

Géologie et eaux souterraines en Franche-Comté

Jacques Mudry¹.

Introduction

Chaîne arquée de l'avant-pays alpin, le Jura est composé de deux ensembles morpho-structuraux :

- au Nord, au Nord-Ouest et à l'Ouest, des plateaux séparés par d'étroites bandes fracturées, plissées et chevauchantes appelées faisceaux ;
- au Sud-Est, une zone entièrement plissée et chevauchante, la Haute-Chaîne ou Haut-Jura. (Fig. 1).

La série jurassienne comprend une alternance de couches imperméables et d'aquifères. **Deux grands ensembles aquifères calcaires** se distinguent par leur puissance : le Dogger et le Malm. Le Dogger repose sur une épaisse série marneuse (Lias) et argileuse (Keuper), il est séparé du Malm par 30 à 200 m de marnes oxfordo-argoviennes (Fig. 2).

Bien sûr, d'autres couches aquifères peuvent avoir très localement un intérêt hydrogéologique : grès du Trias inférieur, Dolomie moellon et calcaires du Muschelkalk dans le Trias, calcaires sinémuriens dans le Lias, diverses

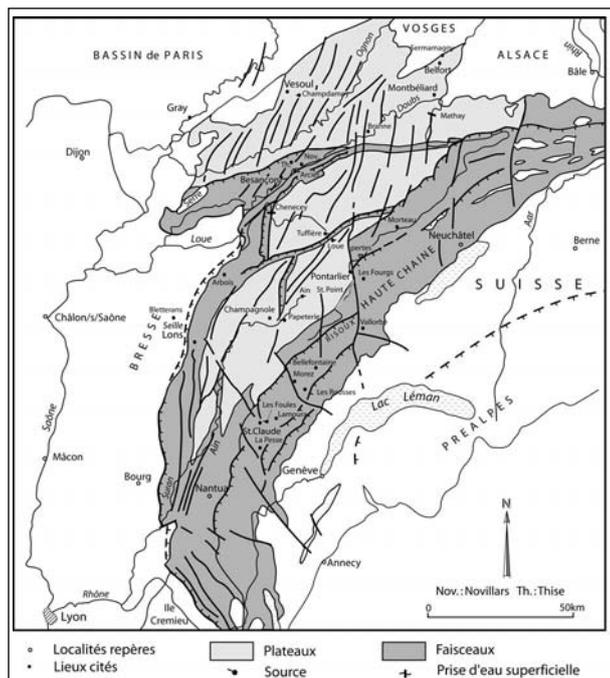


Figure 1. Les grandes unités morpho-structurales du Jura (d'après Chauve, ce volume), et les principaux lieux cités dans le texte. Faisceaux plissés avec des plateaux dans sa partie externe, Haut-Jura entièrement plissé dans sa partie interne.

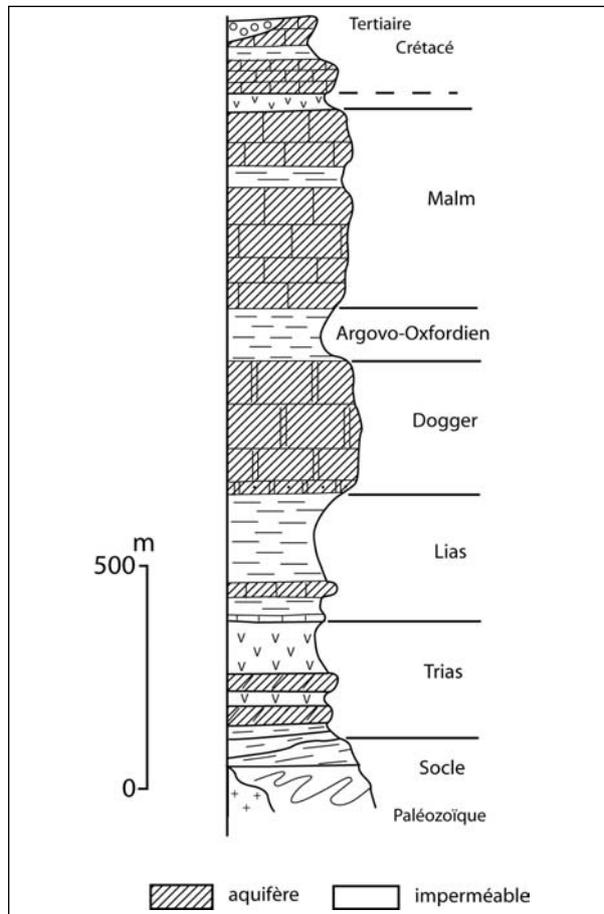


Figure 2. La série jurassienne (d'après Chauve, ce volume), et les principaux aquifères.

À l'exception de couches minces de grès et dolomies (Trias) ou de calcaires (Lias, Crétacé), les deux aquifères majeurs sont le Dogger et le Malm, tous deux intensément karstifiés.

couches calcaires séparées par de minces séries marneuses (Berriasien, Valanginien, Hauterivien, Barrémien) dans le Crétacé inférieur.

À l'exception des grès du Trias inférieur, qui affleurent peu, sauf sur le piémont sud des Vosges et le pourtour du petit massif cristallophyllien de la Serre, la quasi-totalité des aquifères de la série antépliocène de la chaîne du Jura et de la Franche-Comté sont de nature carbonatée et ont été karstifiés.

La structure géologique de la chaîne jurassienne, outre les plis et chevauchements parallèles à la structure générale, montre de **grands accidents transversaux** dextres et surtout sénestres. Ces accidents, avec des rejets

1. Professeur d'hydrogéologie à l'Université de Franche-Comté (Besançon). Courriel : jacques.mudry@univ-fcomte.fr

pluri hectométriques, permettent une interconnexion des réservoirs du Malm et du Dogger, mais encore plus des couches minces (10 à 50 mètres) du Crétacé inférieur : l'épaisseur des intercalaires marneuses est inférieure au rejet horizontal de l'accident.

En dehors de la série anté-Pliocène « cohérente » du Jura, des dépôts détritiques se sont accumulés surtout sur le pourtour jurassien (Alsace, Bresse) et peuvent constituer des aquifères poreux. Les *glaciers* ont laissé sur le Jura des moraines argileuses à blocs, aux propriétés aquifères très variables, mais aussi des dépôts fluvio-glaciaires dans lesquels les matériaux sablo-graveleux, débarrassés de la matrice argileuse des moraines, ont de bonnes propriétés transmissives.

Les cours d'eau issus des Vosges et du Jura ont déposé des alluvions fluviales dont la nature siliceuse ou calcaire conditionne les propriétés chimiques.

À l'exception du pays de Montbéliard et de Besançon (pour un tiers) qui potabilisent de l'eau de surface, les principales agglomérations s'alimentent en eau souterraine. Les aquifères alluviaux alimentent Belfort (nappe de la Savoureuse), Gray (nappe de la Saône), Lons-le-Saunier (nappe de la Seille), Morteau (nappe locale du Doubs), Dole (nappe du bas Doubs). Pontarlier exploite la nappe du fluvio-glaciaire. Le Dogger karstifié alimente Besançon (pour les deux tiers), Vesoul et Arbois. Le karst du Malm fournit l'eau potable de Morez et Saint-Claude.

Les zones rurales du Haut-Jura et des plateaux, à faible densité de population, sont alimentées soit par de petites sources à impluvium local, soit par des syndicats captant des sources karstiques (syndicat de la Haute-Loue) ou des eaux lacustres.

Quelques caractéristiques des aquifères francs-comtois

Les alluvions et dépôts quaternaires

Les nappes d'accompagnement des principaux cours d'eau imprègnent des formations détritiques dont le matériel est géochimiquement contrasté en fonction de l'origine vosgienne ou jurassienne du matériel déritique. Ainsi, les nappes de la Savoureuse, du Breuchin, de l'Ognon, de la Saône... ont un cachet silicaté, alors que les nappes du Doubs, de la Seille, de l'Ain... ont un cachet carbonaté.

Comme dans toutes les nappes alluviales, l'alimentation des nappes jurassiennes se fait par le cours d'eau, mais aussi par les coteaux calcaires dont les nappes sont en équilibre avec celle des alluvions. La conséquence est la nécessité de prendre en compte cette double alimentation

dans la définition des périmètres de protection.

Le fluvio-glaciaire, sablo-graveleux, a de meilleures conductivités hydrauliques que les moraines argileuses à blocs, qui toutefois peuvent localement présenter des perméabilités élevées.

Le karst jurassique

Karst des plateaux et karst de la zone plissée

L'architecture des réservoirs conditionne leur taille et donc le temps de résidence de l'eau dans le réservoir.

Les *plateaux* du Jura externe, peu déformés, constituent des pièges hydrogéologiques dans lesquels les réserves d'étiage peuvent avoir un âge moyen de 5 à 10 ans, ceci malgré le fait que les sources soient du type jurassien, c'est-à-dire qu'elles drainent la zone de battement de la nappe, souvent à la base de la série calcaire du Dogger. Le fonctionnement des réserves est de type mélangeur, pour lequel les recharges successives se mélangent aux eaux déjà présentes.

Les *plis du Haut-Jura*, généralement serrés, ne constituent pas des réservoirs de grand volume. De plus, ces plis, de largeur pluri-kilométrique, sont tronçonnés par des décrochements dextres ou sénestres qui en décalent les flancs, permettant les communications entre couches minces de calcaires néocomiens et la grande masse calcaire du Malm. La conséquence de cette structure facilement vidangée est l'existence d'une nappe dont les eaux d'étiage ont un temps de séjour de 1 à 2 ans. Ce renouvellement rapide est accompagné d'un fonctionnement de type piston, pour lequel les recharges successives suivent et poussent les recharges antérieures.

Une des caractéristiques majeures du drainage karstique dans les zones plissées (faisceaux de plis externes et zone plissée du Haut-Jura) est le rôle des abaissements d'axe des plis dans la structuration du drainage. La figure 3 montre, pour la région de St-Claude, comment la zone du Flumen (Photos 1 et 2), zone abaissée transversalement aux plis, draine un secteur de plus de 20 km de long, depuis les Jouvencelles jusqu'à la Pesse, dans l'axe de la structure. Ceci, malgré l'information morphologique d'un alignement de pertes sur un décrochement (Fig. 4 et photo 3) ou celle de l'enchaînement de vallées sèches transversales aux structures (Fig. 5). En effet (Fig. 4), les pertes des Basses Molunes de la Pesse sont alignées sur un décrochement allant directement au dessus des émergences de la Douveraine et du Merdasson (Fig. 3) et les pertes de l'Anquerne et de l'Embouteilleux (photo 4) se situent en tête d'un système de vallées sèches aboutissant au-dessus

de l'émergence de la Douveraine. Malgré ces contextes morphologiques, les eaux souterraines engouffrées dans les trois ponors (pertes de ruisseaux) aboutissent dans les gorges du Flumen (photo 2), à une distance trois fois plus grande que ce système d'émergences.



Photo 2. Sources des Cascades. Au fond des gorges du Flumen, c'est le point de réapparition des eaux infiltrées dans le synclinal de la Pesse-Septmoncel.

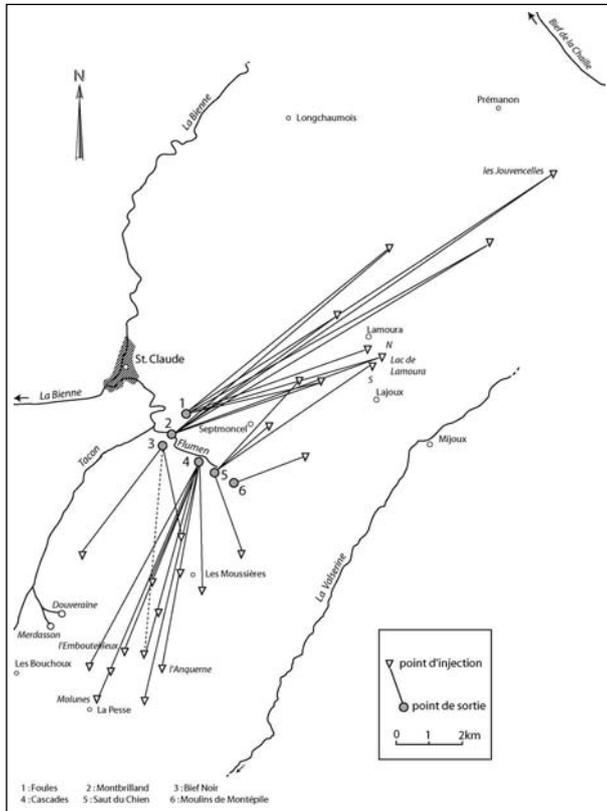


Figure 3. Zone de drainage karstique du Flumen (d'après cabinet Caille, inédit. – voir photos 1 et 2). Malgré l'existence d'autres vallées plus proches des pertes (Tacon, Bief de la Chaille, Valserine), la zone d'abaissement des axes de plis du Flumen draine les 20 km de secteur karstique compris entre les Jouvenelles et la Pesse.



Photo 1. Zone d'abaissement axial des plis du Flumen. Le drainage karstique est polarisé par ce point bas structural entre les Jouvenelles au NE et la Pesse au SE (sur 20 km).

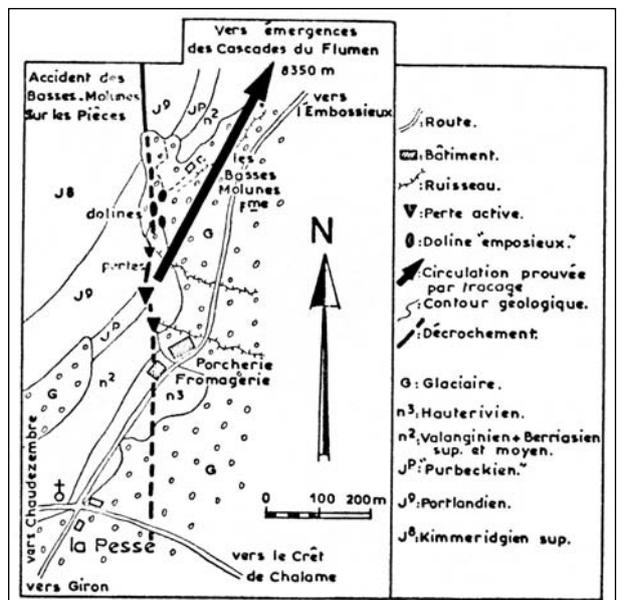


Figure 4. Alignement de pertes sur un décrochement dans le secteur de la Pesse (voir photo 3).



Photo 3. Perte des basses Molunes à la Pesse (39). Photo prise en direction de l'Ouest. Les pertes sont alignées sur la faille Nord-Sud dont on aperçoit le compartiment ouest en relief. Cette faille va en direction de la source de la Douveraine, située à 3 km au Nord-Ouest, alors que l'écoulement karstique est polarisé par la vallée du Flumen (source des Cascades), située à 8 km au NNE.

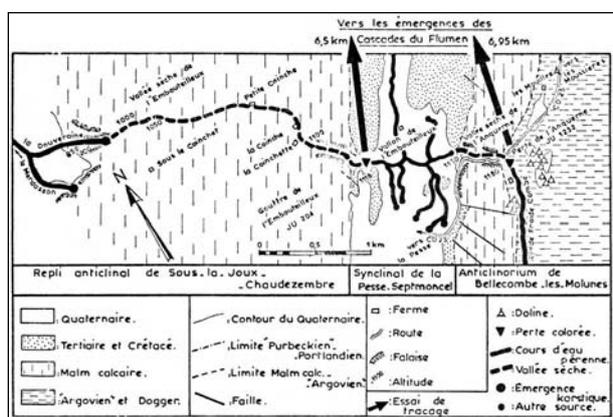


Figure 5. Exemple d'enchaînement de vallées sèches transversales aux structures (voir photo 4).

L'hétérogénéité du karst déclinée dans le Jura

Le karst est un milieu réputé hétérogène au moins de trois points de vue :

- verticalement, il est composé d'un épikarst très ouvert, à circulation principalement à composantes horizontales, surmontant une zone non saturée s.s. peu perméable, franchie verticalement, qui recouvre la zone noyée ;
- spatialement, coexistent des circulations rapides, de l'ordre du m/s dans les drains souvent implantés sur des accidents tectoniques majeurs, et des circulations lentes dans des blocs peu perméables, où les vitesses sont de l'ordre du m/an. De plus, ce schéma peut être compliqué par l'existence d'une partie libre, où les vitesses de circulation sont « classiques » et d'une partie captive où n'existent pas (ou plus ?) d'exutoires naturels. Les seuls points de vidange sont les pompages ;
- dans l'alimentation, les systèmes unaires sont rechargés

par toute la surface de l'impluvium ; ils comprennent donc deux types d'infiltration : diffuse et localement concentrée (dolines). Les systèmes binaires sont à la fois alimentés par l'infiltration diffuse de la pluie et par des pertes de cours d'eau de surface.

Dans le Jura, l'hétérogénéité est décelable à **plusieurs échelles**. Généralement, les circulations sont emboîtées dans un schéma de type Toth : les nombreux tracés d'essais effectués ces 10 dernières années pour la délimitation des périmètres de protection de petites sources captées au pied des anticlinaux ont montré que l'infiltration diffuse sur ces flancs alimentait les karsts locaux émergeant par ces petites sources. Au contraire, l'infiltration concentrée dans des ponors et l'infiltration diffuse sur les structures situées plus à l'arrière contribuent à l'alimentation des grands aquifères régionaux (Loue, Lison, Ain, Dessoubre...).

Une statistique établie par le cabinet Caille dans le Haut-Jura montre que plus la **distance** entre point d'injection et source est grande, plus la vitesse de circulation



Photo 4. Gouffre de l'Embouteilleux à la Pesse (39). C'est l'un des points d'engouffrement qui communiquent avec la source des Cascades, située dans la zone d'abaissement axial du Flumen, distante de 6,5 km vers le Nord, alors que la source de la Douveraine n'est située qu'à 2 km à l'Ouest.

des eaux karstiques est grande. Ceci, parce que les traçages d'essais locaux n'empruntent que des fissures peu karstifiées, en ayant peu de chances de transiter par de grands drains, alors que dans les grandes unités, les circulations sont hiérarchisées, empruntant au départ de petites fissures qui, d'amont en aval, se rejoignent pour former des conduits plus transmissifs, qui se regroupent à leur tour pour donner ou rejoindre un axe de drainage très rapide.

Dans les mêmes calcaires du Dogger de la vallée du Doubs (Thise, Novillars, Branne), la comparaison, à l'aide de la chimie des eaux et des isotopes de l'environnement, des circulations en zone libre, aboutissant aux sources naturelles, et en zone captive, drainées seulement par des forages d'eau potable ou industrielle, a permis de montrer une « **stratification** » des écoulements : **eaux « récentes »** des sources, riches en nitrates, en tritium et en carbone organique, mais pauvres en indicateurs de temps de séjour (rapport Mg/Ca, carbone-13), opposées aux **eaux « anciennes »** (quelques dizaines d'années) des forages, pauvres en traceurs de l'infiltration (NO₃⁻, COT², tritium), mais enrichis en magnésium et en carbone-13, ce qui traduit un long temps de contact eau-roche.

Quelques problèmes liés au karst dans le Jura

Outre les questions d'alimentation en eau, le Jura montre les divers problèmes d'aménagement liés à l'intégration de projets d'infrastructure en milieu karstique.

Certains problèmes sont d'ordre purement **géotechnique** : il s'agit de la conception de fondations d'ouvrages, par exemple sur le plateau de Besançon. Les méthodes d'investigation classiques (traîné électrique, pénétromètre) nécessiteraient un maillage très serré et donc coûteux, ainsi que des méthodes complémentaires adaptées au milieu (microgravimétrie, géoradar) pour permettre une cartographie fiable du bedrock. Pour des raisons comptables, les maîtres d'ouvrage négligent souvent cet aspect et rencontrent d'ennuyeuses et dispendieuses complications lors de la réalisation (dolines remplies d'argile ou vides karstiques sur plusieurs dizaines de mètres de hauteur).

D'autres problèmes sont d'ordre **hydrogéologique**, liés au processus même de la karstification et voici quelques exemples des phénomènes concernés.

Capture progressive

Si la karstification joue globalement à l'échelle de milliers à millions d'années, ses effets sur le débit des cours d'eau fuyards sont parfois visibles à l'échelle humaine. Ainsi, les pertes du Doubs vers la Loue ou celles du Suran dans le sud du Jura s'accroissent de manière

perceptible par une plus grande zone d'assec pendant les étages.

Reprise d'érosion

Les infrastructures linéaires (autoroutes, TGV) recourent des zones tectonisées et karstifiées. Certaines dépressions sont comblées de matériaux de remblai. Dans les dolines de certaines zones recoupées par le tracé de la LGV Rhin-Rhône, des indices d'évolution récente sont observés : effondrements dans les matériaux meubles du fond, arbres à la croissance perturbée (tronc avec plusieurs inclinaisons). Ces observations démontrent que le phénomène de suffosion (soutirage des matériaux meubles de surface par les écoulements karstiques dans des drains) est actif, plus que celui (plus lent) de dissolution. Dès lors, un tracé doit s'efforcer d'éviter ces secteurs où les remblais risquent de subir le même sort que les matériaux naturels.

Vidange d'aquifères par percement de tunnels de base

L'exemple du percement du tunnel du Mont-d'Or (Fig. 6) est caractéristique. Dans les années 1910, la réalisation de la ligne Paris-Lausanne a nécessité le percement de l'anticlinal du Risoux. Le profil du tunnel descend en direction de la Suisse. Le percement, depuis Vallorbe, n'a rencontré aucun problème d'eau pendant la traversée des terrains du cœur anticlinal (Dogger), ni de l'Argovien marneux. Mais lorsque le fonçage a atteint la base du Malm du flanc NW, une venue d'eau de 1,8 m³/s (qui s'est ensuite stabilisée à 0,1 m³/s) est apparue. Cette venue, située plus bas en altitude que les sources locales, les a fait tarir : sources du Bief Rouge, Grande Source et source intermittente de Fontaine-Ronde. Le flot d'eau du tunnel a érodé

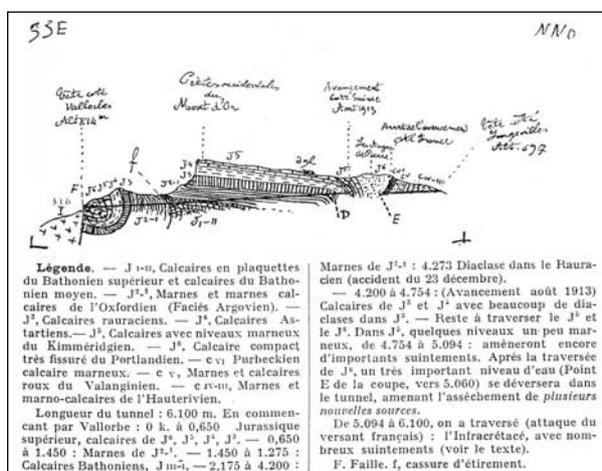


Figure 6. Coupe « historique » du percement du tunnel ferroviaire du Mont-d'Or (25) par Fournier (1910). Les travaux ont vidangé l'aquifère du Malm, dont la voûte anticlinale constitue un impluvium étendu.

le prisme de remblais accumulés pour la voie ferrée contre la falaise de Vallorbe. Les travaux ont pris deux ans de retard et leur coût a explosé.

Aquifères et alimentation en eau potable (AEP)

Captage d'eaux de surface

Les **agglomérations principales** captent les grands cours d'eau au fil de l'eau (voir la figure 1 pour la localisation des lieux cités). Ainsi, la communauté d'agglomération du Pays de Montbéliard (CAPM : 200 000 habitants) a une prise sur le Doubs à Mathay et la ville de Besançon, une prise sur la Loue à Chenecey (1/3 de l'AEP). La ville de St-Claude a une prise de secours sur le Flumen. Ces eaux de surface sont largement dépendantes, tant en débit qu'en qualité, des eaux karstiques qui alimentent les sources de leurs affluents. À part une interconnexion avec l'agglomération de Belfort (ne permettant pas d'alimenter entièrement les deux agglomérations en même temps), la CAPM ne dispose pour l'instant d'aucune ressource propre et suffisante en cas de pollution du Doubs.

Dans le **Haut-Jura**, des syndicats desservant de nombreux villages à faible population pompent des eaux de lacs (les Rousses, Bellefontaine, St-Point) implantés dans des cuvettes tourbeuses.

Captage de nappes alluviales

La présence de grandes rivières de plaine (Saône, Ognon, Seille) a permis d'alimenter les agglomérations bordières par leurs nappes phréatiques d'accompagnement. Ainsi Gray, Lons-le-Saunier (Bletterans)... s'alimentent sur les alluvions. Des rivières plus encaissées comme le Doubs, présentant de petites plaines d'accompagnement, alimentent Morteau, le syndicat du Val de l'Ognon à St-Vit... Par le passé, Besançon a été alimentée par ce type d'aquifère, mais la médiocre qualité de l'eau a imposé le remplacement de cette ressource par l'eau de la Loue et par celle de forages dans les calcaires.

L'agglomération de Belfort est alimentée par les alluvions de la Savoureuse (champ captant de Sermamagny). Un cas particulier est celui de la ville de Pontarlier qui, pour une partie de son AEP, capte les eaux du cône fluvioglacière et, pour le reste, pompe dans le lac St-Point, après avoir abandonné son captage d'eau karstique, trop vulnérable à la pollution par les effluents domestiques du village des Fourgs.

Captage de nappes karstiques

De longue date, les sources ont été captées pour l'alimentation en eau potable des villes. Ainsi Besançon, dès le 1^{er} siècle, sous le règne de Vespasien, a capté la source karstique d'Arcier située à 10 km à l'amont dans la vallée du Doubs, point de sortie du karst binaire du plateau situé à l'arrière du faisceau bisontin. L'aqueduc a été refait au XIX^e siècle et Arcier contribue toujours pour un gros tiers à l'alimentation en eau de Besançon.

D'autres villes captent les eaux de sources karstiques, comme Vesoul qui s'alimente sur la Font de Champdamoy (Dogger), Champagnole, sur la source de la Papeterie et St-Claude, sur les sources des Foules et de Montbrilland (Malm). Le syndicat des eaux de la Haute-Loue capte la source de la Tuffière pour l'alimentation de nombreux villages dépourvus de ressources suffisantes sur les plateaux.

Les sources karstiques ont comme inconvénients la variabilité de leur débit (pouvant devenir très faible à l'étiage) et leur vulnérabilité à la pollution accidentelle, surtout dans le cas où elles sont alimentées par des ponors.

C'est pourquoi des captages par forages ont été établis dans le Dogger pour produire de l'eau industrielle (papeterie de Novillars) ou potable (Thise et Chailluz, alimentant un quart de la ville de Besançon, soit environ 30 000 habitants). Dans les calcaires du Dogger, captifs sous les marnes oxfordiennes dans la moyenne vallée du Doubs, d'autres forages (Roche-Novillars, Branne...) captent cette ressource. L'exploitation par forage permet d'être moins tributaire des fluctuations saisonnières du débit, et moins vulnérable aux pollutions agricole et accidentelle, les forages n'étant pas systématiquement implantés sur les drains.

Quelques problèmes qualitatifs

Les problèmes de qualité sont différents selon la nature des aquifères.

En **zone alluviale**, les problèmes de contamination naturelle sont essentiellement liés au fer et au manganèse. Ces métaux indésirables sont solubilisés en milieu acide ou réduit. De telles conditions se rencontrent là où les nappes alluviales sont localement captives (limons semi-perméables de surface) ou lorsqu'existe de la matière organique dans les sédiments (marais, tourbe). Concernant l'action anthropique, l'occupation du sol a changé en 30 ans. Autrefois lieux de prairies, les alluvions de la Saône, de l'Ognon et du Doubs sont aujourd'hui largement plantées de maïs. La conséquence est un changement dans la nature des substances polluantes : autrefois

atteintes par les nitrates et les bactéries (épandages de lisiers), ces nappes le sont aujourd'hui par des désinfectants ou leurs métabolites.

Dans le *karst*, les problèmes de qualité sont rémanents. Au XIX^e siècle, les eaux d'Arcier ont été responsables de sévères épidémies de typhoïde à Besançon, par exemple en 1856-57 et en 1885-86.

Aujourd'hui, les problèmes de qualité sont mieux circonscrits car, entre la qualité de l'eau brute et celle de l'eau au robinet du consommateur, la désinfection constitue une barrière additionnelle aux périmètres de protection qui protègent les captages et une partie de leur impluvium.

Les principales caractéristiques de la qualité des eaux karstiques sont leur *turbidité* très élevée en crue, avec comme conséquence le transport de *polluants* (métaux, hydrocarbures, solvants, micro-organismes...) sur les particules. En outre, la turbidité empêche la désinfection : manque de surfaces réactives aux oxydants chimiques, opacité pour les UV. L'exploitation des eaux du karst demande donc soit l'élimination des pics turbides (by-pass) en utilisant éventuellement une ressource de secours (interconnexion) ou en distribuant l'eau stockée avant la crue dans les réservoirs, soit un traitement de décantation, floculation, coagulation pour désinfecter une eau limpide. Cette gestion des épisodes turbides demande la mesure d'un turbidimètre en continu.

Les autres problèmes sont, comme autrefois, liés à la *microbiologie*, due aux épandages de lisier sur des sols très minces (ou sur la neige, faute d'une capacité de stockage hivernale suffisante !), ainsi qu'au rejet sans traitement d'eaux usées domestiques, encore courant en zone rurale.

Les périmètres de protection des captages urbains principaux (Besançon, Vesoul, St-Claude) utilisent les périmètres satellites. Comme il est impossible de définir un

périmètre de protection rapprochée à 50 jours du captage, surtout dans les contextes où des eaux de surface s'engouffrent dans des ponors et ressortent au bout de quelques heures au pire, de quelques jours au mieux, la protection des eaux karstiques s'apparente plus à une protection d'eaux de surface, avec plan d'alerte. Dans ces conditions, les points d'engouffrement sont protégés par des périmètres de protection immédiate, et le réseau hydrographique y aboutissant, par des périmètres de protection rapprochée. Comme dans les périmètres entourant les captages, quelques prescriptions, pour la plupart rappelant la réglementation générale, sont édictées : maintien en bois des zones forestières ou naturelles, sécurité renforcée des stockages d'hydrocarbures des habitations existantes, mise en conformité des installations d'élevage (bâtiments, stockage et rejet d'eaux usées), interdiction d'épandages de boues d'épuration, d'effluents et de matières de vidange, limitations des épandages à 170 kg N/Ha, organique et minéral.

Un exemple est donné par les sources des Foules et de Montbrilland, alimentant St-Claude (Fig. 7). La zone de recharge est vaste ; elle s'étend sur des synclinaux crétacés (Combe du Lac, Chaux-Berthod, Septmoncel) et des anticlinaux de Malm (Tresberruy-Ban, Massacre). Le périmètre éloigné inclut les secteurs à activité humaine : bourgs, villages de vacances, routes, parkings au pied des remontées mécaniques et au départ des pistes de ski de fond). Les deux sources captées sont entourées par un petit périmètre immédiat, mais c'est également le cas des deux ponors (pertes Nord et Sud) drainant le lac de Lamoura. Le bassin-versant du lac constitue un périmètre rapproché satellite, de même que le secteur touristique de l'Abbaye (bassin fermé) et le val des Jouvencelles, très fréquentés l'hiver.

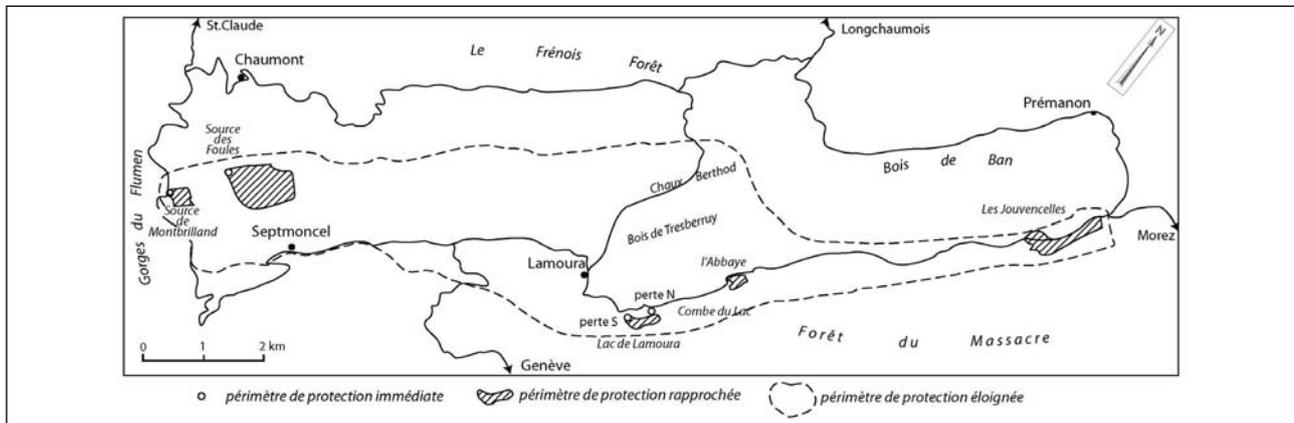


Figure 7. Protection des sources alimentant Saint-Claude (39) par périmètres satellites. Les zones urbanisées (centres de vacances, parkings, caravaneige) situées dans des dépressions fermées ont été placées en périmètre de protection rapprochée, leurs ponors, en zone de protection immédiate.