sont la faille du Mt Bego, la faille du Lac Vert, la faille de Castérino, la faille de Viévolà.
- *L'extrémité nord-est des Alpes de Nice* est constituée par le massif du Marguareis à l'amont de la vallée du Réfrei. C'est un segment d'une vaste structure anticlinale, développée principalement sur le versant italien, qui chevauche vers le sud sur la série paléogène (série du flysch) de la vallée du Réfrei. Au cœur de cette structure affleurent les calcaires et calcschistes du Jurassique-Crétacé qui forment le plus important relief karstique de la région.

Les corrélations entre ces données tectoniques que nous avons pu observer et cartographier permettent à présent de mieux comprendre la distribution des eaux souterraines, leurs écoulements et la répartition de leurs indices de surface, les sources :

- *Dans la zone préalpine (« Arc de Nice »)*, la ressource en eaux souterraines la plus importante est le bassin des Paillons : l'aquifère est la formation calcaire du Jurassique supérieur, partiellement karstifié et dolomitisé. Il est partiellement protégé de la surface par les marnes noires du Cénomanién. L'écoulement des eaux souterraines vers le sud et la région littorale est contrôlé par deux failles majeures : la faille du Férion qui collecte les eaux de surface du flanc oriental du Mont Férion et la faille de Sainte Thècle qui collecte les eaux de surface des contreforts nord-occidentaux du Mont Agel. Une émergence importante de ce réseau karstique apparaît sous le niveau marin, aux sources des Pissarelles, à l'est de Nice, avec un débit de 100 l/s. Une autre émergence importante, la source de Sainte Thècle, apparaît en fond de vallée près de Peillon. Son débit atteint 120 l/s. Deux autres systèmes karstiques jurassiques se développent le long du chaînon littoral avec des émergences sous-marines : les sources du Larvotto (Monaco) contrôlées par les effondrements jurassiques affectant le flanc sud du Mt Agel (débit : 49 l/s) et les sources de Cabbé contrôlées par la faille inverse de la Rocca sur les contreforts orientaux du Mt Agel (débit: 200 l/s).

Plus au nord, les dislocations intenses qui affectent les formations calcaires et dolomitiques du Trias-Jurassique de la bordure du Mercantour génèrent également des réseaux souterrains karstiques ; les principales émergences de ces karsts sont la source des Fournes (débit : 30 l/s) dans la vallée de la Vésubie et dans la vallée de la haute Roya, le forage de Ste Catherine (débit : 24 l/s), la source de Tornou (débit :10 l/s), la source de Viévolà : (débit : 50 l/s). A l'est du Col de Tende, les eaux souterraines qui circulent dans le karst d'altitude du Marguareis émergent sur le versant italien, au nord, dans la vallée du Pesio et à l'est, dans la vallée du Tanaro.

- *Dans le massif du Mercantour*, de nombreuses sources émergent des terrains cristallins et des conglomérats et pélites du Paléozoïque, là où les flux des eaux souterraines sont contrôlés par une fracturation en distension. La plupart sont des sources froides telles que celles du groupe du lac Vert de Fontanalbe (débit : 15 l/s), la source de Causega (débit : 30 l/s), la source du Pilon (débit : 70 l/s), la source des Gaisses (débit : 30 l/s).

Les seules sources thermales connues dans les Alpes de Nice se trouvent dans la vallée de Berthemont, près de Roquebillère, à l'intersection de deux failles profondes. La température de l'eau y atteint 27° C. Le captage le plus récent produit 47 l/s.

- Carte tectonique et des sources disponible sur le site (<http://www.amidessources.org>), dans la chronique n° 12