

## Caractérisation de l'aquifère superficiel de la plaine du Rhône entre Sierre et Evionnaz (Suisse)

Damian GLENZ, Philippe RENARD, Philip BRUNNER, Pierre PERROCHET,  
Hermann ROVINA, Alexandre VOGEL

### Introduction

Les crues récentes de 1987, 1993 et 2000 ont confirmé qu'en raison de la capacité hydraulique du Rhône ainsi que du mauvais état des digues, la plaine en amont du lac Léman n'est pas suffisamment protégée contre les risques d'inondation. Lancé dans les années 1990, le projet de Troisième Correction du Rhône a pour objectif de mettre en œuvre les mesures permettant d'assurer durablement la sécurité de la plaine.

Dans ce contexte, plusieurs études ont été menées ou sont encore en cours en vue de mieux comprendre le fonctionnement de l'aquifère de la plaine du Rhône et plus particulièrement ses relations avec le Rhône. Un modèle des écoulements souterrains entre Sierre et le barrage de Lavey a ainsi été construit sur la base d'une synthèse à grande échelle des données disponibles. Ce travail a été effectué dans le cadre d'une thèse de doctorat à l'Université de Neuchâtel, thèse dont cet article présente une partie des conclusions concernant la synthèse des données et la construction du modèle conceptuel.

### Zone d'étude

#### *Cadre général*

La zone d'étude s'étend sur 60 km entre Sierre et Evionnaz et couvre une surface d'environ 90 km<sup>2</sup>. Elle est limitée à l'amont par le cône de déjection de l'Illgraben et à l'aval par celui du Saint-Barthélemy. Ces deux cônes structurent le profil en long du Rhône. Ils sont formés principalement de dépôts de type laves torrentielles et ont une conductivité hydraulique faible. Ils gênent l'écoulement des eaux souterraines et constituent donc des limites hydrogéologiques naturelles au sein de l'aquifère de la plaine alluviale.

#### *Géologie et géomorphologie*

La structure et le remplissage de la vallée du Rhône sont en majeure partie hérités des glaciations du Pléistocène tardif<sup>1</sup>. La profondeur du massif rocheux

<sup>1</sup> Pierre G. VALLA *et al.*, «Late Neogene exhumation and relief development of the Aar and Aiguilles Rouges massifs (Swiss Alps) from low-temperature thermochronology modeling and <sup>4</sup>He/<sup>3</sup>He thermochronometry», dans *Journal of Geophysical Research*, 117 (2012), DOI: 10.1029/2011JF002043.

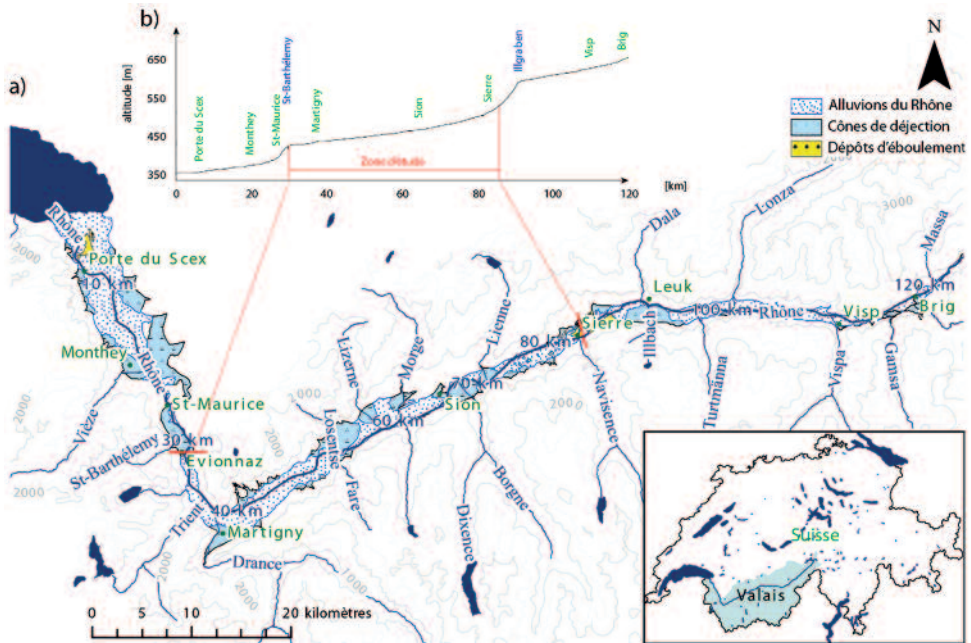


Fig. 1. a) Carte d'ensemble simplifiée de la zone d'étude représentant les terrains quaternaires superficiels en fonction de leur processus de formation; b) profil topographique le long du Rhône.

sous-jacent a été estimée dans le cadre de plusieurs études géophysiques<sup>2</sup>. Elle peut atteindre près de 1 km à certains endroits, comme le montre la coupe longitudinale de la figure 2a.

Dans l'étude d'Olivier Besson *et al.*<sup>3</sup>, huit faciès sédimentaires ont été mis en évidence dans les dépôts quaternaires. Ces auteurs attribuent le remplissage du bassin sédimentaire à une unique phase de déglaciation. L'interprétation sismostratigraphique détaillée du profil acquis près de Sion permet d'identifier la séquence stratigraphique de remplissage suivante: à la base de la séquence, des dépôts torrentiels sous-glaciaires sont en contact avec le substratum rocheux; ils sont surmontés de dépôts morainiques puis de dépôts glacio-lacustres et lacustres; la séquence se termine par une couche superficielle principalement formée de dépôts alluviaux fluviaux.

<sup>2</sup> Peter FINCKH, Walter FREI, «Seismic reflection profiling in the Swiss Rhone valley. I, Seismic reflection field work, seismic processing and seismic results of the Roche-Vouvry and Turtmann and Agarn lines», dans *Eclogae Geologicae Helveticae*, 84 (1991), p. 345-357; Olivier BESSON *et al.*, «Campagne de sismique-réflexion dans la vallée du Rhône entre Sion et St-Maurice, perspectives d'exploitation géothermique des dépôts torrentiels sous-glaciaires», dans *Bulletin du Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel*, 12 (1993), p. 39-58; Daniel ROTEN *et al.*, «A comparison of observed and simulated site response in the Rhône valley», dans *Geophysical Journal International*, 173 (2008), p. 958-978; Hans-Balder HAVENITH *et al.*, «Response spectra for the deep sediment-filled Rhône Valley in the Swiss Alps», dans *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29 (2009), p. 17-38.

<sup>3</sup> BESSON *et al.*, «Campagne de sismique-réflexion», p. 39-58.

Les dépôts glacio-lacustres et lacustres ont une perméabilité faible, à telle enseigne que seule la couche superficielle d'alluvions peut être considérée pour appréhender les échanges entre l'aquifère et le fleuve.

Sur la base de quatre profils sismiques dans le Chablais, Willy Finger et Marc Weidmann<sup>4</sup> estiment l'épaisseur de cette couche à 80 m. D'après Besson *et al.*<sup>5</sup>, l'épaisseur des sédiments alluviaux augmente de 30 m dans la partie amont de la zone d'étude et de 60 à 90 m près de Saint-Maurice. Finger et Weidmann ont daté les sédiments de cette couche à 9000-10 000 ans à des profondeurs de 30 et 40 m.

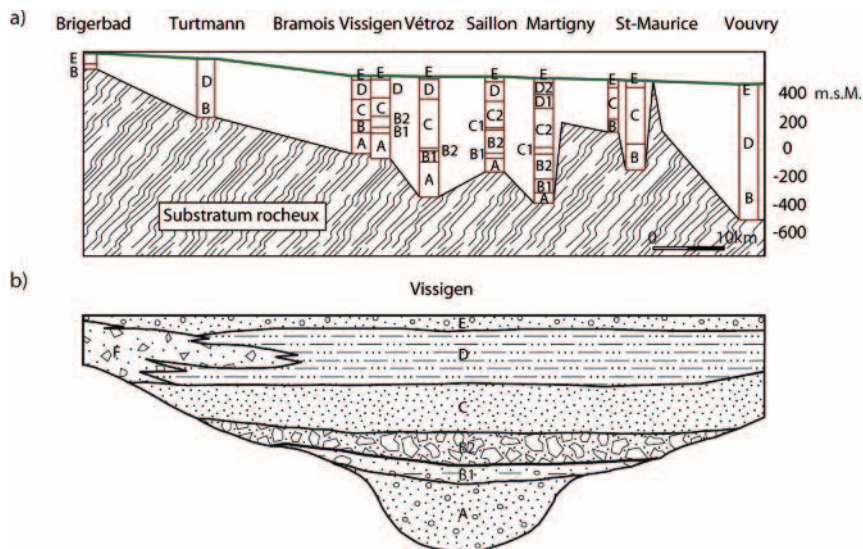


Fig. 2. a) Profil longitudinal représentant la position du substratum rocheux ainsi qu'une interprétation de la séquence de remplissage quaternaire<sup>6</sup>. b) Exemple d'une interprétation: profil sismique tiré à Vissigen, à l'est de Sion<sup>7</sup>. A: dépôts torrentiels sous-glaciaires; B1: dépôts morainiques de base; B2: dépôts morainiques résiduels; C1: dépôts glacio-lacustres pro-glaciaires; C2: dépôts glacio-lacustres périglaciaires; D1: dépôts lacustres («bottom set beds»); D2: dépôts lacustres («foreset beds»); E: dépôts post-lacustres; F: dépôts latéraux de pente.

## Hydrologie

L'hydrologie actuelle du bassin du Rhône est fortement influencée par l'activité humaine. Les influences majeures sont liées aux modifications de la section d'écoulement héritées des deux premières corrections du Rhône (1863-1894 et 1930-1960), ainsi qu'aux aménagements hydroélectriques qui affectent le régime hydrologique du fleuve.

<sup>4</sup> Willy FINGER, Marc WEIDMANN, «Quelques données géologiques nouvelles sur la vallée du Rhône entre Sierre et le Léman», dans *Bulletin de la Murithienne*, 105 (1987), p. 27-40.

<sup>5</sup> BESSON *et al.*, «Campagne de sismique-réflexion».

<sup>6</sup> *Ibidem.*

<sup>7</sup> *Ibidem.*

Plusieurs études récentes<sup>8</sup> ont permis de compléter les connaissances sur la morphologie de la plaine du Rhône avant la Première Correction du Rhône. Ces études montrent que le fleuve occupait une part importante de la surface de la plaine<sup>9</sup>. Les inondations étaient fréquentes<sup>10</sup> et les zones humides et marécageuses s'étendaient également sur une certaine surface<sup>11</sup>. Le solde de celle-ci était recouvert de prairies et de forêts.

La Première Correction du Rhône a donné au fleuve un tracé rectiligne, dans un chenal unique et plus étroit. Les digues continues construites durant cette phase des travaux ont bloqué une partie des écoulements de surface dans la plaine, engendrant un essor des zones humides et marécageuses. L'aménagement a donc dû être complété par un système de canaux d'évacuation des eaux de surface provenant des petits cours d'eau latéraux<sup>12</sup>.

Malgré le système d'épis mis en place, la capacité de transport du Rhône s'est avérée insuffisante pour évacuer les apports importants d'alluvions par les cours d'eau latéraux. Dès la fin des travaux, un exhaussement problématique du fond a ainsi été observé. Une nouvelle correction du Rhône a donc été mise en œuvre afin de renforcer les digues et de resserrer encore la section d'écoulement, dans le but d'augmenter la capacité de charriage du fleuve. Ce sont cependant les prélèvements de graviers dans le lit du Rhône, entrepris dès les années 1950, qui ont stoppé l'exhaussement du fond. Ces prélèvements ont même dépassé les apports naturels, conduisant à approfondir la section du fleuve sur une grande partie du linéaire<sup>13</sup>.

Avec le développement des activités agricoles, des systèmes de drainage des eaux souterraines, souvent connectés aux réseaux de canaux, ont été mis en œuvre parallèlement<sup>14</sup>.

A partir des années 1950, la construction des barrages destinés à la production d'électricité a fortement modifié le régime hydrologique du fleuve et le charriage des sédiments<sup>15</sup>. Sous l'effet du turbinage des eaux des barrages, le débit du fleuve

<sup>8</sup> Flavio ZANINI, Elodie ZANINI, Christine WEBER, «Analyse de la dynamique du paysage de la plaine du Rhône de 1850 à 2003 sur la base de cartes topographiques», dans *Bulletin de la Murithienne*, 124 (2006), p. 89-98; Sabine STÄUBLE, Emmanuel REYNARD, «Evolution du paysage de la plaine du Rhône dans la région de Conthey depuis 1850», dans *Vallesia*, 60 (2005), p. 433-456; Emmanuel REYNARD *et al.*, «Le Rhône alpin vu sous l'angle de la géomorphologie: état des lieux», dans Emmanuel REYNARD, Myriam EYÉQUOZ-DAYEN, Pierre DUBUIS (éd.), *Le Rhône: dynamique, histoire et société*, Sion, 2009 (Cahiers de Vallesia, 21), p. 75-102. Laetitia LAIGRE, Gilles ARNAUD-FASSETTA, Emmanuel REYNARD, «Cartographie sectorielle et dynamique de la plaine alluviale du Rhône suisse (Tourtemagne-Sierre) depuis la fin du Petit Age Glaciaire», dans Christophe LAMBIEL, Emmanuel REYNARD, Cristian SCAPOZZA, *La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte*, Université de Lausanne, Institut de géographie, 2011, p. 79-97.

<sup>9</sup> Onze pour cent de la surface de la plaine en 1850, selon ZANINI *et al.*, «Analyse de la dynamique du paysage», p. 94.

<sup>10</sup> Stephanie SUMMERMATTER, «Die erste Rhonekorrektur und die weitere Entwicklung der kantonalen und nationalen Wasserbaupolitik im 19. Jahrhundert», dans *Vallesia*, 59 (2004), p. 199-224.

<sup>11</sup> Huit pour cent de la surface de la plaine en 1850, selon ZANINI *et al.*, «Analyse de la dynamique du paysage», p. 94.

<sup>12</sup> Charles DE TORRENTÉ, *La correction du Rhône en amont du lac Léman*, Berne, Service fédéral des routes et des digues, 1964.

<sup>13</sup> Martin JAEGGI, Roni HUNZIKER, Tony ARBORINO, «Auswirkungen der 3. Rhonekorrektur auf Geschlechtsbehalt und Flussmorphologie», dans *Wasser Energie Luft*, 103 (2011), p. 122-127.

<sup>14</sup> Pierre FILLIEZ, *1904-2004: Les améliorations foncières en Valais: 100 ans d'activités*, Sion, Service de l'agriculture, Office des améliorations foncières, 2004.

<sup>15</sup> Tobias MEILE, Jean-Louis BOILLAT, Anton J. SCHLEISS, «Hydropeaking indicators for characterization of the Upper-Rhone River in Switzerland», dans *Aquatic Sciences*, 73 (2011), p. 171-182.

subit des variations quotidiennes rapides, appelées marnages ou éclusées, qui se propagent localement dans l'aquifère. Ces modifications du régime hydrologique par les barrages affectent les interactions entre la rivière et les eaux souterraines, par exemple en accélérant le colmatage interne du lit<sup>16</sup>.

Les aménagements du fleuve et la construction des barrages ont conduit à une perte de la dynamique alluviale sur le fond du lit. Il en résulte des phénomènes de colmatage et de pavage qui réduisent potentiellement les échanges d'eau entre le fleuve et l'aquifère. Cependant, le développement de ces phénomènes dans le temps est en principe atténué par l'incision observée du lit du Rhône.

Le débit du Rhône est influencé par la fonte du manteau neigeux et des glaciers, avec une période de basses eaux durant l'hiver et une période de hautes eaux qui commence au mois de mai et se termine par l'arrivée du gel en haute montagne, généralement en octobre<sup>17</sup>. Aujourd'hui, un cinquième du débit annuel moyen à la Porte-du-Scex, près de l'embouchure du Rhône dans le lac Léman, est retenu dans les barrages durant la période estivale pour être relâché pendant la période hivernale. Si, dans son état naturel, le régime du Rhône à la Porte-du-Scex est de type «glacio-nival» à «nivo-glaciaire»<sup>18</sup>, il est classifié aujourd'hui de «nival de transition» à «nivo-pluvial préalpin»<sup>19</sup>, reflétant l'effet retardateur des barrages hydroélectriques sur les débits estivaux.

La turbidité<sup>20</sup> et la température<sup>21</sup> du Rhône montrent également des variations induites par le turbinage des centrales hydroélectriques. Les variations de consommation électrique induisent, quant à elles, des cycles d'éclusées quotidiens (nuit-jour) et hebdomadaires (semaine/week-end).

<sup>16</sup> Urs SCHÄELCHLI, *Kolmation: Methoden zur Erkennung und Bewertung*, Bericht im Auftrag von Fischnetz c/o EAWAG, Dübendorf, 2002, p. 16.

<sup>17</sup> Jean-Luc LOIZEAU, Janusz DOMINIK, «Evolution of the Upper Rhone River discharge and suspended sediment load during the last 80 years and some implications for Lake Geneva», dans *Aquatic Sciences*, 62 (2000), p. 54-67.

<sup>18</sup> Rolf WEINGARTNER, Hugo ASCHWANDEN, *Régimes d'écoulement comme base pour l'estimation des valeurs moyennes des débits*, Planche 5.2 de l'Atlas hydrologique de la Suisse, Berne, Office fédéral de l'environnement, 1992.

<sup>19</sup> MEILE, FETTE, BAUMANN, *Synthesebericht Schwall/Sunk*.

<sup>20</sup> Mira PORTMANN, Peter BAUMANN, Barbara IMHOF, *Schwebstoffhaushalt und Trübung der Rhone*, Rhone-Thur Projekt, EAWAG, WSL, 2004.

<sup>21</sup> Markus W. FETTE, *Tracer studies of river-groundwater interaction under hydropeaking conditions*, Thèse de doctorat, ETH Zurich, 2005; Werner MEIER *et al.*, *Wassertemperaturen und Wärmehaushalt der Rhone und ihrer Seitenbäche*, Publikation des Rhone-Thur Projektes, EAWAG, WSL, 2004; Martin FREY, *Temperaturmodellierung - Auswirkungen von Kraftwerken auf das Temperaturregime in Zuflüssen der Rhône*, Mémoire de master, ETH Zürich, 2003.

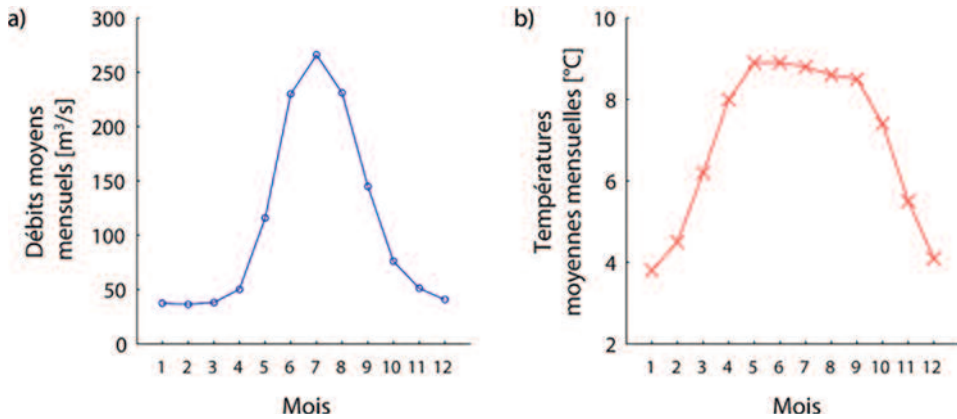


Fig. 3. Valeurs moyennes mensuelles des débits (période des mesures: 1916-2011) (a) et des températures (1974-2011) (b) du Rhône à Sion<sup>22</sup>.

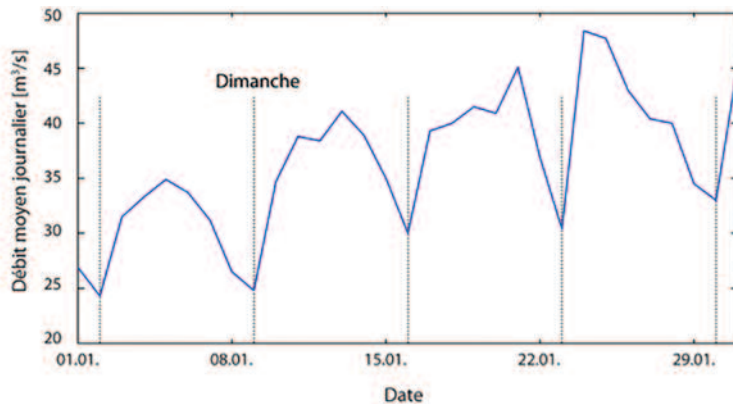


Fig. 4. Débit journalier moyen à Sion<sup>23</sup>, janvier 2011 (le débit est plus faible durant le week-end en raison de la baisse de la consommation d'électricité; les dimanches sont indiqués par des lignes verticales).

L'eau du Rhône est peu minéralisée et sa conductivité électrique est basse, de l'ordre de 100 à 250  $\mu\text{S}/\text{cm}^{24}$  en moyenne. La température moyenne annuelle du Rhône à Sion est de 7,0 °C; les températures maximales sont mesurées en mai et juin, les valeurs minimales en janvier.

<sup>22</sup> Office fédéral de l'environnement, *Données hydrologiques de la station Rhône-Sion; Période de 1974-2011*, données consultées en 2011.  
En ligne: [http://www.hydrodaten.admin.ch/fr/2011.html#historische\\_daten](http://www.hydrodaten.admin.ch/fr/2011.html#historische_daten).

<sup>23</sup> *Ibidem*.

<sup>24</sup> Marc BERNARD, Régine BERNARD, David THELER, *Qualité des cours d'eau en Valais*, Canton du Valais, Département des transports, de l'équipement et de l'environnement, Service de la protection de l'environnement, 2007.

## Description de l'aquifère

### *Composition de l'aquifère*

Pour la zone d'étude, les données d'environ 900 forages ont été codifiées dans la base de données cantonale BdFor<sup>25</sup>. Elles ont été utilisées pour décrire l'extension et la stratigraphie des dépôts alluviaux superficiels. Les données ont été analysées selon la méthode des courbes verticales de proportion (VPC), introduites par Georges Matheron *et al.*<sup>26</sup> dans le contexte des simulations de réservoir. Les courbes VPC résumant chaque horizon en fonction de son lithofaciès, représenté ici par sa granulométrie dominante ou primaire. Ces courbes permettent de rendre de manière graphique et synthétique l'abondance relative des granulométries dominantes suivant la profondeur pour l'ensemble des forages disponibles.

La zone d'étude a été divisée en sous-secteurs, selon leur morphogenèse (plaine alluviale, cône de déjection, dépôts d'éboulement). La figure 5 présente, sous forme de courbes VPC et par sous-secteur, la granulométrie dominante en fonction de la profondeur, ainsi qu'une carte indiquant les positions des forages. La figure 6 présente les proportions moyennes des classes granulométriques dominantes par sous-secteur.

Dans la zone d'étude, les faciès à graviers sont les plus fréquents. Les faciès à limons et sables sont également présents. L'argile constitue dans certains horizons la granulométrie dominante. C'est le cas dans le secteur 2, à des profondeurs plus grandes que 20 m, dans le secteur 3, ainsi que dans le secteur 7, à proximité des dépôts de l'éboulement de Sierre.

Dans tous les profils, la partie superficielle est dominée par les limons et la terre végétale. Leur proportion diminue rapidement vers le bas et, à partir d'une profondeur de 1 m à 1,5 m, la fraction dominante est le plus souvent grossière. En dessous de 5 m, la proportion de limon est relativement stable. La seule exception à cette tendance est observée dans la région située entre Riddes et Martigny (secteur 2), où la proportion de limon augmente à une profondeur d'environ 15 m et devient même la fraction la plus importante autour de 18 m, pour diminuer ensuite en dessous de 25 m. Cette intercalation de sédiments fins correspond à une période durant laquelle ont prévalu des conditions de dépôt de basse énergie. Elle ne reflète par contre probablement pas une transition vers les sédiments lacustres sous-jacents<sup>27</sup>. Cette couche de sédiments fins à une profondeur d'environ 18 m peut localement être considérée comme la base de l'aquifère supérieur.

Certains niveaux à sédiments grossiers contiennent également une part significative de sédiments fins, dont la proportion tend à augmenter vers l'amont, comme, par exemple, dans le secteur 7 (Chalais - Salquenen), où les dépôts d'éboulement prévalent.

<sup>25</sup> BdFor, Base de données de forage, Canton du Valais, 2010.

<sup>26</sup> Georges MATHERON *et al.*, «Conditional simulation of the geometry of fluvio-deltaic reservoirs», dans *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1987, p. 591-599.

<sup>27</sup> BESSON *et al.*, «Campagne de sismique-réflexion».

A l'échelle de la zone d'étude, la stratigraphie est plutôt homogène. A petite échelle cependant, la variabilité est relativement élevée, reflétant la dynamique de remplissage du bassin du Rhône.

Les sédiments observés dans les forages témoignent essentiellement de conditions de dépôt à haute énergie. Les horizons superficiels constitués de sables fins et de limons sont souvent influencés par des interventions anthropiques visant à améliorer les aptitudes agricoles des sols<sup>28</sup>. Comme le montre la figure 5, les forages

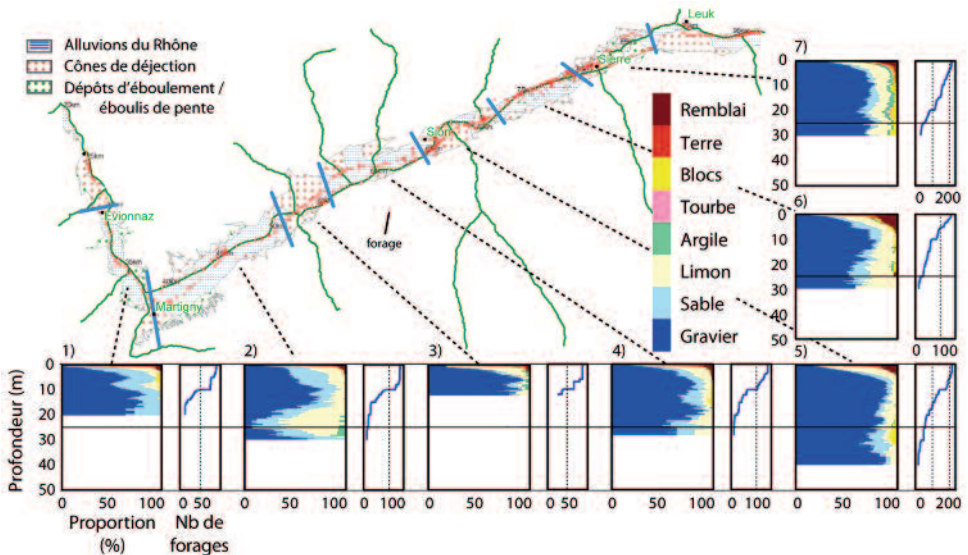


Fig. 5. Granulométries dominantes selon les secteurs et en fonction de la profondeur; l'analyse n'est faite que dans la mesure où au moins 10 forages sont disponibles à la profondeur considérée. Secteurs: 1) Evionnaz - Martigny; 2) Martigny - Riddes; 3) cônes de déjection de la Fare et de la Losentse; 4) Ardon - Sion; 5) cônes de déjection de la Borgne et de la Lienne; 6) Saint-Léonard - Chalais; 7) Chalais - Salquenen.

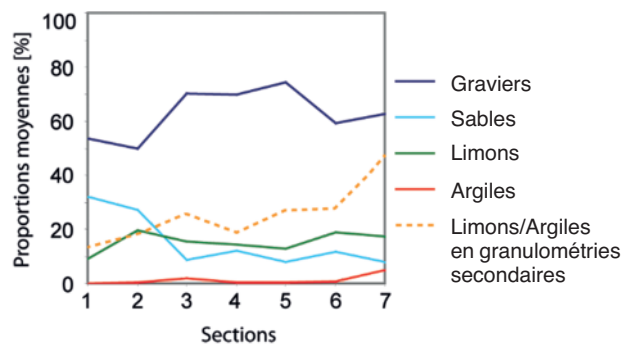


Fig. 6. Pourcentage des granulométries dominantes dans les sous-secteurs. En trait tillé: pourcentage d'échantillons dans lesquels les limons et les argiles sont présents en granulométries secondaires.

<sup>28</sup> Groupement Catena, *Etudes de bases pédologie, Plan d'aménagement Rhône*, 2013 (non publié).



disponibles sont en général trop courts pour atteindre la base des dépôts alluviaux. L'extension de 30 m proposée par Besson *et al.*<sup>29</sup> pour la région de Sion n'est pas confirmée par l'analyse des données des forages, qui indique une extension minimale des dépôts alluviaux de 40 à 50 m dans cette région.

### Conductivité hydraulique de l'aquifère

En plus de la description lithologique, la base de données BdFor contient les résultats des tests hydrauliques à petite échelle. Ils ont été utilisés pour construire des distributions de la conductivité hydraulique pour les principaux types de lithofaciés définis d'après les trois granulométries principales identifiées dans BdFor<sup>30</sup>.

Les statistiques de base (moyenne, variance) pour la conductivité hydraulique des lithofaciés documentés par plus de 15 essais sont présentées dans la figure 7. Les

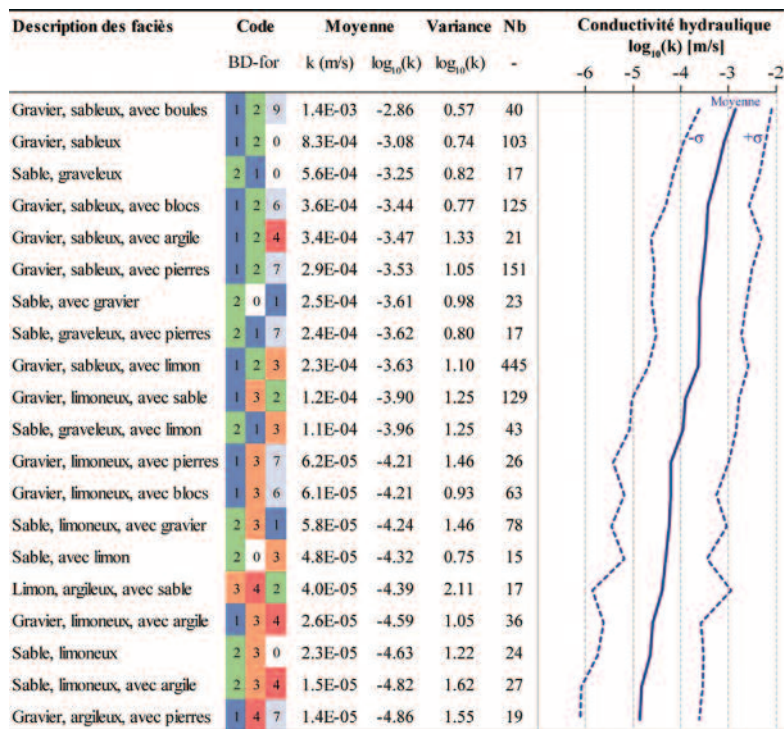


Fig. 7. Lithofaciés principaux et conductivités hydrauliques (k) correspondantes, estimés à partir des essais hydrauliques (par ordre de k décroissant; >=15 échantillons; données: BdFor).

<sup>29</sup> BESSON *et al.*, «Campagne de sismique-réflexion».

<sup>30</sup> Types de granulométrie primaire: gravier (1), sable (2), limon (3), argile (4), tourbe (5), blocs (6), rocher (7), terre (8), gypse (9), remblai (10); types de granulométrie secondaire: graveleux (1), sableux (2), limoneux (3), argileux (4); types de granulométrie complémentaire: avec du gravier (1), avec du sable (2), avec du limon (3), avec de l'argile (4), avec de la tourbe (5), avec des blocs (6), avec des pierres (7), avec du gypse (8), avec des boules (9).

conductivités hydrauliques moyennes des différents lithofaciès sont réparties entre  $10^{-3}$  et  $10^{-5}$  m/s environ. Si les moyennes des conductivités hydrauliques montrent un certain accord avec la granulométrie des sédiments, la dispersion des valeurs pour un lithofaciès donné, exprimée dans la figure 7 par un écart-type de  $\log_{10} k$ , se situe dans une fourchette de 1,5 à 3 ordres de grandeur. L'estimation des conductivités hydrauliques à partir des données de la figure 7 est donc entachée d'une certaine incertitude.

Sur la base des moyennes des conductivités hydrauliques des différents lithofaciès, une conductivité hydraulique moyennée sur la verticale a été calculée pour chaque forage. La figure 8 présente l'histogramme des logarithmes de ces conductivités hydrauliques moyennes. Les valeurs suivent approximativement une loi normale, avec une conductivité moyenne correspondant à  $3,6 \times 10^{-4}$  m/s.

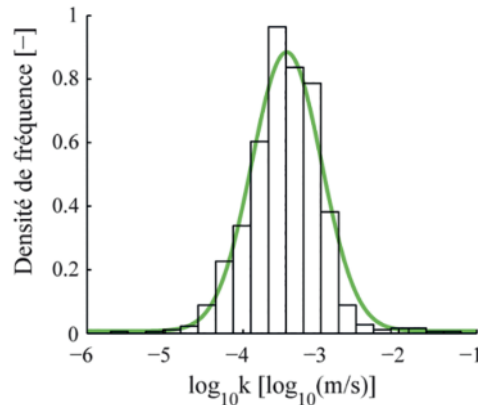


Fig. 8. Histogramme des conductivités hydrauliques moyennes par forage et loi normale, avec une moyenne de -3,44 et un écart-type de 0,45 (en  $\log_{10} k$ ).

## Caractéristiques de la nappe phréatique

### *Recharge par les précipitations*

La vallée du Rhône est protégée des précipitations par le relief des côtés nord et sud. Cela mène à une distribution contrastée des précipitations, avec généralement des conditions sèches dans la plaine et des précipitations élevées dans les montagnes. Dans la région du Valais central, la moyenne annuelle des précipitations mesurées est inférieure à 700 mm<sup>31</sup>. Elle s'élève par exemple à 598 mm à Sion<sup>32</sup>. A l'intérieur de la zone d'étude, les précipitations sont plus élevées à l'ouest et diminuent vers l'est.

<sup>31</sup> Walter KIRCHOFER, Boris SEVRUK, *Hauteurs annuelles moyennes corrigées des précipitations, 1951-1980*, Planche 2.2 de l'*Atlas hydrologique de la Suisse*, Berne, Office fédéral de l'environnement, 1992.

<sup>32</sup> Office fédéral de météorologie et de climatologie suisse, *Normes climatologiques 1961-1990, Station de Sion* (données consultées en 2010. En ligne: <http://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/passe/normes-climatologiques/diagrammes-climatiques-et-normes-par-station.html>).

La valeur maximale de la recharge de l'aquifère par les précipitations peut être estimée par la différence entre les précipitations annuelles moyennes et la moyenne annuelle d'évaporation réelle<sup>33</sup>, c'est-à-dire par les précipitations moyennes nettes.

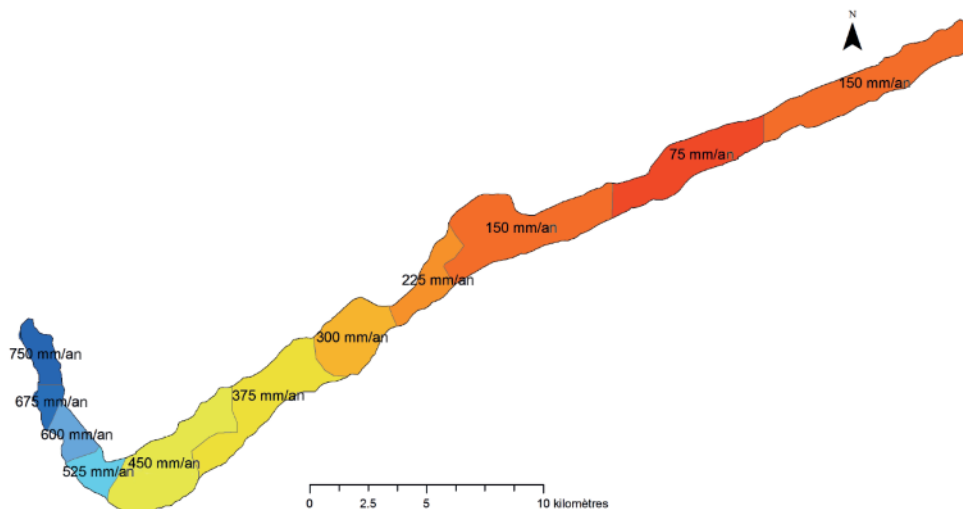


Fig. 9. Carte des précipitations annuelles moyennes nettes (précipitations annuelles moyennes moins la moyenne annuelle d'évaporation réelle). La résolution des données de base est de 2x2 km<sup>2</sup> (données de précipitation) et 1x1 km<sup>2</sup> (données d'évaporation). Pour un meilleur rendu visuel, le résultat de la différence entre les deux a été traité avec une moyenne mobile (taille de la fenêtre mobile: 5 km).

### *Prélèvements d'eau dans l'aquifère*

Les ressources de l'aquifère superficiel sont utilisées comme eau potable, ainsi que pour l'industrie et l'irrigation. Ces différents prélèvements sont difficiles à estimer, en raison de l'absence de systématique dans la manière de les documenter. Concernant l'utilisation comme eau potable et industrielle, les informations disponibles ont été récoltées au niveau local. Sur la base de ces informations, ces prélèvements sont estimés à environ 25 000 m<sup>3</sup>/j.

Pour les eaux d'irrigation, une analyse globale a été faite d'après les besoins d'irrigation des terres arables en Suisse<sup>34</sup> et d'après la contribution des eaux souterraines à la demande en eau pour l'irrigation en Valais, estimée à 16%<sup>35</sup>. Sur la base de la moyenne annuelle, la quantité maximale extraite a été estimée à environ 2300 m<sup>3</sup>/j.

Selon les premières estimations, l'importance des prélèvements s'avère relativement faible par rapport au bilan global de l'aquifère, de sorte que, à grande échelle, ils ne jouent qu'un rôle mineur dans le comportement de l'aquifère. Localement, les

<sup>33</sup> Lucas MENZEL, Herbert LANG, Martin ROHMANN, *Evaporation réelle annuelle moyenne 1973-1992*, Planche 4.1 de l'*Atlas hydrologique de la Suisse*, Berne, Office fédéral de l'environnement, 1999.

<sup>34</sup> Jürg FUHRER, *Abschätzung des Bewässerungsbedarfs in der Schweizer Landwirtschaft*, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART - Forschungsgruppe Lufthygiene/Klima, E.V. EVD, 2010.

<sup>35</sup> Communication personnelle de Jürg Fuhrer (2011).

prélèvements peuvent cependant influencer celui-ci, comme, par exemple, à la hauteur de Sierre.

### *Écoulements des eaux souterraines*

L'étude générale des écoulements souterrains présentée dans ce paragraphe se fonde principalement sur les données hydrochimiques et hydrophysiques récoltées dans le cadre du projet Hydro-Rhône dans les années 1980<sup>36</sup>, ainsi que sur des cartes de niveaux piézométriques moyens<sup>37</sup>. Ces cartes utilisent des valeurs moyennes de charge hydraulique acquises dans le cadre de différentes études sur une période de 10 ans (1994-2003), sur un réseau constitué d'environ 730 piézomètres. Les niveaux piézométriques ont été mesurés deux fois par an, en saison de basses eaux (février-mars) et de hautes eaux (juillet-août) du Rhône.

Les figures 10 et 11a présentent les charges hydrauliques moyennes durant la période de hautes eaux du Rhône, en coupe longitudinale et en plan. Immédiatement à l'aval du cône de déjection de l'Illgraben (env. km 91), la nappe phréatique alluviale se situe à plus de 5 m de profondeur. Les études de Marc Schürch<sup>38</sup> et de Roland Steiner<sup>39</sup> montrent que la recharge de cette zone hydrogéologiquement complexe s'effectue par l'infiltration des eaux du Rhône et par l'apport latéral du flanc sud de la vallée. Sous l'effet de cette alimentation importante, le niveau de la nappe se rapproche de la surface du sol. A la hauteur de Chippis (km 81,5), la nappe est rabattue par les pompes d'alimentation en eau potable et industrielle. A l'aval de Sierre, le niveau piézométrique croît de nouveau, mais reste en dessous de la ligne d'eau du Rhône jusqu'à Sion, où le niveau de la nappe est le même que celui du Rhône sur un court tronçon (km 65-70). En période de basses eaux, une certaine exfiltration survient localement sur la rive gauche, à la hauteur du quartier de Vissigen. Après ce tronçon, le niveau de la nappe est de nouveau sous la ligne d'eau du Rhône. A l'aval de Vernayaz (km 35), il est plus haut que la ligne d'eau du fleuve: la nappe exfiltre dans le Rhône en raison de la présence du cône de déjection du Saint-Barthélemy<sup>40</sup>. Ce cône, on l'a vu, est en effet constitué de dépôts de laves torrentielles à faible perméabilité et fait obstacle à l'écoulement des eaux.

<sup>36</sup> GÉOVAL (Groupement des bureaux d'études géologiques, géotechniques et hydrologiques valaisans, Sion), *Rapport après 3 ans d'observation - Paliers 1-7*, Rapport Hydro-Rhône SA, 1986 (non publié).

<sup>37</sup> CREALP (Centre de recherche en environnement alpin, Sion), *Exploitation et valorisation des données piézométriques de la nappe alluviale - Plaine du Rhône entre Brig et le Léman, Cartes de la nappe phréatique*, 2008 (non publié).

<sup>38</sup> Marc SCHÜRCH, *Détermination des paramètres hydrauliques et hydrochimiques d'un aquifère alluvial dans une vallée alpine (Valais, Suisse)*, Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel, 2000.

<sup>39</sup> Roland STEINER, *Untersuchungen im Pfywald (Wallis) zu Wechselwirkungen zwischen Rhône und Grundwasser mittels Tracern und Modellrechnungen*, Travail de master, ETH Zürich, 2004 (non publié).

<sup>40</sup> Voir sur le Saint-Barthélemy et le cône du Bois-Noir, l'étude de Benjamin RUDAZ, dans ce volume, p. 129-152.

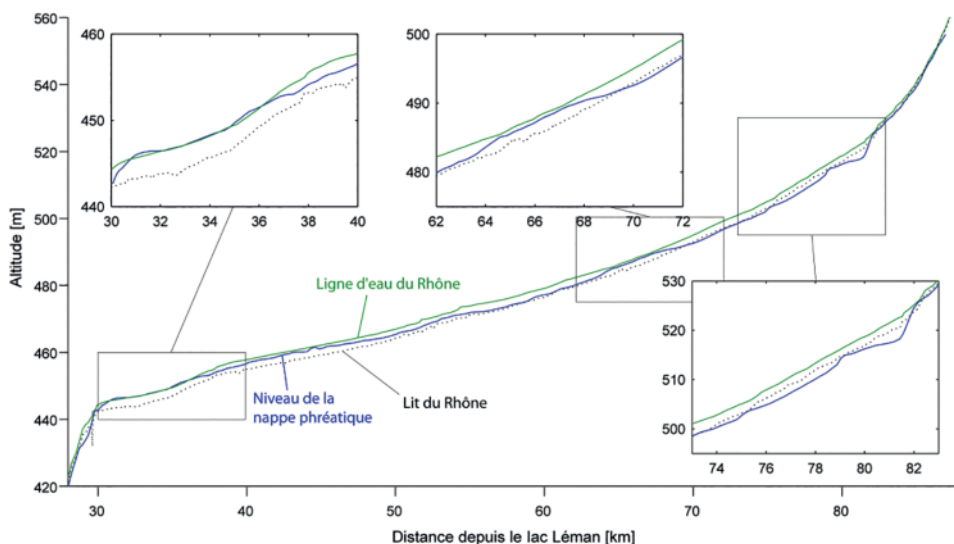


Fig. 10. Profil en long de l'élévation du lit du Rhône, hauteur d'eau dans le Rhône et charges hydrauliques de la nappe sous le fleuve (niveaux moyens en hautes eaux du Rhône; données PAR3<sup>41</sup>).

A grande échelle, la surface de la nappe est parallèle à la surface du sol, dont elle est relativement proche, souvent entre un à deux mètres (voir fig. 13a). Il s'agit d'un aquifère généralement non confiné dont le flux est, à grande échelle, parallèle au Rhône. Le gradient hydraulique moyen entre Sierre et Evionnaz est d'environ 1,5‰ (voir fig. 11a). Il a une valeur maximale d'environ 7‰ à la hauteur de Sierre.

Les battements annuels de la nappe (différence entre les niveaux moyens en hautes et en basses eaux du Rhône) varient d'année en année. Ils sont souvent inférieurs à un mètre, mais peuvent localement atteindre deux mètres (voir fig. 11b). Ils sont en général plus élevés à proximité du Rhône et synchrones avec le comportement du fleuve, en raison de l'influence de ce dernier. A proximité des versants, des battements élevés sont localement mesurés, probablement sous l'effet de zones d'alimentation souterraine. A proximité des canaux drainant la nappe, les battements sont plus faibles. C'est également le cas lorsque le sous-sol est moins perméable.

<sup>41</sup> *Rapport de synthèse du plan d'aménagement de la 3<sup>e</sup> correction du Rhône - PA-R3*, Canton du Valais, Département des transports, de l'équipement et de l'environnement, 2008.

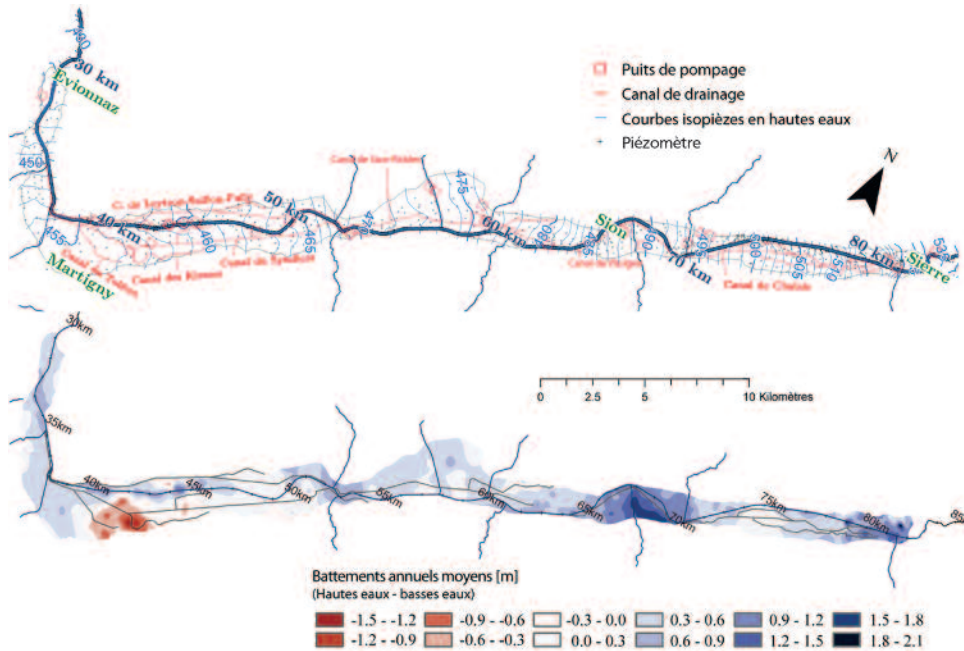


Fig. 11. a) Carte des isopièzes moyennes 1994-2003 en période de hautes eaux du Rhône<sup>42</sup>; b) Battements annuels moyens (différence entre les niveaux moyens durant les hautes et basses eaux du Rhône, 1994-2003)<sup>43</sup>. Les figures incluent les principaux canaux.

## Hydrochimie

Durant les années 1985-1986, plus de 1300 analyses ont été effectuées dans le cadre du projet Hydro-Rhône<sup>44</sup>, sur un réseau particulièrement dense.

Les paramètres suivants ont été mesurés en période de hautes eaux et de basses eaux du Rhône, dans les eaux de surface ainsi que dans les eaux souterraines: température, conductivité électrique, pH, principaux cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ), principaux anions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ) et oxygène dissous. Ces données sont utilisées ici pour caractériser l'hydrochimie de la nappe. Elles sont visualisées dans des diagrammes de Piper et de Schoeller, respectivement dans les figures 12a et 12b.

<sup>42</sup> CREALP, *Cartes de la nappe phréatique*.

<sup>43</sup> *Ibidem*.

<sup>44</sup> GÉOVAL, *Rapport Hydro-Rhône*.

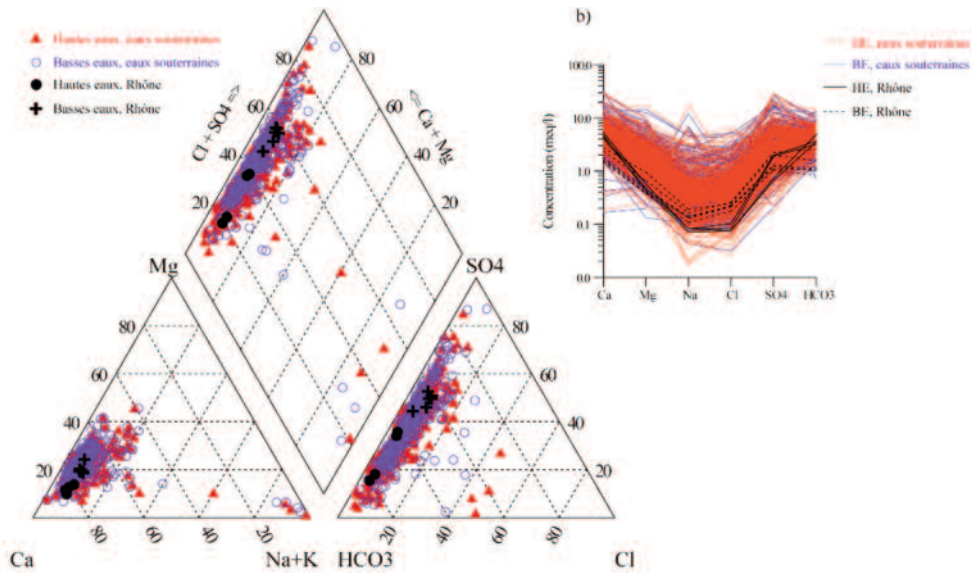


Fig. 12. Composition de l'eau de l'aquifère alluvial en fonction des principaux ions en a) un diagramme de Piper; b) un diagramme de Schoeller (données: Projet Hydro-Rhône<sup>45</sup>).

Du côté des cations, l'eau est principalement dominée par le  $\text{Ca}^{2+}$  et, dans une proportion moindre, par le  $\text{Mg}^{2+}$ . Les principaux anions sont le  $\text{HCO}_3^-$  et le  $\text{SO}_4^{2-}$  (fig. 12b). Les données suggèrent une composition hydrochimique stable durant toute l'année. Dans l'ensemble, les eaux du Rhône et celles de la nappe ont une composition chimique similaire (fig. 12a). Les eaux du Rhône sont cependant généralement moins minéralisées (fig. 12b).

La concentration en oxygène dissous et la conductivité électrique sont représentées sous forme de cartes à la figure 13. Il s'agit de traceurs environnementaux fournissant des informations utiles pour comprendre le régime de la nappe. En effet, les eaux de recharge provenant des eaux de surface sont riches en oxygène<sup>46</sup>. L'oxygène dissous est donc considéré comme un indicateur de la recharge de l'aquifère alluvial par les eaux de surface.

<sup>45</sup> CREALP, *Cartes de la nappe phréatique*.

<sup>46</sup> Allan R. FREEZE, John A. CHERRY, *Groundwater*, Englewood Cliffs, 1979.

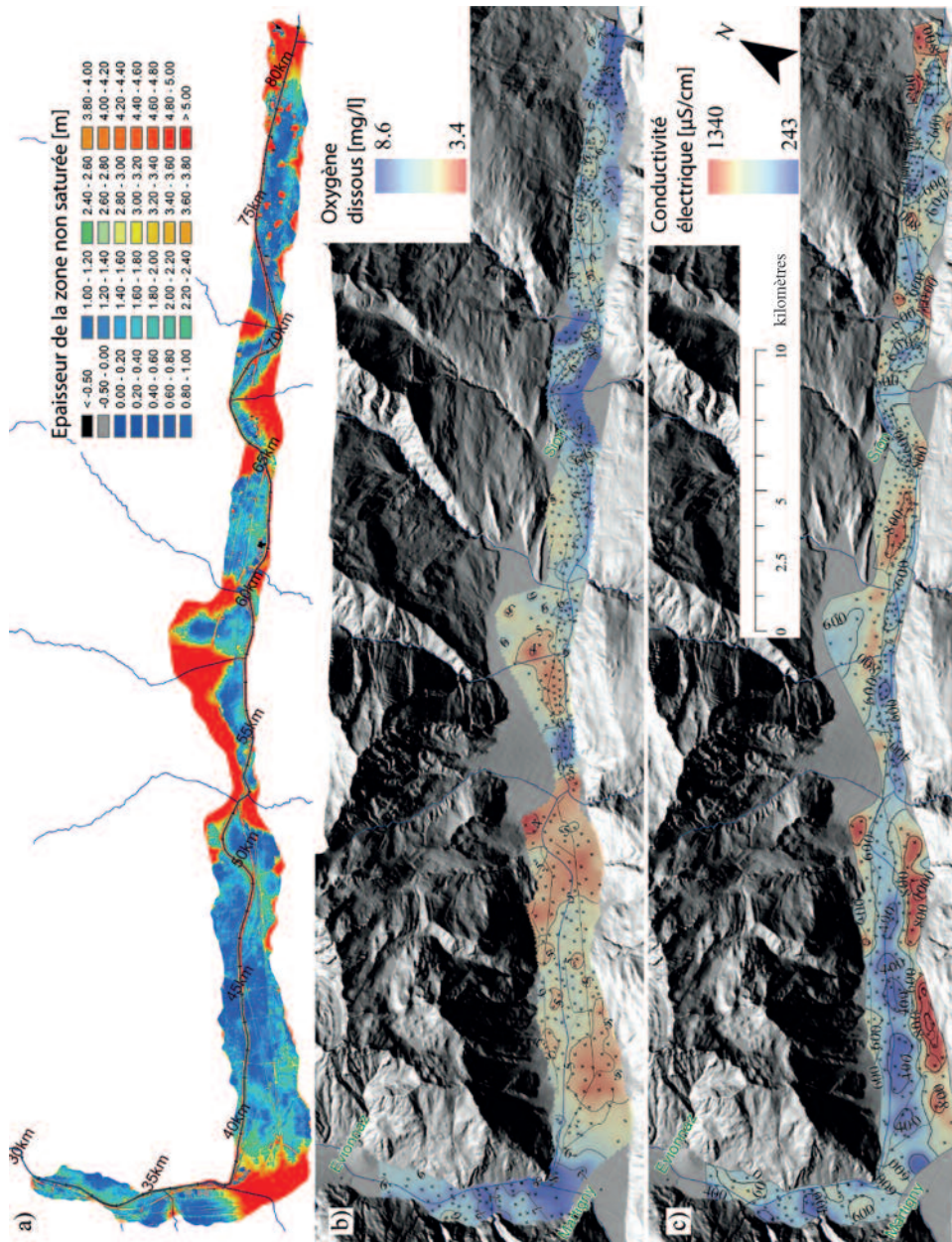


Fig. 13. a) Profondeur de la nappe en hautes eaux (valeurs moyennes 1994-2003<sup>47</sup>); b) concentration en oxygène dissous<sup>48</sup>; c) conductivité électrique (données: hautes eaux 1985<sup>49</sup>).

<sup>47</sup> CREALP, *Cartes de la nappe phréatique*.

<sup>48</sup> GÉOVAL, *Rapport Hydro-Rhône*.

<sup>49</sup> FREEZE, CHERRY, *Groundwater*.



Dans certains cônes de déjection, par exemple la Lienne, la Borgne, la Dranse et le Trient, où des concentrations élevées ont été mesurées (> 8 mg/l), le niveau d'eau de la nappe est situé à une grande profondeur. Il est concevable que dans ces cônes de déjection, la recharge de l'aquifère se fasse au travers d'une zone non saturée et aérée. Ce processus a été suggéré pour expliquer les concentrations élevées en oxygène dissous dans l'aquifère de la Thur<sup>50</sup>.

Entre Vétroz et le cône de déjection de la Losentse (km 55-58), ainsi qu'entre Riddes et Martigny (km 39-54), la nappe est appauvrie en oxygène dissous (3-4 mg/l). Ce phénomène peut être la conséquence d'une réduction de la vitesse d'écoulement ou encore d'une concentration plus élevée en carbone organique dans les sédiments de ce secteur.

La conductivité électrique est corrélée avec la concentration en ions, en particulier  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ . Les zones d'alimentation des eaux souterraines par des eaux de versants correspondent en général à des zones de conductivité élevée, comme dans les secteurs suivants:

- entre Charrat et Riddes (aux environs des km 40 à 50), où émergent plusieurs sources de type  $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ <sup>51</sup>,
- entre Leytron et Saillon, à proximité des zones de résurgences thermales<sup>52</sup>,
- dans la région d'Aproz (km 60-63), où sont présentes de nombreuses sources fortement minéralisées, riches en sulfates<sup>53</sup>,
- à «Pouta-Fontana», en rive gauche à l'amont de l'embouchure de la Lienne (km 71,5-73), où se trouve également une source riche en sulfates<sup>54</sup>,
- en face du lac souterrain karstique de Saint-Léonard (km 72).

Les conductivités élevées peuvent également être liées à une augmentation de la minéralisation de l'eau par dissolution des terrains aquifères, favorisée par une circulation lente des eaux, comme, par exemple, à l'amont de la zone d'étude, dans la région de Sierre, où les eaux souterraines circulent dans les dépôts peu perméables de l'éboulement de Sierre<sup>55</sup>.

Une zone de conductivité électrique relativement faible est le plus souvent présente de part et d'autre du Rhône, les valeurs les plus faibles étant mesurées à proximité immédiate du fleuve. Etant donné la minéralisation négligeable des eaux du Rhône<sup>56</sup>, cette distribution spatiale peut être utilisée comme indicateur des zones d'infiltration des eaux du Rhône dans l'aquifère<sup>57</sup>. D'autres zones à faible conductivité électrique, coïncidant avec des teneurs élevées en oxygène dissous, se rencontrent dans les cônes de déjection de la Lienne, de la Borgne et du Trient. Leur présence peut s'expliquer par une infiltration d'eaux peu minéralisées des affluents ou

<sup>50</sup> Eduard HOEHN, Andreas SCHOLTIS, «Exchange between a river and groundwater, assessed with hydrochemical data», dans *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 (2011), DOI: 10.5194/hessd-7-9023-2010.

<sup>51</sup> Myriam GRANGES, *Etude hydrogéologique et géochimique du système hydrothermal de Saxon, Valais*, Travail de diplôme, Université de Neuchâtel, 2009 (non publié).

<sup>52</sup> François VUATAZ *et al.*, «Résultats d'une prospection des ressources géothermiques du Valais, Suisse», dans *Bulletin du Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel*, 12 (1993), p. 1-37.

<sup>53</sup> FETTE, *Tracer studies of river-groundwater interaction*.

<sup>54</sup> GÉOVAL, *Rapport Hydro-Rhône*.

<sup>55</sup> Marcel BURRI, «La géologie du quaternaire aux environs de Sierre», dans *Bulletin de la Murithienne*, 72 (1955), p. 1-14.

<sup>56</sup> Valeur moyenne: 190  $\mu\text{S/cm}$ .

<sup>57</sup> Valeur moyenne: 654  $\mu\text{S/cm}$ .

du versant. Dans certaines zones (par exemple entre les km 39 et 54), on observe des eaux à conductivité électrique faible, pauvres en oxygène dissous. Cela peut être interprété comme un effet de la consommation d'oxygène par l'activité microbienne dans des eaux initialement riches en oxygène.

La carte des conductivités met en évidence le rôle important des canaux, qui constituent souvent des limites claires entre différents types d'eaux, faiblement minéralisées côté Rhône et plus minéralisées côté versant.

## Synthèse

### *Echanges entre l'aquifère et les eaux de surface*

Une analyse des relations géométriques entre le Rhône et la nappe a été menée dans le cadre des études de base du plan d'aménagement de la Troisième Correction du Rhône<sup>58</sup>. Cette analyse se fonde sur la comparaison entre les niveaux moyens du fond du Rhône, de la ligne d'eau du Rhône et de la nappe. Cette approche fondée sur des valeurs moyennes permet une première analyse des relations entre le cours d'eau et l'aquifère, selon les typologies décrites à la figure 14, caractérisant le comportement de la nappe à grande échelle. A l'échelle locale, cette première analyse doit être complétée par la prise en compte de l'influence des conditions aux limites, des caractéristiques locales de l'aquifère, ainsi que du comportement transitoire des relations entre le fleuve et les eaux souterraines.

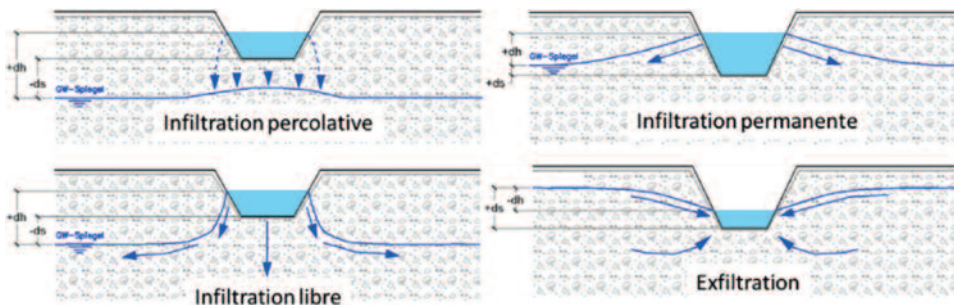


Fig. 14. Représentation des typologies de relations entre un fleuve et un aquifère, sur la base des critères géométriques, d'après Peterson et Wilson<sup>59</sup>.

La figure 15 représente le niveau moyen de la nappe dans l'aquifère entre Brigue et le Léman, relativement à la ligne d'eau du Rhône et au fond moyen du Rhône, en période estivale et hivernale. Cette représentation permet d'identifier quatre systèmes d'écoulement limités par des zones à faible perméabilité (cônes de déjection de l'Illgraben et du Saint-Barthélemy; seuil rocheux de Saint-Maurice). Vers l'aval, l'aquifère est limité par le lac Léman.

<sup>58</sup> ROVINA + PARTNER AG, Varen, *Beurteilung der GW-Beeinträchtigung auf Stufe Generelles Projekt*, 2008, Rapport Projet Rhône 3 (non publié).

<sup>59</sup> Cité par Marios SOPHOCLEOUS, «Interactions between groundwater and surface water: the state of the science», dans *Hydrogeology Journal*, 10, 2 (2002), p. 52-67.

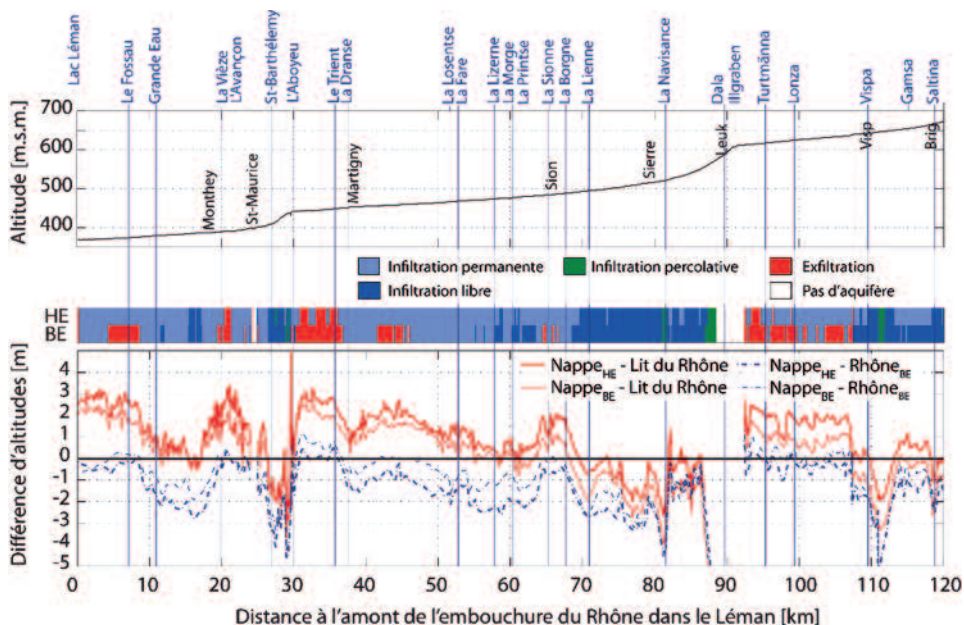


Fig. 15. Partie supérieure: profil en long du Rhône. Partie inférieure: niveau moyen de la nappe dans l'aquifère, relativement à la ligne d'eau du Rhône (traits bleus) et au fond moyen du Rhône (traits rouges), en période estivale (traits épais) et hivernale (traits fins). Barres du milieu: représentation des typologies des échanges entre le Rhône et les eaux souterraines (HE: en saison de hautes eaux du Rhône; BE: en saison de basses eaux).

Sur la majeure partie du linéaire, le niveau des eaux souterraines se situe en dessus du lit du fleuve et en dessous de la ligne d'eau du fleuve (infiltration permanente). A la hauteur de Siere (km 82), de même qu'à Viège (km 110), la nappe est située à quelques mètres sous le lit du fleuve (infiltration percolative). Ces situations sont imputables au rabattement de la surface piézométrique par les pompages présents dans cette zone. Dans les transitions, ainsi que dans certains tronçons particuliers, la nappe est sous le fond du Rhône, mais une zone saturée relie le fleuve à l'aquifère (infiltration libre).

### Modèle conceptuel

La figure 16 présente le modèle conceptuel de l'aquifère alluvial du Rhône, élaboré sur la base des données disponibles. Ce modèle intègre les principaux facteurs influençant ledit aquifère et résumés ci-dessous.

Dans le secteur d'étude, le remplissage quaternaire de la vallée du Rhône est composé, dans sa partie supérieure, de dépôts alluviaux relativement perméables et grossiers – graviers et sables grossiers principalement –, qui constituent l'aquifère alluvial de la plaine du Rhône. Son épaisseur est peu connue, en raison de la profondeur généralement insuffisante des forages. On admet qu'elle varie entre 30 et

90 mètres. Les dépôts lacustres sous-jacents sont peu perméables, de sorte qu'on considère que leur toit forme la base de l'aquifère superficiel.

Les interactions entre les eaux de surface et la nappe influencent fortement le comportement de l'aquifère superficiel, comme le montrent les cartes de potentiel et les paramètres physico-chimiques. A ce titre, le Rhône contribue de façon importante à l'alimentation de la nappe sur la majeure partie du linéaire (infiltration libre et permanente), mais également à son drainage à l'amont des limites étanches constituées par les cônes de l'Illgraben et du Saint-Barthélemy (exfiltration). A l'amont de la zone d'étude, à la hauteur de Sierre, la nappe est déconnectée du Rhône, en raison du rabattement de la surface piézométrique par les pompages présents dans la zone. Localement, les canaux jouent un grand rôle en drainant les eaux de la nappe. Quant aux précipitations, elles ne jouent qu'un rôle secondaire dans la recharge de l'aquifère, comparativement à la contribution du Rhône. Les apports de versant peuvent, par endroits, être importants, se manifestant par des dômes piézométriques et par un chimisme particulier de la nappe.

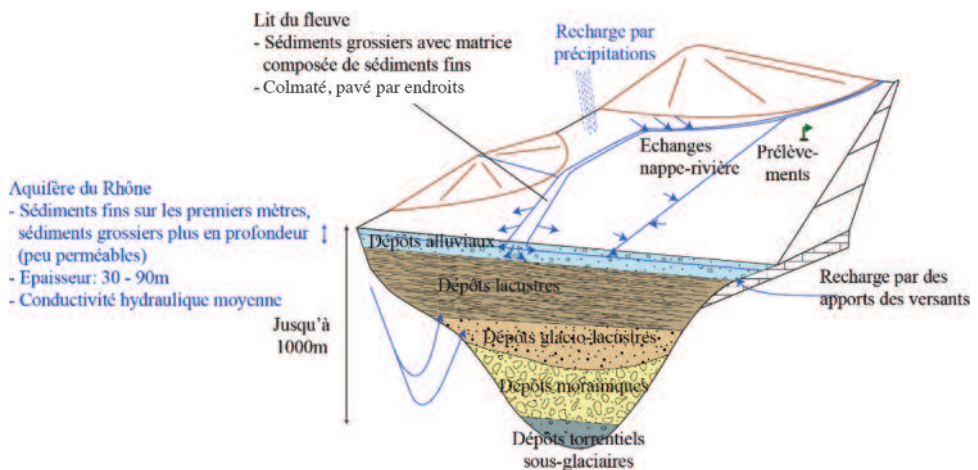


Fig. 16. Modèle conceptuel de l'aquifère alluvial du Rhône représentant les principaux facteurs influents.