FONCTIONNEMENT ET GESTION DES AQUIFÈRES ALLUVIAUX DE HAUTE ALTITUDE CAS DE LA HAUTE-SARINE (ALPES SUISSES)

THÈSE N° 2244 (2000)

PRÉSENTÉE AU DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Julien VAUDAN

diplômé EPF en sciences naturelles
de nationalité suisse et originaire de Bagnes (VS)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. A. Parriaux, directeur de thèse
Dr S. Bernasconi, rapporteur
Prof. M. Campy, rapporteur
Dr G. Della Valle, rapporteur
Prof. A. Schleiss, rapporteur

Lausanne, EPFL
2000

Table des matières

1. Introduction **1**

1.1. Les aquifères alluviaux alpins 1
1.2. Cadre et buts de la thèse 1
1.3. Déroulement et méthodologie 2
1.4. Aspects financiers et collaborations 3

2. Cadre géographique et bref historique du développement régional **5**

2.1. Cadre géographique 5
2.2. Bref aperçu historique du développement touristique 6
2.3. L'aérodrome militaire de Saanen 8
2.4. Les barrages du Sanetsch et d'Arnon (Arnen) 8

3. Cadre géologique régional **11**

3.1. Le contexte tectonique préalpin 11
3.1.1. Les nappes helvétiques 11
3.1.2. L'ultrahelvétique 13
3.1.3. La Zone Submédiane 13
3.1.4. Les nappes préalpines 14
3.2. Aspects structuraux 16
3.3. Implications hydrogéologiques 17

4. Cadre géologique local : le remplissage quaternaire **19**

4.1. Généralités 19
4.2. Données existantes 19
4.3. Investigations Géophysiques 21
4.3.1. Méthodes géoélectriques 21
4.3.2. Méthodes sismiques 25
4.4. Forages, essais de pompage et micromoulinet 27
4.4.1. Déroulement de la campagne de sondage 27
4.4.2. Essais de pompage et micromoulinet de forage 28
4.5. Synthèse sur les propriétés hydrogéologiques 29
4.5.1. Le Bassin de Saanen-Gstaad 31
4.5.2. Région de grund 37
4.5.3. Le bassin de Feutersoey-Zälg-Bode 38
4.5.4. Bassin de Gsteig 38
4.6. Contribution à la reconstruction du retrait glaciaire 39

5. Aspects climatologiques 45

5.1. Précipitations 45
5.2. Evapotranspiration 47

6. Hydrogéologie de la haute Sarine 49

6.1. Généralités 49
6.2. Caractérisation des écoulements de surface 50
6.2.1. Dynamique et régime d'écoulement 51
6.2.2. Analyse de la décrue principale de la Sarine 56
6.2.3. Présentation des caractéristiques physico-chimiques 59
6.3. Ecoulements souterrains 62
6.3.1. Variations piézométriques et régime d'écoulement souterrain 62
6.3.2. Calcul des bilans des écoulements souterrains 66
6.3.3. Qualités des eaux souterraines 69

7. Modélisation des écoulements 81

7.1. Choix et buts du modèle d'écoulement 81
7.2. Résultats 84
7.3. Apports de la modélisation pour la haute Sarine 86

8. Synthèse hydrogéologique générale et typicité de la haute Sarine 87

8.1. Remarque sur les aspects méthodologiques adoptés 87
8.2. Les différents types d'alimentation de la nappe alluviale 87
8.3. L'infiltration directe 88
8.4. Les échanges rivière-nappe (alimentation de type A) 88
8.5. Les infiltrations indirectes (alimentation de Type B, Karst et versants) 92
8.6. Synthèse des aspects quantitatifs et qualitatifs de la ressource 93
8.7. Typicité de la haute Sarine 95

9. Aménagement et gestion des eaux souterraines en milieu alpin 99

9.1. Cadre général 99
9.2. Concept de gestion des eaux souterraines en milieu alpin 100
9.2.1. La première phase : les investigations 100
9.2.2. La deuxième phase : le concept de gestion 101
9.2.3. La troisième phase : l'utilisation 103
9.3. La mise en valeur à long terme ou la "quatrième phase" 104

10. Conclusion 107

Liste des figures

Figure 2.1: La vallée de la haute Sarine dans le contexte alpin. 5

Figure 2.2: Carte de situation générale avec l'indication des noms de lieux utilisés au cours de cette thèse. 7

Figure 2.3: Situation des barrages. 9

Figure 3.1: Esquisse tectonique régionale simplifiée de la haute Sarine. 12

Figure 3.2: Plis dans l'Helvétique de la face Nord-ouest du Spitzhorn. 13

Figure 3.3: Schéma tectonique des nappes préalpines d'après Caron in Trümpy (1980) et Badoux et Lombard (1962). 14

Figure 3.4: Aperçu lithostratigraphique des nappes principales des Préalpes. 15

Figure 3.5: L'écaille du Rübli se distingue très nettement par sa morphologie. 17

Figure 4.1: Carte de situation des sondages mécaniques effectués dans la plaine alluviale de la haute Sarine entre 1950 et 1999. 20

Figure 4.2: Dispositif géoélectrique de type Schlumberger. 22

Figure 4.3: Carte des résistivités électriques apparentes. 24

Figure 4.4: Extrait du profil sismique réflexion de l'aéroport de Saanen (étude GEOLEP pour l'OEHE : OEHE, 1999a). 27

Figure 4.5: Diagraphies au moulinet de forage (flowmeter). 28

Figure 4.6: Carte des conductivités hydrauliques (compilation des archives et de nos essais sur KB31, KB32, KB33 et KB34). 30

Figure 4.7: Carte de la profondeur du bedrock déterminée par les méthodes d'investigation géophysiques et par forages. 32

Figure 4.8: Carte des sédiments quaternaires de la vallée de la haute Sarine. 33

Figure 4.9: Profils-types du remplissage quaternaire. 34

Figure 4.10: Schéma de principe d'un remplissage proglaciaire (Campy, 1989). 36

Figure 4.11: Dépôts proglaciaires de type sandur (Campy, 1989) 37

Figure 4.12: Stades tardiglaciaires (Maisch, 1982). 40

Figure 4.13: Cordon morainique de Büel. 41

Figure 4.14: Cordon morainique de Feutersoey (coord. 586700/140490) 42

Figure 5.1: Distribution mensuelle des précipitations. 46

Figure 5.2: Inondation au printemps 1999 (mois de mai) dans la région de Feutersoey-Zälg-Bode sur la rive droite de la Sarine. 47

Figure 5.3: Distribution spatiale des précipitations annuelles moyennes (Pa) dans la haute Sarine d'après Mauerhofer (1980)..... 48

Figure 6.1: Les éléments importants du cycle de l'eau dans le milieu alpin d'après Banton et al. (1997)..... 49

Figure 6.2: Profil type de l'endiguement de la Sarine avec ses digues (Kissling et Zbinden, 1984). 50

Figure 6.3: Aperçu de la distribution spatiale des points de mesures des paramètres physico-chimiques du réseau d'observation des eaux de surface. 52

Figure 6.4: Coefficients d'écoulement caractéristiques pour la Sarine. 53

Figure 6.5: Coefficients d'écoulement caractéristiques pour le Louibach à Gstaad. 53

Figure 6.6: Débits instantanés mesurés à la station limnigraphique AO66 de l'OEHE mise en place en 1999. 54

Figure 6.7: Influence des barrages sur les débits naturels des rivières dans la région de la haute Sarine. 55

Figure 6.8: Extrait de l'enregistrement du limnigraphe AO12 durant le mois de juin 1997..... 58

Figure 6.9: Hydrogrammes de fonte de neige dans les Alpes autrichiennes sur le torrent du Glatzbach à 2450 msm (Singh et al, 2000). 58

Figure 6.10: Extrait de l'annuaire hydrographique du canton de Berne..... 59

Figure 6.11: Variations temporelles et spatiales de la conductivité électrique des affluents principaux de la Sarine. 60

Figure 6.12: Variations temporelles et spatiales de la conductivité électrique de la Sarine durant la période d'observation. 61

Figure 6.13: Relations entre les différents types de réseaux d'écoulement en milieu alpin. Les fèêches indiquent les possibilités d'alimentation entre les systèmes. 63

Figure 6.14: Réseau d'observation de la nappe alluviale de la haute Sarine utilisé dans le cadre de cette thèse..... 64

Figure 6.15: Exemple de la synchronicité quasi parfaite entre la crue de la Sarine et la crue dans la nappe alluviale pour l'événement du 10.12.1997 au 13.12.1997..... 66

Figure 6.16: Situation et numéros des profils de bilan du flux de la nappe. 67

Figure 6.17: Comparaison des différents scénarios de calcul des bilans d'après l'étude GEOLEP (OEHE, 1999a). 68

Figure 6.18: Statistique sur les valeurs de conductivité électrique mesurées dans les eaux de la nappe alluviale de la haute Sarine de 1997 à 1999. 70

Figure 6.19: Résultats des mesures discrètes des paramètres physico-chimiques effectuées sur les points d'observation principaux de notre réseau. 71

Figure 6.20: Mesures de température et de la conductivité électrique effectuées sur les points A1 à A3. 72

Figure 6.21: Représentation de la composition des eaux souterraines de la haute Sarine par la méthode de Piper. 74

Figure 6.22: Carte des teneurs en sulfates mesurées sur notre réseau d'observation des eaux souterraines le 6.4.1998. 75

Figure 6.23: Corrélation entre les éléments majeurs et mineurs caractéristiques des eaux des aquifères du Trias. 76

Figure 6.24: Profil indiquant l'existence de la profondeur critique à partir de laquelle les variations saisonnières de la teneur en $\delta^{18}O$ des eaux souterraines ne se reflètent plus de manière significative d'après (Clark et Fritz, 1997). 78

Figure 6.25: Représentation de la relation entre l'altitude moyenne d'infiltration des précipitations et les valeurs moyennes en $\delta^{18}O$. 79

Figure 7.1: Conditions aux limites piézométriques et pour le transport de matière utilisées pour la modélisation numérique des écoulements. 83

Figure 7.2: Simulation des apports en sulfates. 85

Figure 8.1: Les différents types d'alimentation de la nappe alluviale de la haute Sarine déterminées dans le cadre de cette thèse. 88

Figure 8.2: Représentation schématique des types d'alimentation indirecte de la nappe. 89

Figure 8.3: Les différents types de relations rivière-nappe identifiées dans la haute Sarine, schémas d'après Blau et al. (1984). 90

Figure 8.4: Détail des échanges rivière-nappe à la hauteur de l'aérodrome de Saanen entre février et août 1998. 91

Figure 8.5: Les différents types de réserves d'après Parriaux (1999). 93

Figure 8.6: Situation des vallées alluviales alpines considérées dans notre comparaison. 96

Figure 9.1: Inadéquation de l'exploitation gravitaire du régime naturel des eaux souterraines et de la demande au cours d'une année type d'après Parriaux et al. (2000) 99

Figure 9.2: Principe d'aménagement en 3 phases des ressources en eaux souterraines en milieu alpin. 101

Figure 9.3: Concept d'utilisation des eaux souterraines de la haute Sarine. 102

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Déroulement de la thèse. 2

Tableau 1.2: Présentation des différentes étapes de cette thèse et des partenaires privés et institutionnels. 3

Tableau 2.1: Distribution par tranche d'altitudes de la topographie du bassin versant de la haute Sarine (d'après Mauerhofer 1980, modifié). 6

Tableau 4.1: Récapitulatif des méthodes géophysiques utilisées et du matériel nécessaire. 21

Tableau 4.2: Sondages géoélectriques réalisés dans la plaine alluviale de la haute Sarine. 23

Tableau 4.3: Synthèse des résultats de sismique réfraction. 26

Tableau 4.4: Synthèse des essais de pompage de courte durée et des essais au moulinet de forage (flowmeter). 29

Tableau 4.5: Récapitulatif des méthodes d'investigations géologiques et géophysiques appliquées à la haute Sarine. 31

Tableau 5.1: Stations de mesure de l'ISM dans la région de Saanen-Gsteig utilisées dans le cadre de cette thèse. 45

Tableau 5.2: Comparaison des données sur les précipitations mesurées durant cette thèse avec celles des études antérieures effectuées sur la haute Sarine. 46

Tableau 6.1: Réseau d'observation et de mesure de la Sarine et de ses affluents principaux (resp. S=Sarine et T=Torrents). 51

Tableau 6.2: Débits des principaux affluents de la Sarine en période d'étiage (mesures réalisées avec un appareil de jaugeage au sel de type MADD et sur la base des données limnigraphiques de l'OEHE). 55

Tableau 6.3: Résultats de l'analyse de 3 crues importantes sur la Sarine et calcul de la réserve d'eau souterraine écoulable selon la méthode de Maillet. 57

Tableau 6.4: Réseau d'observation de la nappe alluviale de la haute Sarine. 63

Tableau 6.5: Synthèse des données piézométriques de l'aquifère alluvial de la haute Sarine pour l'année 1998. 65

Tableau 6.6: Profils de bilans hydrauliques d'après l'étude GEOLEP. 68

Tableau 6.7: Statistiques des mesures de conductivité électrique sur la période d'observation (s représente l'écart-type et n le nombre d'échantillons) 70

Tableau 6.8: Répartition des mesures de la nature chimique de l'eau de l'aquifère alluvial de la région de la haute Sarine selon Jäckli (1970). 73

Tableau 6.9: Analyses bactériologiques des nouveaux forages (16.6.1999). 76

Tableau 7.1: Résultats de la modélisation (outils de calcul Budget Feflow). 84

Tableau 7.2: Comparaison de l'approche des bilans et de la modélisation. 85

Tableau 7.3: Différences entre les niveaux piézométriques réels moyens et calculés pour le 6.4.2000. 86

Tableau 8.1: Calcul de l'alimentation directe annuelle de la nappe. 90

Tableau 8.2: Tableau de calcul des réserves permanentes. 93

Tableau 8.3: Valeurs de tolérance et valeurs de qualités des teneurs en sels minéraux définies par le Manuel Suisse des Denrées Alimentaires ainsi que par l'OEaux. 94

Tableau 8.4: Résumé du degré de parenté entre différents aquifères alpins de haute et de basse altitude (voir AnnexeXIII pour les détails). 96

Tableau 9.1: Utilisation actuelle de la nappe. 104

Liste des annexes

Annexe 1	Archive des sondages mécaniques
Annexe 2	Sondages géoélectriques
Annexe 3	Profils sismiques
Annexe 4	Logs des sondages OEHE
Annexe 5	Essais de pompage
Annexe 6	Lieux et types de mesures chimiques et physico-chimiques
Annexe 7	Enregistrements limnigraphiques et données géochimiques
Annexe 8	Données limnigraphiques de la Sarine à Saanen WEA AO12
Annexe 9	Etude des courbes de tarissement
Annexe 10	Comparaisons limnigraphiques nappe-rivière
Annexe 11	Analyses des éléments majeurs
Annexe 12	Analyses des éléments en traces (ICPMS GEOLEP)
Annexe 13	Analyses isotopiques
Annexe 14	Equations de base dans les modèles numériques d'écoulements
Annexe 15	Typicité des aquifères alluviaux de montagne

Résumé

La vallée alpine de la haute Sarine se situe à une altitude moyenne d'environ 1'000 à 1'200 msm. Elle s'est formée dans sa partie sud et jusqu'à la hauteur de Gstaad à la faveur d'un accident tectonique nord-sud typique des structures dominantes des Préalpes, puis a suivi un plan de chevauchement d'azimut est-ouest pour terminer sur le verrou rocheux de la colline du Vanel. La période tardi- et postglaciaire a été marquée par la déposition de sédiments glaciolacustres, fluvioglaciaires et enfin fluviatiles qui ont rempli l'auge laissée libre par le glaciers probablement depuis une période encore antérieure à l'interstade Bölling-Alleröd. La profondeur de ce surcreusement varie entre 20 et plus de 50 m de profondeur. Les forages que nous avons réalisés ont pu documenter des séries de sédiments glaciolacustres typiques.

La mise en oeuvre de plusieurs méthodes d'investigations géophysiques (résistivité, sismique réfraction et réflexion, diagraphies et essais de pompage) nous a permis d'exploiter plusieurs sources d'informations que nous avons confrontées entre elles afin de réaliser un modèle en 3 dimensions du remplissage quaternaires et de ses propriétés hydrogéologiques. Ces sédiments pour la plupart relativement bien perméables renferment une nappe phréatique libre que nous avons subdivisé en 3 parties. Le bassin de Gsteig au sud est fermé, la vallée ayant été obstruée par un glissement d'une très grande ampleur qui s'est probablement déclenché en plusieurs étapes successives dès les premières améliorations sensibles du climat. La seconde partie, le bassin de Feutersoey n'a d'emblée pas été retenue comme cible hydrogéologique favorable selon nos investigations préliminaires. Le dernier bassin, celui de Gstaad-Saanen est le plus grand et le plus épais. C'est également dans ce bassin que se concentre la plus grande partie des activités touristiques et industrielles de la région.

Le réseau d'observation implanté afin de caractériser les écoulements souterrains nous a permis à la fois de procéder à des mesures piézométriques et à des prélèvements pour analyses chimiques et bactériologiques. Nous avons également effectué une campagne d'analyses du traceur environnemental $\delta^{18}O$. L'ensemble de ces analyses a mis en évidence les caractéristiques particulières de l'alimentation de la nappe. La nappe est alimentée de manière préférentielle par l'infiltration de la Sarine ainsi que celle des précipitations. Nous avons également repéré une alimentation karstique de type évaporitique souterraine.

Nous proposons enfin un concept de gestion et de protection des eaux souterraines adapté à la situation particulière de la plaine alluviale de montagne de la haute Sarine, autant du point de vue quantitatif que du point de vue qualitatif.

Les aquifères alpins d'altitude comme celui de la haute Sarine représentent dans l'ensemble une ressource en eau souterraine de qualité encore très peu exploitée dont les potentiels sont grands, mais encore à définir à plus grande échelle en appliquant par exemple des méthodes de simulations numériques des écoulements et en créant des réseaux d'observation à long terme qui permettrons de les intégrer dans une politique de développement durable des ressources en eaux souterraines dans le contexte alpin.

Abstract

The Haute Sarine alpine valley is located at an average altitude of approximately 1'000 to 1'2000 masl. It was formed in its southern part up to the area of Gstaad to the favour of a typical North-South tectonic fault according to the main structures of the Préalpes, then followed normal fault striking East-West to end up on the rock bolt of the Vanel hill. The late and postglacial period was marked by the deposition of glaciolacustrines, glaciofluviatile and flurecent fluviatile sediments which have filled the ice free valley bottom probably starting from a period older than the Bölling-Alleröd interstadial. The depth of this overdeepening varies between 20 and more than 50 m of depth. Drillings which we carried out could document series of typical glaciolacustrine sediments.

The implementation of several geophysical survey methods (resistivity, seismic refraction and reflexion, well logs and pumping tests) enabled us to analyse several sources of information which we confronted between them in order to produce a 3D model of the quaternary deposits and their hydrological properties. Most of these sediments are relatively quite permeable and build a free groundwater reservoir that we subdivided into 3 parts. The basin of Gsteig in the south is closed, the valley having been blocked by a massive landslide that probably occured in several successive stages starting at the first climate improvements. The second part, the basin of Feutersoey has not been retained as a potential important hydrogeologic resource based on our preliminary investigations. The last basin, that of Gstaad-Saanen is the largest and thickest. It is also in this basin that most of the tourist ans industrial activities of the area are concentrated.

The observation network was established in order to characterize the groundwater flows enabling us at the same time to carry out piezometric measurements and chemical as well as and bacteriological analyses. We also carried out a $\delta^{18}O$ isotope analysis campaign. The whole of these approaches highlighted the particular characteristics of the groundwater recharge. The ta-groundwater system is mainly fed by the Sarine and the precipitations infiltration. We also located an underground karstic feeding of evaporitic type.

We finally propose a groundwater management and protection concept adapted to the particular situation of the Sarine alluvial mountain aquifer system on both quantitative and qualitative aspects.

The high altitude alpine groundwater catchment areas such as the Haute Sarine represent as a whole a quality resource, with high potentials yet to be defined on a larger scale, for example by applying numerical modeling and by organizing and maintaining long term observation networks that will enable us to define a sustainable groundwater resource management within the alpine area.

Remerciements

Cette thèse a été effectuée dans un environnement de travail d'excellente qualité, en tout point semblable au cadre naturel sur lequel elle s'appuie. Cela ne fut pas un hasard et je le dois avant tout aux personnes qui m'ont soutenu et entouré.

Je remercie le Professeur A. Parriaux, directeur du laboratoire de géologie de l'EPFL (GEOLEP) qui m'a proposé ce travail de thèse voici bientôt 4 ans. Il m'a soutenu et j'ai pu bénéficier de ses connaissances ainsi que de son esprit critique, motivant et constructif tout au long de mon travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement le Dr G. della Valle qui a financé cette thèse par le biais de la section de géologie et d'hydrogéologie de l'Office de l'Economie Hydraulique et Energétique du canton de Berne (OEHE) dont il fut le directeur. Sa confiance et son professionnalisme m'ont guidé, inspiré et motivé durant cette thèse.

Je remercie les membres du jury pour avoir accepté d'en faire partie et de m'avoir fait profiter de leurs connaissances spécifiques avant et pendant la soutenance. Le Dr S. Bernasconi a réalisé les analyses isotopiques et m'a aidé dans leur interprétation, le Prof. M. Campy a fait preuve d'une très grande disponibilité et je l'en remercie vivement, je remercie enfin le Prof. A. Schleiss qui lu ma prose avec patience. Le Prof. F. Descoeudres a accepté de présider le jury et je lui en suis reconnaissant.

Le travail avec les collaborateurs de l'OEHE et du Gewässer- und Bodenschutzlabor fut enrichissant et je tiens à remercier tous les membres qui m'ont aidé durant ces 4 dernières années. Les collaborateurs du GEOLEP ont également constitué une équipe de soutient importante, en particulier les membres du laboratoire d'analyse et les nombreux assistants et "senior scientists" qui m'ont encadré de manière professionnelle et motivante tout au long de ma thèse. Un merci particulier aux collègues du bureau GC B1 386 qui m'ont en outre supporté durant la dernière ligne droite et fortement rédactionnelle de mon séjour au GEOLEP. Cette thèse n'aurait pas pu se réaliser de manière optimale sans la collaboration des "Wasserversorgungen" des communes de Saanen et de Gsteig ainsi que les nombreux habitants qui m'ont permis d'accéder aux points de mesures "privés". Merci aux gens du Saanenland pour leur bonne humeur et leur sens de l'accueil.

Enfin, un grand merci à ma famille et à mes amis qui m'ont toujours accordé leur confiance et m'ont soutenu et accompagné moralement durant toutes ces longues années d'études sans toujours savoir ce que je cherchais vraiment dans la vallée de la haute Sarine.

1. INTRODUCTION

1.1. LES AQUIFÈRES ALLUVIAUX ALPINS

L'aménagement des ressources en eau des aquifères alluviaux alpins constitue une tâche importante et très vaste qui englobe un grand nombre de techniques se basant sur une approche multidisciplinaire de prospection, d'investigation et de gestion. Généralement, ce sont les grandes plaines où se concentrent les activités industrielles qui ont attiré l'attention des scientifiques et des autorités. De vastes projets décrivent les grandes ressources des vallées périalpines principales dont l'altitude moyenne ne dépasse pas les 1'000 msm en règle générale. Les gisements aquifères alluviaux des vallées dites "latérales" situées plus haut et plus proches des glaciers et des zones de haute montagne n'ont pour leur part suscité qu'un intérêt réduit.

Les raisons sont à la fois d'ordre économique, technique et social. Alors que les grandes plaines comme celle du Rhône, de la vallée d'Aoste, du Rhin ou de l'Emmental, concentrent d'importantes activités industrielles et agricoles et comptent de nombreuses agglomérations, les vallées latérales peu populeuses vivent essentiellement sinon exclusivement du tourisme, exception faite de quelques activités pastorales. Dans le premier cas, un réseau d'approvisionnement gravitaire par le biais de sources ne suffit pas et surtout n'assure pas une livraison en continu de l'eau pour les besoins de l'industrie par exemple. A l'opposé, les vallées hautes ne consomment dans l'ensemble que peu d'eau.

Il existe de nombreuses études sur les gisements d'eau souterraine dans les Alpes. Du point de vue scientifique et académique, ce sont avant tout les aquifères rocheux qui ont concentré beaucoup de travaux, en particulier sur le karst à cause de sa forte vulnérabilité. Les ressources représentées par les parties aquifères des comblements quaternaires des grandes vallées ont également suscité les intérêts de la recherche, surtout lorsque des enjeux économiques existaient comme l'utilisation à but industriel ou commercial des ressources (thermalisme et eaux minérales). En ce qui concerne les vallées hautes, on constate que les études complètes, en particulier sur la dynamique de l'alimentation, se font plus rares. Nous verrons que les ressources qu'offrent ces aquifères sont intéressantes, à la fois par leur quantité et par leur qualité. Or ces ressources actuellement souvent délaissées possèdent un potentiel intéressant en général sous-exploité que nous nous proposons de mettre en valeur dans cette thèse.

1.2. CADRE ET BUTS DE LA THÈSE

Cette thèse a été réalisée en collaboration avec l'Office de l'Economie Hydraulique et Energétique du canton de Berne (OEHE) dans le cadre de son vaste programme d'élaboration des rapports de base pour l'utilisation et la protection des ressources en eaux souterraines entrepris depuis bientôt 30 ans. Une approche systématique des gisements d'eaux principaux compris dans les nappes alluviales a conduit l'administration cantonale de Berne à mettre en valeur toute un série d'aquifères qui n'avaient jusqu'alors jamais été prospectés dans leur ensemble. La haute Sarine en faisait partie. La réalisation de cette thèse avait comme but de décrire les aspects particuliers d'un aquifère alpin de haute altitude ainsi que l'élaboration d'un concept de gestion des eaux souterraines. Nous présentons ci-dessous les points principaux que nous avons retenus comme objectifs nécessaires pour déterminer la typicité d'un aquifère de haute montagne :

- quelles sont les propriétés (s.l.) des terrains aquifères ?
- quels sont les types d'alimentation et de recharge ?
- quelles sont les quantités disponibles (définition de la ressource) ?
- quelle est la qualité des eaux souterraines ?

1.3. DÉROULEMENT ET MÉTHODOLOGIE

Cette étude s'est déroulée sur une période de quatre ans. La première partie a consisté en l'élaboration d'un plan de travail et de financement qui fut accepté par les autorités politiques du canton de Berne en février 1997. Dès lors, nous avons pu entreprendre l'installation du réseau de mesure nécessaire à l'étude des eaux souterraines de la vallée de la haute Sarine. Le travail a été organisé en plusieurs étapes afin d'une part d'optimiser son avancement en fonction des résultats obtenus et d'autre part d'en assurer une répartition efficace entre les différents intervenants et de mettre en valeur les multiples applications du produit fini que constituent les données hydrogéologiques récoltées (tab. 1.1).

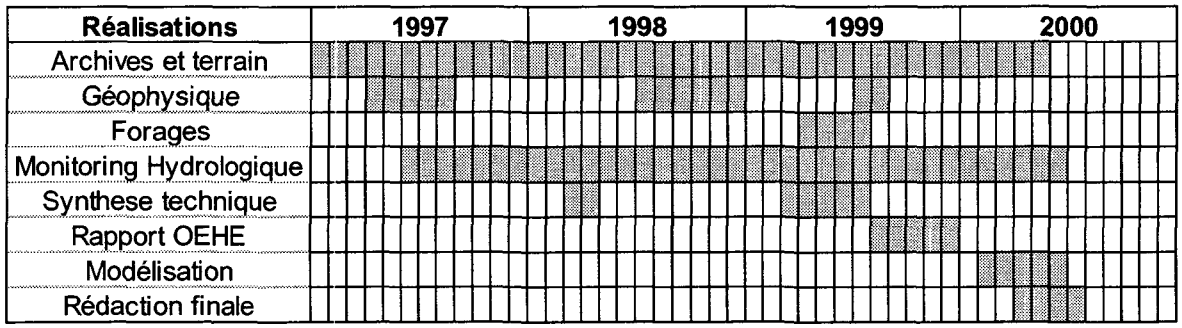


Tableau 1.1 : Déroulement de la thèse en parallèle avec la réalisation du rapport hydrogéologique sur les ressources en eaux de la haute Sarine sur mandat de l'OEHE.

Du point de vue méthodologique, le déroulement de l'étude a consisté en une suite classique de travaux d'investigations hydrogéologiques de terrain et d'étapes d'interprétation au bureau (tab. 1.2) dont la structure est présentée dans de nombreux ouvrages de référence sur l'hydrogéologie (Banton et al., 1997; Castany, 1967; Freeze et Cherry, 1979; Hölting, 1992; Mattess, 1994; Parriaux, 1999). Ainsi, chaque partie du travail a permis une progression rapide et ciblée des recherches. Dans un premier temps, il a fallu réunir les connaissances déjà existantes sur la haute Sarine. Pour ce faire, nous avons pu utiliser les nombreuses sources d'informations existantes en Suisse. Ainsi, après avoir consulté la documentation archivée auprès des Archives Géologiques du Service Géologique National à Berne, les bibliothèques des universités de Berne, Fribourg et Lausanne ainsi que la Base de Données hydrogéologiques et géologiques (HDOK) du service géologique de l'Office de l'Economie Hydraulique du canton de Berne, il fut possible de peindre un tableau relativement complet de la tâche à fournir afin de compléter les connaissances existantes et surtout de fournir des données suffisantes afin de permettre la création d'un concept de gestion et de protection des ressources en eaux souterraines de la plaine alluviale de la haute Sarine.

1.4. ASPECTS FINANCIERS ET COLLABORATIONS

Le financement des travaux de recherches a été essentiellement assuré par la production du rapport hydrogéologique pour la gestion des eaux souterraines de la haute Sarine commandé par l'administration cantonale bernoise (OEHE, 1999a) et réalisé par le GEOLEP. Il s'agissait d'un crédit total de 321'000.- Frs dont 35.1% furent subventionnés par la Confédération Helvétique. Les activités de mandats annexes ont permis de financer les développements plus académiques qui ont suivi cette étude et qui ont abouti à la présente thèse.

Les collaborations furent multiples afin de mener à bien cette étude relativement ambitieuse car les connaissances hydrogéologiques sur la région choisie restaient très lacunaires il y a 4 ans. Il fut nécessaire de recourir à des méthodes d'investigations très diverses comme la géophysique et les forages carottés. Ainsi, ce n'est qu'avec les efforts communs de nombreux acteurs que nous pouvons produire cette thèse aujourd'hui (tab. 1.2).

Réalisations	Partenaires	
Direction	OEHE	Dr. G. della Valle, Prof. Dr. A. Parriaux
Réalisation	GEOLEP	J. Vaudan
Géophysique	GEOLEP	J. Vaudan, T. Bussard (J. Jenny GG, A. Pugin UNIGE et F. Büker ETHZ)
Flowmeter	GEOLEP	J. Vaudan
Sondages	Hydrogéo S.A.	G. Schüller
Hydrométrie	OEHE	BaderAbteilungen Hydrometrie und Geologie
Analyses chimiques et bactériologiques	GSA	Gewässer- und Bodenschutzlabor, canton de Berne
	Labor Meyer	Labor Dr. Meyer A.G., Bern
	GEOLEP	Dr. M. Bensimon
Cartographie	OEHE	P. Eichwald, D. Hofstetter (Rossens)
Analyses des isotopes	ETHZ	Dr. S. Bernasconi, Geologisches Institut

Tableau 1.2 : Présentation des différentes étapes de cette thèse et des partenaires privés et institutionnels.

2. CADRE GÉOGRAPHIQUE ET BREF HISTORIQUE DU DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL

Le but de ce court chapitre d'introduction est de situer le cadre géographique de la région étudiée afin de nous familiariser avec les noms de lieu utilisés tout au long de cette thèse pour désigner les différentes zones étudiées. Nous verrons aussi sans entrer dans les détails d'une analyse socio-économique, comment le développement de la région a amené les autorités à développer l'aménagement des eaux de leur belle et charmante région. Nous verrons aussi comment deux constructions majeures, le barrage du Sanetsch et l'aérodrome de Saanen ont influencé les conditions naturelles des écoulements de surface et souterrains.

2.1. CADRE GÉOGRAPHIQUE

La région étudié se situe dans les Préalpes romandes, dans le prolongement du Pays d'Enhaut vaudois (fig. 2.1). La région est relativement haut perchée pour une vallée alluviale avec une altitude moyenne pour la partie plaine et ses flancs de 1684 m (Mauerhofer, 1980).

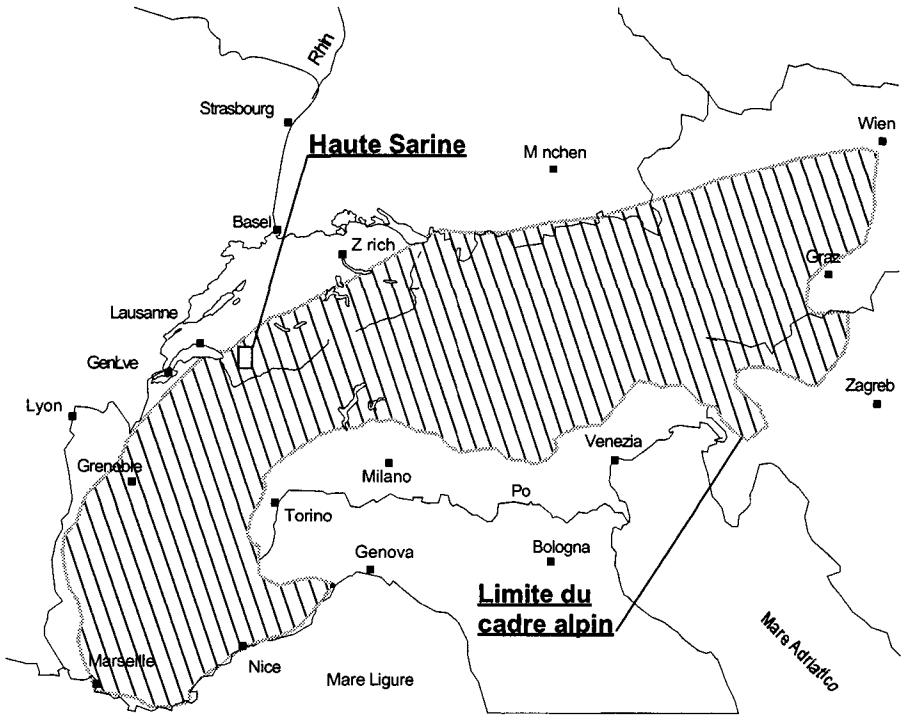


Figure 2.1: La vallée de la haute Sarine dans le contexte alpin.

La plus grande partie du bassin versant se situe en dessous de 2000 m d'altitude (tab. 2.1) d'après Mauerhofer (1980). Il est intéressant de remarquer que cet auteur a retranché le bassin versant du lac d'Arnon (Arnensee) de son calcul puisque les eaux qui y sont retenues sont pour la plus grande partie amenées hors du bassin versant de la Sarine pour être turbinées.

Tranche d'altitude m.s.m.	Proportion en % du bassin versant
1000-1200	8.69
1200-1400	16.2
1400-1600	18.78
1600-1800	17.85
1800-2000	12.77
2000-2200	7.43
2200-2400	8.69
2400-2600	5.41
2600-2800	2.75
2800-3000	1.12
3000-3200	0.3
3200-3400	0.01
Total	**100 (=221.06 km^2)**

Tableau 2.1: Distribution par tranche d'altitudes de la topographie du bassin versant de la haute Sarine (d'après Mauerhofer 1980, modifié).

Ceci ramène la superficie totale du bassin versant topographique à 221 km^2. Nous pouvons considérer la plaine alluviale de la haute Sarine située à une altitude moyenne de 1'200 msm (y compris une partie des versants) comme représentative des régions alpines comprenant se situant à plus de 1000 m d'altitude dont une grande partie des ressources en eaux souterraine est comprise dans la nappe phréatiques des dépôts du remplissage quaternaire tardi- et postglaciaire. Les phénomènes décrits dans cette thèse montrerons le caractère typé de ces régions sur la base de cet exemple. La plaine alluviale principale se compose de plusieurs zones indiquées sur la carte de la figure 2.2. Il s'agit des noms de lieux ainsi que les altitudes représentatives que nous allons utiliser pour décrire les nombreuses particularités de cette région.

2.2. BREF APERÇU HISTORIQUE DU DÉVELOPPEMENT TOURISTIQUE ET DE LA GESTION LOCALE DES EAUX

Les paysages agréables et reposants des Préalpes bernoises ont constitué un argument de poids qui a poussé de nombreux étrangers à choisir Saanen et surtout Gstaad (en français Gessenay) comme lieu de villégiature depuis plus d'un siècle. C'est sur les hauteurs du petit village de Gstaad qu'entre 1911 et 1913 se construit un des palaces les plus renommés des Alpes suisses. La lutte contre les incendies dont le dernier détruisit 12 maisons le 19 juillet 1898 et l'arrivée des touristes incitèrent les autorités communales à aménager un réseau de distribution d'eau à l'échelle communale dès le début du XXème siècle en achetant et en aménageant des sources aux alentours de Gstaad et de Saanen (P. Trösch dans "Anzeiger von Saanen" du 30.7.1976). Par la suite le réseau s'est développé en privilégiant les ressources gravitaires.

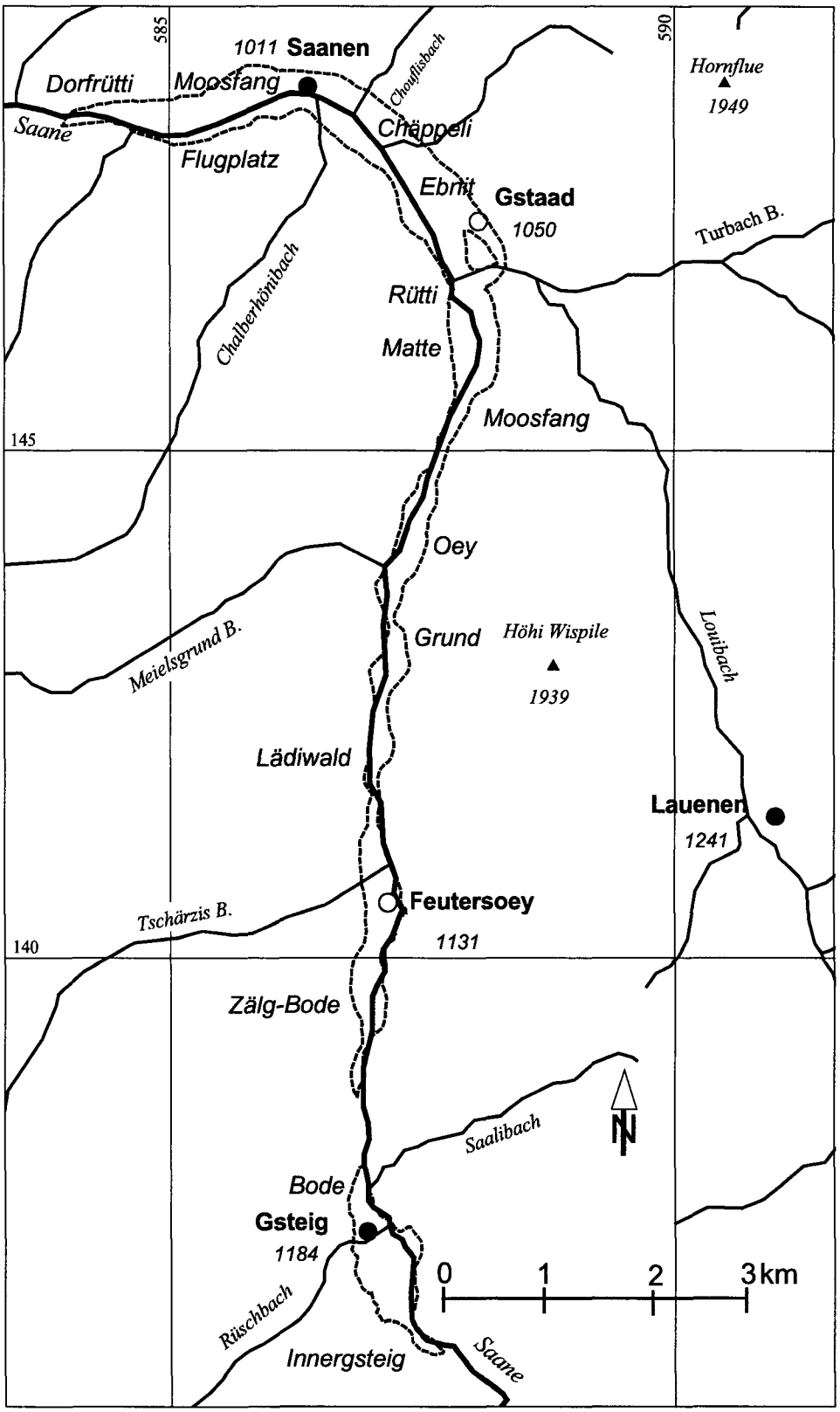


Figure 2.2: Carte de situation générale avec l'indication des noms de lieux utilisés au cours de cette thèse.

Malgré cela, la commune de Saanen a quand même opté dans les années 50 pour la construction d'un puits exploitant la nappe phréatique principale dans la région de Chäppeli pour pallier au déficit de ressources gravitaires durant les périodes hivernales de forte affluence touristique. Nous noterons l'exploitation ingénieuse de l'aquifère alluvial de la petite vallée de Lauenen : l'ouvrage réalisé en 1975 utilise le principe du siphon pour fournir l'eau à la commune de Saanen. En d'autres termes, on utilise la différence d'altitude entre l'aquifère alluvial de la vallée secondaire et les réservoirs de la commune pour n'utiliser les pompes qu'à l'amorçage, le reste n'étant dès lors plus qu'affaire de gravité.

2.3. L'AÉRODROME MILITAIRE DE SAANEN

La construction de l'aérodrome militaire de Saanen a profondément marqué les écoulements souterrains de la région Flugplatz-Fallersmatte. En 1943 la mise en place de la première piste et de ses impressionnants systèmes de drainage va créer un profond changement dans le paysage hydraulique naturel (Kissling, 1941; OFAEM, 1994).

Jusqu'alors, tout le secteur occupé par l'aérodrome était parcouru par de nombreux ruisseaux témoins d'autant d'affleurements de la nappe qui était forcée par la présence du verrou imperméable du Vanel à l'extrémité ouest de la plaine à faire surface dans cette vaste zone d'exfiltration. L'eau est désormais drainée par un système efficace et vaste dont l'exutoire principal consiste en un torrent à l'extrémité ouest de l'aérodrome. Nous reviendrons plus loin sur les implication hydraulique de cet ouvrage.

2.4. LES BARRAGES DU SANETSCH ET D'ARNON (ARNEN)

La figure 2.3 nous indique la situation des deux barrages existant dans la région de la haute Sarine ainsi que les limites de celui-ci. La construction du barrage du Sanetsch (Senin) s'étala de 1960 à 1965. Il ne fut pas d'emblée sans problème d'envisager la construction d'un barrage dans un environnement calcaire. Plusieurs experts parmi lesquels nous citerons le prof. Arbenz, le prof. Olianoff et le Dr. Falconier étudièrent les différents aspects hydrogéologiques et géotechniques de la future construction (Mauerhofer 1980).

Le volume actuel de la retenue représente 2.7 mio de m^3. L'influence du barrage sur l'écoulement naturel de la Sarine, qui rappelons-le prend naissance dans la région du Sanetsch, reste modeste. L'eau utilisée pour le turbinage retourne à la rivière au début du domaine alluvial au sud de Gsteig. Margot et al. (1991) estiment que plus de 80% du débit naturel est restitué et que le turbinage occasionne une augmentation d'environ 20% du débit en hiver.

L'eau du lac naturel d'Arnon (Arnensee) alimente les infrastructures de production d'electricité de la Société Romande d'Electricité (aujourd'hui le Romande Energie) depuis 1922. Le barrage artificiel, une digue en terre, a été pour sa part élevé en 1957. Le volume de la retenue est de 10.3 mio de m^3 (Mauerhofer 1980). Nous n'avons pas abordé en détail l'analyse de l'influence du barrage sur les débits du Tschärzisbach. Selon Margot et al. (1991), le débit de ce torrent à sa confluence avec la Sarine représente malgré le barrage 41 à 60% de son débit naturel avant la construction de la digue.

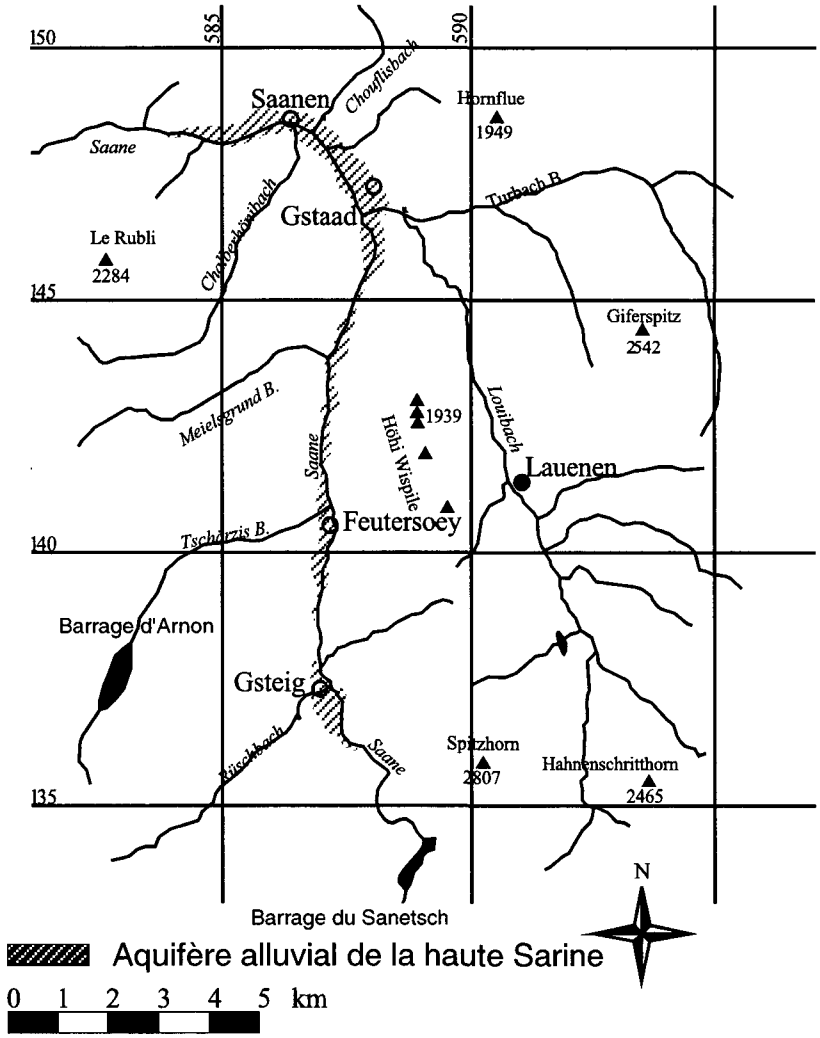


Figure 2.3: Situation des barrages dans le bassin versant de la haute Sarine.

3. CADRE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL

3.1. LE CONTEXTE TECTONIQUE PRÉALPIN

Afin de bien comprendre les aspects très particuliers des ressources en eaux de la haute Sarine, il est nécessaire d'aborder de manière relativement détaillée le cadre tectonique dans lequel s'est formée la vallée. De nombreux géologues eurent l'occasion d'étudier les Préalpes. Ces unités tectoniques se trouvent dans le "rayon d'action" de trois grandes universités de Suisse romande, celles de Fribourg, Lausanne et Berne. Par exemple, Masson (1976) offre un aperçu très complet sur plus d'un siècle d'investigations géologiques dans les Préalpes alors que plus proches de nous, Mosar et al. (1996) décrivent de manière détaillée les aspects structuraux d'un grande partie de l'édifice. Mosar et Borel (1995) ont par ailleurs répertorié plus de 910 publications sur le thème des préalpes. Ce chiffre impressionnant montre à quel point cette partie des alpes suisses a suscité de vocations et parfois de controverses.

C'est néanmoins grâce à un nombre restreint et relativement récent de ces articles que nous avons pu présenter une esquisse géologique de la région de la haute Sarine entre Gsteig et Saanen. Il a fallu repérer les informations susceptibles d'appréhender au mieux les écoulements souterrains et leur bassin d'alimentation au travers des différentes unités tectoniques.

La figure 3.1 nous offre un aperçu tectonique détaillé de la région étudiée. On y distingue du sud au nord les unités suivantes : les nappes helvétiques, les nappes ultrahelvétiques et les nappes préalpines (d'origine pennique).

3.1.1. LES NAPPES HELVÉTIQUES

Ces nappes sont essentiellement constituées de calcaires et de marnes mésozoïques et tertiaires, essentiellement du Crétacé et quelques formations de l'éocène (Badoux et Lombard, 1962). Elles se situent tout au sud du domaine étudié et forment de splendides plis (fig. 3.2). Il s'agit de la plus haute des nappes helvétiques, celle du Wildhorn.La Sarine, rivière principale, prend sa source dans ces montagnes, dans le domaine du col du Sanetsch. Ces roches sont karstiques et l'on peut admirer de grands champs de lapiés au col du Sanetsch. Nous ne disposons pas de données précises concernant ces réseaux karstiques, mais étant donné le plongement axial de 15 à 30° des nappes vers le NE, nous n'avons pas constaté de grandes émergences de type vauclusienne dans notre périmètre d'étude. Néanmoins, ces phénomènes ne sont pas à exclure étant donné l'existence de nombreux plans de chevauchements et de failles le long desquels l'eau peut circuler. La commune de Gsteig possède un captage (Burg) dans ces unités qui est probablement d'origine karstique avec un débit moyen >1300 l/min. selon Kellerhals (1990). Morphologiquement, ces unités forment des falaises abruptes surplombant la région de Gsteig qui constitue la partie sud de l'aquifère étudié.

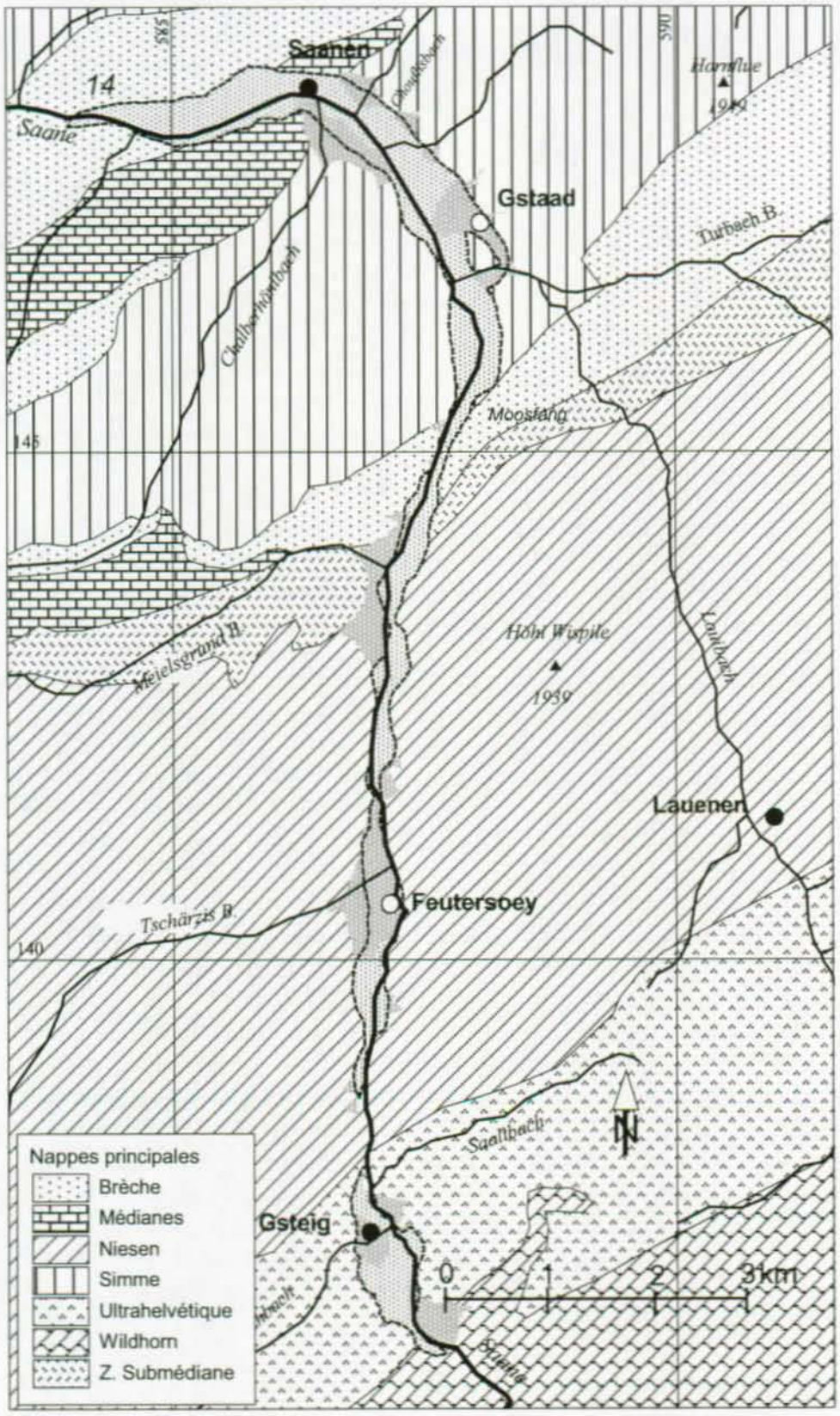


Figure 3.1: Esquisse tectonique régionale simplifiée de la haute Sarine (modifié d'après Lombard et al. 1974).

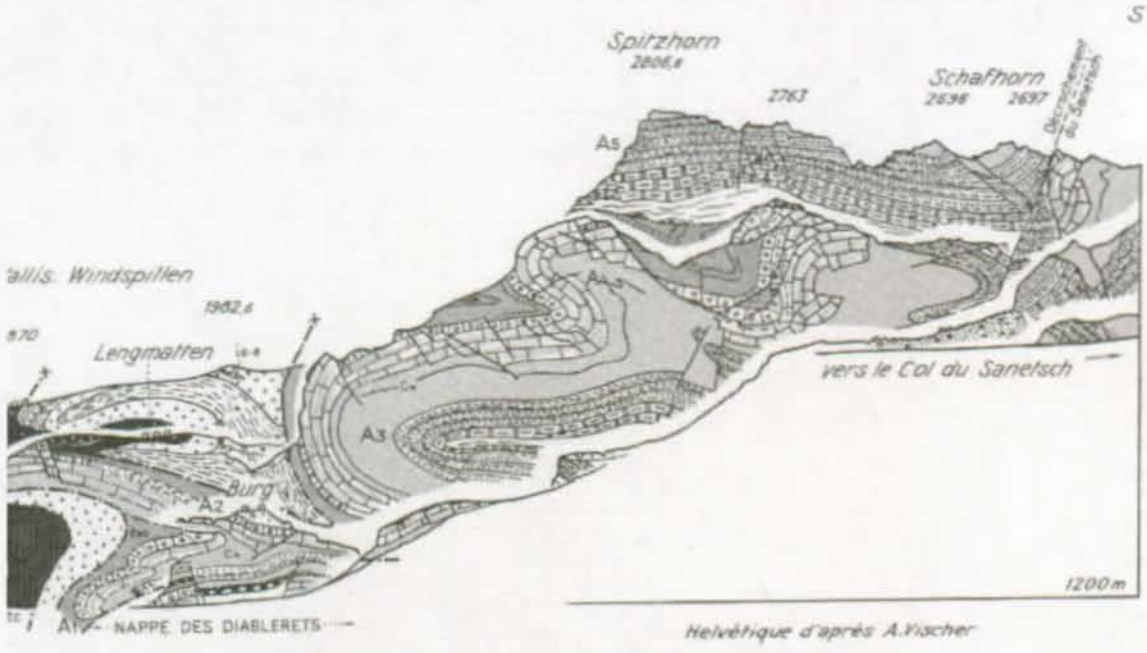


Figure 3.2: Plis dans l'Helvétique de la face Nord-ouest du Spitzhorn à la limite sud du domaine étudié dans cette thèse d'après Badoux et Lombard (1962).

3.1.2. L'ULTRAHELVÉTIQUE

Il s'agit d'une grande dépression topographique se situant au front des nappes helvétiques communément appelée la Zone des Cols constituée de terrains dont l'âge va du Trias à l'Eocène. Badoux et Lombard (1962) et Badoux (1963) décrivent la structure tectonique de ces unité comme extrêmement compliquée étant donné les contraintes tectoniques subies lors de leur mise en place, puis lors des déformations ultérieures (plissement de l'Helvétique et passage des masse préalpines d'origine pennique). Du point de vue hydrogéologique, c'est surtout la présence des unités triasiques karstiques (gypse, cornieule, calcaires dolomitiques) qui va marquer le caractère chimique (Mandia, 1991) et le cheminement des eaux ainsi que la recharge de l'aquifère principale. Nous verrons plus loin combien cette signature typique se retrouve à la fois dans les eaux de surface et les eaux souterraines. Les unités imperméables de l'Aalénien sont quand à elles à l'origine du grand glissement au nord de Gsteig (région de Saali) qui barre complètement la vallée.

3.1.3. LA ZONE SUBMÉDIANE

Cette zone a suscité énormément de controverses résumées dans Weidmann (1976) du point de vue de son appartenance tectonique dont l'indépendance est aujourd'hui acquise. Il s'agit de roches composées essentiellement de gypse, cornieules et calcaire dolomitique (Trias), de différents types de calcaires et de brèches fines (Jurassique et Crétacé) et de Flyschs (Tertiaire) qui apparaissent sous forme de lentilles extrêmement laminées et tectonisées (Badoux et Lombard, 1962). Dans cette unité, ce sont les gypses qui jouent un rôle particulier au niveau hydrogéologique par leur aspect essentiellement karstique dont nous reparlerons plus loin.

3.1.4. LES NAPPES PRÉALPINES

L'origine de ces nappes est pennique (Caron, 1973; Stampfli et al., 1991; Trümpy, 1980). Il s'agit pour l'essentiel de nappes de charriage, décollées de leur socle cristallin et transportées jusqu'à leur emplacement actuel comme le montrent les profils tectoniques de la figure 3.3, on distingue d'épaisses séries de Flyschs peut compétents (Nappe du Niesen, de la Brèche et de la Simme) ainsi que des parties plus compétentes formées surtout de calcaires (Préalpes Médianes Rigides).

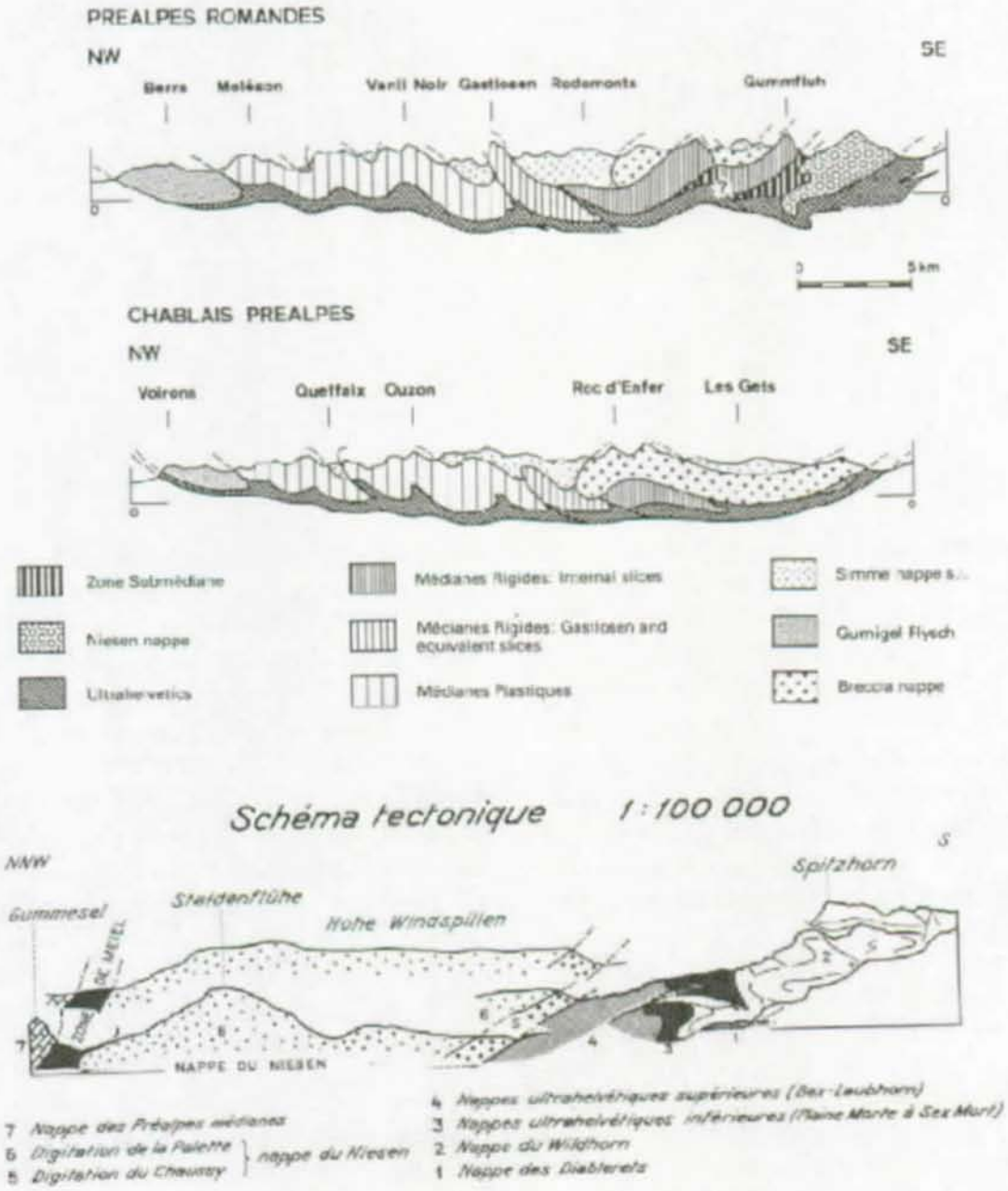


Figure 3.3: Schéma tectonique des nappes préalpines d'après Caron in Trümpy (1980) et Badoux et Lombard (1962).

La figure 3.4 quand à elle représente une synthèse stratigraphique des principales unités décrites ci-après. Nous invitons le lecteur à s'y référer afin de repérer les séries plus susceptibles de renfermer des aquifères karstiques comme les calcaires massifs du Malm dans la nappe des Préalpes Médianes rigides en opposition aux lithologies de type clastique et terrigène (flyschs et brèches) qui composent la plus grande partie des autres nappes.

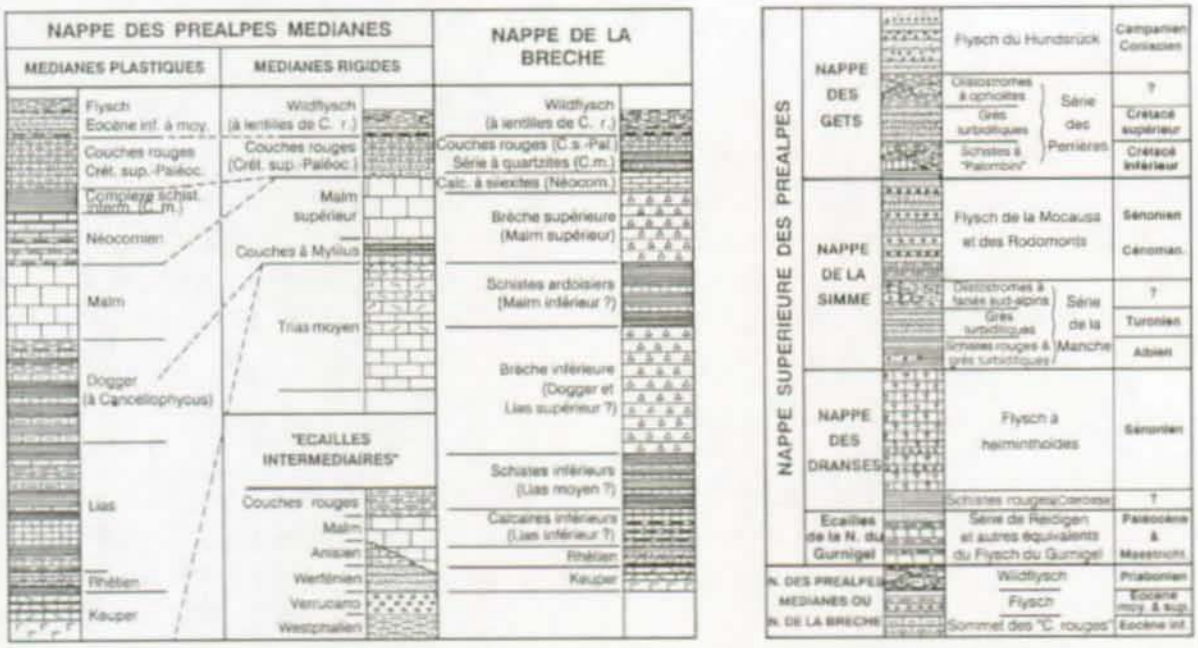


Figure 3.4: Aperçu lithostratigraphique des nappes principales des Préalpes à l'exception de la nappe du Niesen d'après Charollais et Badoux (1990).

Nappe du Niesen

Elle consiste en un soubassement de roches mésozoïques surmonté d'une épaisse série de Flysch. Elle couvre la plus grande partie du terrain étudié et du bassin versant considéré. Morphologiquement, on la reconnaît par son relief prononcé mais doux qui s'étend du nord de la Zone des Cols jusqu'aux portes de Gstaad (crête des Windspilen). Ackermann (1986) offre une description exhaustive de la sédimentologie de cette unité qui comprend des terrains détritiques terrigènes d'âge essentiellement Maastrichien (Crétacé supérieur). On y trouves des séries de Flysch conglomératiques et gréseuses dans lesquelles les circulations d'eau sont relativement complexes (Basabe, 1992). A la base de cette nappe on trouve un soubassement "anté-flysch" formé de terrains discontinus allant du Trias (gypse et dolomies) au Crétacé qui n'affleure pas dans la région étudiée. Pour notre part, nous considérons que les roches de cette nappe ne participent pas de manière préférentielle à l'alimentation de la nappe alluviale puisqu'elles contiennent essentiellement des terrains imperméables recouverts de moraines tout aussi peu perméables.

Nappe de la Brèche

On trouve à la base de cette nappe une série triasiques qui affleure rarement et dont l'importance hydrogéologique semble très réduite dans notre contexte. Le reste de la nappe consiste en une série de brèches calcaires jurassiques et une série de flyschs éocènes composés de calcaires et de schistes gréseux (Badoux et Lombard, 1962). Ces unités ne jouent vraisemblablement aucun rôle hydrogéologique important dans la recharge de la nappe alluviale mais constituent probablement à un niveau local un cloisonnement imperméable des nappes aquifères des Préalpes médianes rigides qui plus profondément se reposent sur la Zone Submédiane et les unités ultrahevétiques.

Nappe de la Simme

Cette nappe est composée pour sa plus grande partie d'un complexe de flyschs du Crétacé (Albien-Cénomanien-Turonien-Campanien-Maestrichtien) et dans une plus faible mesure de calcaires marneux aaléniens et de radiolarites (Flück, 1973; Wicht, 1984). Il s'agit par conséquent d'une unité que nous considérons comme essentiellement imperméable et par conséquent extrêmement pauvre en gisements d'eau souterraines.

Nappe des Préalpes Médianes Rigides

Dans le secteur considéré par cette thèse, la nappe des Préalpes médianes rigides est représentée par l'écaille du Rübli. A la base de cette écaille fortement tectonisée on trouve en principe du Trias qui n'affleure pas dans notre secteur. Ainsi c'est avec des calcaires massifs gris du Jurassique supérieur (Malm) qui se distinguent bien dans le paysage (fig. 3.5) que l'on reconnaît cette unité. Le sommet de la série se compose de calcaires marneux crétacés (Cénomanien-Turonien) rougeâtres contenant des foraminifères que l'on appelle les "Couches Rouges", puis de flyschs schisto-gréseux sombres d'âge probablement Maestrichien (Badoux et Lombard, 1962; Hürliman et al., 1996). La nature karstique des roches calcaires du Malm en particulier entraîne des écoulements souterrains vers la vallée principale de la haute Sarine et son aquifère alluvial. Il ne s'agit néanmoins pas de karst bien développé et nous avons affaire à un karst de type "dispersé" où l'on ne trouve pas de systèmes de grandes cavités bien développées (Parriaux et al., 1990b).

3.2. ASPECTS STRUCTURAUX

Les unités préalpines sont marquées par de nombreux accidents tectoniques, failles et chevauchements contemporains à la mise en place des nappes. Ces structures ont été l'objet de nombreux travaux. Pour la région de la haute Sarine, les travaux de Plancherel (1979), un précurseur, de Ackermann (1986) et de Mosar (1992) représentent notre principale source d'information. Nous avons relevé deux aspects importants de la géologie structurale des préalpes dans la région étudiée : d'une part l'importance des accidents tectoniques verticaux et subverticaux d'orientation générale SSE-NNV et d'autre part les limites tectoniques de type chevauchement qui ont des azimuts Est-Ouest en général. Ackermann (1986) et Plancherel identifient clairement l'accident de la Sarine qu'il cartographient le long de la vallée du même nom. Par ailleurs, on peut constater un décrochement très net à la hauteur de Gstaad dans les unités de la Zone Submédiane et de celle de la nappe de la Brèche, clairement identifié par Plancherel (1979). Dans sa thèse sur la typologie des eaux souterraines de la nappe du Niesen, Basabe (1992) a bien mis en évidence l'importance des structures géologiques dans la circulation des eaux à l'intérieur de la nappe.

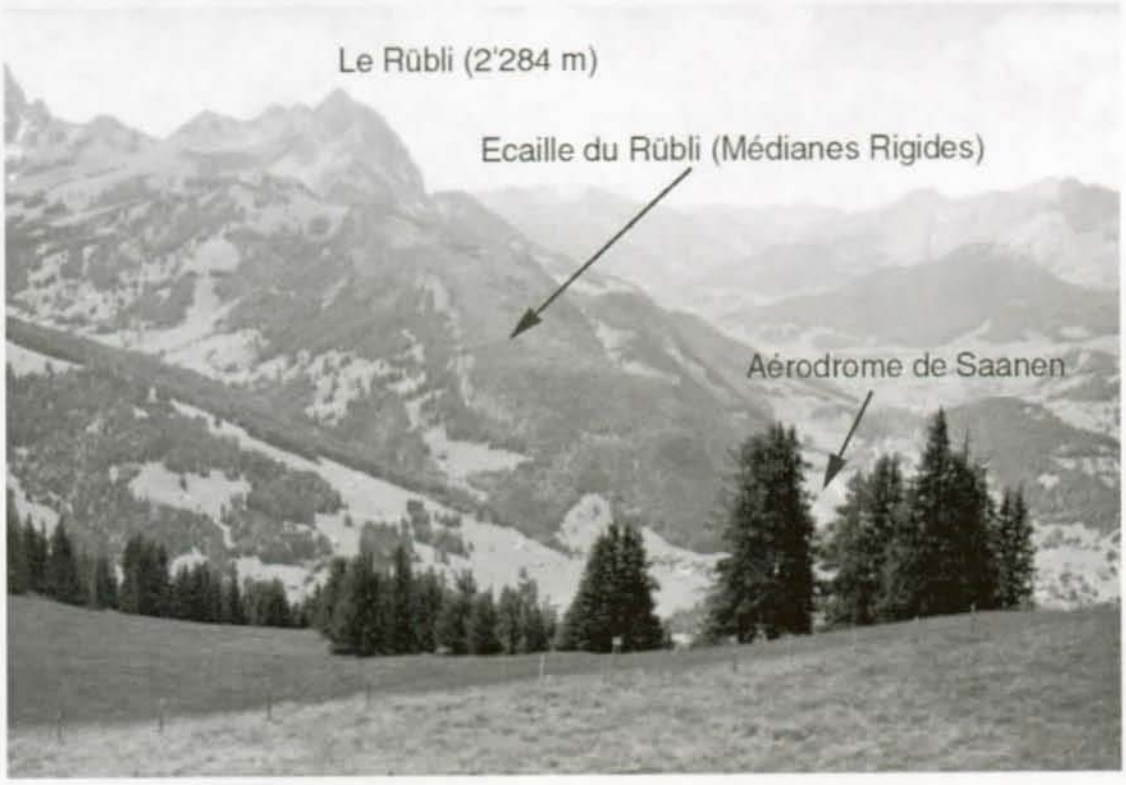


Figure 3.5: L'écaille du Rübli se distingue très nettement par sa morphologie très marquée due aux roches calcaires relativement compétentes qui la compose.

L'interconnection des différents types de discontinuités (perméabilité de fractures) va favoriser le cheminement de l'eau dans des roches a priori peu perméables. L'eau va pénétrer dans la roche par des canaux préférentiels comme le développement de karst, la présence de discontinuités majeures ou les interstrates stratigraphiques et les inhomogénéités pétrographiques (alternances de bancs gréseux plus perméables avec des parties marneuses). Il ne faut cependant pas négliger le fait que les formations de la nappe du Niesen comme leurs "consoeurs" préalpines se situent dans une zone à faciès anchimétamorphique (faible métamorphose des sédiments) qui a eu pour effet de cimenter les formations plus poreuses et par conséquent de les rendre moins perméables (Trümpy, 1980). Schoeneich et Imfeld (1997) mentionnent la présence certifiée de karst dans la nappe du Niesen (région du Pic Chaussy). Basabe (1992) relève quand à lui l'existence de micro-karst dans ces même flyschs.

3.3. IMPLICATIONS HYDROGÉOLOGIQUES

Il s'agit pour nous d'intégrer dans les possibilités d'alimentations de la nappe alluviale les différents aspects hydrogéologiques des formations géologiques présentées précédemment. Toutes ces recharges restent pour la plupart invisibles à la surface, mais sont fort heureusement détectables par des méthodes hydrogéochimiques et isotopiques comme nous le verrons plus loin. La comparaison des analyses effectuées dans la nappe alluviale avec les données acquises dans le cadre du projet AQUITYP développé au GEOLEP, laboratoire de géologie de l'EPFL (Parriaux et al., 1990a) ainsi que la typologie globale des aquifères alpins admise au niveau suisse (Dematteis et al., 1996) s'avérera un élément de discrimination important et efficace en l'absence d'un réseau local d'observation des sources.

4. CADRE GÉOLOGIQUE LOCAL : LE REMPLISSAGE QUATERNAIRE

4.1. GÉNÉRALITÉS

Les dépôts de roches meubles quaternaires constituent le siège de l'aquifère considéré dans cette thèse. Afin de connaître la nature des différentes unités hydrogéologiques, il est nécessaire de reconstituer l'histoire du comblement de la vallée de la haute Sarine qui détient un rôle majeur dans la genèse et dans la distribution spatiale des unités sédimentaires récentes aquifère comme l'ont montré de nombreux auteurs dans nombre d'études sédimentologiques et hydrogéologiques effectuées dans le cadre de l'arc alpin (Dray, 1993; Nicoud et al., 1993; Nicoud et al., 1999; Novel, 1995; Parriaux et Nicoud, 1993). Nous avons commencé par un aperçu bibliographique essentiellement basé sur des rapports techniques que nous avons complété par de nombreuses investigations sur le terrain. Cette approche multidisciplinaire a permis de livrer une image relativement complète dans le temps et dans l'espace des dépôts de roches meubles tapissant le fond de la vallée qui ont révélé une histoire mouvementée source de leur nature hétérogène.

Les investigation géologiques classiques de terrain ont permis de dresser la carte géologique de surface des dépôts quaternaires. Les travaux de géophysique et la réalisation de forages mécaniques complémentaires ainsi que des essais spécifiques in situ ont rendu possible une apréhension en trois dimensions de la vallée, de son remplissage et des caractéristiques hydrogéologiques que nous avons pu intégrer dans un modèle numérique régional des écoulements souterrains présenté dans le chapitre 7.

4.2. DONNÉES EXISTANTES

Il existe un nombre relativement élevé de sondages carottés réalisés dans la plaine alluviale de la haute Sarine. Ceci s'explique essentiellement par la vocation touristique des lieux qui nécessite d'une part un grand nombre de constructions (habitations, commerces) et d'autre part une utilisation des ressources en eaux à l'aide de puits filtrants (nous reviendrons plus loin sur la nature exacte de l'utilisation de l'eau souterraine). En nous plongeant dans les diverses sources d'archives géologiques disponibles (HDOK Hydrogeologische Dokumentationsstelle du canton de Berne, les archives géologiques nationales ainsi que quelques bureaux d'études locaux), nous avons pu recenser et intégrer des sondages effectués entre les années 1954 et 1999 (Annexe I).

La distribution régionale du remplissage et en particulier l'épaisseur des terrains perméables aquifères restaient malgré toutes ces études totalement inconnues sauf à l'extrémité ouest du domaine étudié au lieu dit Dorfrütti où trois sondages mécaniques ont atteint la roche à environ 10 m de profondeur (KB1, KB2 et KB3). la situation des anciens sondages ainsi que les quatre nouveaux effectués dans le cadre de cette étude sont représentés dans la figure 4.1.

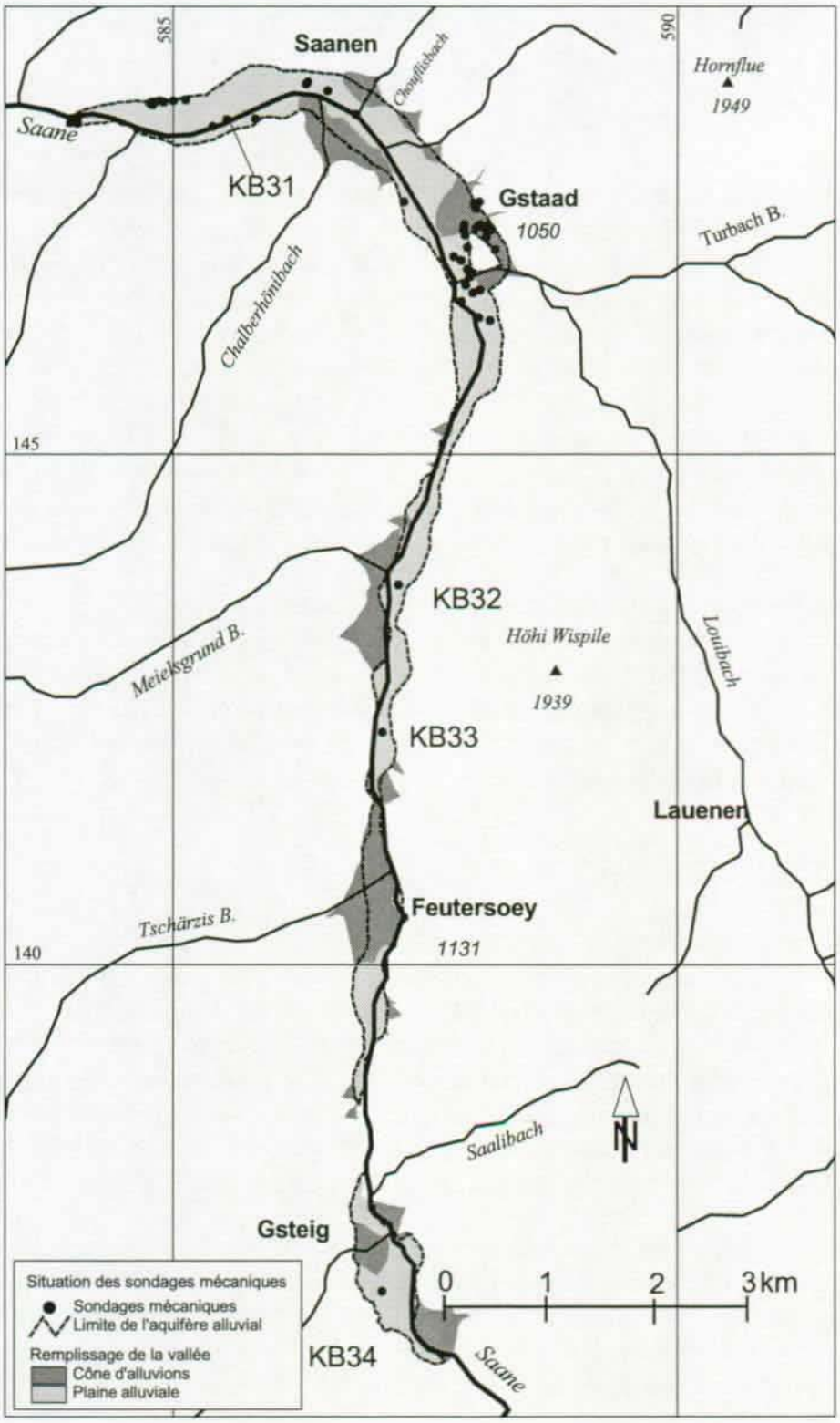


Figure 4.1: Carte de situation des sondages mécaniques effectués dans la plaine alluviale de la haute Sarine entre 1950 et 1999 (uniquement les codes des 4 forages effectués dans le cadre de cette thèse sont indiqués).

En ce qui concerne d'autres méthodes d'investigations hydrogéologiques, nous n'avons trouvé qu'une seule étude géophysique effectuée dans la région de la haute Sarine antérieure à nos propres prospections (CSD, 1983). Il s'agit d'une étude géoélectrique très locale effectuée à l'Ouest de Gstaad. Par conséquent, nos travaux dans ce domaine constituent une base de données complètement nouvelle et originale.

4.3. INVESTIGATIONS GÉOPHYSIQUES

Le but de ces campagnes de mesures géophysiques était d'obtenir des données sur la nature du sous-sol de manière rapide, efficace et économique dans les secteurs où nous ne disposions d'aucune donnée préexistante (sondage mécanique). Nous avons commencé par effectuer une campagne de sondages géoélectriques suivie d'une série de mesures de type traînés électriques. Constatant que ces mesures ne suffisaient pas à déterminer en particulier la position exacte du bedrock, nous avons mis en oeuvre des méthodes d'investigation sismiques plus lourdes mais plus à même d'atteindre les profondeurs estimées. Le tableau 4.1 présente une description du matériel utilisé lors des différentes campagnes d'investigations géophysiques.

Type	Marque	Internet (au 3.7.00)
1) Résistivités		
Potentiomètre	IGL-UNIL	www-sst.unil.ch
Software	WinSev, W_Geosoft, Switzerland	www.wgeosoft.ch
2) Sismique		
Sismographe	StrataView R24, Geometrics, USA	www.geometrics.com
Sismographe	StrataView R48, Geometrics, USA	www.geometrics.com
Software Réfraction	SIPQC, Rimrock Geophysics Inc., USA	www.geometrics.com
Software Réflexion	Visual_SUNT, W_Geosoft, Switzerland	www.wgeosoft.ch

Tableau 4.1: Récapitulatif des méthodes géophysiques utilisées et du matériel nécessaire.

4.3.1. MÉTHODES GÉOÉLECTRIQUES

Principe

Par les électrodes A et B (fig. 4.2), on fait circuler un courant électrique continu d'intensité I. Ce courant provoque une différence de potentiel ΔV que l'on mesure entre les électrodes M et N. Cette différence de potentiel est proportionnelle à un facteur, calculé d'après la géométrie du dispositif, et à la résistivité électrique apparente des terrains sous-jacents. On peut donc, en mesurant I et ΔV au point O du dispositif, calculer une résistivité et en déduire des informations sur la nature géologique du sous-sol.

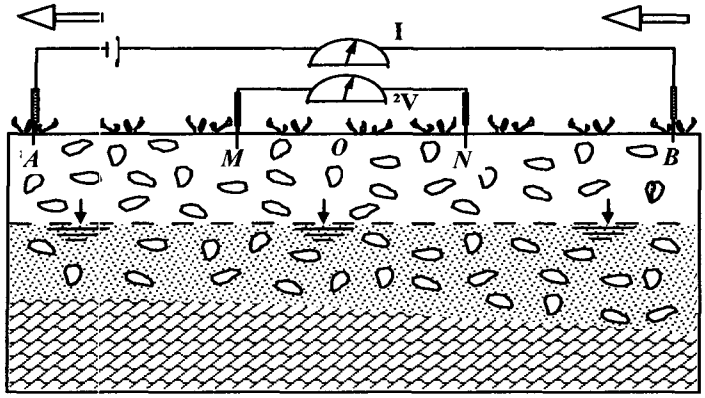


Figure 4.2: Dispositif géoélectrique de type Schlumberger.

Les premières investigations ont été effectuées par le biais de sondages géoélectriques. Ces derniers permettent d'obtenir des informations quantitatives à la verticale du point de mesure (Meyer de Stadelhofen, 1991). L'interprétation de ces sondages permet d'obtenir l'épaisseur et la résistivité spécifique des couches à l'aplomb du centre su dispositif (sous réserve des limites d'interprétation comme le principe d'équivalence, que nous ne traiterons pas ici, mais qui ont été prises en compte lors de l'interprétation).

Le principe du traîné électrique est conçu pour sa part de manière à faire porter l'investigation sur une tranche de sous-sol d'épaisseur plus ou moins constante (l'écart AB reste constant à chaque point de mesure). Ce dispositif est par conséquent sensible avant tout aux variations latérales des qualités électriques du sous-sol. La méthodologie de l'essai consiste à déplacer le dispositif sur un tracé choisi dans la zone à étudier et à faire une mesure à chaque emplacement. Cette succession de mesures permet l'établissement d'un profil des résistivités. En répartissant judicieusement les traînés sur l'ensemble de la région étudiée, on pourra tracer une carte des résistivités de la surface considérée.

Dans les deux méthodes, la profondeur d'investigation est fixée par la distance qui sépare les deux points extrêmes du dispositif, A et B. Plus la distance entre A et B est grande, plus la profondeur testée est importante. Cependant, lorsque la profondeur augmente, il est fréquent de rencontrer plusieurs types de terrains. On enregistre alors une valeur représentative de l'ensemble des terrains traversés. La résistivité calculée est apparente. Elle est une fonction complexe de la résistivité vraie de chaque terrain.

Les valeurs de résistivités électriques mesurées sur le terrain peuvent par ailleurs servir au calcul de la perméabilité de ces derniers, ou tout au moins à son estimation. La relation entre ces deux grandeurs a peu être mise en évidence à plusieurs reprises lors d'études similaires (Dassargues, 1997; Mac Donald et al., 1999; Meyer de Stadelhofen, 1991). Il faut rappeler que pour des formations aquifères à porosités d'interstices saturées en eau, la résistivité apparente mesurée dépend fortement de la minéralisation l'eau de formation et de la teneur en argiles selon la Loi d'Archie (Meyer de Stadelhofen, 1991; Telford et al., 1990). Dans notre cas, c'est essentiellement la forte teneur en sels minéraux des eaux souterraines qui va influencer les mesures. D'une manière générale, elle va tendre à faire diminuer les valeurs de résistivités apparentes. Ce phénomène a été pris en compte lors de l'interprétation des résultats.

Interprétation des résultats

Les résultats obtenus par les méthodes d'investigations géoélectriques sont représentés dans le tableau 4.2 (récapitulatif des sondages), dans la figure 4.3 ainsi que dans l'annexe II (pour le

No Sondage	Lieu	x	y	Qualité	Nbre terrains	*Prof. [m]
S1	Innergsteig	587300	136880	B	5	39
S2	Gsteig Bode	586830	137650	B	4	30
S3	Feutersoey	586950	140550	B	4	13
S4	Grund	587130	142420	L	4	46
S5	Oey	587260	144200	M	4	10
S6	Matte	588040	145730	M	4	43
S7	Rütti	588000	146550	B	4	26
S8	Flugplatz Est	585300	148440	B	6	83
S9	Fallersmatte	584820	148430	B	3	3.6
S10	Flugplatz Ouest	584650	148320	B	4	22
S11	Aebnitt	587740	147670	B	4	56
S12	Chäppeli	586830	148340	B	5	55

Tableau 4.2: Sondages géoélectriques réalisés dans la plaine alluviale de la haute Sarine, l'indice de qualité exprime une évaluation de la fiabilité de l'interprétation par rapport aux mesures de terrains (B = interprétation bonne, M = moyenne, L = limitée). * La profondeur représente le toit du dernier terrain considéré.

détail de chaque sondage). Il ressort de cette campagne que la nature du remplissage de la haute Sarine est relativement hétérogène, ce qui n'est pas une surprise en soi. Tous les sondages effectués sont de type K (Meyer de Stadelhofen, 1991; Telford et al., 1990), c'est à dire que la résistivité du premier terrain est systématiquement inférieure à celle du second et qu'en général, le dernier terrain a une résistivité inférieure aux couches intermédiaires. On distingue parfois très bien des zones à très forte résistivité (> 500 Ωm) proches de la surface correspondant aux graviers secs (S3, S7, S8, S9, S11 et S12). Les épaisseurs de ces terrains varient entre 6 et 1.4 m ce qui correspond plus ou moins à la situation du toit de la zone saturée de l'aquifère principal aux points de mesures. Les terrains situés au-dessus ont en principe des résistivités bien inférieures de l'ordre de 40 à 100 Ωm. Ceci représente la couche superficielle du sol composé la plupart du temps par des limons sableux, contenant de la matière organique dont l'épaisseur ne dépasse jamais le mètre si ce n'est au S2, où l'épaisseur calculée atteint 5 m et peut correspondre à une plus importante présence de matière organique sous forme de tourbe (on observe d'importants marécages dans la région de Gsteig). Les terrains identifiés plus profondément ont une épaisseur et une nature bien plus variables. On peut néanmoins déterminer deux groupes dont le premier est constitué par des terrains indiquant des résistivités entre 100 et 500 Ωm qui correspondent à des sables et graviers saturés en eau dont les épaisseurs varient de 2 à 52 m. Le deuxième groupe comprend des terrains de résistivités plus faible de l'ordre de 30 à 80 Ωm dont l'épaisseur a été calculée à 38 m dans S8 et 16 m dans S10. Nous l'avons interprété comme étant de la moraine de fond constituant l'aquiclude principal du système aquifère alluvial de la haute Sarine. Le bedrock n'a vraisemblablement été atteint qu'à un deux reprises, au S8 à 83 m de profondeur et une résistivité de 581 Ωm qui marque la présence de calcaires et au S10 avec un terrain à 200 Ωm à 22 m de profondeur (flysch marno-gréseux).

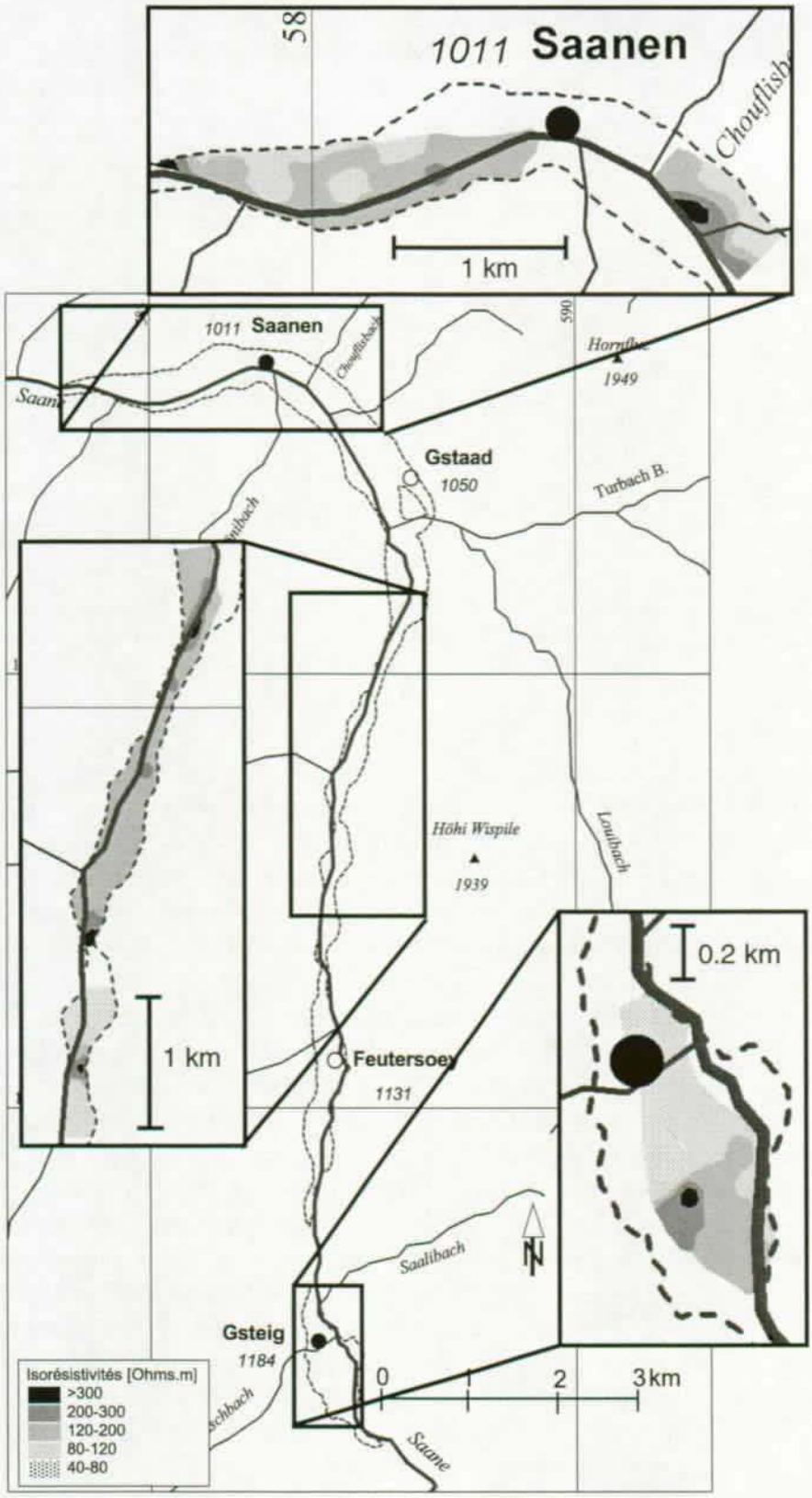


Figure 4.3: Carte des résistivités électriques apparentes (traînés électriques TEL de type Schlumberger AB=100 m), les zones étudiées ont été agrandies.

La carte des résistivités apparentes établie sur la base des mesures de traîné électrique (dispositif Schlumberger, AB=100 m) met en évidence deux zones avec des résistivités moyennes à élevées qui représentent des dépôts sablo-graveleux à graveleux (120 < Ωm < 200). Sur les bord, en particulier dans la région d'Äbnitt au nord de Gstaad, on distingue des zones à résistivité plus faible (<120 Ωm) où l'on a du matériel morainique remanié moins perméable. Une telle zone a aussi été identifiée au nord de Feutersoey. La région de Gsteig est plus nuancée, ceci est dû au fait que le grand cône de déjection du torrent du Reuschbach s'imbrique fortement dans la structure alluviale de la plaine. Il s'agit aussi, comme nous le verrons plus loin de la présence d'horizons limoneux peux perméables.

4.3.2. MÉTHODES SISMIQUES

Les données obtenues grâce aux deux campagnes de mesures géoélectriques ainsi qu'à la réalisation des quatre sondages de reconnaissance carottés nous ont permis d'obtenir une représentation à l'échelle régionale de la nature et de la distribution des dépôts quaternaires. Il n'a malheureusement pas été possible de définir la profondeur exacte de la vallée de manière suffisante au niveau régional et par conséquent de connaître l'épaisseur totale des sédiments quaternaires. Pour ce faire nous avons mis en oeuvre les méthodes d'investigations géophysiques plus lourdes de réfraction et de réflexion qui ont fait maintes fois leur preuves dans le cadre d'études sur le remplissage des vallées quaternaires alpines et de ses aspects hydrogéologiques (Bodmer et al., 1996; Büker et al., 1998; Hartmann, 1998; OEHE, 1998; Pugin, 1989; Pugin et al., 1997; Signer, 1996).

La mise en oeuvre des méthodes sismiques de prospection du sous-sol reste encore relativement lourde d'une part par le matériel et le personnel nécessaire sur le terrain, puis d'autre part par le traitement des données qui même s'il a bénéficié des apports de l'informatique moderne, reste une tâche délicate et laborieuse (Mari et al., 1997). Ainsi, nos choix se sont portés sur la mise en oeuvre de la sismique réfraction dans un premier temps car elle a l'avantage certain de ne pas nécessiter de traitement avancé des données à l'aide du traitement numérique du signal (Mari et al., 1998; Telford et al., 1990). Les doutes qui subsistaient quand à la profondeur d'investigation potentielle de la sismique réfraction nous ont tout de même incités à enregistrer suffisamment de données pour pouvoir appliquer un traitement de sismique réflexion sur un certain nombre de profils choisis. Bien nous en a pris car il fut effectivement possible de repérer la position du bedrock, en particulier dans le bassin de Saanen uniquement grâce à la sismique réflexion, même si la séquence de traitement est restée éminemment sommaire. La liste des 15 profils sismiques réalisés dans la haute Sarine lors des campagnes de terrain du 20 au 29 juillet 1998 ainsi que celle complémentaire du 28 juillet 1998 est présentée dans l'annexe III.

Nous rappelons qu'aucune étude semblable n'avait été entreprise précédemment à notre connaissance dans la région de la haute Sarine et que les données brutes des enregistrements sont disponibles au GEOLEP.

4.3.2.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX DES MÉTHODES D'INVESTIGATION SISMIQUE

Les méthodes sismiques en géophysique étudient la vitesse de propagation d'ondes de choc artificielles dans le sous-sol afin d'en retirer un maximum d'information sur la nature et l'épaisseur des terrains rencontrés. Ainsi, les ondes sismiques sont générées par une source et enregistrées par une unité d'acquisition. Ultérieurement, les données brutes sont traitées de manière numérique afin d'obtenir des images interprétables du sous-sol.

4.3.2.2. RÉSULTATS DE LA PROSPECTION PAR SISMIQUE RÉFRACTION

Les résultats obtenus par la sismique réfraction complètent bien ceux obtenus par les campagnes géoélectriques. Nous avons pu à l'aide d'une douzaine de profils déterminer la profondeur à laquelle se situait le bedrock dans la plupart des cas. Nous avons donc pu déterminer l'épaisseur totale des sédiments qui constituent le remplissage quaternaire de la vallée de la haute Sarine (tab. 4.3). Cette méthode est malheureusement limitée à la détermination des contacts proches de la surface où les contrastes de vitesses sont importants. Les résultats sont intégrés dans la carte de profondeur du bedrock (fig. 4.6). Nous n'avons pas reproduit les représentations graphiques des dromochrones ainsi que des profils en profondeurs réalisés à l'aide du logiciel SIPQC 4.0 installé sur le sismographe pour des raisons graphiques d'impression et de lisibilité. Ce programme (version simplifiée de SIPT2 produit par la même entreprise) permet une interprétation complète de la réfraction dans les conditions de terrain et ne peut être implémenté à un PC standard.

Type de terrain	Epaisseur [m]	Vitesses [m/s]
Zone altérée, sol	< 10	392 à 870
Quaternaire indifférencié	3 à 35	1'087 à 2'098
"Bedrock"	-	2'238 à 4'945

Tableau 4.3: Synthèse des résultats de sismique réfraction.

En nous basant sur des comparaisons avec des ordres de grandeurs existants (Büker, 1998; Parriaux, 1999; Signer, 1996), nous avons pu interpréter la zone du Quaternaire indifférencié comme étant essentiellement composée de sédiments de type fluvioglaciaires et/ou glacio-lacustres aquifères. Lorsque nous parlons de "bedrock", il s'agit pour nous d'identifier l'aquitard de la nappe principale. Les vitesses obtenues nous empèchent parfois d'interpréter la vraie nature du "bedrock" car dans ces gammes de vitesses, il peut s'agir d'une moraine de fond, compacte et imperméable. C'est vraisemblablement le cas pour toutes les vitesses inférieures à 2'600 m/s.

4.3.2.3. LES RÉSULTATS DE LA SISMIQUE RÉFLEXION

L'usage de la sismique réflexion terrestre haute résolution nécessite en principe une séquence de traitement assez complexe dont la réalisation complète n'a jamais été le but de cet thèse. Néanmoins, l'appareillage de terrain à disposition ainsi que le logiciel de traitement utilisé nous ont permis malgré un traitement un traitement sommaire de repérer quelques réflexions intéressantes. Le profil effectué sur le site de l'aérodrome de Saanen (S14) a livré un résultat satisfaisant, là où, malgré l'application de la sismique réfraction, nous n'avions toujours pas réussi à atteindre le bedrock avec une certitude suffisante. Nous nous bornerons à ne présenter que ce profil effectué durant cette étude, puisqu'il a permis de dimensionner l'appel d'offre pour la réalisation des travaux de sondages mécaniques (fig. 4.4).

Les résultats, intégrés dans la carte de profondeur du bedrock (fig. 4.6), montrent en général la présence de forts réflecteurs dans la quasi totalité des profils. Les signaux proches de la surface (<50 msec) n'ont en principe pas été retenus car comme nous n'avions appliqué aucune correction statique dont l'importance en sismique réflexion haute résolution est cruciale (Pugin et Pullan, 1998; Yilmaz, 1987) nous ne pouvions exclure une confusion avec les premières arrivées par exemple. L'analyse de faciès sismique s'est avérée trop ambitieuse pour nos petits profils à faible degré de couverture.

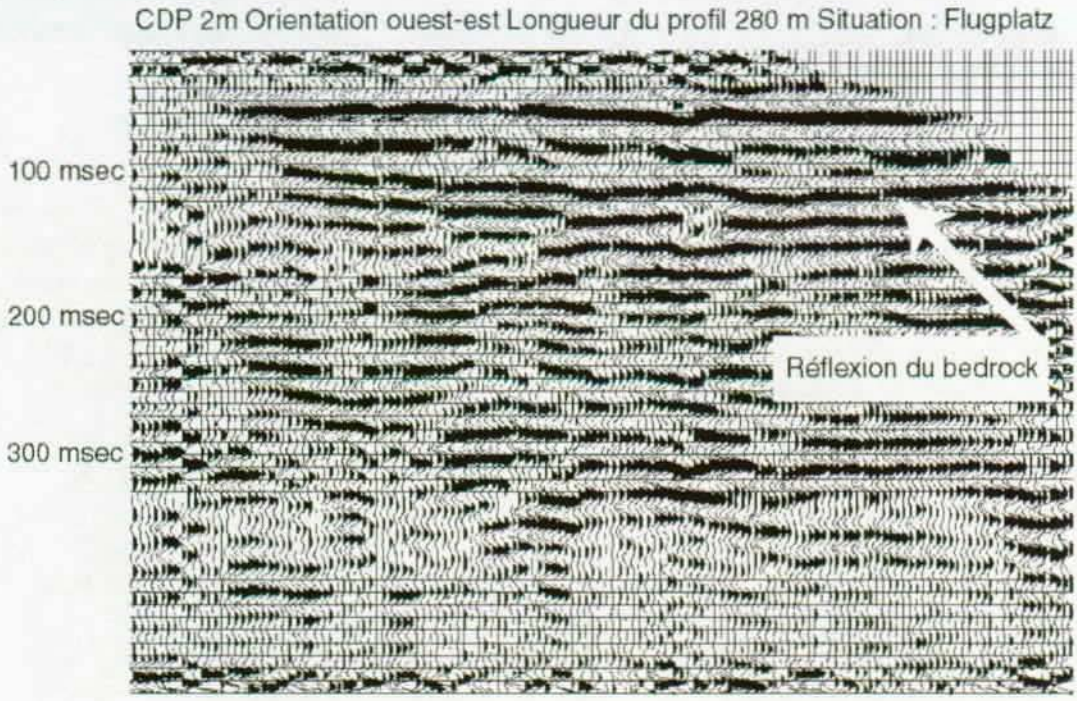


Figure 4.4: Extrait du profil sismique réflexion de l'aéroport de Saanen (étude GEOLEP pour l'OEHE : OEHE, 1999a).

Rappelons aussi qu'en sismique terrestre il existe de très nombreuses sources de bruit de différentes natures (cohérentes ou aléatoires) qu'il faut filtrer pour les séparer du signal. Il s'agit-là d'un travail de spécialistes qui évolue entre l'art et la science (Ulrych et al., 1999) et qui ne faisait pas partie de nos objectifs dans le cadre de cette thèse.

4.4. FORAGES, ESSAIS DE POMPAGE ET MICROMOULINET

4.4.1. DÉROULEMENT DE LA CAMPAGNE DE SONDAGE

Ce n'est qu'après avoir repéré les cibles hydrogéologiques potentielles grâce aux méthodes géophysiques nous avons lancé le processus d'appel d'offres pour la réalisation des sondages mécaniques. Il fut long et laborieux car il n'a pas été facile de trouver une entreprise prête à effectuer ces travaux dans les délais requis et l'enveloppe financière que nous avions définie auparavant. Ceci fut la cause d'un retard relativement fâcheux qui déplaça le début prévu des travaux au mois de janvier 1999. Comme une difficulté arrive rarement seule, nous avons dû affronter de terribles conditions météorologiques durant les mois de février et mars ce qui repoussa finalement la fin des travaux de forages jusqu'au printemps, soit le 25 mai 1999.

Malgré cela il fut possible de réaliser un quatrième sondage en plus des trois initialement prévus dans l'appel d'offre tout en restant dans l'enveloppe financière attribuée par l'OEHE ce qui permit d'accéder à des informations géologiques absolument inédites dans la région de Gsteig au pied du Sanetsch. Les profils géologiques et les descriptions lithologiques des sondages sont présentés dans l'annexe IV.

Les résultats montrent très clairement 3 types d'environnements sédimentaires distincts que nous reprendrons à la description globale des bassins sédimentaires glacio-lacustres et fluvio-glaciaires du paragraphe suivant. Afin d'éviter des répédans les descritions des sédiments quaternaires et leur genèse, nous reviendrons plus loin sur leur interprétation.

4.4.2. ESSAIS DE POMPAGE ET MICROMOULINET DE FORAGE

Afin de déterminer la distribution des perméabilités verticales dans les nouveaux forages, nous avons procédé à des tests au moulinet de forage (flowmeter) et à de petits essais de pompage. Nous n'avons pas effectué d'essais de pompage de longue durée pour des raisons de temps et de logistique. Les résultats obtenus grâce à ces différents essais nous ont permis d'évaluer d'une part la distribution des perméabilités verticales à l'intérieur de l'aquifère (fig. 4.5) ainsi que de compléter d'autre part les données fournies par les archives des essais de pompages effectués au cours des études géologiques et géotechniques précédentes. Nous avons réalisé par ailleurs un calibrage (Annexe V) pour vérifier la relation linéaire entre le débit pompé et les tours d'hélice de l'appareillage (la firme utilise l'unité suivante : les CPS Count Per Second).

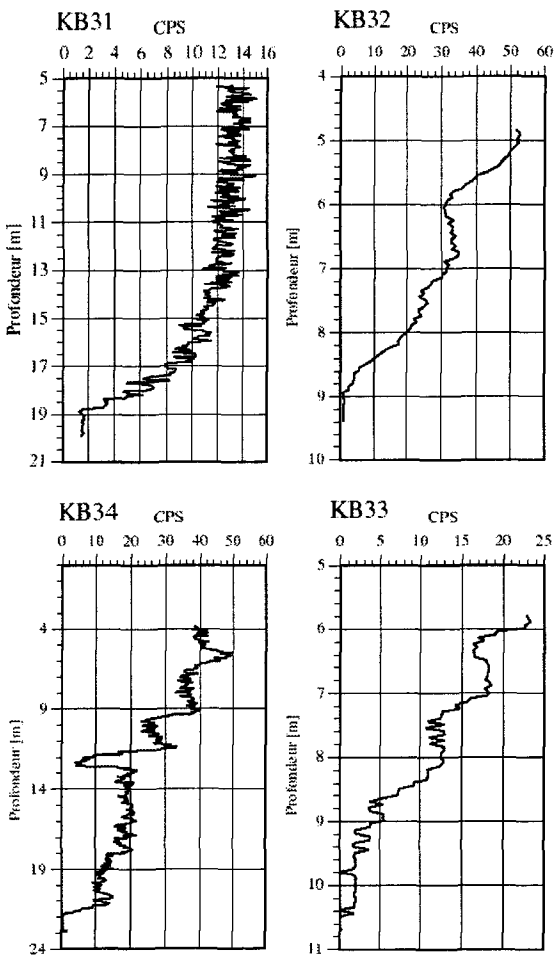


Figure 4.5: Diagraphies au moulinet de forage (flowmeter) effectuées par le GEOLEP sur les 4 nouveaux forages KB31, KB32, KB33 et KB34. Les CPS peuvent être transposés en unités de débit en se basant sur la relation CPS=0.083Q définie lors de l'étalonnage du dispositif en laboratoire.

Le tableau 4.4 montre la synthèse des résultats des essais effectués dans les sondages KB31, 32, 33 et 34. On constate d'emblée que les terrains les plus perméables se situent dans les premiers mètres de sédiments. Ils offrent une productivité extrêmement élevée de l'ordre de 40 à 80 l/min.m pour les parties fortement aquifères.

Sondage	No OEHE	Flowmeter	Essai de pompage	Débit	Rabattement
		PerméabilitéK [x10^{-3}m/s]	Perméabilité K [x10^{-3}m/s]	[l/min]	dh [m]
KB31	585/148.18	3.6	2.8	764	0.2
KB32	587/143.6	3.8	3.7	764	0.5
KB33	587/142.2	2.5	1.3	424	0.4
KB34	587/136.7	0.8	1.6	955	1

Tableau 4.4: Synthèse des essais de pompage de courte durée et des essais au moulinet de forage (flowmeter).

D'une manière générale, en compilant les données à disposition, nous constatons une forte variabilité des perméabilités moyennes autant verticale qu'horizontale que nous avons attribuée à la nature extrêmement variable des dépôts quaternaires. En effet, les fréquents changements de régime de la Sarine durant la période tardi- et postglaciaire ont conduit à une chenalisation importante des sédiments ainsi qu'à une variation latérale de ces derniers due essentiellement à la présence de cônes de déjection torrentiels qui causèrent l'obstruction complète de la vallée (exemple de Feutersoey). La figure 4.6 représente la distribution des perméabilités dans la plaine de la haute Sarine. Nous nous somme basés sur une compilation des données existantes (forages, géophysique) pour son élaboration. Les données à disposition nous ont parues suffisantes pour cette représentation régionale.

Si l'on considère la définition des faciès hydrogéologiques de Anderson (1989) qui y rattache des unités homogènes de point de vue génétique, mais anisotropes du point de vue hydraulique, notre représentation des perméabilités s'accorde bien avec les sédiments d'un environnement fluvioglaciaire et glaciolacustre que nous allons décrire dans les prochains paragraphes.

4.5. SYNTHÈSE SUR LES PROPRIÉTÉS HYDROGÉOLOGIQUES ET LA NATURE DU REMPLISSAGE QUATERNAIRE

Rappelons tout d'abord les différentes étapes qui nous ont permis de nous représenter les dépôts quaternaires de la vallée de la haute Sarine en trois dimensions. Le tableau 4.5 indique le type de l'étape ainsi que les méthode utilisées. Nous avons par ailleurs indiqué un facteur de qualité d'interprétation qui permettra aux différents spécialistes d'apprécier les données d'une part en fonction de nos connaissances et de nos compétences plus ou moins approfondies dans chaque matière et d'autre part en fonction du type même de la source d'information et des sources d'incertitudes qui lui sont communément attribuées (méthode directe ou indirecte, représentation de la variabilité spatiale des paramètres mesurés ou décrits).

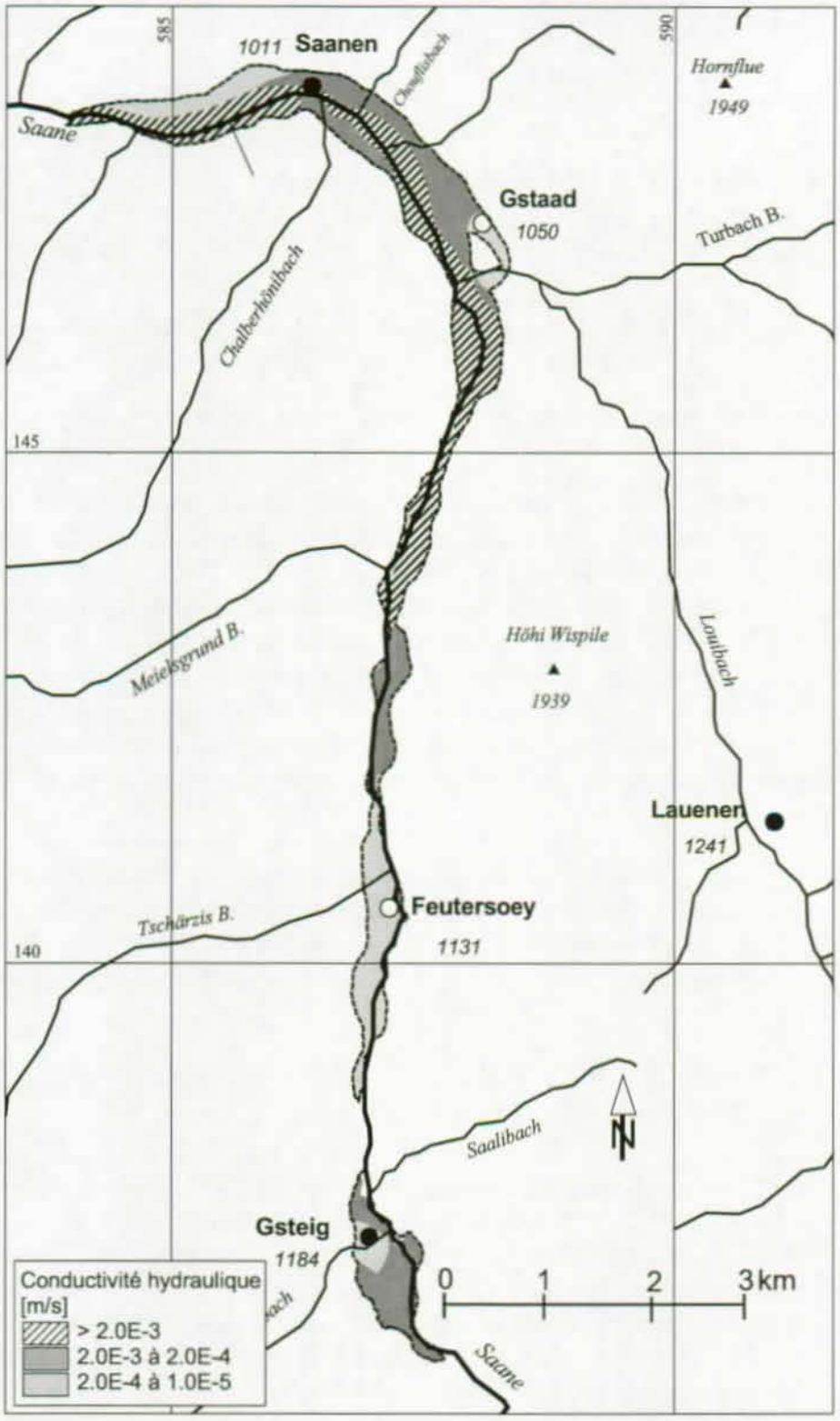


Figure 4.6: Carte des conductivités hydrauliques (compilation des archives et de nos essais sur KB31, KB32, KB33 et KB34).

Type	Objectifs	Qualité
Levé de surface et compilation des données existantes	Aperçu géomorphologique et géologique	Bx,y-Mz
Campagne Géoélectrique	Distribution spatiale et nature des dépôts quaternaires	Bx,y-Mz
Sismique réfraction	Epaisseur des terrains quaternaires	Lx,y-Mz
Sismique réflexion	Position du bedrock	Lx,y-Mz
Forages	Epaisseur, nature et caractéristiques hydrogéologiques des terrains quaternaires	Lx,y-Bz
Moulinet de forage (Flowmeter)	Perméabilité verticale des terrains	Lx,y-Mz
Essais de pompages	Perméabilité des terrains	Lx,y-Lz

Tableau 4.5: Récapitulatif des méthodes d'investigations géologiques et géophysiques appliquées à la haute Sarine avec leur facteur de qualité (B = Bonne, M = Moyenne, L = Limitée, x, y = variations latérales et z = variations en profondeur).

Malgré le haut degré de qualité dont bénéficient globalement les différentes sources de renseignement, nous insistons à nouveau sur le caractère régional de la validité de nos interprétations.

La plaine alluviale de la haute Sarine consiste en un seul aquifère principale libre qui se divise en trois parties que nous décrirons dans la suite par le terme de bassin, même s'il peut paraître quelque peu abusif. Il s'agit en fait de bassins de sédimentation glaciaire et post-glaciaire formés le long d'un accident tectonique NS (la vallée elle-même) typique du cadre structural préalpin (voir chapitre sur le cadre géologique régional), puis qui suivent un chevauchement d'azimut Est-Ouest dès Saanen. La profondeur probable du bedrock est représentée dans la figure 4.7. et la nature des sédiments quaternaires de couverture est représentée dans la figure 4.8 sous forme de cartes ainsi que dans la figure 4.9 sous la forme de profils-types.

4.5.1. LE BASSIN DE SAANEN-GSTAAD

Il s'agit du plus grand et du plus profond bassin que les glaciers ont formé dans la haute Sarine. Sa profondeur varie entre 80-90 m sous l'aérodrome de Saanen pour remonter brusquement à 10 m à son extrémité ouest dans la région de Dorfrütti. Le remplissage est typiquement glacio-lacustre alpin (Nicoud et al., 1993; Nicoud et al., 1987).

Le sondage KB31 a traversé complètement tout le remplissage quaternaire de la vallée puisqu'il s'est terminé dans la roche dont 10 m furent forés pour s'assurer qu'il s'agissait bien du bedrock. Les informations livrées par ce forage sont extrêmement intéressantes et nous renseignent sur le remplissage de ce que nous appellerons désormais le bassin de Saanen. Le bedrock est composé par des calcaires marneux rougeâtres contenant des foraminifères (*Globotruncana* et Globigérines, Badoux et Lombard 1962) que nous avons observés sans chercher à les déterminer de façon précise. Il s'agit très vraisemblablement des "Couches Rouges" qui correspondent stratigraphiquement au Cénomanien-Turonien du Crétacé inférieur (Badoux et Lombard 1962) situées au sommet de la série de l'écaille du Rübli des Préalpes médianes rigides situées à cet endroit juste sur la rive gauche de la Sarine.

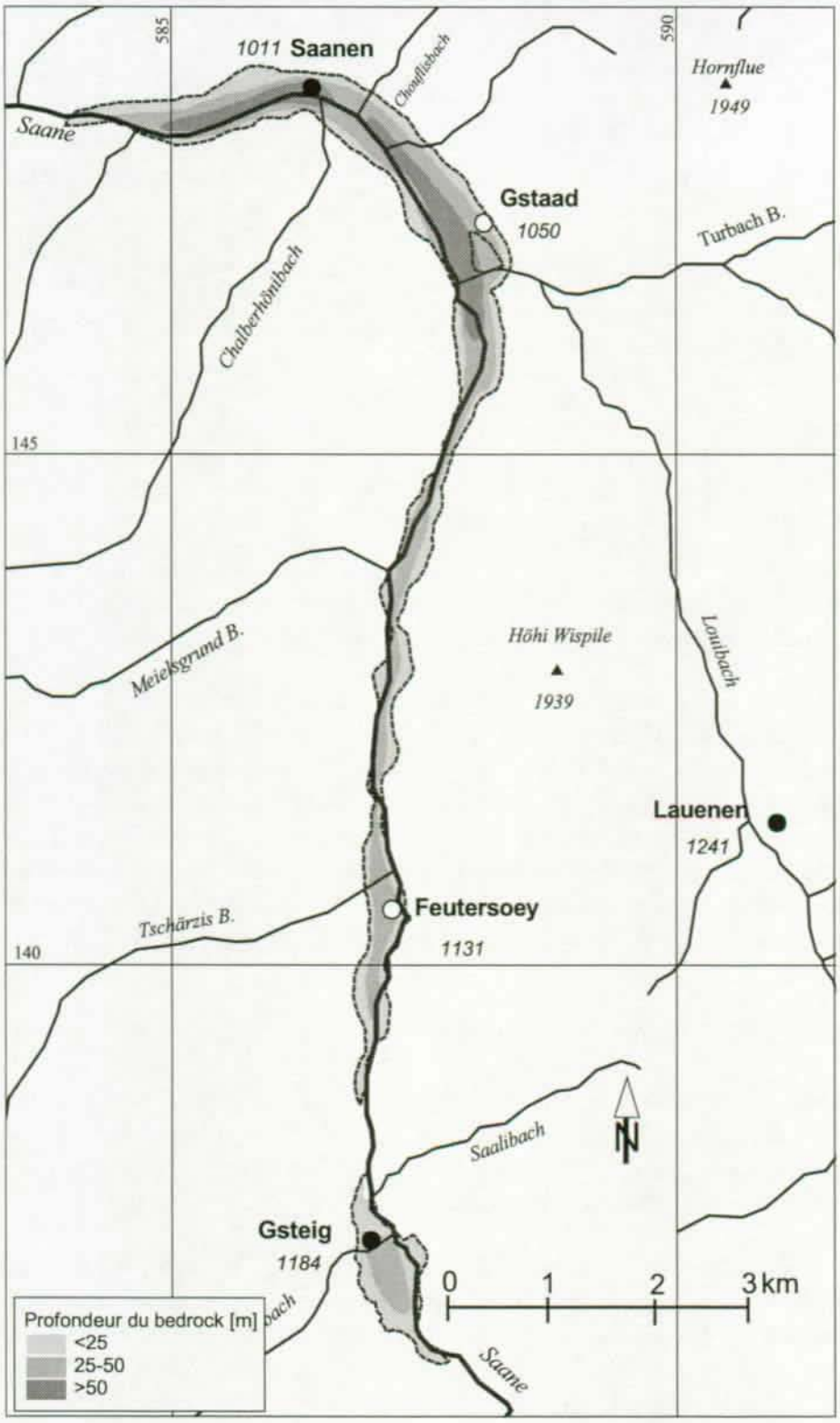


Figure 4.7: Carte de la profondeur du bedrock déterminée par les méthodes d'investigation géophysiques et par forages.

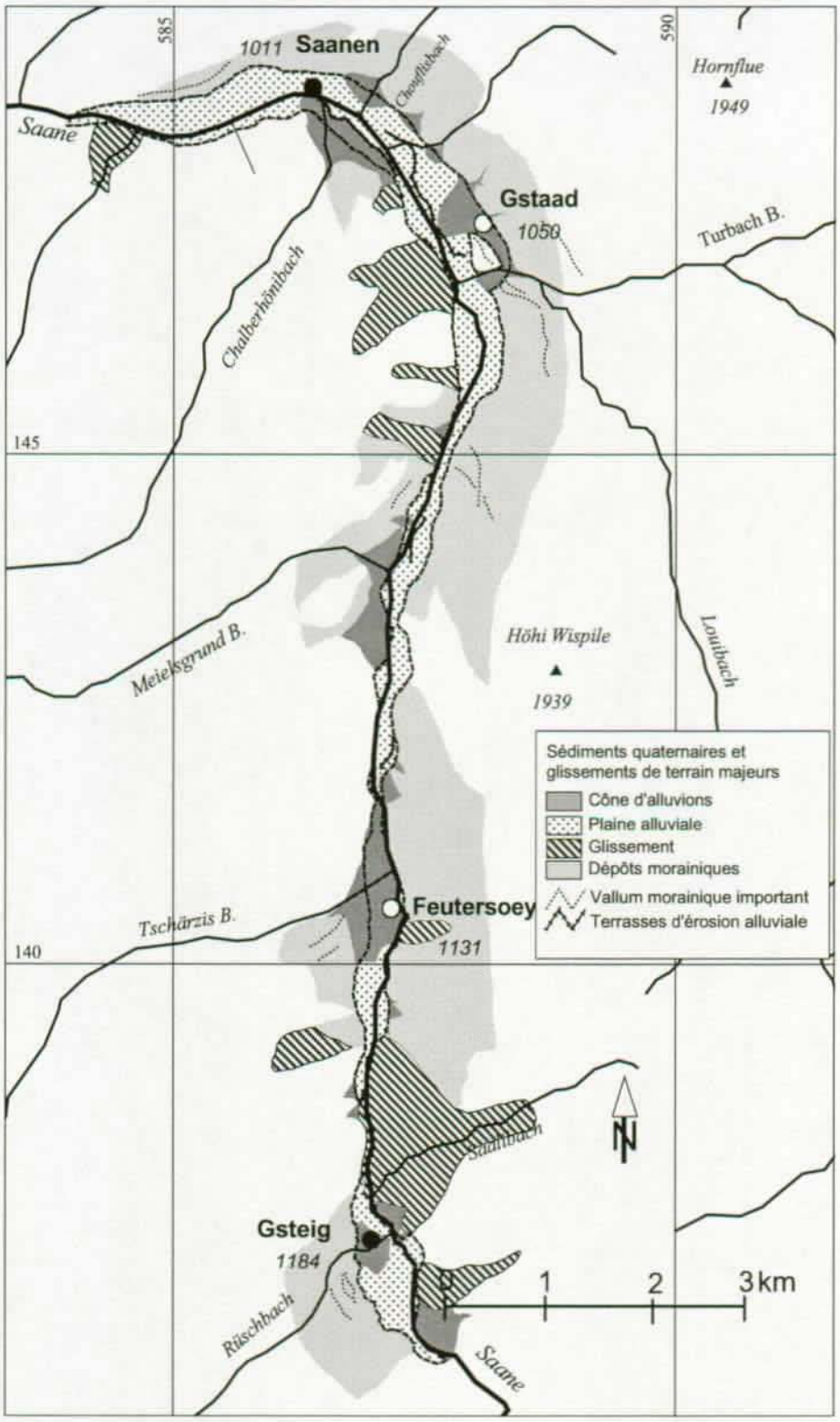


Figure 4.8: Carte des sédiments quaternaires de la vallée de la haute Sarine d'après compilation et interprétation des nouvelles données et des archives utilisées.

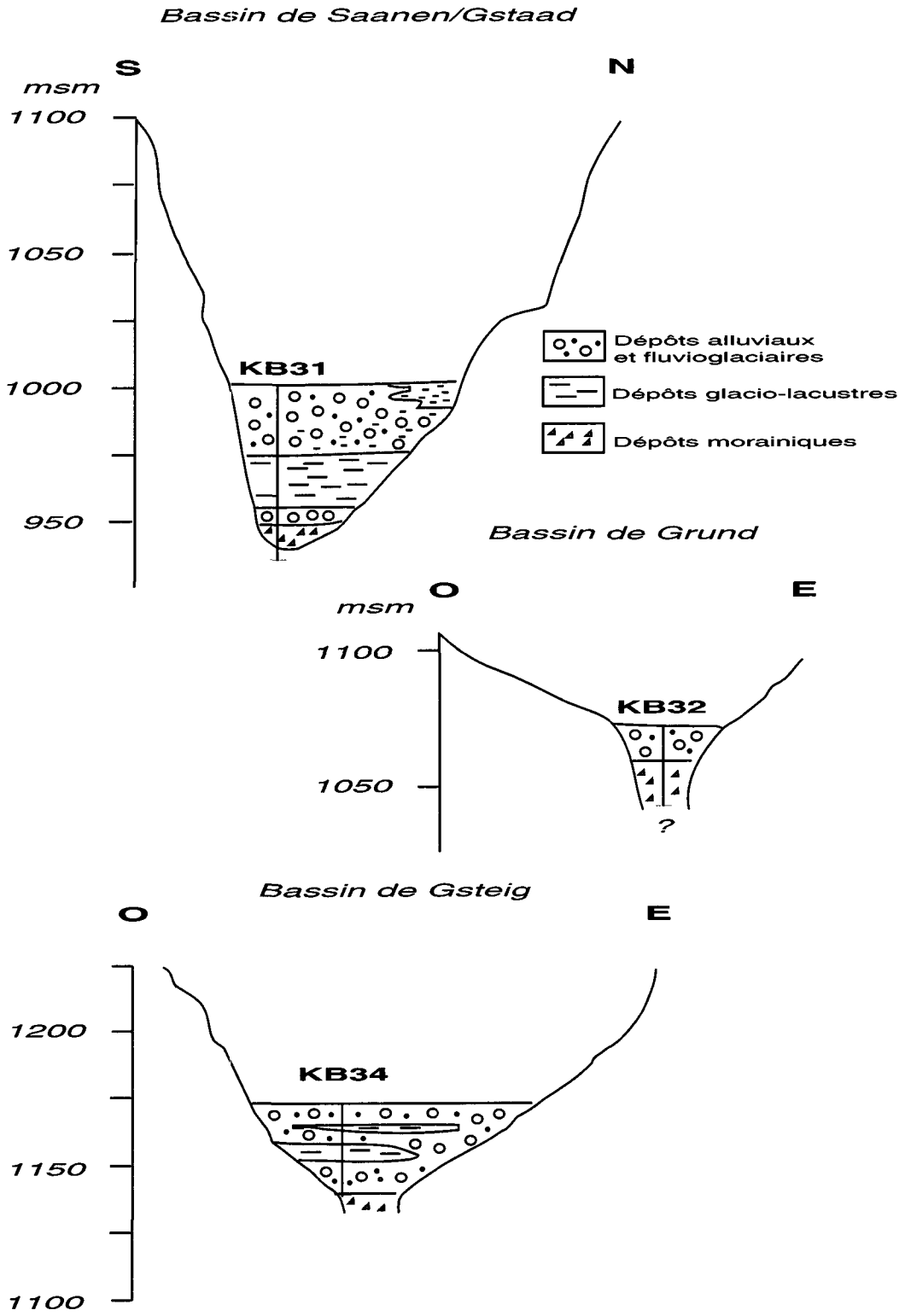


Figure 4.9: Profils-types du remplissage quaternaire composant l'aquifère alluvial de la vallée de la haute Sarine depuis le bassin de Gstaad-Saanen à l'aval jusqu'au plus petit bassin de Gteig à l'amont de la vallée.

Les dépôts quaternaires offrent une splendide séquence de remplissage glacio-lacustre typique dont on peut trouver de nombreux exemples dans le cadre alpin s.l. (Drewry, 1986; Nicoud et al., 1993; Parriaux et Nicoud, 1993; Pugin, 1989; Tissières, 1990; West, 1977) dont la figure 4.10 nous montre un schéma de principe.

On trouve à la base des sédiments meubles une véritable moraine de fond (lodgment till) extrêmement compacte qui se trouve juste au-dessus de 2 m de roche concassée et cimentée par son propre matériel issu du broyage. Il s'agit là certainement d'un coussin glaciaire composé de roche broyée par le poids du glacier. La moraine de fond quand à elle est composée d'une matrice limono-argileuse dans laquelle sont imbriquées de manière compacte des pierres anguleuses. Au-dessus de ces dépôts morainiques nous trouvons un fin lit de gravier relativement propre et non compacté qui peut correspondre à petit torrent sous-glaciaire de faible importance ou à une partie graveleuse de la moraine. Le comblement de la dépression par des sédiments commence alors par une séquence de sables limoneux montrant des laminites typiques que nous ne pouvons pas suite à notre analyse attribuer à des varves car nous n'avons pas pu démontrer leur rhytmicité annuelle (Campy et Macaire, 1989). Ensuite, c'est une épaisse série de limons sableux lités (varvés) qui représente les dépôt typiquement lacustres, les bottomsets, avec quelques dropstones. Les couches suivantes sont formées par des foresets composés de sable fin à moyen, en partie lités qui toujours contiennent quelques dropstones. Enfin, le comblement du lac arrive à son terme avec une série de sables légèrement graveleux et de graviers moyen limoneux qui forment les topsets avec leurs lits de graviers et de galets chenalisés (Parriaux et Nicoud, 1993). La partie supérieure du sondage est constituée d'alluvions fluviatiles ou de dépôts fluvioglaciaires de type sandur composés de graviers propres ou légèrement sablo-limoneux. Il est intéressant de relever que nous n'avons pas identifié de matière organique dans ce forage (sauf les premiers centimètres du sol).

Les caractéristiques hydrogéologiques de ces formations sont très hétérogènes. La partie graveleuse aquifère représente environ 20 m, les formations deltaïques plus fines sont également aquifères, mais dans une bien moindre mesure puisque dans des diagraphies au moulinet de forage effectuées lors des essais de pompage, ceux-ci ne participaient pas de manière significative à l'alimentation du débit pompé. Nous avons relevé la présence d'une horizon aquifère profond dont les caractéristiques hydrauliques n'ont pas pu être testées (OEHE, 1999a).

La carte des résistivités apparentes montre que lorsque l'on se dirige vers l'ouest ou vers le nord du bassin, les valeurs diminuent pour entrer dans la catégorie 80 à 120 Ωm qui correspond à des terrains moins perméables. Pour la partie ouest, il s'agit de matériel morainique, alors que pour la partie nord il s'agit vraisemblablement de sables fins limoneux saturés (les foresets décrits plus haut).

Les forages exécuté lors d'une construction dans ce secteur on pénétré ces couches sableuses sur plusieurs mètres (CSD, 1969).Ces terrains à faible résistivité ont également été repérés par les sondages géoélectriques S9 et S10. Les valeurs comprises entre 120 et 300 Ωm indiquent la présence de terrains plus perméables et saturés en eau de nature graveleuse à sablo-graveleuse. Il s'agit des alluvions récents de la Sarine et des dépôts fluvioglaciaires et glacio-lacustres (topsets). Ces terrains s'étendent au-delà de Saanen vers l'est et le sud-est (régions de Chäppeli, Äbnitt et Rütti) comme l'attestent les sondages KB12, KB 13, KB14, FB3 et les sondages géoélectriques S11 et S7.

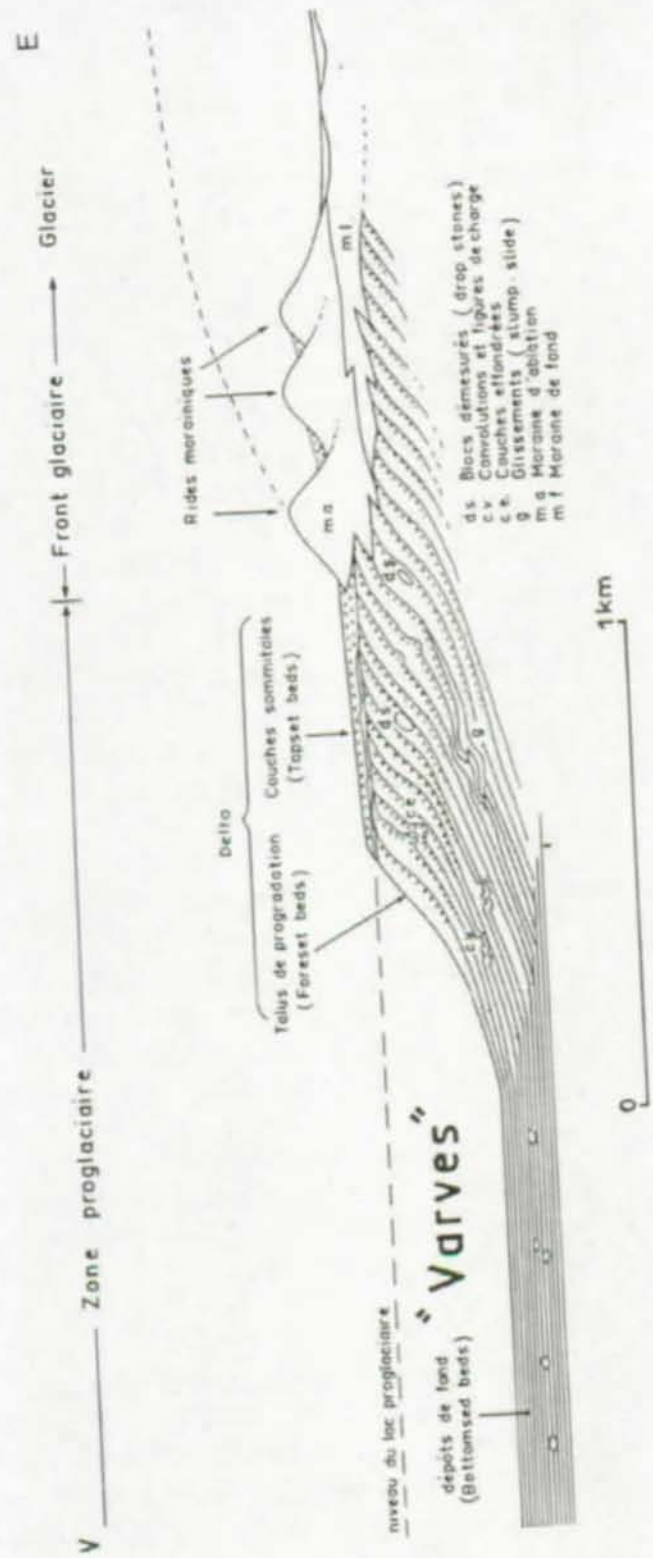


Figure 4.10: Schéma de principe d'un remplissage proglaciaire (Campy, 1989).

Le bassin de Gstaad constitue le prolongement du précédent. L'auge glaciaire y est toujours profonde (> 50 m) et le remplissage très similaire. Aucun sondage mécanique ou géoélectrique n'est parvenu au bedrock. Les profils sismiques nos 2, 3 et 5 donnent des valeurs de la profondeur du bedrock variant entre 30 et 35 m. D'après le profil de sismique réfraction no 2, le bedrock remonte entre les deux bassins. Ceci n'a pas pu être vérifié autrement, mais se défend par le fait que l'écaille du Rübli constitue une lithologie plus compétente au milieu des flyschs. L'érosion glaciaire y aurait trouvé quelque résistance plus marquée.

L'épaisseur des terrains aquifère est légèrement supérieure à celle observée sous l'aérodrome de Saanen (de l'ordre de 10 m). Aucun vestiges de sédiments glaciolacutres n'ont pu être identifiés dans ce bassin. Ceci concorde avec la présence des deux cônes du Louibach et du Chalberhönibach dont l'activité importante a contribué au comblement rapide du bassin de Saanen-Gstaad. En profondeur les terrains sont aussi plus sableux et correspondent également à des dépôts fluvioglaciaires proximaux, encore mal triés de type Sandur (fig. 4.11).

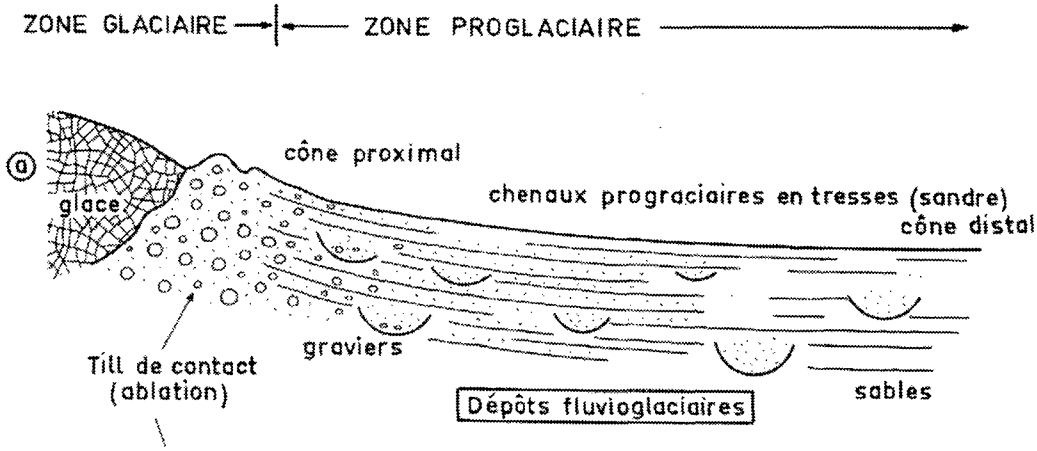


Figure 4.11: Dépôts proglaciaires de type sandur (Campy, 1989)

4.5.2. RÉGION DE GRUND

Le forage KB32 est sensiblement différent du premier à plus d'un titre. Tout d'abord il a été effectué dans une zone où aucun autre forage n'avait été exécuté auparavant. Ensuite, il n'a pas traversé toute la série quaternaire et n'a par conséquent pas atteint le bedrock. De bas en haut, on y distingue deux types de dépôts. Le bas est composé de moraine en partie remaniée, formée de limon argileux avec des graviers, des blocs et des pierres. La partie supérieure est composée pour sa part de graviers sablo-limoneux contenant de grosses pierres et quelques blocs, entrecoupés à deux reprises par un horizon argilo-limoneux avec de la matière organique et quelques graviers. Ces horizons ne peuvent vraisemblablement pas être rattachés à la formation d'un grand lac comme celui de Saanen. Néanmoins, la présence d'un fin litage nous indique l'existence d'un plus petit lac. Il s'agissait probablement d'un lac de barrage créé part le cône alluvial du Meielsgrundbach, qui fut jadis certainement plus important.

Le sondage KB 33, bien que relativement proche du précédent, diffère de celui-ci pour deux raisons. On constate d'une part l'absence d'horizons limoneux et d'autre part une granulométrie bien plus grossière (présence de gros cailloux et de blocs). Le milieux semble par conséquent avoir été beaucoup plus dynamique qu'à l'aval. La partie inférieure du forage est constituée de matériel morainique probablement en partie remanié. La partie supérieure consiste en une épaisse séquence fluvioglaciaire avec des passées moins perméables en partie imbriquées qui peuvent correspondre à du matériel morainique remanié. Le sondage n'a pas atteint le bedrock.

Cet étroit bassin s'étend de la région de Moosfang au sud de Gstaad où la vallée se rétréci jusqu'à la limite entre les deux communes de Saanen et de Gsteig dans la région de Grund. Jusqu'à cette thèse, aucune donnée hydrogéologique n'existait sur cette portion d'aquifère. Les sondages et les traînés géoélectriques (S5 et S6), mécaniques (KB32 et KB33) et les profils sismiques (9, 10 et 11) ont pu mettre en évidence des terrains fortement perméables d'une épaisseur de 10 m environ.

4.5.3. LE BASSIN DE FEUTERSOEY-ZÄLG-BODE

La région de Feutersoey composée du plus grand cône de déjection de la vallée qui la barre complètement d'ailleurs, n'a d'emblée pas retenu notre attention. Le remplissage quaternaire y est vraisemblablement composé de sédiments fins déposés dans un environnement lacustre créé par le grand cône de déjection torrentiel sur lequel repose le village de Feutersoey. Le profil sismique réalisé dans la partie sud du bassin n'était pas de bonne qualité et son interprétation reste entachée de nombreux doutes. Le bedrock devrait se situer à une profondeur de 20 à 30 m au maximum. Nous avons néanmoins pu observer l'émergence d'une nappe sur la rive droite du lit de la Sarine aux coordonnées 587'230/140'715. Il semble que cet exutoire naturel d'une nappe phréatique locale ne tarisse jamais.

4.5.4. BASSIN DE GSTEIG

Le forage KB34 constitue également une première car aucun autre sondage mécanique n'avait été réalisé dans la région de Gsteig auparavant. On y distingue une alternance de séquences sablo-graveleuses et limoneuses. Les séquences contiennent toutes de la matière organique. Nous avons même identifié des restes de bois dans la séquence inférieure, soit entre 25 et 26 m de profondeur. Dès 26 m, on trouve des dépôts morainiques formés de limons graveleux compacts à texture imbriquée. Le bedrock n'a pas été atteint. Il est intéressant de mettre en relation les horizons limoneux dont l'origine lacustre (l'horizon 14 à 16.5 m contient un litage bien marqué) avec le glissement de terrain situé au Nord de Gsteig dans la région de Saali et qui barre complètement la vallée. Cet impressionnant glissement est essentiellement constitué de matériel morainique et de schistes noirs de l'Aalénien qui sert de plan de glissement. L'origine de l'instabilité est probablement due au retrait du glacier principale de la Sarine qui avait un rôle stabilisateur et au réchauffement du climat qui suivit. On distingue de semblables glissements plus à l'Est, dans la vallée de la Simme (Brüchli et Schwarzbächli).

Ces horizons lacustres permettent une datation relative des phases de glissement (Lang et al., 1999). La présence des trois horizons limoneux peut être mise en parallèle avec trois phases importantes de glissement qui ont conduit à l'obturation complète de la vallée à la hauteur de Saali. Il faut ajouter à cela le cône de déjection du Reuschbach qui contribue aussi à cet effet de barrage.

Depuis, le niveau de la nappe est maintenu relativement haut par ce que l'on peut considérer comme une limite imperméable. On constate d'ailleurs de nombreux exutoires naturels de la nappe dans la région de Innergsteig, juste à la limite avec le cône de déjection susmentionné. Nous reviendrons plus loin sur ces aspects hydrogéologiques particuliers. Nous n'avons pas pu dater les dépôts de matière organique découverts dans le sondage KB34, néanmoins, la présence de restes de bois dans la séquence de base indique que la première phase de glissement est vraisemblablement postérieure au Dryas récent (11'000 - 10'000 BP) puisque c'est à cette époque seulement que la vallée de la haute Sarine a été libérée de toute glace jusqu'aux environs de Gsteig et que les arbres avaient bien colonisé le paysage (Burga et Perret, 1998).

4.6. CONTRIBUTION À LA RECONSTRUCTION DU RETRAIT GLACIAIRE DANS LA VALLÉE DE LA HAUTE SARINE

La réalisation des nouveaux forages a permis de définir de façon plus complète la distribution des dépôts quaternaires de la vallée de la haute Sarine. Les 4 sondages ont été effectués dans des secteurs où aucune connaissance préalable sur la nature et la distribution des dépôts existait. Ainsi, ces travaux constituent un apport original et nouveau à la reconstruction des stades de retraits glaciaires dans cette vallée. La première étude géomorphologique et première tentative de reconstruction est l'oeuvre de Nussbaum (1906). Dans son travail, il décrit de manière extrêmement précise l'aspect morphologique des dépôts quaternaires qui marquent le paysage de la haute Sarine. Il identifie plusieurs stades. Malheureusement trop attaché aux théories relativement rigides de l'époque quand aux nombre de stades glaciaires, nous ne nous attarderons pas trop sur ses choix. Plus tard, c'est le tour de Hantke(1972; 1980) de s'attacher à la reconstruction des stades glaciaires dans la région. Enfin, plus proche de nous, Monachon (1978) nous offre un travail de synthèse tout à fait complet auquel nous apporterons nos "découvertes" afin de proposer une histoire du retrait glaciaire plausible dans le cadre des préalpes romandes, comparable dans une bien moindre mesure à celle des vallées adjacentes des Ormonts, de l'Hongrin et de l'Etivaz détaillée par Schoeneich (1998).

L'histoire récente des variations climatiques dans les Alpes se base essentiellement sur des comparaisons entre les diverses données paléoclimatiques obtenues grâce aux relevés géomorphologiques, aux analyses palynologiques, aux datations absolues fournies par des restes de matière organique emprisonnées dans les dépôts quaternaires et par la détermination de la ligne d'équilibre des glaciers et de ses dépressions par rapport au stade de référence de 1850 (Schoeneich, 1998).

Nous prendrons comme point de départ le maximum du Würm (nous l'attribuons ici très grossièrement à environ 20'000 BP), dernière grande glaciation qui mena les glaciers bien au-delà des vallées préalpines. A cette époque, toute la région était recouverte de glace qui devait atteindre 1'800 m d'altitude au dessus de Gstaad (Hantke, 1980). Les phases d'amélioration du climat successives ont ensuite entraîné le glaciers dans un grand nombre de stades de recul, mélangés à de plus ou moins importantes réavancées dues à des détériorations brutales du climat, ces épisodes constituent les stades tardiglaciaires et postglaciaires.

Le début de cette époque varie d'un endroit à l'autre en fonction des conditions climatiques locales (Maisch, 1982; Welten, 1982; Welten et Schlüchter, 1988). On attribue par contre de manière plus précise et plus globale, le début de l'époque postglaciaire à environ 10'200 BP, soit à la fin relativement brutale de l'épisode froid du Dryas récent (fig. 4.12).

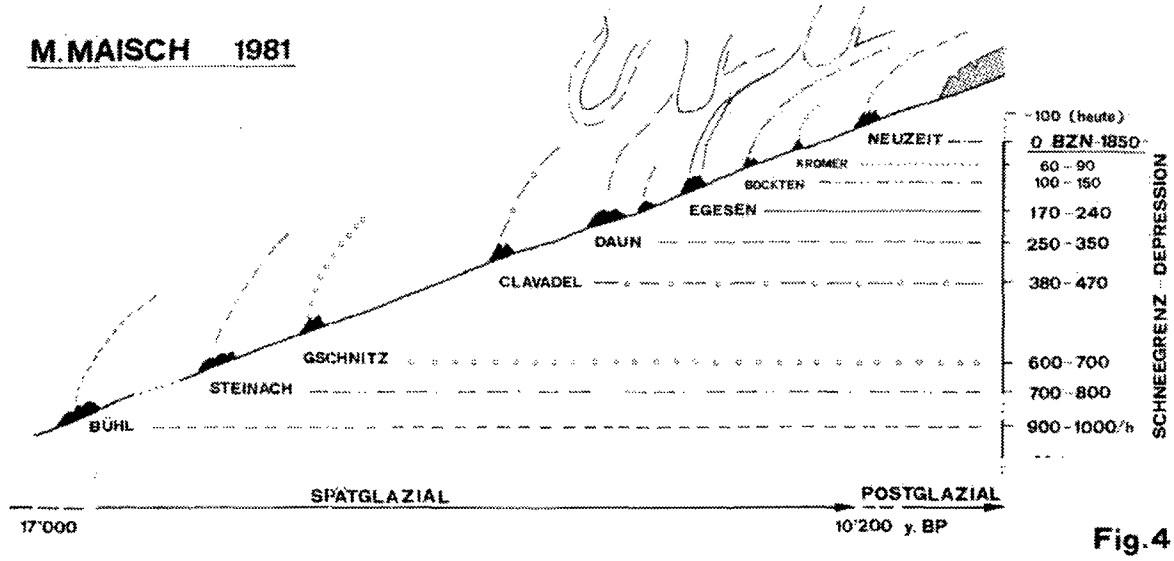


Figure 4.12: Stades tardiglaciaires (Maisch, 1982)

On constate un enrichissement de l'identification des stades au fur et à mesures des différentes études successives pour arriver à la classification généralement utilisée de nos jours pour les Alpes suisses, celle de Maisch (1981; 1982; 1992) essentiellement pour les glaciers des Grisons, mais qui s'adapte bien à ceux des Alpes occidentales (Schoeneich, 1998). Le comblement des vallées alpines s'inscrit complètement dans le cadre des différents stades de retrait et d'avancées glaciaires énumérés ci-dessus. Dans le cadre de cette thèse, nous allons aborder en particulier deux stades de retraits du glacier de la Sarine.

Le Stade de Saanen-Le Vanel et le lac proglaciaire de Saanen

Les reliques du complexe morainique de Büel à l'ouest immédiat du village de Saanen (fig. 4.13) permettent d'identifier le stade de Saanen-Le Vanel (Hantke, 1972; Monachon, 1978). A cette période, il était encore associé au glacier de la vallée de Lauenen, alimenté de manière similaire par un bassin versant important prenant naissance dans les hautes Alpes calcaires. La moraine médiane de la colline située au centre du village de Gstaad ainsi que de nombreuses autres formes morainiques situées plus en amont dans la vallée principale de la Sarine remontent probablement à la même époque.

C'est probablement grâce aux alimentations latérales de plus petits glaciers que l'on explique la présence du glacier de la Sarine aussi loin (Monachon, 1978). La position exacte de la langue du glacier devait se situer dans la région de Flendruz-Rougemont et correspondre à une stade glaciaire anté-Bühl, comparable aux stades GE 12-HE9 décrits par Schoeneich (1998) dans les vallées de l'Hongrin et de l'Etivaz.

Ces stades sont selon nous antérieurs au Dryas ancien ou correspondent au plus tôt au début de cette période puisque Welten (1982) a analysé un profil pollinique à Saanenmöser (1250 m) qui commence dans le Dryas ancien (env. 13'000 BP) et qui implique qu'à cette époque, le col de Schönried-Saanenmöser devait déjà être libre de toute glace.

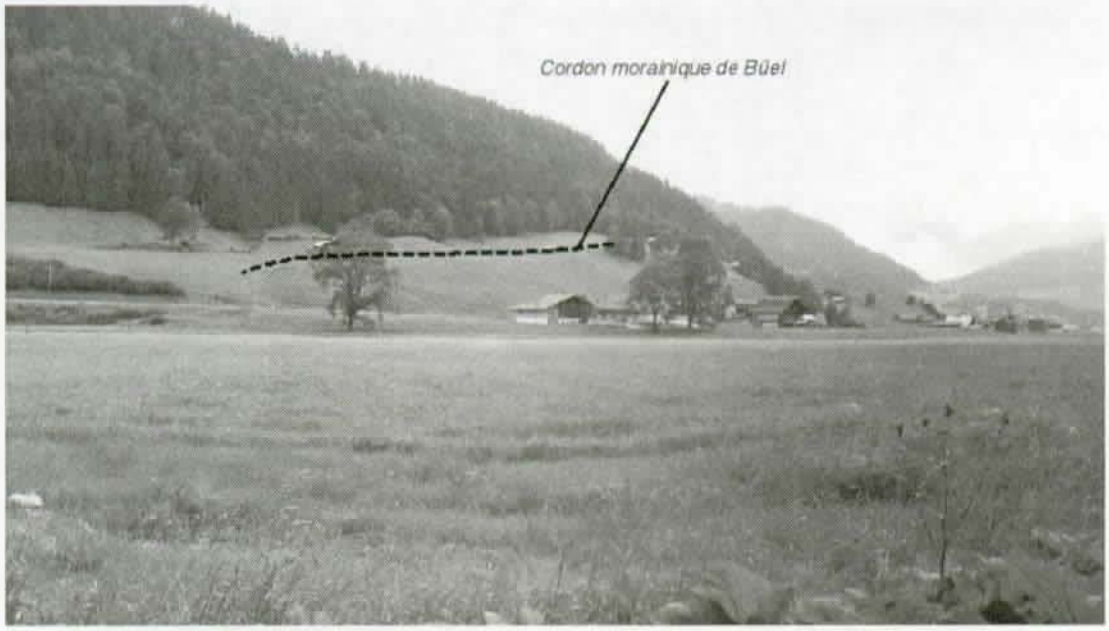


Figure 4.13: Cordon morainique de Büel sur la rive droite de la Sarine au sud de Saanen correspondant au stade du village du même nom, probablement antérieur à l'interstade Bölling-Alleröd (coord. 584850/148540).

Le stade de Gstaad constitue un point d'accrochage suivant dans l'histoire de la déglaciation de la vallée de la haute Sarine. Il constitue probablement un stade de recul (Monachon 1978). Le front du glacier devait se situer dans la région de Moosfang, juste au sud de Gstaad où l'on observe des reliques morainiques caractéristiques sur la rive droite de la Sarine à environ 1200 mètres d'altitude dans le secteur Mossfang-Vorschess.

Le glacier de Tungel qui occupait la vallée de Lauenen devait probablement s'arrêter dans la région de Trom. Les lambeaux du glacier provenant du Turbachtal devaient quand à eux s'accrocher aux quelques cirques glaciaires entourant et fermant ladite vallée. Ainsi, la région de Gstaad devait constituer un confluent de deux grands torrents glaciaires, dont celui de Lauenen est probablement à l'origine du cours épigénique entamant la moraine médiane de Gstaad.

C'est certainement à cette époque que le grand surcreusement de Saanen a pu se remplir de manière relativement rapide car l'apport de sédiments était important, étant donné qu'au moins trois grands cours d'eau venaient y déposer leurs lots de sédiments. La formation du lac est due pour sa part à la présence du verrou rocheux du Vanels à l'extrémité ouest de notre zone d'étude.

La vallée était donc complètement fermée et ce surcreusement ne demandait qu'à ce remplir. Les conditions climatiques devaient être encore très froides et peuvent correspondre à la fin du Dryas ancien, juste avant l'interstade Bölling-Alleröd qui a vu l'arrivée de la végétation dans les Préalpes (Burga et Perret, 1998). Nous n'avons pas relevé la présence de matière organique dans les sédiments lacustres découverts dans le forage KB31 de 1999.

Le stade de Gsteig

Entre Mossfang et Gsteig, les restes de moraines sont peu nombreux. La plus grande partie du matériel morainique a glissé et a été remanié par la rivière de telle manière à ce qu'il devient impossible de retrouver quelque stade glaciaire net et bien défini. On remarque cependant 2 cordons morainiques bien conservés qui offrent des forme typiques à l'embouchure des vallées de Meielsgrund et d'Arnen (fig. 4.14). Ils correspondent vraisemblablement à des moraines médianes du glacier de la Sarine et de ses affluents respectifs.

Figure 4.14: Cordon morainique de Feutersoey (coord. 586700/140490)

Alors que le glacier s'est retiré dans la vallée, les matériaux remaniés et transportés par les torrents se sont en partie déposés dans ce bassin. Au moment où le régime changea de la sédimentation à l'érosion, il y eu formation de nombreuses terrasses d'érosion visibles tout le long de la plaine alluviale actuelle. Nussbaum (1906) donne même un ordre de grandeur de cette érosion qu'il estime à plus de 100 m à maints endroits. Nous pensons pour notre part que l'érosion récente des dépôts quaternaires de la vallée de la haute Sarine ne dépasse pas l'ampleur observée sur les actuelles formes d'érosion, soit de l'ordre de 10 m au maximum entre le niveau de la plaine à la fin de la période de sédimentation et le niveau actuel de la Sarine.

Le remplissage de la vallée représente dans l'ensemble une séquence relativement classique postglaciaire avec l'érosion des sédiments fluvioglaciaires anciens et dépôt des alluvions fluviatiles récentes plus grossières. Le lit de la Sarine se creuse aujourd'hui dans ces sédiments plus récents (Campy et Macaire, 1989; Parriaux, 1981).

Le stade de Gsteig est quand à lui bien conservé et consiste en d'épais dépôts morainiques sis au pied des nappes Helvétiques où s'est retiré le glacier de nos jours. Nussbaum (1906), Monachon (1982) et Hantke (1982) reconnaissent également ce stade. Il correspond vraisemblablement aux stades H2-DA4, antérieurs à l'interstade Bölling-Alleröd (13'000 à 11'000 ans BP), décrits par Schoeneich (1998) pour les vallées de l'Hongrin et de l'Etivaz. Il nous semble en tout cas peu probable qu'il s'agisse d'un stade plus ancien car les premiers sédiments qui recouvrent la moraine dans le forage KB34 sont de nature lacustre et contiennent des restes de matière organique qui indiquent un climat déjà plus clément que celui du stade de Saanen, encore bien marqué par le froid. La position de ces moraines nous incite à penser qu'elles sont encore antérieures aux moraines datées par Küttel (1979) dans la région de Kühdungel dans la vallée de Lauenen positionnées à une période antérieure à la fin du Drays récent, c'est-à-dire 10'200 BP.

Résumé et synthèse

Le remplissage quaternaire de la vallée de la haute Sarine a été marqué par deux grandes périodes. La plus ancienne qui correspond encore certainement au tardiglaciaire et à un fort recul des glaciers a favorisé la mise en place d'un grand lac proglaciaire dans la région de Saanen. Le reste de la vallée a été progressivement comblé par des graviers fluvioglaciaires et du matériel morainique remanié par d'importantes quantités d'eau de fonte des glaciers. Dans un deuxième temps, ces édiments ont à leur tour été érodés et en partie remaniés par la Sarine au postglaciaire. On trouve ainsi des terrasses d'érosion typiques bien marquées. Localement, de grands cônes de déjections torrentiels (Feutersoey) ou des glissements de terrains importants (Saali) ont obstrué le cours de la Sarine et créé des petits lacs dont on retrouve des dépôts limoneux caractéristiques. Hydrogéologiquement, les parties fluvioglaciaires et alluviales récentes forment un aquifère continu reposant sur les dépôts morainiques imperméables tapissant le fond de la vallée. Nous avons ainsi affaire à un milieu sédimentaire typique du comblement des vallées alpines avec un changement de régime important au postglaciaire, la présence d'importanttes couches de graviers fluvioglaciaires et alluviaux ainsi que la formation de petites retenues naturelles à l'amont des grands cônes de déjection torrentiels provenant des vallées latérales.

5. ASPECTS CLIMATOLOGIQUES

Les caractéristiques climatologiques définissent et contrôlent en grande partie la nature et l'ampleur des variations du signal d'entrée de l'alimentation des ressources en eaux souterraines. Le chemin suivi par l'eau pour arriver dans la nappe alluviale dépend aussi des conditions hydrogéologiques (perméabilités, échanges rivière-nappe, types de roche). Ce chapitre présente un aperçu des caractéristiques climatiques générales de la région de la haute Sarine qui va permettre de comprendre les variations des écoulements superficiels et souterrains qui seront abordées dans les chapitres suivants.

Les paramètres climatologiques utilisés dans le cadre de cette thèse ont été fournis essentiellement par les stations de mesure de Météosuisse - Institut Suisse de Météorologie (ISM/SMA) qui dispose d'un vaste réseau s'étalant sur tout le territoire suisse. Le tableau 5.1 offre un aperçu des stations utilisées. Pour plus de détails concernant les paramètres enregistrés au différentes

	Coordonnées	Code ISM	Alt. [msm]
Gstaad Grund	587070/142970	SMA5588	1085
Lauenen	590910/141700	SMA5570	1250
Innergsteig	587680/136130	SMA5560	1195

Tableau 5.1: Stations de mesure de l'ISM dans la région de Saanen-Gsteig utilisées dans le cadre de cette thèse.

stations, nous renvoyons le lecteur aux références de l'Atlas Hydrologique de la Suisse (Weingartner et Aschwanden, 1989) et aux données de l'ISM. Bien que la station de mesure de Grund bei Gstaad soit représentée comme station climatologique, on y mesure en fait que très peu de paramètres météorologiques, dont nous avons exploité seulement la température "moyenne" journalière (mesurée à 13 heures). Les stations de Lauenen et de Innergsteig sont rudimentaires et l'on y mesure uniquement les précipitations. Les enregistrements sont reportés dans l'annexe V dans la partie supérieure des représentations.

5.1. PRÉCIPITATIONS

Les précipitations constituent un élément très important du bilan hydrologique à l'échelle d'un bassin. En ce qui concerne la plaine alluviale de la haute Sarine, nous avons utilisé les mesures des deux stations ISM de Grund et de Gsteig (fig. 5.1) pour déterminer des valeurs moyennes pour la période étudiée (1997-1998). Le tableau 5.2 nous présente une statistique des précipitations durant la période de référence 1901-1960, la période de l'étude Mauerhofer (1980) et la période d'observation retenue dans cette thèse.

	Précipitations moyennes annuelles [mm]		
	Gsteig (SMA5560)	Lauenen (SMA5570)	Gstaad (SMA5588)
1996	1600.7	1300.8	1302.6
1997	1648.5	1421.2	1550.8
1998	1593.7	1200.5	1373.2
1999	2035.0	1689.0	1859.0
1996-1997	1719.5	1402.9	1521.4
Mauerhofer 1980			
1973-1977	1479.0	1376.0	1435.0
Période de référence			
1901-1960	1333.0	1301.0	1249.0

Tableau 5.2: Comparaison des données sur les précipitations mesurées durant cette thèse avec celles des études antérieures effectuées sur la haute Sarine.

La comparaison des données à disposition nous permet de décrire la région considérée dans cette thèse comme très riche du point de vue des précipitations (pour 1999 en particulier, essentiellement dans la première moitié de l'année de janvier à juin). En effet, avec une valeur comprise entre 1719 mm pour Gsteig et 1521 pour Grund (dans la vallée principale), nous nous situons au-delà de la valeur de référence de 1901-1960 (20 % de plus environ) et de celle de Mauerhofer (1980) ainsi que de la moyenne suisse de 1481 mm pour la période 1961-1980 (Kirchhofer et Sevruk, 1991).

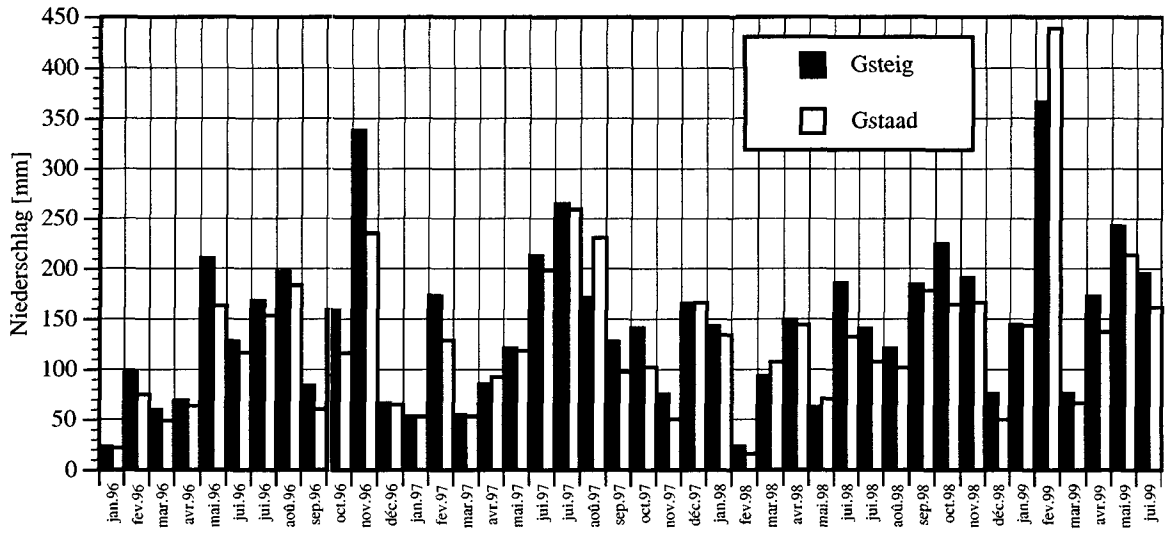


Figure 5.1: Distribution mensuelle des précipitations aux stations ISM de Grund et de Gsteig dans la vallée principale (étude GEOLEP pour l'OEHE : OEHE, 1999a).

Ces précipitations importantes liées à la fonte des neiges ont conduit à d'importantes inondations en Suisse au printemps 1999 auxquelles n'a pas échappé la région de la haute Sarine (fig. 5.2). La distribution spatiale des précipitation varie énormément sur l'ensemble du bassin versant comme le montre le travail de Mauerhofer (1980) sur l'hydrologie de cette même région qui nous a permis de comparer notre période d'étude celle qu'il a effectuée dans les années

Figure 5.2: Inondation au printemps 1999 (mois de mai) dans la région de Feutersoey-Zälg-Bode sur la rive droite de la Sarine. On distingue dans le fond de la photo la neige qui recouvre les falaises des nappes helvétiques situées à l'amont de la vallée de la haute Sarine.

1970. On constate néanmoins qu'en ce qui concerne la plaine alluviale et par conséquent l'aquifère principal, cette distribution est beaucoup plus homogène (fig. 5.3). La première période riche en précipitations se situe vers la fin du printemps et en été (mai à septembre). Une seconde phase importantes et intenses se déroule en automne et varie d'une année à l'autre (en 1996 au mois de novembre, en 1997 au mois de décembre, en 1998 en octobre).

5.2. ÉVAPOTRANSPIRATION

Nous ne disposions d'aucune mesure directe de l'évapotranspiration dans la région étudiée. Selon l'Atlas Hydrologique de la Suisse, la valeur annuelle moyenne d'évapotranspiration se situe entre 400 et 500 mm (Menzel et al., 1989; Primault, 1972). Nous avons pris la valeur moyenne de 450 mm comme représentative de l'évapotranspiration pour la plaine alluviale principale. Cette valeur est probablement plus élevée que la réalité mais demeure acceptable pour les calculs de bilans qui seront présentés plus loin.

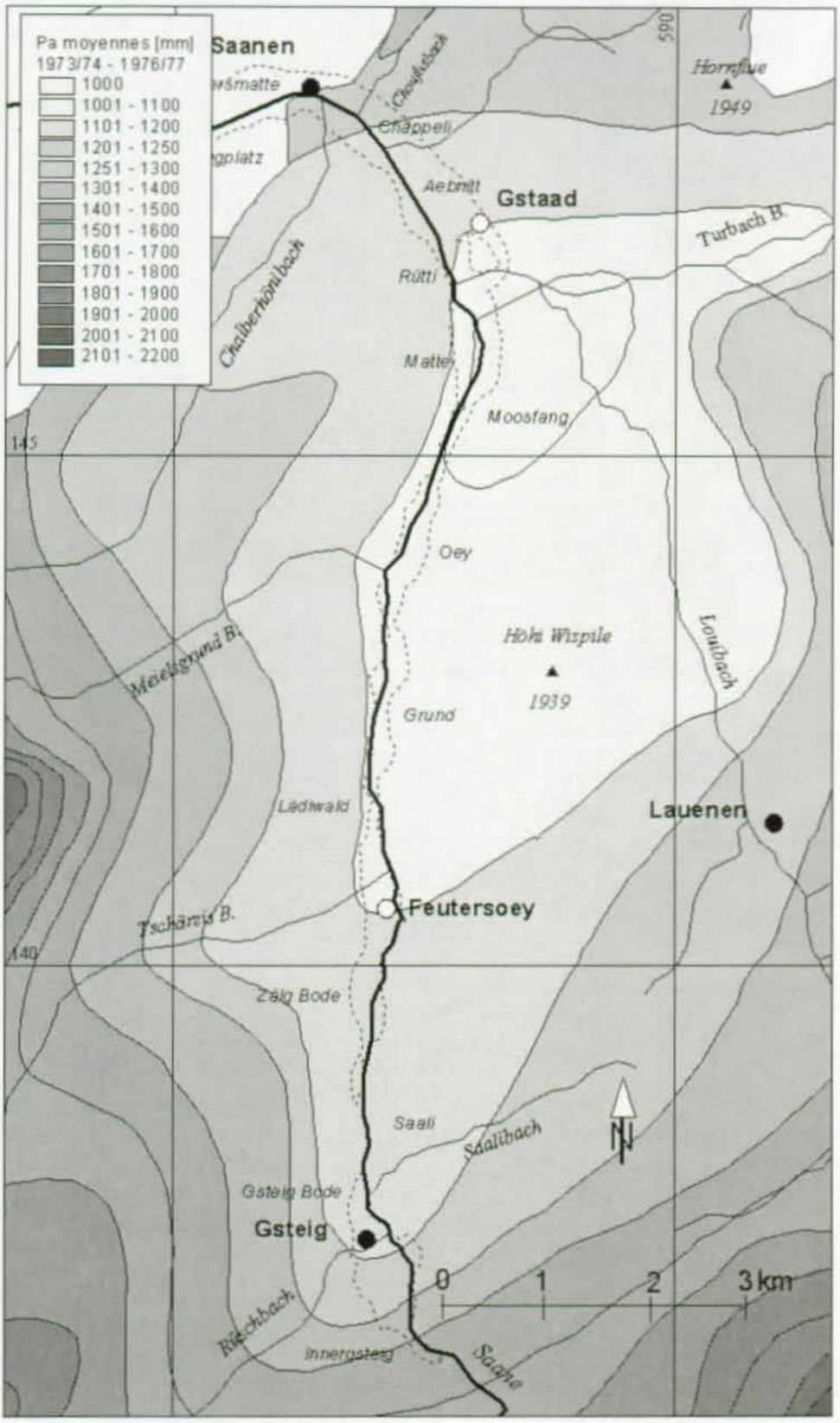


Figure 5.3: Distribution spatiale des précipitations annuelles moyennes (Pa) dans la haute Sarine d'après Mauerhofer (1980).

6. HYDROGÉOLOGIE DE LA HAUTE SARINE

6.1. GÉNÉRALITÉS

Nous allons aborder dans ce chapitres les aspects hydrologiques généraux du bassin versant de la plaine alluviale de la haute Sarine. On y distingue deux grands types d'écoulements, les écoulements de surface et les écoulements souterrains, tous deux contrôlés par les facteurs climatiques régionaux. Afin de parvenir à une synthèse sur le régime des écoulements, nous présenterons en premier lieu les paramètres climatiques de la régions, puis les caractéristiques des écoulements de surface et enfin les particularités des écoulements souterrains.

Les interactions existant entre les différents systèmes d'écoulement s'appréhendent de manière directe ou indirecte. Les méthodes de mesures hydrologiques (limnigraphiques) permettent une approche directe des variations de écoulements et de l'interaction entre les différents types. Le caractère géochimique représente une manière indirecte d'estimation des processus d'échange et de recharge existant au niveau du bassin d'étude. Nous aborderons ainsi les aspects physico-chimique des composantes du cycle hydrologique (fig. 6.1) parallèlement aux mesures directes décrites plus haut.

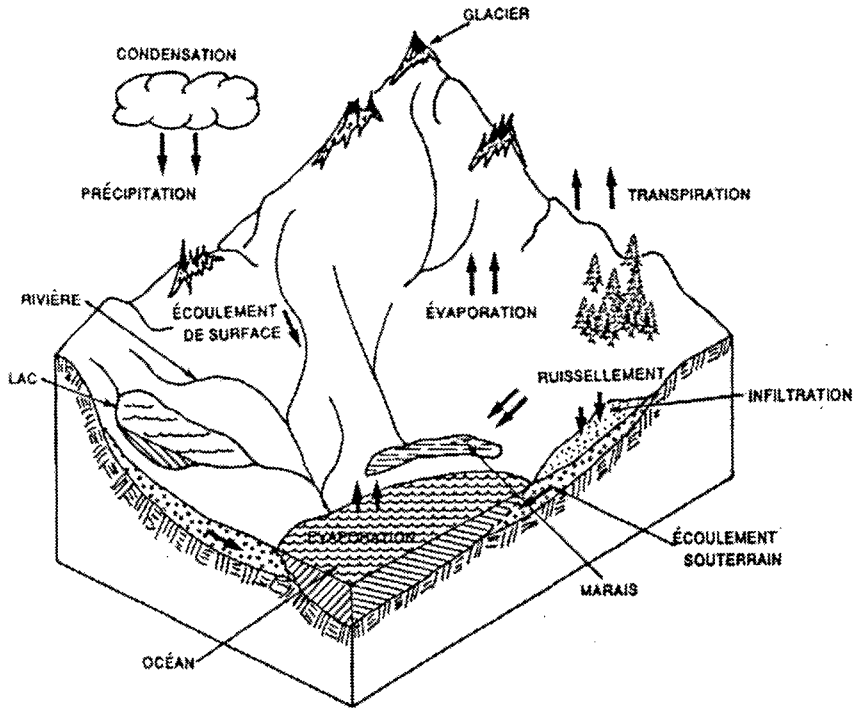


Figure 6.1: Les éléments importants du cycle de l'eau dans le milieu alpin d'après Banton et al. (1997).

La combinaison de ces différentes approches intégrées dans le cadre géologique et hydrogéologique local abordé dans les chapitres précédents nous permettra de présenter une synthèse régionale des écoulements souterrains, de leur vulnérabilité et des processus de recharge typiques dans le cadre alpin de la plaine alluviale de la haute Sarine.

6.2. CARACTÉRISATION DES ÉCOULEMENTS DE SURFACE

La Sarine constitue le principal cours d'eau de la région de haute Sarine et traverse entièrement la plaine alluviale étudiée du sud jusqu'à son extrémité ouest dans la région du Vannel-Dorfrütti. Le réseau hydrographique s'inscrit dans la topographie du bassin versant en occupant les fonds des vallées et les partie imperméables des versants couverts de matériaux morainiques ou constitués de flyschs. Les zones où l'on constate l'absence de réseau hydrographique de surface correspondent aux affleurements des roches karstiques évaporitiques et calcaires présentées dans le cadre géologique régional.

Le régime des écoulements de surface constitue un point important dans la compréhension des régions alpines car la rivière principale constitue une des origines de la recharge de l'aquifère alluvial, mais elle récolte aussi les eaux d'exfiltration de la nappe. Il s'agit donc à la fois d'un émetteur et d'un récepteur en termes hydrauliques.

La Sarine a subi des travaux d'endiguement comme la plupart des cours d'eau alpins (Kissling, 1964; Kissling, 1984) qui ont essentiellement consisté en la mise en place de digues de protection contre les inondations ainsi que l'aménagement des rives du cours de la rivière. D'une manière générale, il ne s'agit pas de grands travaux de bétonnage ou de canalisation. Le tracé du lit actuel n'a pas été en soi l'objet de corrections importantes. Ce n'est pas le cas pour les affluents principaux qui ont subit des travaux d'endiguement parfois plus importants (par ex. le Louibach à travers Gstaad). Tous ces ouvrages n'ont dans l'ensemble pas changé fondamentalement le lit des différents cours d'eau ni les relations hydrauliques avec les eaux souterraines car il s'agit de renforcement des berges à l'aide de blocs, le cours de la rivière étant resté pour l'essentiel identique à son état naturel (fig. 6.2).

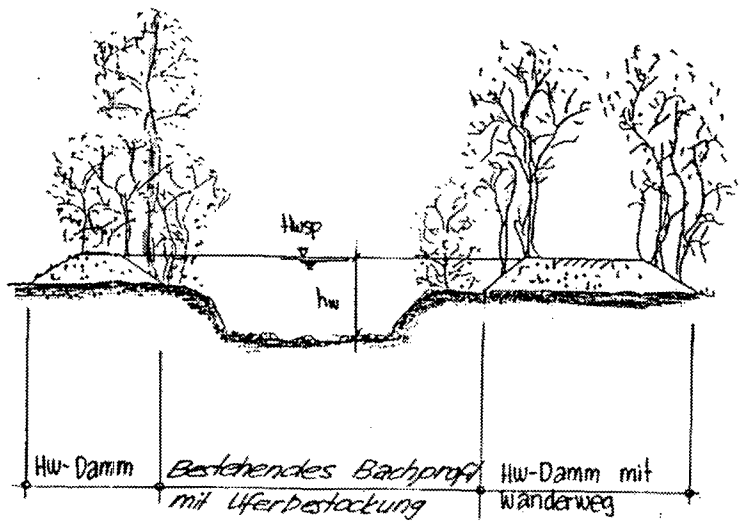


Figure 6.2: Profil type de l'endiguement de la Sarine avec ses digues (Kissling et Zbinden, 1984).

Afin de disposer de données temporelles et spatiales sur différents paramètres utilisés dans cette thèse, nous avons mis sur pied un réseau de mesures recouvrant l'ensemble du domaine. Le tableau 6.1 et la figure 6.3 indiquent les points de mesures choisis pour ce travail ainsi que les stations d'enregistrement permanentes des institutions publiques mises à disposition.

Réseau de mesure des eaux de surface (cours d'eau)					
Code	Lieu	x	y	No OEHE	Paramètres mesurés
S1	Dorfrütti	583970	148320	-	Température, Conductivité et Oxygène-18
S2	Flugplatz	585770	148270	AO12	Température, Conductivité et Oxygène-18
S3	Rütti	587890	146440	-	Température, Conductivité et Oxygène-18
S4	Matte	587950	145450	-	Température, Conductivité et Oxygène-18
S5	Grund	587170	143340	-	Température, Conductivité et Oxygène-18
S6	Feutersoey	587260	140760	-	Température, Conductivité et Oxygène-18
S7	Gsteig Bode	587000	137550	-	Température, Conductivité et Oxygène-18
S8	Innergsteig	587680	136160	-	Température, Conductivité et Oxygène-18
S9	BKW	587850	136130	-	Température, Conductivité et Oxygène-18
T1	Chalberhöni	586440	148460	-	Température, Conductivité et Oxygène-18
T2	Chouflisbach	586980	148490	-	Température, Conductivité et Oxygène-18
T3	Louibach	588060	146730	AO11	Température, Conductivité et Oxygène-18
T4	Stillbach	587550	144300	-	Température, Conductivité et Oxygène-18
T5	Meielsgrund	587090	143860	-	Température, Conductivité et Oxygène-18
T6	Tschärzisbach	586790	140630	-	Température, Conductivité et Oxygène-18
T7	Saalibach	587280	137610	-	Température, Conductivité et Oxygène-18
T8	Reuschbach	587130	137310	AO66	Température, Conductivité et Oxygène-18

Tableau 6.1: Réseau d'observation et de mesure de la Sarine et de ses affluents principaux (resp. S=Sarine et T=Torrents).

Les résultats des mesures effectuées à tous ces point d'observation ainsi que les statistiques générales réalisées sur les limnigraphes de la Sarine et du Louibach (débits classés, etc.) sont reportés dans les annexes VII et VIII où ils sont représentés en parallèle avec d'autres paramètres hydrologiques et climatologiques.

6.2.1. DYNAMIQUE ET RÉGIME D'ÉCOULEMENT

La dynamique et le type de régime d'écoulement des différents éléments du réseau hydrographique de surface (la Sarine et ses affluents) a pu être déterminée essentiellement par l'analyse des données limnigraphiques des stations de mesure. Nous avons déterminé le coefficient de Pardé (Weingartner et Aschwanden, 1989) pour définir le régime d'écoulement des cours d'eau où nous disposions de mesures en continu. Selon l'Atlas Hydrologique de la Suisse (Weingartner et Aschwanden, 1989), la Sarine a un régime nival alpin.

Les données à notre disposition nous ont permis de préciser que le régime hydrologique de la Sarine à Gstaad est plutôt nivo-pluvial avec la présence d'un deuxième pic de débit en automne que l'on observe à l'amont comme à l'aval de la plaine alluviale (fig. 6.4). Les torrents affluents ne sont pas jaugés systématiquement, à l'exception du Louibach, provenant de la vallée de Lauenen. La station de mesure AO11 positionnée sur cet affluent nous a permis de calculer le régime d'écoulement de ce torrent. Il s'agit également d'un régime nivo-pluvial à nivo-glaciaire avec une pointe de débit bien définie au printemps (fig. 6.5).

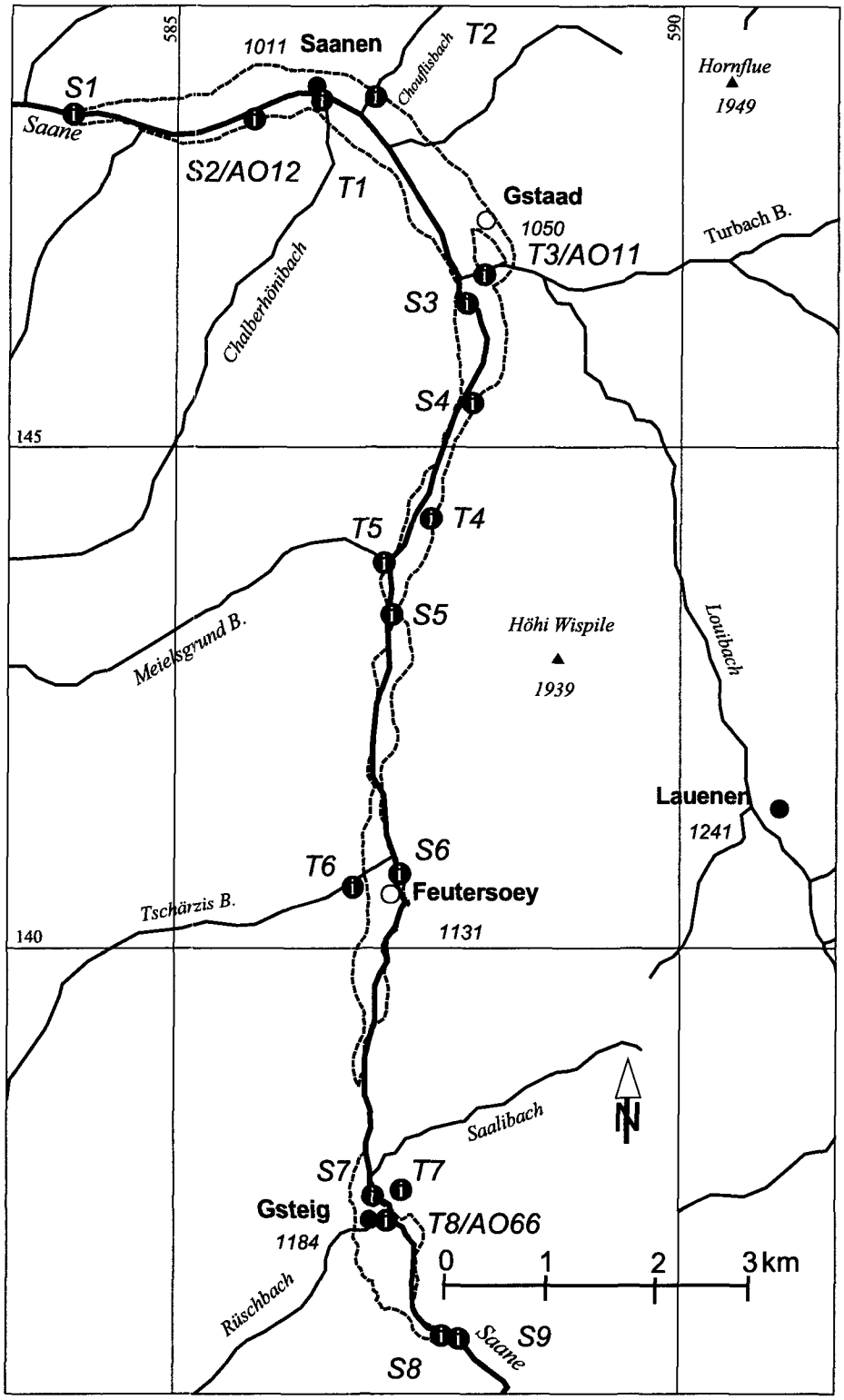


Figure 6.3: Aperçu de la distribution spatiale des points de mesures des paramètres physico-chimiques du réseau d'observation des eaux de surface (les stations sont indiquées par un "i" entouré d'un cercle noir).

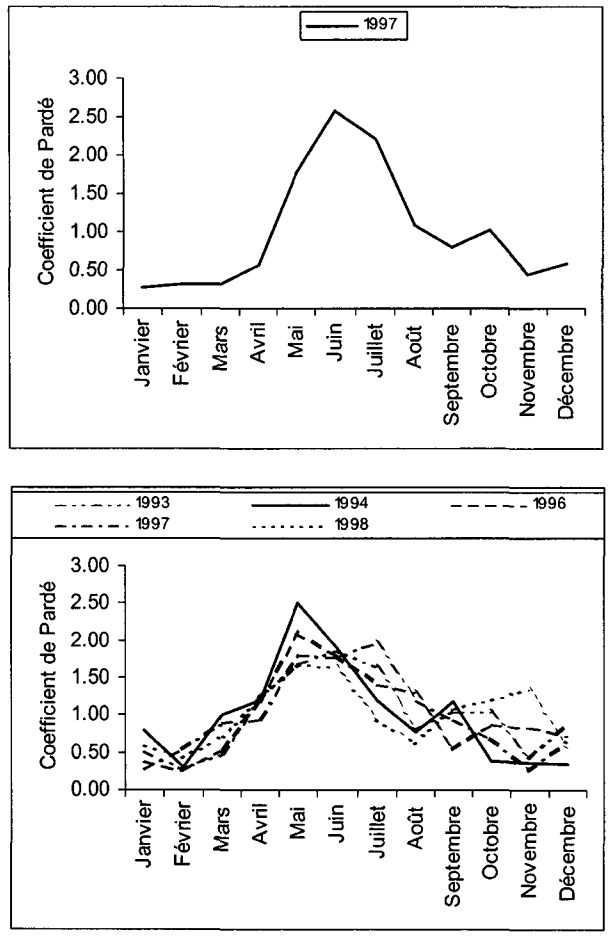


Figure 6.4: Coefficients d'écoulement caractéristiques pour la Sarine à l'amont (représentation du haut) et à l'aval (représentation du bas) de son cours dans la plaine alluviale.

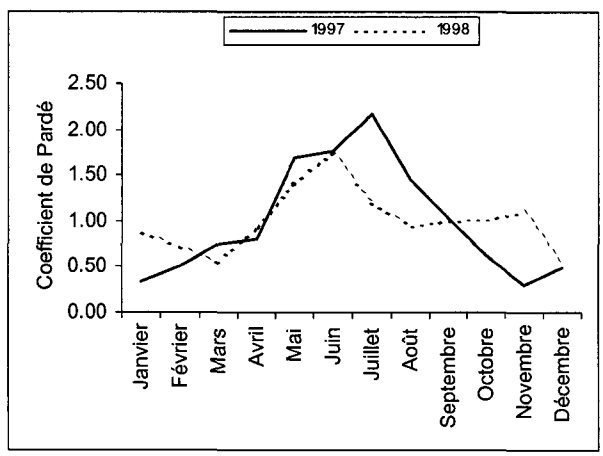


Figure 6.5: Coefficients d'écoulement caractéristiques pour le Louibach à Gstaad.

Périodes de crue

Les données limigraphiques enregistrées durant la période d'étude sur le Louibach et sur la Sarine permettent de mettre en évidence plusieurs phénomènes caractéristiques des rivières alpines. La crue printanière due à la fonte des neige est importante et dure environ 3 à 4 mois. Les autres pics de débits, parfois impressionnants si l'on considère la brièveté du phénomène se distribuent tout au long de l'année avec des événements pluvieux extrêmes en automne. A la suite des événements pluvieux et de la fonte des neige, les débits redescendent rapidement vers des valeurs d'étiage. La nature relativement imperméable des roches qui composent la plus grande partie du bassin versant ainsi que de la couverture morainique à matrice fine liée aux flyschs ne favorisent pas le stockage de l'eau dans le sol et le sous-sol et créent une forte composante de ruisselement. Ainsi, les écoulements sont rapides et ne durent que peu de temps, ce qui explique le retour rapide à un débit faible d'étiage. Nous verrons plus loin que ces circonstances favorisent la recharge de l'aquifère principal, seule unité géologique vraiment perméable présente dans la région. Les enregistrements effectués sur le Louibach montrent les mêmes phénomènes. Dès 1999, un limnigraphe a été installé sur le Reuschbach, second affluent de la Sarine par ordre d'importance. Les données enregistrées montrent également l'ampleur de la crue de printemps et l'influence plus modérée des précipitations automnales (fig. 6.6).

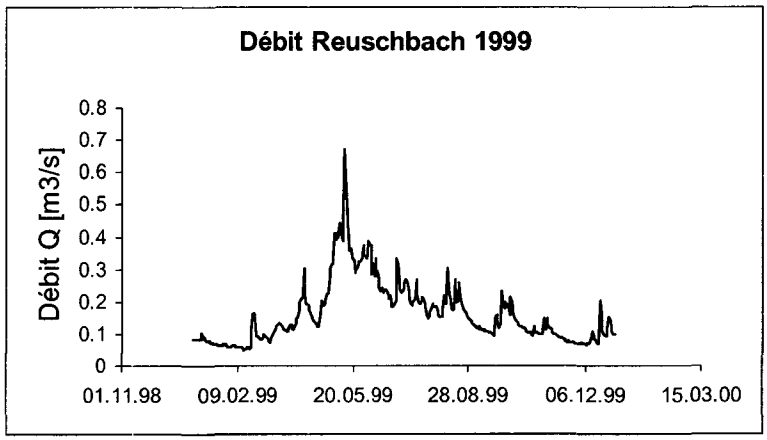


Figure 6.6: Débits instantanés mesurés à la station limnigraphique AO66 de l'OEHE mise en place en 1999.

Périodes d'étiage

Les périodes d'étiage sont relativement synchrones pour tous les cours d'eau et correspondent à des moments de l'année où l'on constate de forts déficits de précipitations. A ce moment, le débit de base est essentiellement assuré par la vidange de la nappe et par les quelques torrents encore actifs. Nous avons procédé à une série de mesure de débits en basses eaux, le 7 octobre 1997, à l'aide de l'instrumentation de jaugeage au sel MADD. Les résultats montrent que le Louibach constitue le principal affluent de la Sarine dont il contribue à 1/3 environ du débit total (tab. 6.2), que la Sarine fournit 1/3 du débit en tête de la plaine alluviale et que les autres torrents forment le 1/3 restant. Ceci démontre qu'en période d'étiage prononcé, la nappe alluviale ne contribue vraisemblablement que de manière modeste au débit de la Sarine.

Cours d'eau	Q [m³/s] le 7/10/97	Type de mesure
Reuschbach	0.35	MADD ponctuelle
Tschärzisbach	0.18	MADD ponctuelle
Meielsgrundbach	0.1	MADD ponctuelle
Turbach	0.23	MADD ponctuelle
Chouflisbach	0.04	MADD ponctuelle
Chalberhönibach	0.1	MADD ponctuelle
Louibach	1.06	Limnigr. continue
Saane b. Gsteig	0.9	Limnigr. continue
Saane b. Saanen	2.94	Limnigr. continue

Tableau 6.2: Débits des principaux affluents de la Sarine en période d'étiage (mesures réalisées avec un appareil de jaugeage au sel de type MADD et sur la base des données limnigraphiques de l'OEHE).

Influence des retenues artificielles (barrages)

Pour la Sarine, la partie restante du débit moyen annuel en tête de la plaine alluviale est supérieure à 80 % du débit avant la construction du barrage du Sanetsch et on constate une augmentation d'environ 20 % du débit en hiver due à l'exploitation hydroélectrique et au rejet de l'eau turbinée (prise dans la retenue artificielle) dans la rivière (Margot et al., 1991). Pour le Tschärzisbach ainsi que pour le Reuschbach (torrents provenant de la région d'Arnon et de Reusch, tous deux barrés par des retenues d'eau artificielles), le débit restitué est de l'ordre de 41 à 60 % (Margot et al., 1991). Le débit d'étiage de la Sarine à l'exutoire du bassin versant (station de mesure de Saanen AO12) a été fixé à 1.4 m3/sec selon la définition de la LEaux en considérant une période d'observation de 10 ans de 1984 à 1993 (Aschwanden et Kan, 1998). La figure 6.7 tirée de Margot et al. (1991) indique la position et le degré d'influence des barrages sur les ours d'eau susmentionnés.

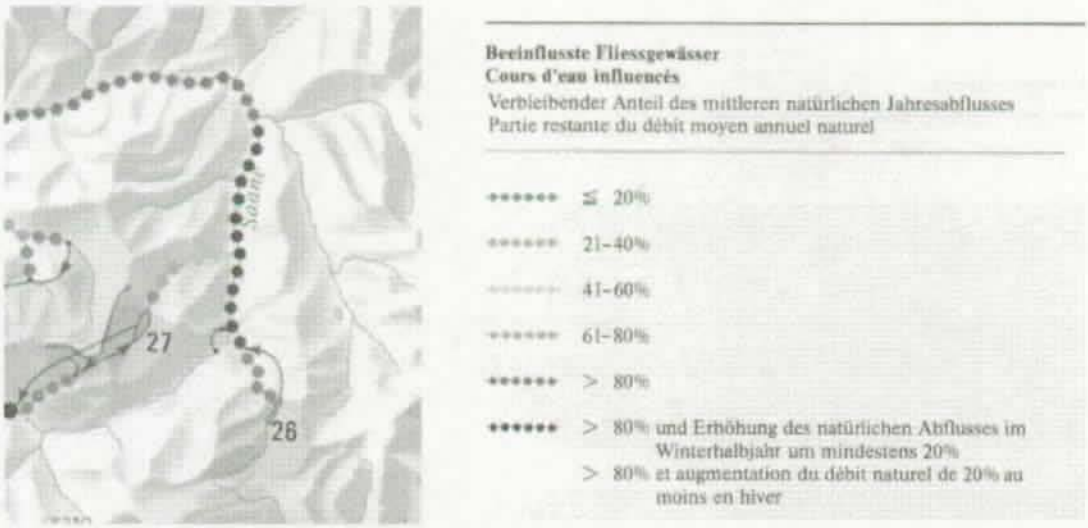


Figure 6.7: Influence des barrages sur les débits naturels des rivières dans la région de la haute Sarine. Le No 26 représente le barrage du Sanetsch, le No 27 celui d'Arnon. Les flèches indiquent le cheminement des eaux turbinées depuis le lac de retenue jusqu'au point de restitution (Margot et al. 1991).

6.2.2. ANALYSE DE LA DÉCRUE PRINCIPALE DE LA SARINE

Afin de déterminer la dynamique des crues et d'en exploiter les informations sur les réserves d'eau écoulables, nous avons procédé à l'analyse des hydrogrammes de crue de trois événements caractéristiques précédant les basses eaux de l'hiver (Annexe IX). Ces trois événements montrent une séquence de décrue avec la présence tout d'abord du ruissellement de surface (pente raide), puis de la composante de l'écoulement hypodermique et enfin, la portion due au débit de base à partir de laquelle nous avons effectué nos calculs d'estimation des réserves d'eau souterraines écoulables en tenant compte de la forte dépendance existant entre l'hydrogramme et l'événement analysé (Szilagyi, 1999; Weingartner, 1990).

Le volume calculé par cette méthode représente l'ensemble des réserves d'eau souterraine écoulable sur la totalité du bassin versant. Il n'est par conséquent pas représentatif directement des réserves présentent dans l'aquifère alluvaile de la vallée principale de la haute Sarine abordé dans cette thèse. La nature peu perméable de la majorité des terrains constituant le bassin versant global de la haute Sarine, exception faite de la petite plaine alluviale de la vallée de Lauenen et de celle encore moins importante de Reusch, nous pouvons considérer les ordres de grandeur des valeurs de volume d'eau soutarraine écoulable comme représentatifs de celles de l'aquifère alluvial principal de la haute Sarine.

Pour effectuer ces calculs de tarissement, nous avons appliqué la formule de Maillet (Banton et al., 1997; Hölting, 1992), tirée de la relation :

$$\ln Q_t = \ln Q_0 - \alpha t$$

Cette équation exprime le résultat d'une loi exponentielle décroissante où Q_t est le débit au temps t, Q_0, le débit au temps t = 0 (sur la courbe de décrue ou celle du tarissement correspondant en principe à l'écoulement des eaux souterraines) et α une constante appelée coefficient de décrue. Nous avons transformé cette équation dans une expression logarithmique en base dix, soit :

$$\log Q_t = \log Q_0 - 0.43\alpha t$$

Cette équation appliquée aux courbes de tarissement définies dans les 3 cas de crues analysées nous ont permis de définir 3 volumes pour les réserves souterraines du bassin pour le début de chaque période d'observation (Banton et al., 1997) en intégrant la fonction de tarissement à l'infini d'après la relation suivante :

$$\int_0^\infty Q_t dt = \int_0^\infty Q_0 e^{-\alpha t} dt = \frac{Q_0}{\alpha}$$

Les résultats obtenus par l'application de cette méthode sont présentés dans le tableau 6.3 ci-après :

Crue	Q_0 [m^3/s]	a	Q_0/a [mio m3]
13.9.97 au 30.9.97	7.07	0.05	12
7.10.97 au 30.11.97	4.25	0.02	18.4
11.12.98 au 31.12.98	5.19	0.03	15

Tableau 6.3: Résultats de l'analyse de 3 crues importantes sur la Sarine et calcul de la réserve d'eau souterraine écoulable selon la méthode de Maillet.

Les réserves d'eau souterraines écoulables ainsi calculées nous ont permis de constater d'une part leur importance et d'autre part le fait que d'une année à l'autre, celle-ci se renouvellent puisqu'en l'espace d'environ 12 mois, on obtient le même volume de réserve écoulables à la même période de l'année. L'analyse du volume d'eau écoulable obtenue suite à la crue du 13.9.1997 au 30.9.1997 permet raisonnablement d'appréhender la situation des réserves écoulables à la fin d'un cycle prononcé d'étiage saisonnier. On ne peut que difficilement tirer plus de renseignements quantitatifs des courbes de décrues analysées. Une observation importante consiste dans l'apparente stabilité des réserves à disposition d'une année à l'autre et dans la constance du facteur α qui est lié aux caractéristiques hydrogéologiques du réservoir fournissant le débit de base (Weyer, 1972). Des valeurs comprises entre 0.1 et 0.01 indiquent une ressource "nerveuse" (Weyer, 1972) dont nous interprétons la nature du réservoir d'origine comme fortement perméable, ce qui correspond bien à l'aquifère alluvial. Nous pouvons ainsi confirmer que la nappe est responsable d'une partie du baseflow. Pour confirmer cet état de fait, il serait nécessaire de répéter le calcul sur des séries temporelles plus longues. Cela ne faisait pas partie des buts fixés pour ce travail. Nous estimons également que le baseflow est constitué pour une partie non-négligeable par l'alimentation des torrents situés tout au sud de la Sarine. En effet, l'augmentation importante de la conductivité électrique de l'eau de la Sarine en période de basses eaux dépasse souvent les valeurs de conductivités de l'eau de la nappe elle-même. En janvier 1998 par exemple, les eaux de la nappe oscillaient entre 450 et 500 µS/cm alors que celles de la Sarine variaient entre 550 et 600 µS/cm.

Parallèlement aux crues naturelles de grande ampleur, nous avons relevé des phénomènes plus modestes, mais dont la spécificité mérite d'être rappelée dans cette thèse. Il s'agit d'une part des petite crues quotidiennes qui reflètent le turbinage des eaux du barrage du Sanetsch qui sont rejetées dans la Sarine à l'entrée du bassin de Gsteig, et dont les enregistrements limnigraphiques gardent une trace particulière sous la forme d'une augmentation subite du débit, uniforme durant plusieurs heures, dont la fin est tout aussi abrupte (fig. 6.8). Sur cette même figure, on constate l'existence d'une lame de fusions nivale et glaciaire quotidienne (Martinec, 1976) encore présente tard dans l'année, mais dont l'ampleur n'atteint plus celle générale du printemps.

Entre autres auteurs, Singh et al. (2000), Fountain (1998) et Richards et al. (1998) ont montré par l'analyse détaillée des petites récessions quotidiennes de débits dûs à la fonte des neige dans le milieu alpin que la ressource temporaire représentée par les masses neigeuses se caractérise en général par une très grande variabilité interannuelle. De plus, la récession est plus lente lorsque le bassin contient encore une grande quantité d'eau sous forme de neige et s'accentue lorsque ce volume diminue (fig. 6.9). Ceci montre bien l'aspect variable et aléatoire de ce type de recharge dans le bilan hydrique d'un bassin versant alpin.

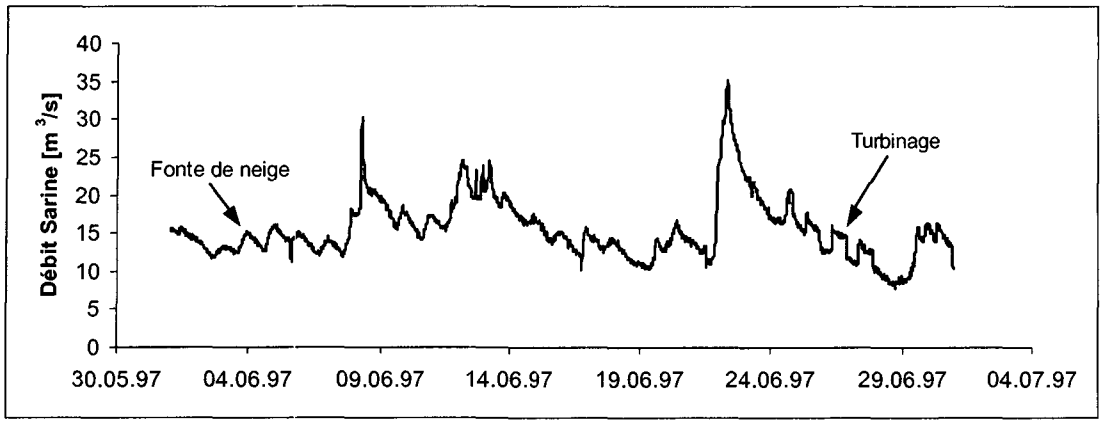


Figure 6.8: Extrait de l'enregistrement du limnigraphe AO12 durant le mois de juin 1997.

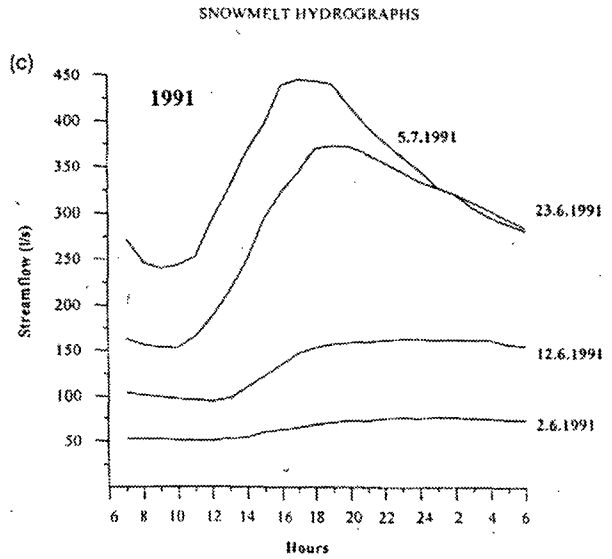


Figure 6.9: Hydrogrammes de fonte de neige dans les Alpes autrichiennes sur le torrent du Glatzbach à 2450 msm (*Singh et al, 2000*).

En appliquant leurs conclusions, on constate en comparant la forme des petites récessions (par ex. le 4.6.97) de la figure 6.8 à celles de la figure 6.9 qu'au mois de juin 1997, les réserves disponibles occasionnées par les masses de neiges accumulées en altitude sont vraisemblablement proches de l'épuisement pour l'année considérée. Il existe par ailleurs des tentatives de classements des courbes de décrue (ou récession), dont certaines mettent en relation les différents types avec leur implication climatologique comme par exemple les phases d'ablation importantes des glaciers (Hannah et al., 2000). Plusieurs travaux mettent par ailleurs en évidence l'importance relative de la fonte des neiges et de celle des glaciers dans le bilan hydrologique régional des bassins versants alpins que nous reconnaissons bien sur nos enregistrements limnigraphiques (Chen et Ohmura, 1990).

6.2.3. PRÉSENTATION DES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DE LA SARINE ET DE SES AFFLUENTS

Les paramètres physico-chimiques des eaux de surface ont été considérés dans cette étude dans le but de les comparer avec ceux des eaux souterraines afin de déterminer de manière régionale les interactions possibles entre ces divers éléments. Nous n'avions pas comme objectif premier la description de la qualité des eaux de surfaces. Par conséquent, c'est un nombre restreint de mesures qui a été effectué, mais qui dans l'optique de l'appréhension régionale des ressources en eaux souterraines a répondu à nos besoins et à nos objectifs.

Pour la sarine, parallèlement à la station de mesure de Saanen où des échantillons pour l'analyse de la qualité chimique de l'eau ont été prélevés en 1994 (fig. 6.10), nous avons mesuré la température et la conductivité de l'eau à plusieurs emplacements de notre réseau d'observation mentionné plus haut et dont les résultats sont présentés dans l'annexe VII.

Chemisch bakteriologische Resultate
Fliessgewässer
Résultats bactério-chimiques
cours d'eau

Saane
Gstaad

SA03

Koordinaten 587.929/146.425 Höhe 1040 m ü.M. BUWAL Nummer 1911

1994	12.01.94	10.02.94	7.03.94	5.04.94	4.05.94	9.06.94	11.07.94	1.08.94	14.09.94	13.10.94	14.11.94	13.12.94
Zeit	11.45	12.10	14.40	14.25	14.10	12.30	11.30		11.45	13.55	11.20	13.20
Temperatur	2.5	1.8	6.0	3.8	6.1	6.4	9.6		8.7	9.4	4.4	2.6
pH	8.32	8.68	8.76	8.40	6.27	8.30	7.88		7.80	8.44	8.61	8.22
Sauerstoffgehalt mg O_2/l	12.0	12.5	11.8	11.6	10.9	10.4	9.4		12.0	10.2	11.9	12.5
Sauerstoffsättigung %	100	102	108	100	100	96	94		117	102	104	101
DOC mg C/l	1.3	0.6	1.1	1.0	0.9	1.0	<0.5		0.7	<0.5	2.0	<0.5
Ammonium mg NH_4-N/l	0.130	0.060	0.028	0.017	0.046	0.034	0.039		0.043	0.034	0.230	0.036
Nitrit mg NO_2-N/l	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002		<0.002	<0.002	0.007	<0.002
Nitrat mg NO_3-N/l	0.46	0.28	0.30	0.27	0.31	0.22	<0.20		<0.20	<0.20	0.46	0.26
Gesamt-Stickstoff mg N/l	0.76	0.62	0.50	0.33	1.02	0.34	0.30		0.29	0.24	1.10	0.36
Phosphat mg PO_4-P/l	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005		<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Gesamt-Phosphor mg P/l	0.006	0.016	0.007	0.020	0.009	0.026	<0.005		<0.005	<0.005	0.029	0.011
Silikat mg SiO_2/l	3.6		3.2		2.1		1.8				3.1	
Sulfat mg SO_4/l	168		147	88	77		61				161	
Chlorid mg Cl/l	2.2	1.0	1.8	1.2	0.6	0.8	0.6				2.5	0.7
Gesamthärte mVal/l	7.00		6.19		4.14		3.14		3.83		6.59	
Karbonathärte mVal/l	3.63		3.26		2.46		1.95		2.59		3.40	
Kalium mg K/l	1.0		1.0		0.5				0.5		1.3	
Natrium mg Na/l	2.3		2.3		1.1				1.2		3.2	
Leitfähigkeit µS/cm	601	476	592	439	406	290	317		358	385	647	395
E.coli (MUG)/1000 in 100ml	0.440	1.100	0.600	0.450	0.140	0.050	0.380		0.800	0.300	0.170	0.040

Figure 6.10: Extrait de l'annuaire hydrographique du canton de Berne (OEHE, 1994a).

En ce qui concerne les paramètres physico-chimiques des affluents de la Sarine, c'est essentiellement la mesure régulière de la conductivité électrique de ces derniers qui nous a permis d'en appréhender les apports au niveau des sels minéraux dissous dans la Sarine. Ils ne contribuent par contre que très modestement à la recharge de l'aquifère principale, exception faite du Louibach pour la région de Gstaad. La figure 6.11 nous présente une synthèse des variations temporelles et spatiales des valeurs de conductivité mesurées sur les torrents incorporés dans notre réseau d'observation.

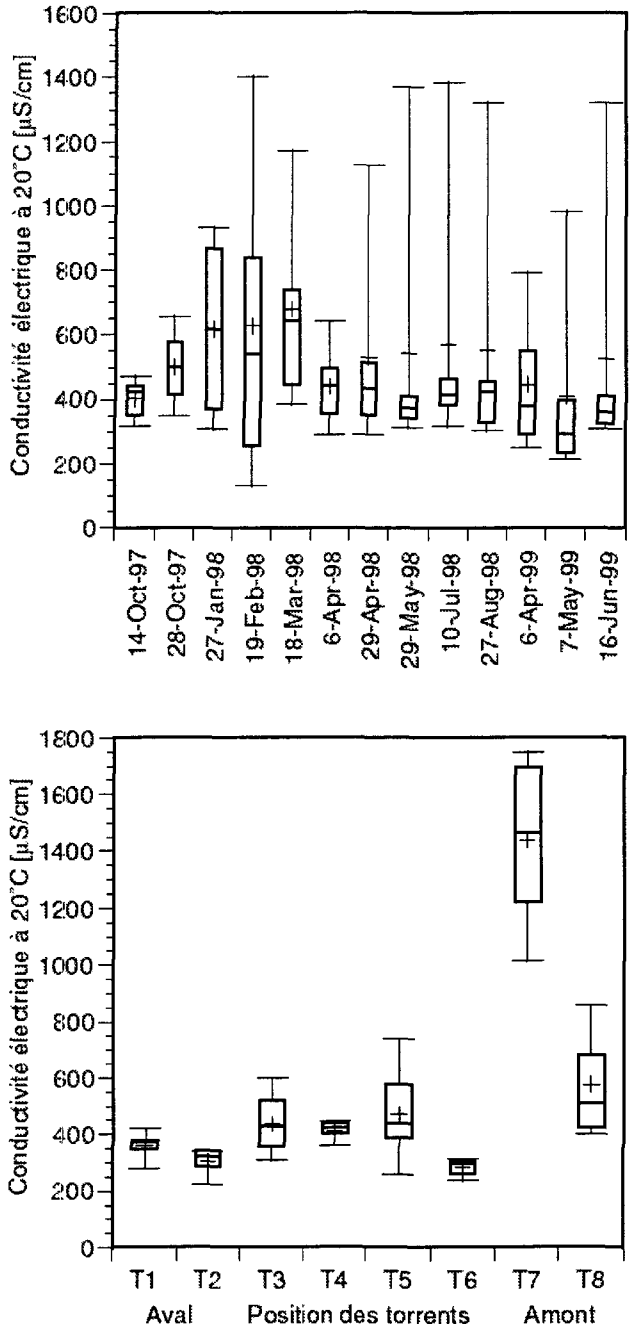


Figure 6.11: Variations temporelles et spatiales de la conductivité électrique des affluents principaux de la Sarine durant la période d'observation. La figure du haut représente l'évolution dans le temps de la variation spatiale de la conductivité électrique de l'ensemble des points de mesures. Celle du bas montre l'évolution d'amont en aval des variations temporelles de la conductivité électrique. Les différents point d'échantillonnage sont représentés sur la figure 6.3.

La présence de sulfates en grandes quantités dans la Sarine à Saanen (jusqu'à 168 mg/l le 12.1.1994) s'explique essentiellement par l'existence de roches évaportitiques dans le bassin versant. Dans l'annexe VII, on peut constater que le Saalibach (T7) provenant de la Zone des Cols a en permanence une conductivité électrique élevée qui indique qu'il transporte beaucoup de sulfates. Le Reuschbach (T8) en contient également beaucoup.

Ces deux torrents contribuent au débit de la Sarine dès son entrée dans la plaine alluviale, de sorte qu'il a été difficile par exemple de déterminer avec précision les zones et les périodes d'échange entre la rivière et la nappe.

La Sarine (fig. 6.12) contient donc en permanence beaucoup de sulfate et la dureté de son eau est également élevée. Le débit de base est ainsi composé en grande partie par l'alimentation des aquifères karstiques évaporitiques de la Zones des Cols. Nous pouvons relever encore les concentrations extrêmement faibles en nitrates.

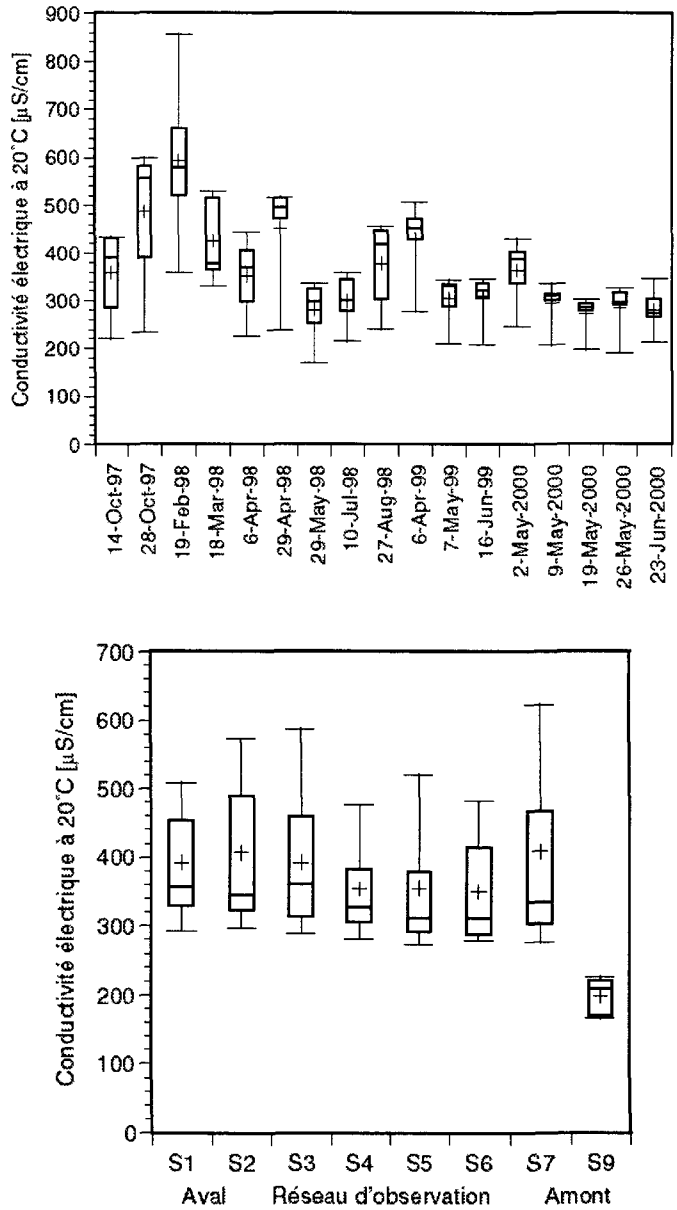


Figure 6.12: Variations temporelles et spatiales de la conductivité électrique de la Sarine durant la période d'observation. La figure du haut représente l'évolution dans le temps de la variation spatiale de la conductivité électrique de l'ensemble des points de mesures le long de la Sarine. Celle du bas montre l'évolution d'amont en aval des variations temporelles de la conductivité électrique. Les différents point d'échantillonnage sont représentés sur la figure 6.3. On constate que le point de mesure S9 se situe nettement en-dessous de tous les autres. Ceci s'explique par le fait qu'il se situe à l'amont de la confluence de la Sarine avec T7 et T8 qui apportent une quantité importante de sulfates depuis leur bassin versant qui n'est autre que la Zone des Cols (Ultrahevétique avec évaporites).

On constate deux types de variations de la composition chimique (mesurée par le biais de la conductivité électrique) des eaux de surface. La première variation est temporelle et dépend des variations saisonnières de débit. La variation des valeurs de conductivités est de l'ordre de 300 µs/cm sur la période d'observation considérée. La seconde variation est d'ordre géographique.

Les mesures effectuées à l'entrée du bassin de la Sarine, avant que celle-ci ne subisse l'apport des torrents du Reuschbach et du Saalibach, tous deux fortement chargés en sulfates provenant de leur bassin versant de la Zone des Cols, composés en grande partie de roches évaporitique du Trias (Gypse) sont basses. Après l'affluence, elles sont élevées. Les variations de conductivité sur le reste du cours de la Sarine sont essentiellement dues aux apports des affluents principaux. La relative augmentation de la conductivité dans le secteur S6 à S5 peut être attribuée à une exfiltration des eaux souterraines dans la partie aval du cône de Feutersoey. Nous avons décrit plus haut dans cette zone une source située au pied du versant gauche de la vallée qui contenait beaucoup de sulfates et dont l'origine pourrait être du Trias des unités ultrahelvétiques sous-jacentes. Il peut s'agir par ailleurs tout simplement d'un enrichissement de la minéralisation dû au séjour prolongé dans la partie alluviale aquifère qui contient un nombre important de sédiments provenant des zones triasiques du bassin versant.

L'augmentation plus nette de la conductivité entre les zones S4 et S2 nous paraît quand à elle devoir trouver son origine d'une part dans des phénomènes d'exfiltration et d'autre part dans l'arrivée du Louibach, en partie chargé de sulfates provenant de son affluent le Turbach qui contient des roches évaporitiques dans son bassin versant (Zone Submédiane).

6.3. ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS

Nous avons vu comment le réseau hydrographique de surface réagit aux variations des facteurs climatiques régionaux dans le contexte du bassin versant de la haute Sarine. Nous avons également vu comment ces écoulements étaient en premier lieu contrôlés par les phénomènes météorologiques de fonte des neiges et de précipitations. L'analyse des écoulements souterrains nécéssite un degré d'intégration supplémentaire, c'est-à-dire l'appréhension des échanges entre le réseau hydrographique de surface ainsi que les apports aux interfaces souterraines, généralement invisibles lors des investigations géologiques classiques de surface (fig. 6.13).

Afin de déterminer les différents apports en eau dans la nappe alluviale de la haute Sarine et de définir leur spécificité, nous avons utilisé deux approches classiques : l'analyse des données piézométriques (enregistrements des variations du niveau de la nappe) ainsi que la caractérisation de la composition chimique des eaux souterraines. Nous aborderons aussi les aspects qualitatifs de la ressource au sens de la loi suisse (LEaux, OEaux).

6.3.1. VARIATIONS PIÉZOMÉTRIQUES ET RÉGIME D'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN

Afin de déterminer les variations du niveau de la nappe contenue dans l'aquifère alluvial de la haute Sarine décrit dans le chapitre précédent, nous disposions d'un réseau de stations de mesures réparti sur toute la zone d'étude. L'emplacement des point d'observations n'a par contre pas pu être décidé en fonction des cibles hydrogéologiques ou des zones particulières définies par l'étude géologique.

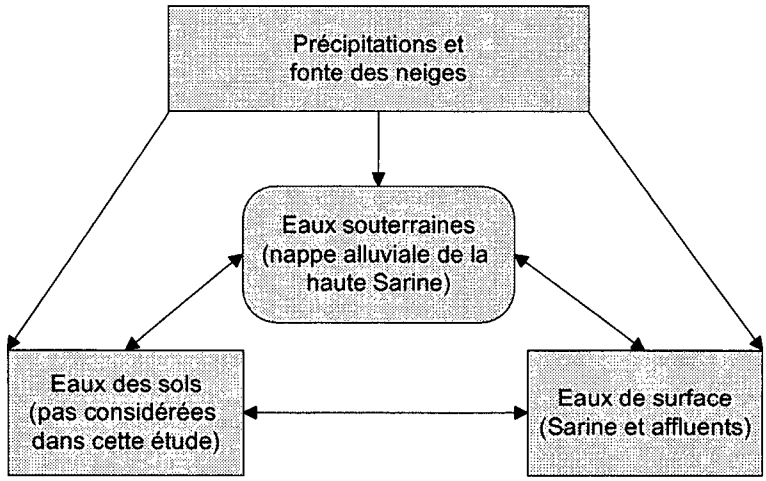


Figure 6.13: Relations entre les différents types de réseaux d'écoulement en milieu alpin. Les fèèches indiquent les possibilités d'alimentation entre les systèmes.

En effet, comme nous l'avons vu, les forages de reconnaissance n'ont été réalisés qu'à la fin de l'étude et n'ont par conséquent pas pu être intégrés dans notre réseau de mesure dans des délais opportuns. Les stations ont donc été installées là où nous disposions de points d'observations déjà existants. Le tableau 6.4 et la figure 6.14 et l'annexe VI nous indiquent la nature et l'emplacement de ces points.

Code	Lieu	x	y	No OEHE	Piézo. No
FB3	Chäppeli	586823	148328	3	Com. Saanen
FB13	Umf. Ost	587870	146860	13	993
FB14	Umf. West	587860	146820	14	GO15/997
KB1	ARA1	584050	148280	8	990
KB3	ARA3	584050	148240	7	991
SB1	Fallersmatte	585400	148530	20	GO13/995
SB5	Matte	587860	145510	8	992
SB6	Moosfang	587960	145380	9	GO16/998
SB11	Grund	587150	143310	5	GO14/996
SB12	Gsteig Bode	586880	137530	5	994

Tableau 6.4: Réseau d'observation de la nappe alluviale de la haute Sarine : KB = Sondage mécanique équipé d'un tube piézométrique, FB = Puits filtrant vertical équipé d'un tube piézométrique, SB = Puits artisanal ou PAC. La station SB12, OEHE No 994 a été démontée au cours de l'étude pour des raisons techniques.

Une partie des stations était équipée de limnigraphes à tambour classiques. Quatre points d'observations purent bénéficier d'un appareillage de mesure plus moderne de type Datalogger mesurant simultanément le niveau piézométrique de la nappe ainsi que la température de l'eau (Luder, 1996). L'analyse des enregistrements piézométriques nous a permis d'appréhender la dynamique des eaux souterraines dans l'aquifère alluvial considéré. Nous avons choisi une manière classique d'aborder les enregistrements limnigraphiques qui consiste essentiellement en une comparaison directe des hydrogrammes entre eux afin d'en déterminer les variations synchrones et leurs amplitudes respectives.

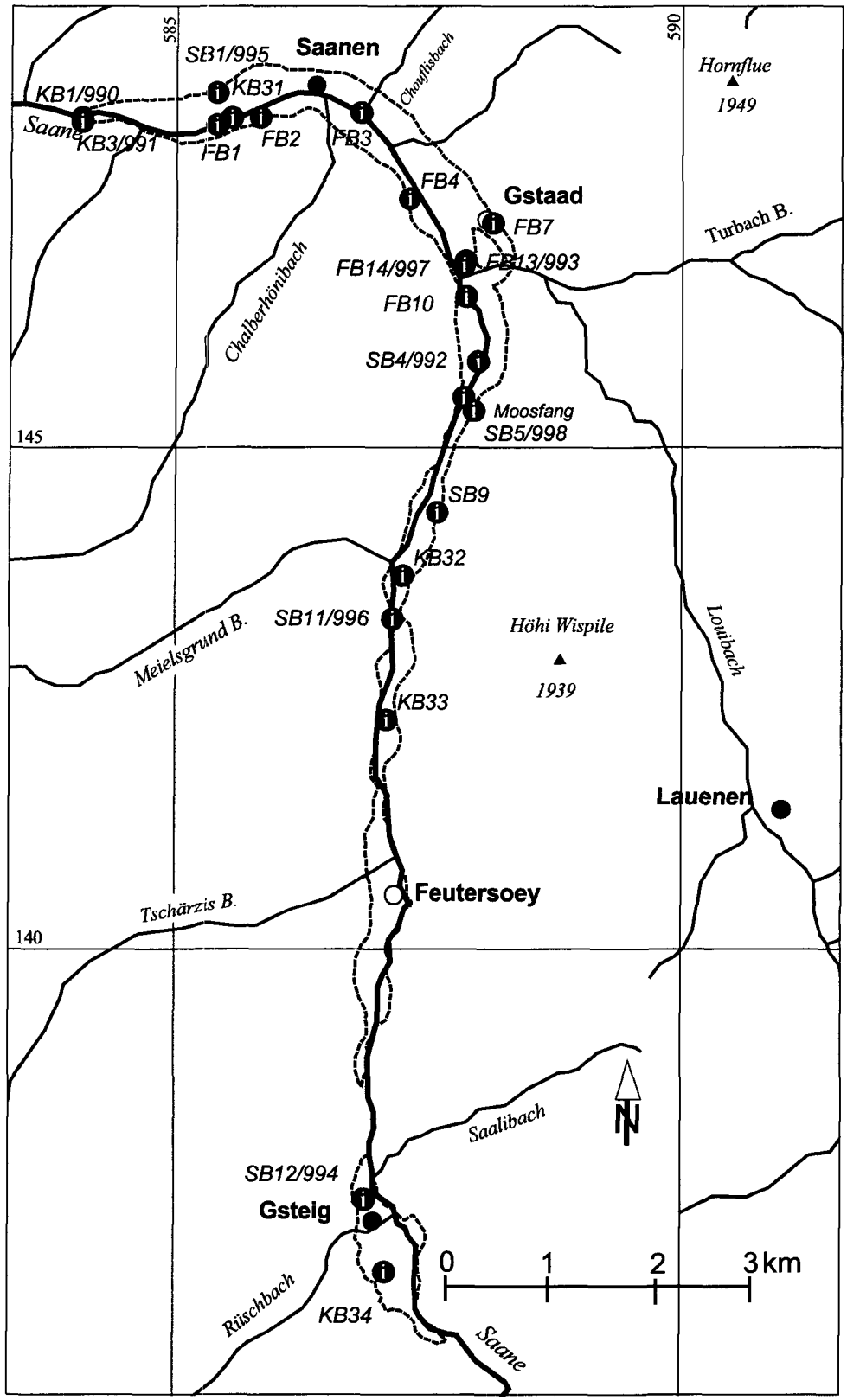


Figure 6.14: Réseau d'observation de la nappe alluviale de la haute Sarine utilisé dans le cadre de cette thèse. Les codes indiqués se réfèrent aux stations équipées d'un limnigraphe de l'OEHE.

Nous avons observé des variations de plusieurs types que nous avons assimilées à différents phénomènes de recharge ou d'étiage de la nappe. Le tableau 6.5 nous présente une compilation des principales variations observées durant l'année 1998 représentative de la période d'étude.

Code	z_t	z_n [msm]			A	e	h_S	x_S
	[msm]	Max.	Min.	Moyenne	[m]	[m]	[msm]	[m]
KB1	990.66	989.08	988.29	988.49	0.8	2.17	987.1	40
KB3	990.69	989.31	988.64	988.64	0.67	2.05	987.1	60
SB1	1002.46	999.96	999.37	999.48	0.59	2.98	1000.4	400
FB3	1015.5	1014.77	1013.8	1014.1	0.97	1.4	1010	40
FB13	1037.79	1033.64	1032.15	1032.73	1.49	5.06	1032.45	190
FB14	1037.77	1033.79	1032.43	1032.93	1.36	4.84	1032.45	145
SB5	1048.81	1047.64	1046.52	1046.91	1.12	1.9	env. 1048	110
SB6	1051.55	1050.53	1048.68	1049.28	1.84	2.27	env. 1048	40
SB11	1076.48	1075.69	1071.67	1073.18	4.02	3.6	env. 1076	5

Tableau 6.5: Synthèse des données piézométriques de l'aquifère alluvial de la haute Sarine pour l'année 1998. On peut y lire les paramètres suivants : z_t=cote du terrain au point d'observation, z_n=cote de la nappe, A=amplitude des variations : Max-Min, e=épaisseur moyenne de la zone non saturée, h_S=cote de la Sarine à la hauteur du point d'observation et x_S=distance à la Sarine en ce point.

On constate l'existence de similitudes et de différences entre les points de mesure. La similitude principale consiste dans l'extrême rapidité avec laquelle la nappe réagit aux augmentations de débits de la Sarine, que ce soit suite à un événement pluvieux ou à des phénomènes saisonniers comme la fonte des neiges au printemps. L'analyse détaillée d'un événement que nous avons déjà considéré plus haut nous montre combien la recharge est rapide et pour ainsi dire synchrone avec l'augmentation du débit de la Sarine et l'apparition des précipitations (fig. 6.15).

Le temps de réaction de l'aquifère est de moins de 24 heures. Ce scénario se répète à chaque événement. Dans l'annexe X sont présentées les relations entre l'augmentation du débit dans la Sarine et les augmentations du niveau de la nappe. Globalement ces phénomènes montrent une corrélation positive et l'ampleur des variations entre les hautes et les basses eaux de la nappe est plus modeste pour des raisons hydrauliques à l'aval, proche de l'exutoire de la nappe, qu'à l'amont (Castany, 1967). Un autre type de variations de la nappe est défini par la distance entre le point d'observation et la rivière. En principe, les point d'observations éloignés de la rivière en ressentent moins les variations qui ont tendance à s'estomper (le gradient entre la nappe et la rivière est plus élevé dans les environs immédiats de celle-ci). Les variations les plus faibles ont été enregistrées au point d'observation SB1/995, situé à 400 m de la rivière dont il est par dessus le marché séparé par l'important système de drainages de l'aérodrome de Saanen qui va tamponner voir même annuler une partie des variations piézométriques.

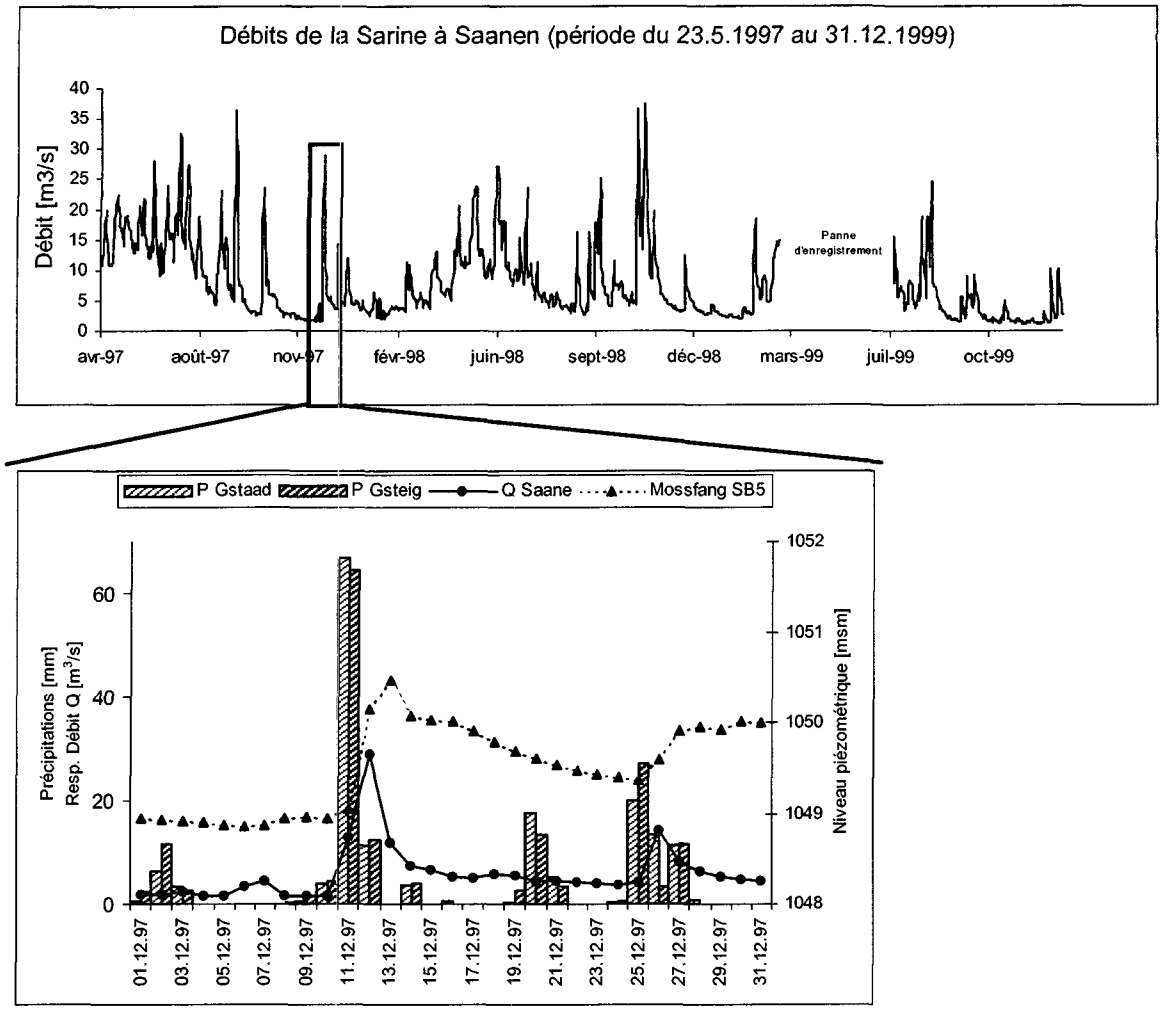


Figure 6.15: Exemple de la synchronicité quasi parfaite entre la crue de la Sarine et la crue dans la nappe alluviale pour l'événement du 10.12.1997 au 13.12.1997.

6.3.2. CALCUL DES BILANS DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS

Afin d'élaborer une synthèse régionale sur la ressource en eau souterraine représentée par l'aquifère de la haute Sarine, nous avons choisi d'adopter une méthode utilisée de manière standard dans les rapports de l'OEHE depuis plusieurs décennies, une approche par comparaison de bilans de flux au travers de profils choisis (fig. 6.16). Le calcul des bilans s'est effectués sur la base de la formule suivante (Blau et al., 1984; Fürst et al., 1990; OEHE, 1983) :

$$Q = iKF$$

Dans cette expression qui n'est autre que la loi de Darcy, i est le gradient de la nappe en %, K la perméabilité en m/s et F la surface saturée en eau traversée en m^2. Les données utilisées sont présentées dans le tableau 6.6.

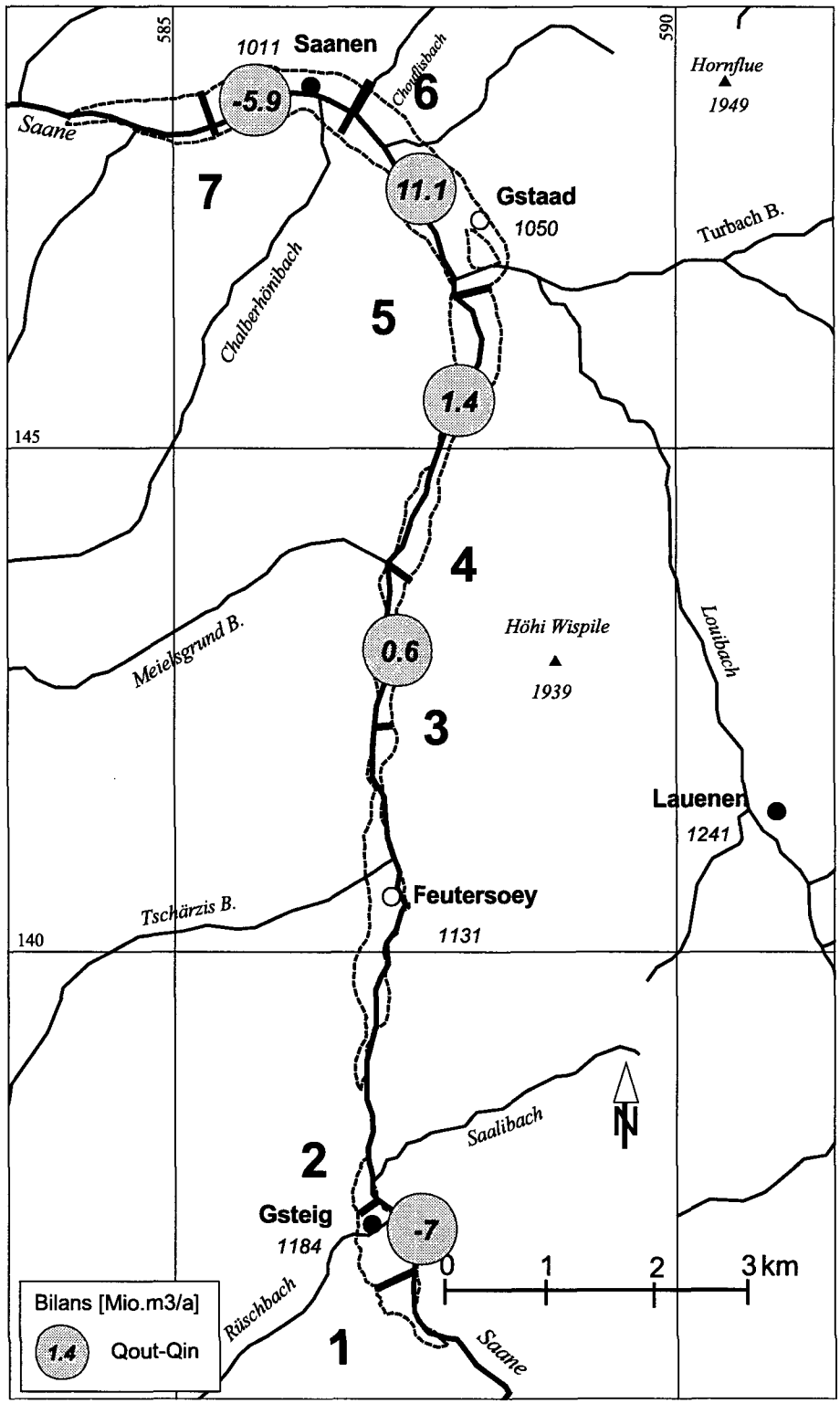


Figure 6.16: Situation et numéros des profils de bilan du flux de la nappe. Le calcul du bilan est également représenté entre le profil amont et le profil aval (Qout-Qin) pour le cas de base du tab. 6.6.

Profil	No	Gradient i [%]	Perméabilité K [x10^{-3}m/s]	Surface F [m^2]	Flux Q [l/s]	Flux Q [Mio.m^3/a]	Différence [Mio.m^3/a]
Bassin de Gsteig							
Innergsteig	1	2.8	1.6	6'750	302	9.5	
Gsteig Bode	2	5	1.6	1'000	80	2.5	-7
Grund-Saanen							
Grund Süd	3	6.6	1.3	1'000	85	2.7	
Grund Post	4	2.8	3.7	1'000	103	3.3	0.6
Hallenbad	5	2.5	1	6'000	150	4.7	1.4
Chäppeli	6	2	2.5	10'000	500	15.8	11.1
Flugplatz	7	1.5	2.8	7'500	315	9.9	-5.9

Tableau 6.6: Profils de bilans hydrauliques d'après l'étude GEOLEP (OEHE, 1999a).

Ces données peuvent être sujettes à caution. En effet, les incertitudes des divers paramètres utilisés peuvent être importantes étant donné que le milieu naturel considéré est fortement hétérogène et anisotrope. Nous en avons tenu compte en calculant plusieurs fois les bilans en changeant les valeurs des paramètres (fig. 6.17).

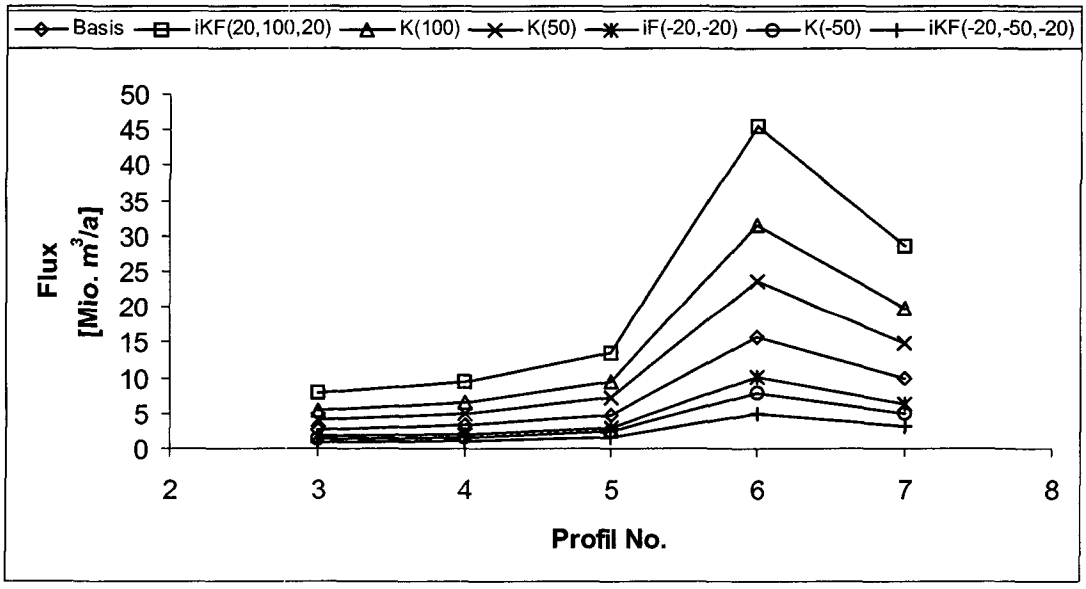


Figure 6.17: Comparaison des différents scénarios de calcul des bilans d'après l'étude GEOLEP (OEHE, 1999a). Les paramètres i, K et F sont présentés dans le tab. 6.6 avec les valeurs utilisées pour le cas de base (Basis). Les variations respectives sont données en pourcent du cas de base entre parenthèses.

Ces approches globales nous ont permis d'estimer les grandeurs de l'infiltration et de l'exfiltration ainsi que celles probables des apports des aquifères karstiques de la Zone Submédiane. Nous avons obtenu une valeur d'infiltration de l'ordre de 40 l/s et une valeur d'exfiltration d'environ 215 l/s (OEHE, 1999a).

Ces ordres de grandeurs correspondent avec les différentes mesures effectuées de manières directes ou indirectes (comme ce fut le cas dans notre thèse) lors des nombreuses investigations hydrogéologiques effectuées dans le cadre des rapports sur l'aménagement des eaux du canton de Berne ou dans d'autres prospections d'eau souterraine en milieu alpin (Nicoud et Maillet-Guy, 1990; OEHE, 1983; OEHE, 1989; OEHE, 1994b; OEHE, 1999).

6.3.3. QUALITÉS DES EAUX SOUTERRAINES

L'analyse des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines nous fourni des indications indirectes sur les relations entre les eaux souterraines et ses différents types d'alimentations. Les analyses ont été faites sur la base du réseau d'observation de la nappe présenté plus haut élargi à un plus grand nombre de points où nous avons analysé plusieurs types de paramètres qui permettent d'appréhender le milieu des eaux souterraines du point de vue qualitatif et dans une certaine mesure quantitatif. Le but de ces analyses et mesures était de donner une image de la répartition géographique de la chimie et de la qualité des eaux souterraines de l'aquifère de la haute Sarine ainsi que d'identifier l'origine des différentes composantes (météorique, souterraine, eaux de surface). Les paramètres analysés sont présentés dans l'annexe VI.

Parallèlement aux analyses in situ, nous avons utilisé les ressources du laboratoire de chimie du GEOLEP pour les éléments en traces, le laboratoire d'analyse des eaux et du sol du canton de Berne (Gewässer- und Bodenschutzlabor) pour les cations et les anions majeurs, le laboratoire d'analyse des isotopes stables de l'institut de géologie de l'ETHZ et un laboratoire privé pour l'analyse de la bactériologie (Labor Meyer AG, Berne).

6.3.3.1. PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES

Ces paramètres mesurés in situ permettent de repérer rapidement des conditions particulières dans les eaux souterraines comme les conditions redox du milieu ou la teneur en minéraux dissous mentionnés dans nombre d'ouvrages spécialisés sur la chimie des milieux phréatiques (Hölting, 1992; Mattess, 1994; Sigg et al., 1992; Stumm et Morgan, 1996). Les mesures effectuées sur le réseau d'observation de la nappe alluviale de la haute Sarine sont de type discrètes pour la plus grande partie de ces paramètres, à l'exception des quatre stations limnigraphiques équipées d'un appareil digital, un logger, qui a enregistré des mesures en continu de la température de l'eau (stations SB1, FB14, SB6 et SB11).

La nappe alluviale

Les résultats des mesures de la conductivité électriques présentés dans l'annexeV ont d'emblée mis en évidence la forte minéralisation des eaux souterraines. Le tableau 6.7 et la figure 6.18 nous montrent une statistique des mesures effectuées au cours des années 1997 à 1999 :

Certains points d'observations se situent dans des zones à forte teneur en sels minéraux des eaux de la nappe, alors que d'autres présentent des valeurs de conductivité électriques plus proches des grandeurs généralement observées dans les nappes alluviales alpines carbonatées sans évaporites dans leur bassin versant correspondant généralement à des minéralisations totale de l'ordre de 500 mg/l (Dematteis et al., 1996; Hartmann, 1998). Nous avons donc pu mettre en évidence l'existence d'eau fortement minéralisée dans l'aquifère quaternaire de la haute Sarine. Nous reviendrons plus loin sur cet aspects particulier. Les autre paramètres n'ont en revanche pas révélé d'autres conditions particulières sur la qualité des eaux souterraines. La figure 6.19 présente une compilation de ces données.

Données	FB1	FB2	FB3	FB10	FB13	FB14	KB1	KB3	KB31
n	10	1	5	6	16	9	15	14	6
Moy.	450	357	569	618	521	610	423	421	423
Max.	495	357	580	686	627	868	561	465	488
Min.	408	357	560	595	413	555	279	400	395
s	34	-	7	34	53	99	86	21	34

Données	KB32	KB33	KB34	SB1	SB4	SB5	SB6	SB11	SB12
n	4	3	5	20	7	21	10	15	16
Moy.	395	363	790	545	726	710	481	434	657
Max.	463	385	1077	586	807	815	624	526	715
Min.	360	348	617	491	677	600	306	290	616
s	48	19	184	26	53	55	90	70	25

Tableau 6.7: Statistiques des mesures de conductivité électrique sur la période d'observation (s représente l'écart-type et n le nombre d'échantillons)

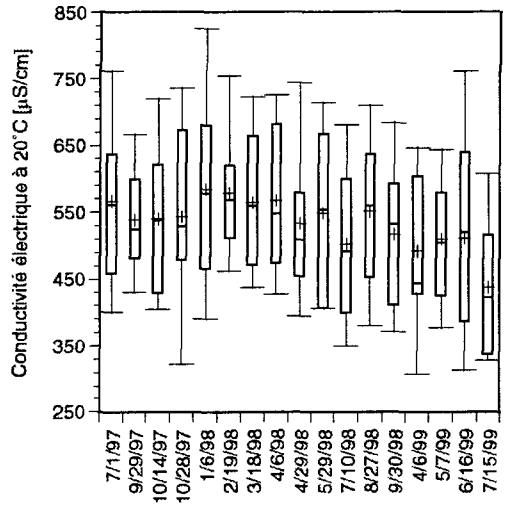


Figure 6.18: Statistique sur les valeurs de conductivité électrique mesurées dans les eaux de la nappe alluviale de la haute Sarine de 1997 à 1999.

Les mesures de température discrètes et continues (obtenues sur le réseau de logger de l'OEHE) nous ont permis de relever 2 observations principales. D'une part, nous constatons l'existence de cycle saisonniers bien marqués avec des maxima en septembre et octobre et des minima en mars et avril et d'autre part l'existence de deux types de courbes de températures caractéristiques.

Alors que les stations SB1 et FB14 offrent des courbes de variation de températures "lisses" dont l'amplitude varie essentiellement au niveau saisonnier avec de minimes variations de second ordre (quotidiennes), nous constatons que les mesures réalisées au point SB11 varient beaucoup plus au niveau quotidien et hebdomadaire tout en gardant l'aspect général des variations saisonnières

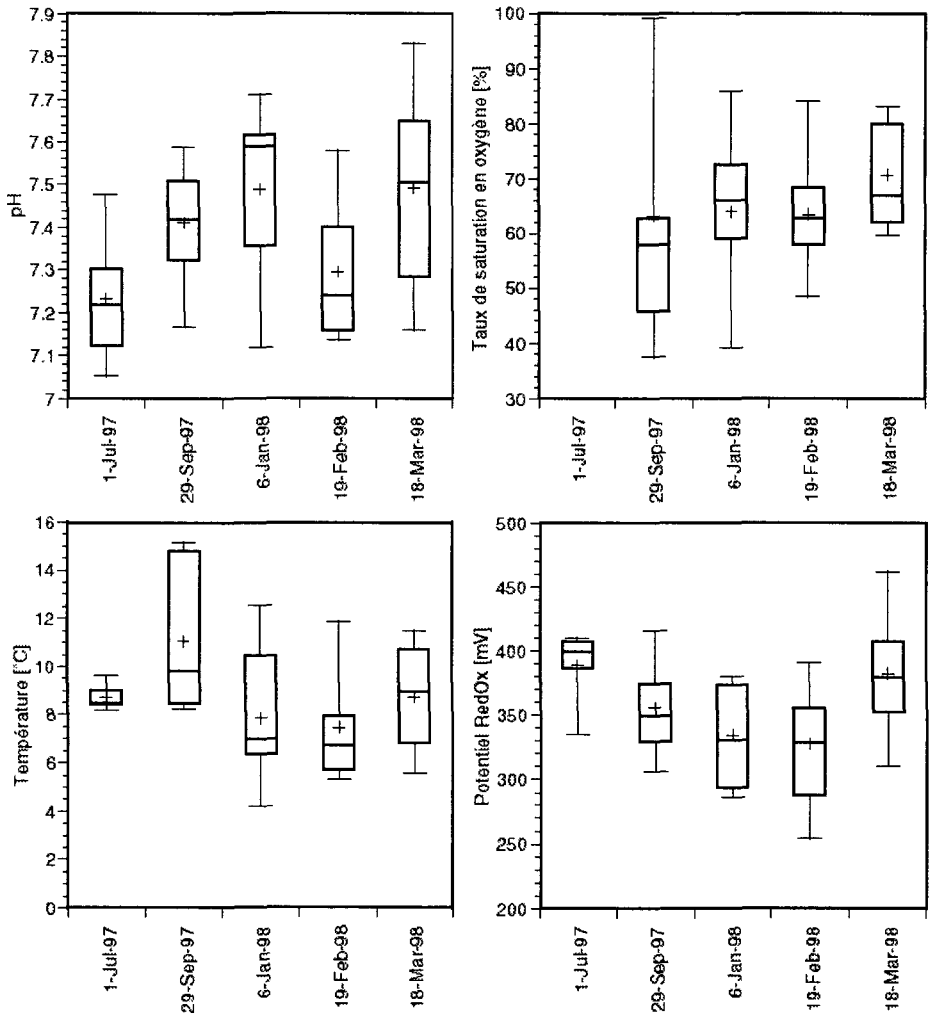


Figure 6.19: Résultats des mesures discrètes des paramètres physico-chimiques effectuées sur les points d'observation principaux de notre réseau. La température moyenne du lieu (Station SMA 5588 Grund b. Gstaad) pour la période considérée (1.7.1997 au 18.3.1998) était de 10.5 °C.

Les mesures réalisées au point SB6 présentent de très faibles variations saisonnières et des pics "anormaux" en novembre et décembre 1997 que nous attribuons à des raisons techniques. Les variations saisonnières ressortent bien sur l'ensemble des mesures discrètes effectuées (Annexe VII). Les variations observées permettent de distinguer deux types d'environnements phréatiques. les points SB1 et FB14 se situent dans des zones peu influencées par l'infiltration directe des eaux de surface et le signal sinusoïdal observé s'explique par les variations de la température de l'air, source principale d'énergie thermique, fortement atténuées par l'effet tampon du sol et ne sont plus que de l'ordre de 2 à 7°C. Ce n'est pas le cas de SB11, où comme nous l'avons déjà vu l'infiltration des eaux de la Sarine va perturber le signal en créant des variations plus fréquentes. L'ensemble des mesures effectuées sur les cours d'eau indique également l'existence de variations saisonnières. Les variations quotidiennes sont par contre nettement plus marquées. Toutes les mesures n'ont pas révélé d'anomalies importante permettant de suspecter la présence de ressource thermale ou subthermale.

Réseau des sources

Parallèlement aux points de mesures principaux, nous avons suivi de manière moins systématique 3 émergences d'eau souterraine (Fig. 6.20 et Annexe VI) qui se situaient au niveau de la plaine alluviale et dont la nature "phréatique" avait été avancée par Bieri (1953). Les résultats nous ont permis d'en définir l'origine avec plus de précision. Nous avons attribué la source de Rübelsdorf (sud de Saanen) à une probable résurgence karstique dont l'origine serait l'écaille du Rübli. La source de Lädiwald, située au nord de Feutersoey en plein Flysch du Niesen, représente vraisemblablement une exurgence d'influence évaporitique dont l'origine est à rechercher dans les unités extra-flysch définies par Basabe (1992).

La circulation des eaux peut se faire le long du plan de chevauchement de la nappe du Niesen sur l'Helvétique qui affleure dans la vallée voisine de la Simme à une altitude similaire à celle de la source observée qui se situerait par conséquent dans son prolongement.

La "source" de Gsteig est quand à elle liée directement à l'exurgence de la nappe alluviale à la faveur de l'interface entre les dépôts perméables alluviaux du bassin de Gsteig et de ceux moins perméables du cône d'alluvions du Reuschbach. Il s'agit en fait d'un véritable torrent qui prend naissance de manière diffuse dans tout ce secteur par ailleurs marécageux situé au sud du village.

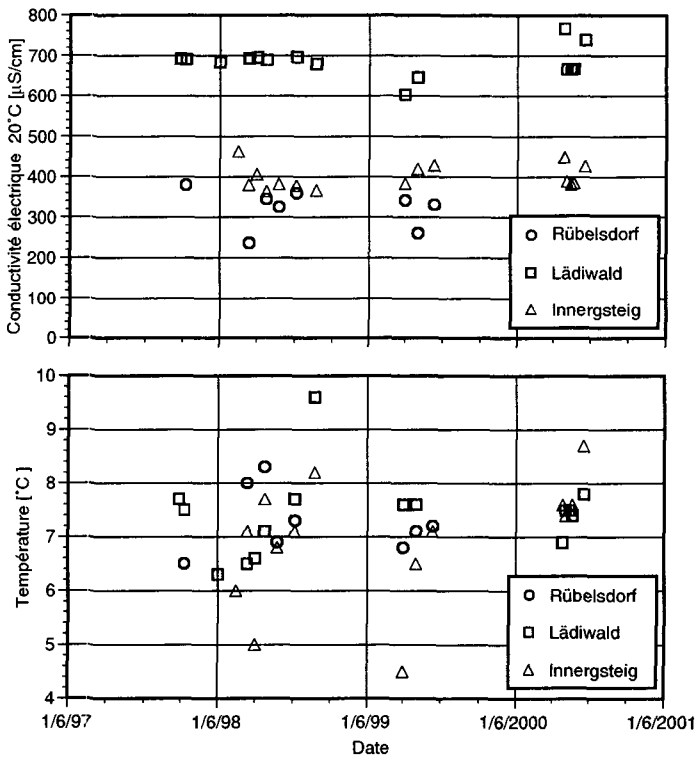


Figure 6.20: Mesures de température et de la conductivité électrique effectuées sur les points A1 à A3.

6.3.3.2. ANALYSES CHIMIQUES

Les analyses chimiques effectuées sur les échantillons d'eau souterraine de la haute Sarine ont été effectuées afin de déterminer la qualité de la ressource au sens de la LEaux de 1991 et de l'OEaux de 1998 dans le cadre de l'étude sur les bases hydrogéologiques pour la gestion des gisements d'eaux souterraines pour l'OEHE. Nous y avons inclus 2 campagnes d'analyse des éléments en traces, 5 campagnes d'analyses des éléments majeurs et une campagne d'analyses bactériologiques ciblée sur les nouveaux gisements définis par les sondages effectués dans le cadre de cette thèse (KB31, 32, 33 et 34). Nous n'avons pas analysé d'autres éléments, en particuliers les composés organiques, car notre connaissance du milieu naturel de la haute Sarine et des activités qui y sont développées n'apportait pas de présomptions de pollutions de ce type.

Tous les résultats des analyses des éléments majeurs et mineurs sont reproduites dans les annexes IX et X. Dans les paragraphes suivants, nous bornerons notre description aux éléments originaux et caractéristiques des eaux de la nappe alluviale de la haute Sarine ainsi qu'à quelques éléments critiques du point de vue de l'utilisation possible de la ressource.

Les composants majeurs

L'analyse des éléments majeurs a permis la classification des eaux souterraines d'après un schéma généralement admis en Suisse, celui de Jäckli (1970). Nous avons obtenu les résultats présentés dans le tableau 6.8.

Type Jäckli	%	Nombre absolu
Ca-(Mg)-HCO_3-(SO_4)	20	11
Ca-(Mg)-HCO_3	13	7
Ca-(Mg)-HCO_3-SO_4	36	20
Ca-HCO_3-SO_4	11	6
Ca-HCO_3	11	6
Ca-Mg-HCO_3	5	3
Ca-HCO_3-(SO_4)	2	1
Ca-Mg-HCO_3-SO_4	2	1
Total	100	55

Tableau 6.8: Répartition des mesures de la nature chimique de l'eau de l'aquifère alluvial de la région de la haute Sarine selon Jäckli (1970). La dominance des faciès sulfatés et hydrogénocarbonatés calciques est frappante.

La dominance des faciès carbonatés calciques et sulfatés calciques nous confirme les mesures de conductivité électriques. La plus grande partie des eaux souterraines (71%) contient plus de 10% de sulfates dont la provenant des karsts évaporitiques de la Zone des Cols et de la Zone Submédiane. La représentation classique de Piper (fig.6.21) permet de visualiser les pôles Calcium en ce qui concerne les cations et les pôles hydrogénocarbonates et sulfates des anions.

Les statistiques présentées en annexe avec les mesures brutes nous permettent par ailleurs de constater qu'avec des concentrations situées entre 5 et 210 mg/l de sulfates dans les eaux souterraines, nous nous situons bien au-dessous du seuil de saturation de 1925 mg/l à 10°C pour le gypse (Hölting, 1992; Mattess, 1994).

Les mesures de la dureté totale de l'eau nous permettent par ailleurs de classer les eaux souterraines de la haute Sarine dans la classe des eaux dures à très dures (moyenne de 30°F). Les objectifs de qualités fixés par l'OEaux pour les sulfates sont bien évidemment dépassées (limite de qualité 10 à 50 mg/l). On parvient plus rarement à dépasser très légèrement la valeur de tolérance de 200 mg/l. Compte tenu de l'environnement géologique naturel, cela n'a rien de surprenant. Les plus hautes concentrations ont été mesurées dans les secteurs les plus proches des exutoires supposés des zones karstiques (fig. 6.22).

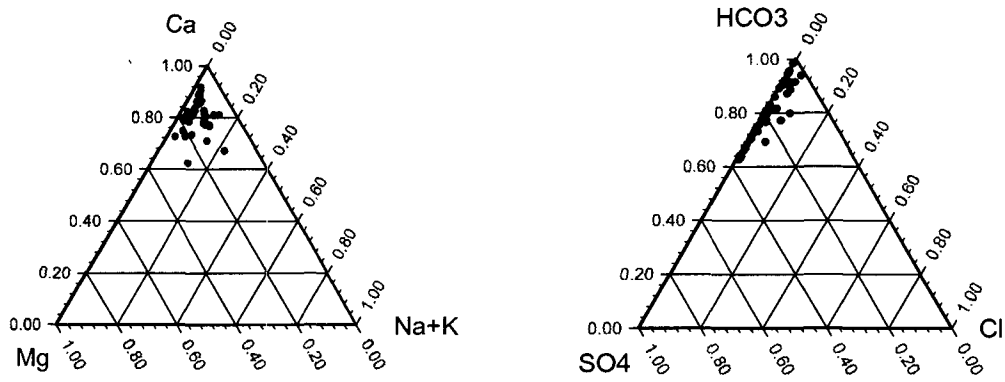


Figure 6.21: Représentation de la composition des eaux souterraines de la haute Sarine par la méthode de Piper.

En ce qui concerne les autres éléments, nous pouvons relever l'infime quantité de nitrates mesurée, systématiquement inférieure aux objectifs de qualité fixées par l'OEaux de 25 mg/l qui indique une qualité exceptionnelle de l'eau en comparaison aux eaux souterraines des régions à fortes activités agricoles. Ce n'est pas l'activité pastorale de la région qui met en péril la qualité de l'eau car on peut en effet remarquer qu'il n'y a aucune activité agricole intensive sur tout le bassin considéré. On pourra remarquer les hautes valeurs de sodium et de chlorures mesurées le 9 avril 1998 au point FB7 situé au centre du village de Gstaad qui représentent l'influence du salage des routes en hiver. La teneur en phosphates mesurée au point KB1 était systématiquement plus élevée qu'ailleurs et a même légèrement dépassé la limite de qualité de 0.05 mg/l avec 0.062 mg/l le 6 avril 1998. Compte tenu de la position du point de mesure dans la proximité immédiate des bassins de décantation de la station d'épuration de Saanen, nous ne pouvons exclure quelque fuite de cette dernière, en de faibles proportions.

Les éléments en traces

Deux campagnes d'analyses des teneurs en éléments en traces ont été effectuées dans le cadre de cette thèse afin de déterminer la composition des eaux souterraines et de repérer des influences anthropiques et des parentés géochimiques. Dans tous les échantillons nous avons relevé la présence en concentrations élevées de Sr. Ce n'est pas une surprise en soi et la bonne corrélation de cet élément avec les teneurs en sulfates (fig.6.23) ne fait que confirmer l'origine géogène de ces deux éléments décrite par Mandia (1991) dans le cadre du projet AQUITYP du GEOLEP (Looser et al., 1995; Parriaux et al., 1990a).

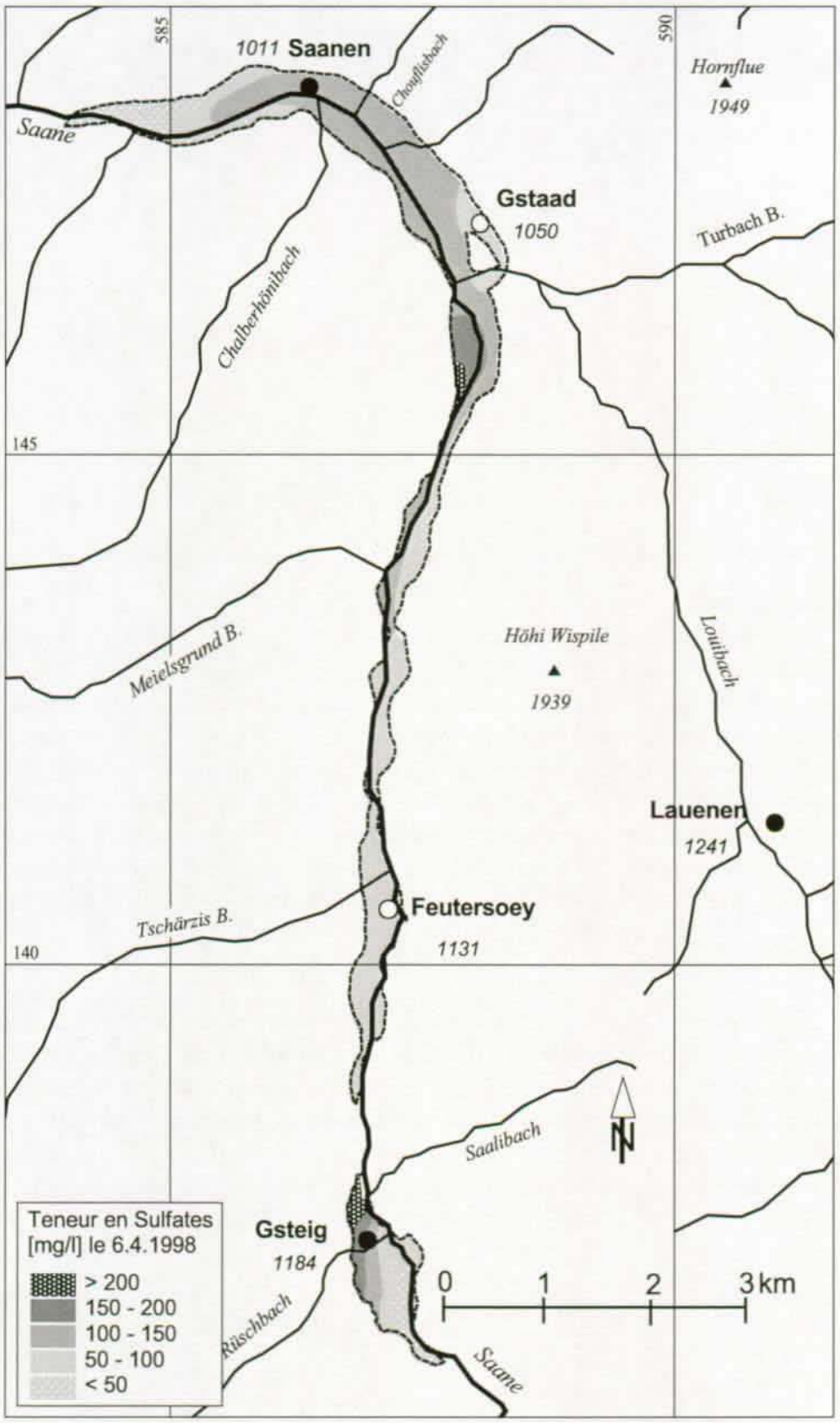


Figure 6.22: Carte des teneurs en sulfates mesurées sur notre réseau d'observation des eaux souterraines le 6.4.1998.

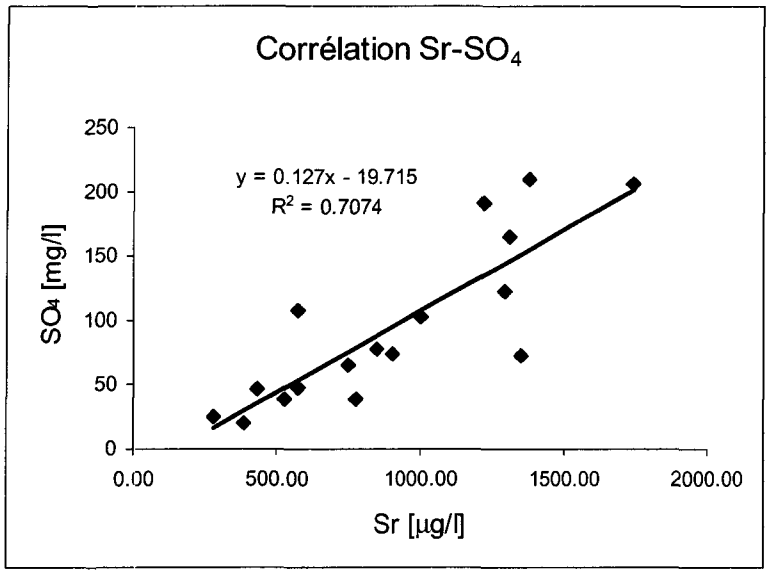


Figure 6.23: Corrélation entre les éléments majeurs et mineurs caractéristiques des eaux des aquifères du Trias.

En ce qui concerne les autre éléments, nous avons identifié Ba, B, Zn, Al et Pb comme géogènes dont l'origine peut typiquement être attribuée aux Flyschs de la nappe du Niesen (Basabe, 1992). Nous ne pouvons toutefois pas exclure une origine artificielle par le biais de pollutions mineures pour expliquer les teneurs relativement élevées en Al, Mn, Fe (ces deux éléments apparaissent typiquement lors de la diminution de la teneur en oxygène des eaux souterraines), Pb, Ba et Zn au point KB1 qui se situe juste à l'aval de la décharge principale de la commune de Saanen et de la station d'épuration. L'origine de ces mêmes éléments aux points FB1 et FB13 semble devoir pour sa part être attribuées aux revêtements utilisés pour les filtres des puits et à la faible fréquence de leur mise en service, voir à leur abandon (Parriaux et Bensimon, 1990).

6.3.3.3. ANALYSES BACTÉRIOLOGIQUES

En ce qui concerne la qualité bactériologique de l'aquifère principale de la vallée de la haute Sarine, force est de constater qu'elle est excellente. Les mesures prises régulièrement à la station de pompage communale de Chäppeli depuis près de cinquante ans démontrent une qualité irréprochable (documents consultés au Service des Eaux de la commune de Saanen). Les analyses réalisées par nos soins dans les 4 nouveaux forages lors de la campagne de mesures du 16.6.1999 à la suite d'une période relativement pluvieuse n'ont fait que confirmer cet état de fait (tab. 6.9).

Analyses	KB31	KB32	KB33	KB34	Limites
Germes aérobies/ml	25	10	58	43	100
Entérocoques /100 ml	0	0	0	0	0
E. coli /100 ml	0	0	0	0	0

Tableau 6.9: Analyses bactériologiques des nouveaux forages (16.6.1999).

6.3.3.4. ANALYSES ISOTOPIQUES

Les analyses isotopiques ne sont pas à proprement parler des indicateurs de qualité des eaux souterraines au sens de la LEaux et de l'OEaux. Néanmoins, elles permettent de mettre en évidence des cycles de teneurs isotopiques saisonnières et des zones d'infiltration qui ont des répercussions sur la qualité des eaux. Comme nous l'avons fait pour les analyses chimiques, nous n'allons pas insister dans ce paragraphe sur les méthodes d'analyses utilisées. Les fondements des méthodes isotopiques peuvent être consultées dans la littérature récente (Clark et Fritz, 1997; Etcheverry et Parriaux, 1998; Mazor, 1991; Mazor, 1997; Moser et Rauert, 1980; Pearson et al., 1991). Les résultats des analyses effectuées durant notre thèse sont présentés dans l'annexe V. Les paragraphes suivants résument les principales conclusions que l'on peut raisonnablement tirer des résultats obtenus.

Variations saisonnières

Les variations saisonnières du signal isotopique sont les plus frappantes et les seules que nous ayons pu véritablement identifier sur la base de notre échantillonnage relativement écarté dans le temps. On constate une forte baisse du $\delta^{18}O$ au printemps. Le mélange des eaux de fonte des neiges est généralement composé d'une partie de neige "originale" (Clark et Fritz, 1997) dont la teneur en $\delta^{18}O$ avoisine les -20 $^{o}/_{oo}$ pour des bassins versants de l'ordre de 3'000 à 4'000 msm (Clark et Fritz, 1997; Gibson et Prowse, 1999; Moser et Rauert, 1980; Sueker et al., 2000) et d'une partie de neige appauvrie qui dans le cas de la haute Sarine définissent un mélange dont la teneur en $\delta^{18}O$ oscille entre -12 et -13 $^{o}/_{oo}$ au point de mesure S9 à l'extrémité sud de la plaine alluviale. Les mesures réalisées permettent avant tout une approche qualitative du phénomène.

La quantification des différents constituants du débit de la rivière requiert un nombre plus importants d'échantillons et une approche événementielle des écoulements en général que nous n'avions pas envisagé dans le cadre de cette thèse (Etcheverry et Parriaux, 1998; Iorgulescu, 1997; Sueker et al., 2000; Vitvar, 1998). On constate en général une faible amplitude des variations qui est à rattacher à l'état fortement tamponné de l'aquifère qui ne reflète en définitive que les grands événements comme la fonte des neiges. On observe en principe la diminution des variations saisonnières du $\delta^{18}O$ avec la profondeur et la valeur moyenne résultante est représentative de la teneur moyenne en $\delta^{18}O$ dans le précipitations régionales (Clark et Fritz, 1997; Iorgulescu, 1997; Thierrin, 1990) comme l'indique la figure 6.24.

La profondeur critique à laquelle les variations s'estompent est de l'ordre de 1.40 m par exemple pour le petit bassin de la haute Mentue décrit par Iorgulescu (1997). L'annexe XIII présente une statistique de base sur les mesures effectuées durant notre thèse sur l'ensemble du réseau d'observation (eaux souterraines N, Sarine S et torrents T). On constate en effet que l'ampleur des variations entre les mesures est plus importante pour le réseau hydrographique de surface que pour les eaux souterraines tamponnées.

Les plus grandes variations observées dans la nappe l'ont été au point SB11, déjà présenté comme subissant d'importantes infiltrations d'eau de surface directement depuis la Sarine. La fonte des neiges se fait aussi plus nette par les valeurs plus basses mesurées dans les torrents et la Sarine, que dans la nappe. D'une manière globale, les valeurs minimales sont observées durant les mois d'avril à juillet alors que les valeurs plus élevées s'observe durant les mois d'hiver et en automne. Ces données correspondent bien au cycle hydrologique annuel régional déjà mentionné plus haut.

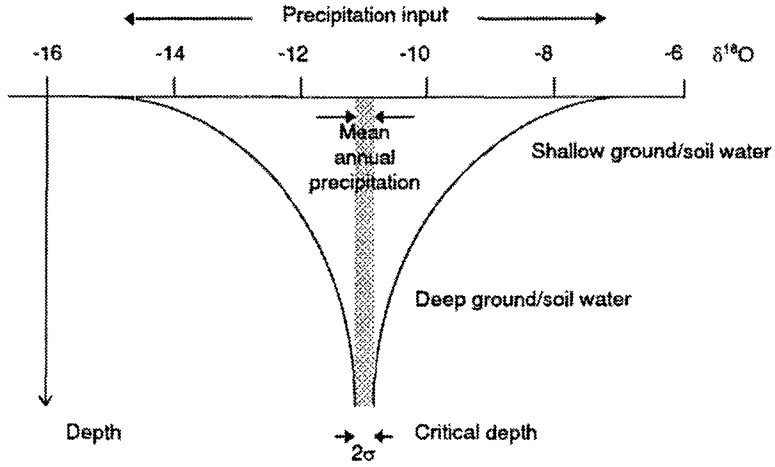


Figure 6.24: Profil indiquant l'existence de la profondeur critique à partir de laquelle les variations saisonnières de la teneur en $\delta^{18}O$ des eaux souterraines ne se reflètent plus de manière significative d'après (Clark et Fritz, 1997).

L'analyse d'événements particuliers à une échelle de temps plus petite s'est avérée irréalisable. En effet, les travaux traitant ce genre d'approche se basent sur des séries de données bien plus denses que les notre et poursuivent des buts en général différents (Iorgulescu, 1997; Sueker et al., 2000; Vitvar, 1998).

Le réseau des sources observées parallèlement présente a priori les mêmes variations saisonnières avec des valeurs plus basses au printemps lors de la fonte des neiges. Les mesures effectuées au point A3 montrent des variations plus prononcées qui reflètent bien l'infiltration importante de la Sarine à l'aval de cet endroit.

Intégration des données dans le cadre alpin régional

Une comparaison des données moyennes avec les données mesurées dans des stations du Service Hydrologique National dans le cadre de son réseau fédéral d'observation des isotopes (Etcheverry et al., in prep.; Schotterer et al., 1995) nous permet de constater la validité de l'effet tampon décrit plus haut. Nos données s'intègrent parfaitement dans le cadre des valeurs mesurées dans les stations de l'Oberland Bernois depuis longtemps (Pearson et al., 1991). L'altitude moyenne de la plaine alluviale est de 1'200 msm, comme nous n'avons pas relevé de différence significative dans la teneur en $\delta^{18}O$ des points d'observations choisis, nous avons suffisamment d'indices qui nous permettent d'exclure une alimentation importante de l'aquifère de type thermale ou subthermale ou encore quelque réseau karstique situé bien au dehors du bassin versant de la haute Sarine (fig. 6.25). L'analyse de l'isotope stable ^{18}O de la molécule d'eau nous a permis d'identifier et de confirmer les phénomènes de recharge les plus significatifs de l'aquifère alluvial de la haute Sarine.

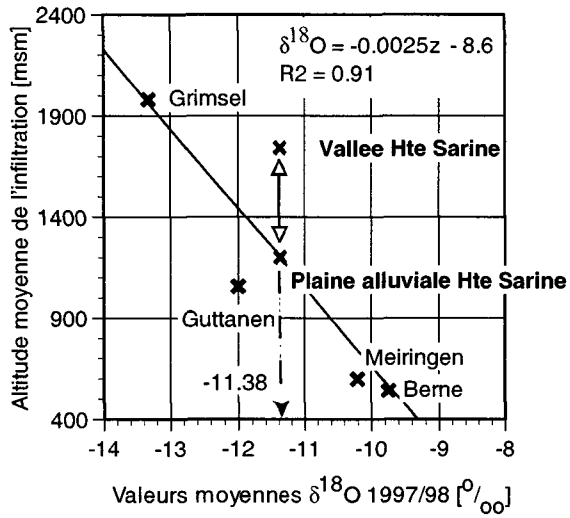


Figure 6.25: Représentation de la relation entre l'altitude moyenne d'infiltration des précipitations et les valeurs moyennes en $\delta^{18}O$ de l'Oberland bernois (sur la base des données du réseau fédéral de mesures des isotopes du SHGN). On constate que la valeur moyenne des eaux souterraines de la haute Sarine correspond avec les valeurs régionales pour la période considérée de 1997-1998. La valeur moyenne de la teneur isotopique des eaux souterraines de la plaine alluviale est indiquée par une flêche (- 11.38).

La figure 6.25 situe la valeur moyenne de la teneur en $\delta^{18}O$ de la nappe alluviale de la haute Sarine comme étant bien intégrée dans la droite météorique de l'Oberland bernois. Si l'on considère que ces eaux souterraines sont un mélange représentatif de l'ensemble des eaux du bassin versant de la vallée principale dont l'altitude moyenne a été définie par Mauerhofer (1980) sur la base d'une courbe ipsographique à 1'741 msm, la droite météorique bernoise n'est plus valable. Nous avons également mis en évidence des variations saisonnières des valeurs de $\delta^{18}O$ qui démontrent une alimentation annuelle de la part de la rivière et des précipitations importante ainsi qu'un temps de séjour relativement court de l'eau dans l'aquifère.

Pour clore ce chapitre, il est nécessaire de rappeler l'importance des effets d'altitude, de la topographie et de la climatologie locale sur les résultats fournis par l'analyse de la teneur en $\delta^{18}O$. Ces derniers peuvent subir d'importantes variations dont les origines ne sont pas directement liées aux phénomènes de réalimentations que nous cherchons à définir (Gat et Rietti-Shati, 1999; Mazor, 1991; Mazor, 1997) mais aux particularités essentiellement climatologiques du bassin versant considéré.

7. MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS

La modélisation numérique des écoulements souterrains constitue un puissant outils d'analyse et de simulation d'événements naturels ou accidentels dans les aquifères (Anderson et Woessner, 1992; Bear et Bachmat, 1998; Kinzelbach, 1995). Grâce aux progrès des techniques de calculs sur ordinateurs, il est possible aujourd'hui d'appréhender des problèmes hydrogéologiques très complexes en 2 ou 3 dimensions. La modélisation des écoulements souterrains en milieu poreux se base sur les principes fondamentaux de la dynamique des fluides. Nous avons utilisé l'outil de modélisation FEFLOW (Diersch, 1998) qui est le plus performant du marché. Pour les principes de base concernant la modélisation des écoulements souterrains, le lecteur pourra se rapporter à la fin du texte, annexe XI.

Nous y résumons les lois physiques qui décrivent l'écoulement des eaux souterraines et du transport de substances dissoutes :

- la loi d'écoulement de Darcy

- l'équation de continuité

- l'équation de transport de matière

Le logiciel FEFLOW utilise dans ses calculs la méthode des éléments finis (Diersch, 1998) qui permet notamment une meilleure approximation des formes irrégulières qu'une approche par la méthode des différences finies (Anderson et Woessner, 1992).

7.1. CHOIX ET BUTS DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT

Avant d'entreprendre la modélisation des écoulements souterrains de la nappe alluviale principale de la vallée de la haute Sarine, nous avons identifié les buts que nous voulions atteindre ainsi que les moyens dont nous disposions. La qualité et la représentatitivité des résultats d'une modélisation dépendent en effet en grande partie des paramètres que l'on pourra y introduire (conditions aux limites, caractéristiques des matériaux).

Les buts de ce modèle numérique sont les suivants :

1) l'utilisation d'une méthode moderne de simulation des écoulements souterrains en tant qu'outil de gestion à part entière de l'aquifère considéré

2) la confirmation de l'existence des apports souterrains définis au chapitre précédent, en particulier la confirmation des apports karstiques évaporitiques de la Zone Submédiane et carbonatés de la chaîne du Rübli

3) le calcul d'un bilan hydraulique régional et moyen basé sur une approche quantitative

4) la représentation en 3 dimensions de la structure de l'aquifère alluvial de la haute Sarine

Les conditions aux limites

Le modèle d'écoulements souterrains traite la partie nord de la plaine alluviale. C'est là que que nous avons identifié les plus gros apports de sulfates des versants karstiques et que l'aquifère est le plus épais. La Sarine y joue également un rôle complexe et difficile à déterminer sur la base des observations de terrain uniquement. La nature des buts fixés pour l'élaboration de cette thèse nous ont incités à choisir une modélisation en régime permanent des écoulements dont le calage est plus aisé que pour un modèle transitoire prenant en compte les variations du régime d'écoulement de la nappe et des diverses composantes de recharge dans le temps (précipitations, karst, infiltration, exfiltration, apports indirects des flancs de la vallée, etc.). Nous avons choisi une période de moyennes eaux avec la date du 6.4.1998. Nous disposons également d'un grand nombre d'analyses chimiques pour cette date qui nous ont permis de caler le modèle de transport de matière pour les sulfates. Nous connaissances sur les débits d'infiltration et d'exfiltration se résument aux estimations fournies dans le chapitre précédent et dans le rapport GEOLEP pour l'OEHE (1999a). Nous avons par ailleurs introduit la topographie à partir des fichiers du Service Topographique Fédéral suisse (OFT, 1998) ainsi que la base de l'aquifère d'après nos données. Nous avons introduit dans les modèle les conditions aux limites et les paramètres hydrauliques des matériaux suivants :

Nous avons choisi un modèle en 3D afin de prendre en compte la Sarine de manière indépendante dans la 1ère couche du modèle. Il contient 5 couches dont la dernière (couche inférieure) a été dessinée grâce aux données géophysiques et aux forages réalisés dans le cadre de cette thèse. Le potentiel hydraulique a été imposé sur la Sarine, à la limite amont du modèle, la limite latérale à la hauteur de Gstaad et sur l'aérodrome afin de reproduire l'action des drains. Les précipitations (1000 mm/a) sont imposées à la première couche (layer) du modèle.

Les paramètres hydrauliques

En ce qui concerne les paramètres hydrauliques de l'aquifère, la distribution des perméabilités et de la nature des terrains meubles aquifères peut être considérée a priori comme représentative à l'échelle régionale, raison pour laquelle nous l'avons intégrée telle quelle dans le modèle. Le modèle prend en compte la partie perméable et saturée de l'aquifère alluvial de la haute Sarine. Les valeurs des conductivités hydrauliques appliquées aux super-éléments de la première à la troisième couche du modèle sont celles qui ont été définie à l'aide des essais in situ et que l'on trouve dans le chapitre 4 (voir fig. 4.6). On notera en particulier le lit de la Sarine avec une valeur de 10^{-5}m/s afin de simuler le colmatage du lit par les limons (sur la première couche seulement). Les deux dernières couches ont une conductivité hydraulique de 10^{-5}m/s. Pour le transport de matière, nous avons appliqué une transmisivité longitudinale de 100 m et une dispersivité latérale de 10 m. La porosité est de 20% pour tous les éléments. La figure 7.1 indique les conditions aux limites pour les conditions hydrauliques (piézométriques) et pour le transport de matière, en particulier les entrées de sulfates dans le modèle.

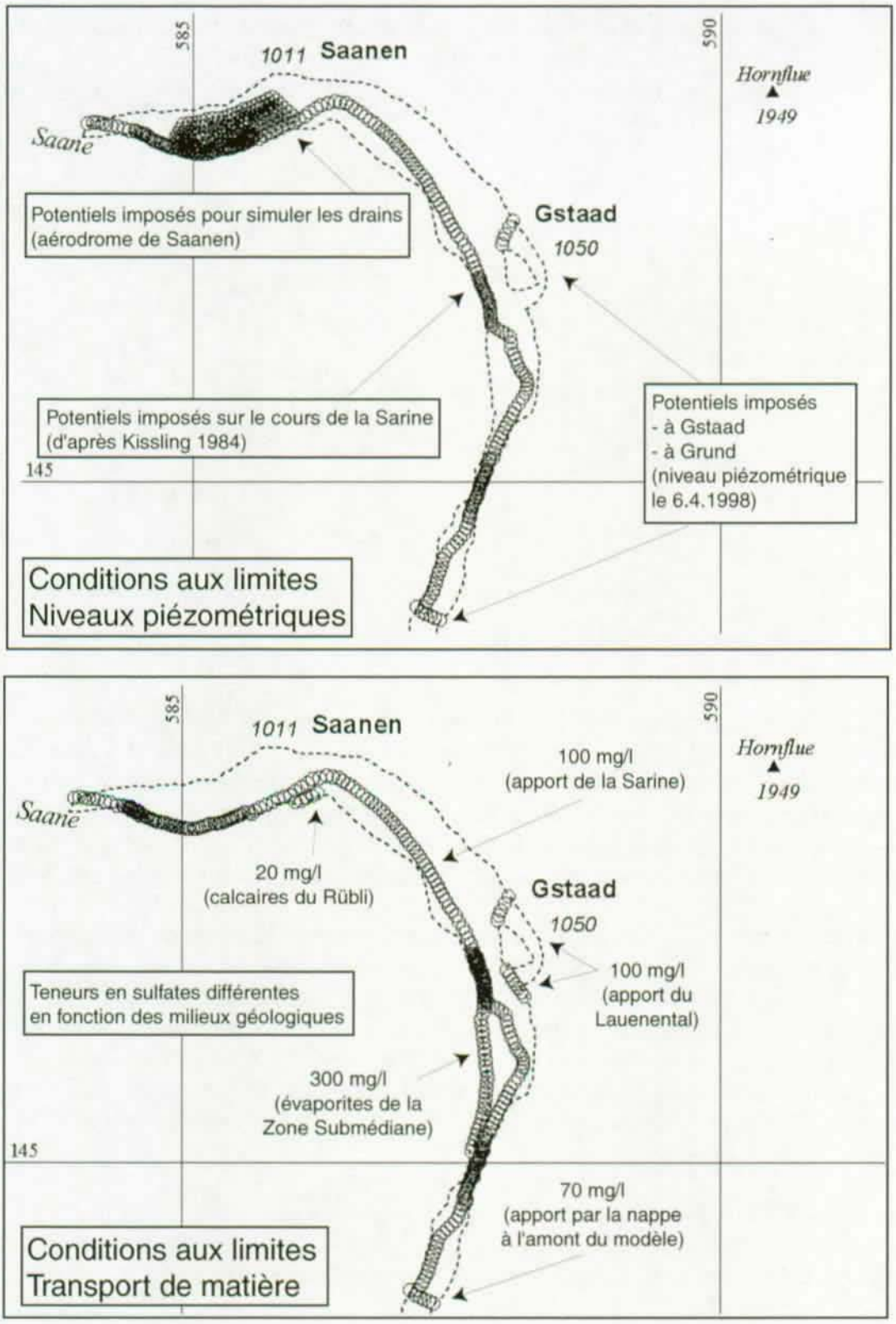


Figure 7.1: Conditions aux limites piézométriques et pour le transport de matière utilisées pour la modélisation numérique des écoulements.

7.2. RÉSULTATS

Les résultats sont présentés dans le tableau 7.1 ci-dessous. Pour les représentations graphiques ainsi que pour la description détaillée des résultats obtenus (maillage, etc.), le lecteur pourra consulter les fichiers originaux au GEOLEP (fichier FEFLOW : saanenNEWMAT.fem).

	Résultats FEFLOW			
Budget total	**[Mio m³/a]**	**[m³/j]**	**[m³/s]**	**[l/s]**
IN	108	2.95E+05	3.41E+00	3.41E+03
OUT	111	3.03E+05	3.51E+00	3.51E+03
Précipitations	3	7.90E+03	9.14E-02	9.14E+01
Budget Sarine				
IN	7	1.99E+04	2.30E-01	2.30E+02
OUT	7	1.87E+04	2.16E-01	2.16E+02
Précipitations	0	8.04E+02	9.31E-03	9.31E+00
Budget Flugplatz				
IN	66	1.80E+05	2.08E+00	2.08E+03
OUT	73	2.01E+05	2.33E+00	2.33E+03
Débit des drains	8	2.10E+04	2.43E-01	2.43E+02
Précipitations	1	1.60E+03	1.85E-02	1.85E+01

Tableau 7.1: Résultats de la modélisation (outils de calcul Budget Feflow).

Nous pouvons constater que l'infiltration de la Sarine dans l'aquifère est très importante, de l'ordre de 230 l/s ce qui est supérieur aux estimations que nous avons proposées dans le chapitre précédent. Nous considérons que l'ordre de grandeur est respecté. Le calcul d'exfiltration de 216 l/s correspond parfaitement à celui effectué avec le calcul des bilans qui était de 215 l/s. Le bilan global sert avant tout de contrôle de cohérence et n'a pas de signification au point de vue de l'estimation des ressources car il calcule la totalité des flux entrant et sortant du modèle.

La zone de l'aérodrome constitue la plus importante zone d'exfiltration de la région modélisée. Ceci est la conséquence de la présence des drains. La Sarine est caractérisée d'apèrs le modèle par des phénomènes d'infiltration jusqu'à la zone des points d'observation FB13 et FB14 à l'ouest de Gstaad. Dès lors, on constate la prépondérance de l'exfiltration jusqu'à la hauteur de l'aérodrome de Saanen où les drains influencent également les échanges rivière-nappe en forcant l'infiltration des eaux de la Sarine sur quelques centaines de mètres. Puis de là à la fin du modèle, nous n'observons plus que de l'exfiltration. Ces résultats concordent bien avec nos observations décrites dans le chapitre 6.

Nous avons effectué une analyse des flux à certains points particuliers ayant une signification du point de vue des ressources afin de les comparer avec les données calculées par les méthodes de bilan (tab. 7.2). Les profils utilisés sont les mêmes que ceux indiqués auparavant dans la figure 6.14 du chapitre 6.

Par effet d'échelle et par le manque de précision dans les données à disposition (altitude exacte et emplacement des drains), ils nous a été impossible d'approcher de manière idéale les conditions réelles de drainage dans le secteur de l'aérodrome dont le calcul du débit d'exfiltration a été effectué de la manière la plus rudimentaire qui soit en calculant le temps de parcours d'une feuille d'arbre multiplié par la section approximative du torrent réunissant les eaux drainées.

Comparaison	Feflow [Mio m³/a]	Bilans [Mio m³/a]
Flux profil 4	1.6	3.3
Flux profil 5	3.8	4.7
Flux profil 6	5.5	15.8
Flux profil 7	5.8	9.9
	[l/s]	[l/s]
Infiltration moyenne	230	40
Exfiltration moyenne	216	215
Exfiltration Flugplatz	230	500*

Tableau 7.2: Comparaison de l'approche des bilans et de la modélisation. * = débit du drain principal de l'aérodrome de Saanen, estimé le 23.6.2000 par hautes eaux.

Nous constatons que dans l'ensemble les deux approches fournissent des résultats situés dans des ordres de grandeurs tout à fait similaires. En ce qui concerne le transport de matière, nous avons pu simuler de manière tout à fait satisfaisante les apports en sulfates des versants de nature triasique de la Zone Submédiane à l'amont de notre modèle. Le panache de sulfates observé lors de notre campagne de mesures du 6.4.1998 (voir fig. 6.23) a pu être reproduit de manière fidèle (fig. 7.3). Ceci confirme l'existence de ces apports souterrains.

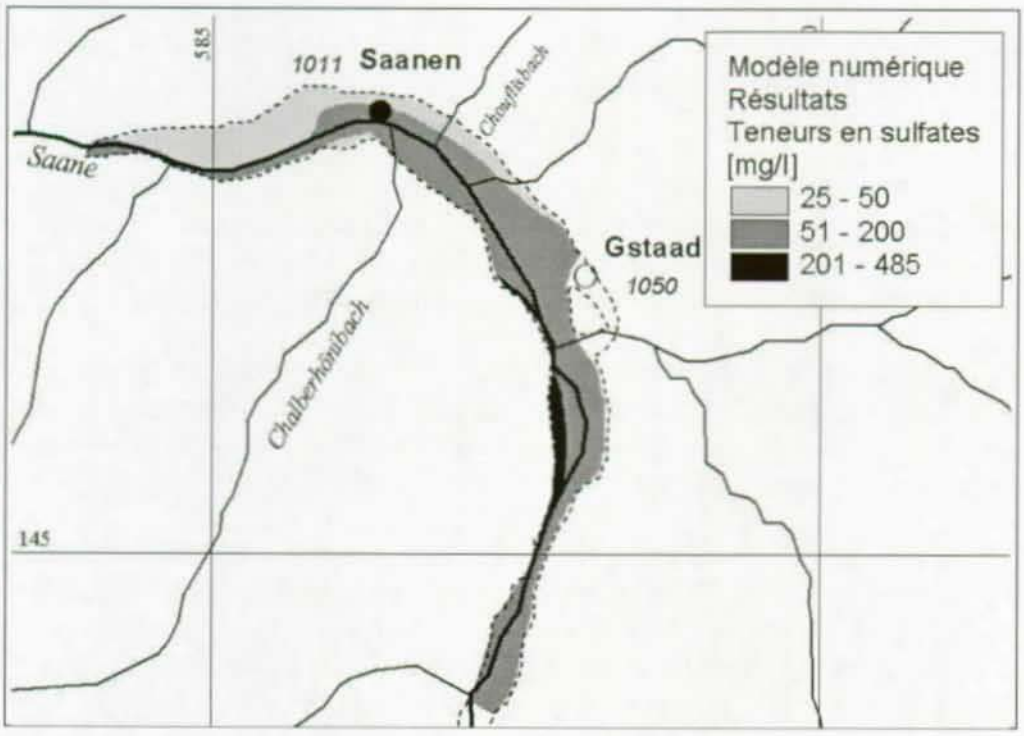


Figure 7.2: Simulation des apports en sulfates. Le panache des teneurs élevées en sulfates est comparable avec celui de la figure 6.23.

En ce qui concerne le calage hydraulique, nous avons obtenu une erreur de l'ordre de plus ou moins 2 m sur les points d'observation retenus où nous disposions de mesures limnigraphiques pour la date choisie (tab. 7.3). Ainsi, étant donné que les seuls points imposés étaient situés aux limites de l'aquifère à part ceux imposés sur le cours de la Sarine, il nous a été possible de montrer l'importance de celle-ci dans le contrôle global des écoulements souterrains de la haute Sarine.

	Niveau piézométrique le 6.4.1998		
Point d'obs.	Réel R	Calculé C	d=R-C
KB1	988.49	988.23	0.26
SB1	999.48	1001.09	-1.61
FB3	1014.1	1014.9	-0.8
FB13	1032.93	1034.04	-1.11
SB4	1046.91	1046.83	0.08
SB5	1049.28	1047.38	1.9

Tableau 7.3: Différences entre les niveaux piézométriques réels moyens et calculés pour le 6.4.2000.

7.3. APPORTS DE LA MODÉLISATION POUR LA HAUTE SARINE

La réalisation du modèle d'écoulement nous a permis de confirmer plusieurs observations de terrain relatées dans cette thèse. Ceci a une grande valeur car le modèle représente une approche purement quantitative des écoulements. Ainsi, malgré notre calage quelque peu provisoire sur le transport de matière, nous avons pu confirmer toutes nos hypothèses sur les alimentations directes et indirectes de la nappe de la haute Sarine.

En particulier :

- apport de sulfates dans les eaux souterraines depuis les versants composés de roches karstiques ainsi que depuis la rivière (en particulier dans le secteur de l'aérodrome de Saanen). Confirmation de la formation d'un plume de sulfates à la hauteur du village de Gstaad.

- importance de la rivière au niveau hydraulique. On constate que le lein hydraulique entre la Sarine et la nappe est important. En effet, lors du calage, les paramètres hydrauliques on peut d'importance sur les variations du niveau piézométrique de la nappe. Il est ainsi contrôlé essentiellement par ses liens avec la rivière.

L'approche numérique des écoulements souterrains dans une vallée alpine s'avère donc un outil puissant capable de fournir des données quantitatives directement applicables dans un contexte de mise en valeur des ressources disponibles. L'approche par la modélisation permet en outre une mise en valeur des données existantes dans un contexte de gestion à long terme. Elle offre en effet une possibilité d'adaptation aux différents problèmes d'aménagement des eaux souterraines et de prévision des pollutions potentielles que nous n'avons pas mise en oeuvre dans le cadre de cette thèse.

8. SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE GÉNÉRALE ET TYPICITÉ DE LA HAUTE SARINE

8.1. REMARQUE SUR LES ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES ADOPTÉS

Le calcul des différents types d'alimentation entre le réseau hydrographique de surface, les apports souterrains des karsts et des versants, et l'aquifère alluvial peut se faire de plusieurs manières, toutes ne nécessitant pas les mêmes données de base. Nous avons choisi d'utiliser les bilans régionaux de flux d'eau souterraine à travers des profils choisis ainsi que la modélisation des écoulements souterrain. Il existe de nombreuses autres possibilités de calcul de mélange utilisant les principes de conservation de la masse et utilisant les nombreux traceurs chimiques ou environnementaux (Bassett, 1997; Iorgulescu, 1997; Sueker et al., 2000; Vitvar, 1998). Ces approches a priori plus quantitatives nécessitent la mise en place d'un réseau d'observation dont les aspects logistiques revêtent une part importante de la réalisation, de la durée et des coûts de l'étude (Blau et al., 1984), en particulier :

- nécessité de disposer d'un pas d'échantillonnage dense des paramètres physico-chimiques s.l. afin de pouvoir en intégrer l'ensemble des variations dans les calculs et les modèles

- nécessité de disposer d'un nombre élevé de profils de calculs de débit sur la Sarine pour déterminer de façon plus précise les débits d'exfiltration et d'infiltration

- analyse plus approfondie des événements (crues) et des zones particulières (aérodrome de Saanen, zone de Matte-Rütti). Ces aspects impliquent aussi une période d'étude en général plus longue

Dans ce contexte, les données que nous avons récoltées et que nous synthétisons dans les paragraphes suivants nous apparaissent pertinentes pour offrir au lecteur des conclusions quantitatives rigoureuses des différents types d'alimentation directes et indirectes de la nappe dans le cadre des buts fixés pour la réalisation de cette thèse.

8.2. LES DIFFÉRENTS TYPES D'ALIMENTATION DE LA NAPPE ALLUVIALE

Dans le cadre de cette thèse, nous avons identifié plusieurs types de relations rivière-nappe résumés dans la figure 8.1 et représentés dans la figure 8.2. L'infiltration des précipitations directement dans la zone saturée de l'aquifère constitue le premier type. Les eaux de surface parviennent également à alimenter la nappe alluviale par les phénomènes d'infiltration au travers du lit et des rives du cours d'eau. L'exfiltration représente le phénomène inverse, l'eau de la nappe alimente le réseau hydrographique de surface.

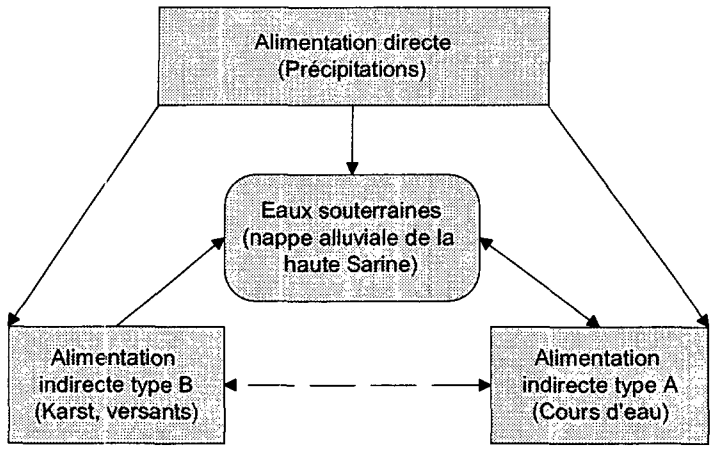


Figure 8.1: Les différents types d'alimentation de la nappe alluviale de la haute Sarine déterminées dans le cadre de cette thèse.

8.3. L'INFILTRATION DIRECTE

Le calcul de l'infiltration directe des précipitations dans l'aquifère nous a permis d'offrir une valeur quantitative du phénomène. Nous n'avons pas pris en compte les aspects pédologiques, compte tenu que les sols de la région étudiée sont extrêmement peu développés et leur épaisseur ne dépasse pas les 50 à 70 cm (Balzari, 1991). L'infiltration se fait par conséquent de manière rapide ce que mettent en évidence par ailleurs les montées extrêmement rapides du niveau de la nappe. Si l'on tient compte de l'évaportranspiration, les précipitations efficaces sont de l'ordre de 1'000 mm par année. Le tableau 8.1 présente les résultats des calculs d'infiltration sur les différentes parties de l'aquifère. On y constate que l'alimentation directe sur l'ensemble de l'aquifère est de l'ordre de 4.7 mio m^3 par année, soit l'équivalent d'un débit constant de 149 l/s.

8.4. LES ÉCHANGES RIVIÈRE-NAPPE (ALIMENTATION DE TYPE A)

Infiltration

La Sarine joue un rôle important dans l'alimentation de la nappe. Le réseau d'observation des niveaux piézométriques nous a permis de définir des zones d'infiltrations permanentes. En effet, dans certains secteurs, le niveau de la nappe était systématiquement au-dessous de celui de niveau de l'eau dans la Sarine. Le rythme et l'ampleur des variations décrites plus haut dans cette thèse nous confirment cet état de fait. La longueur totale des zones où la Sarine réalimente la nappe quasiment en continu représentent environ 7 km (OEHE, 1999a) et le débit d'infiltration moyen sur une année est de l'ordre de 40 à 200 l/s ce qui est du même ordre que l'alimentation directe par infiltration des précipitations. On distingue deux types d'infiltrations. Le premier type représente l'infiltration en discontinuité hydraulique entre la rivière perchée et l'aquifère et est typique de la région de Grund-Oey au sud de Gstaad (SB11, KB32 et KB33) où la Sarine est endiguée et légèrement surélevée par rapport au terrain environnant. Le deuxième type constitue une sorte de zone de transition entre l'infiltration d'une rivière perchée et l'infiltration dans des zones où existe une continuité hydraulique entre la Sarine et l'aquifère.

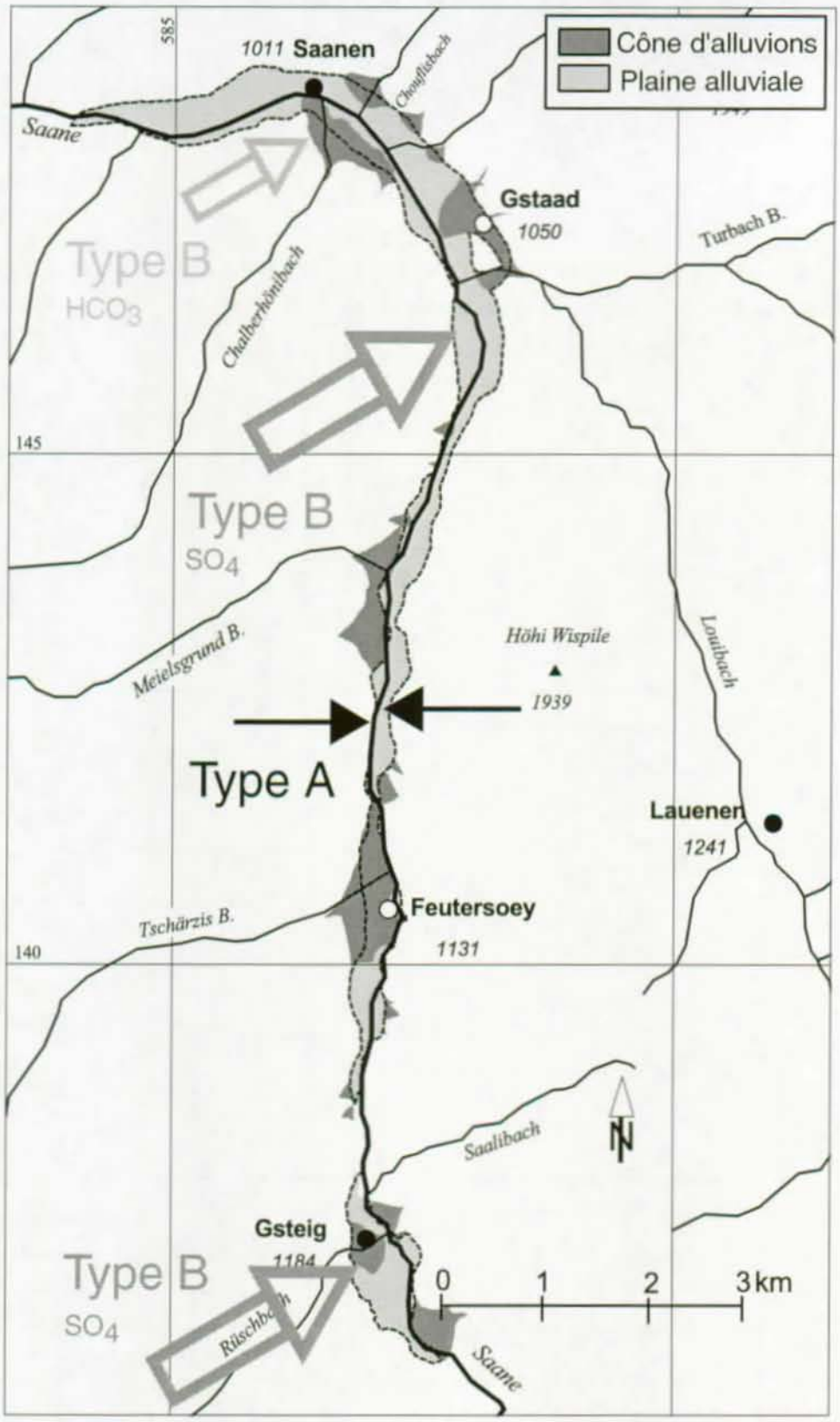


Figure 8.2: Représentation schématique des types d'alimentation indirecte de la nappe. Le type A bien que représenté localement pour des raisons de lisibilité existe sur tout le cours de la Sarine. Le type B représente les apports souterrains karstiques. La grandeur des flèches indique un ordre de comparaison arbitraire.

Bassin	Surface [m²]	P_{eff} [m/a]	Recharge [Mio. m³/a]
Gsteig	666'500	1.2	0.8
Grund	750'670	0.95	0.7
Saanen	3'418'140	0.95	3.2

Tableau 8.1: Calcul de l'alimentation directe annuelle de la nappe.

Cette zone se situe au nord de Oey et se prolonge jusqu'à la zone de Rütti-Ebnit (SB5, SB6, FB13, FB14). La figure 8.3 représente schématiquement les différents types de relations rivière-nappe rencontrées dans la haute Sarine.

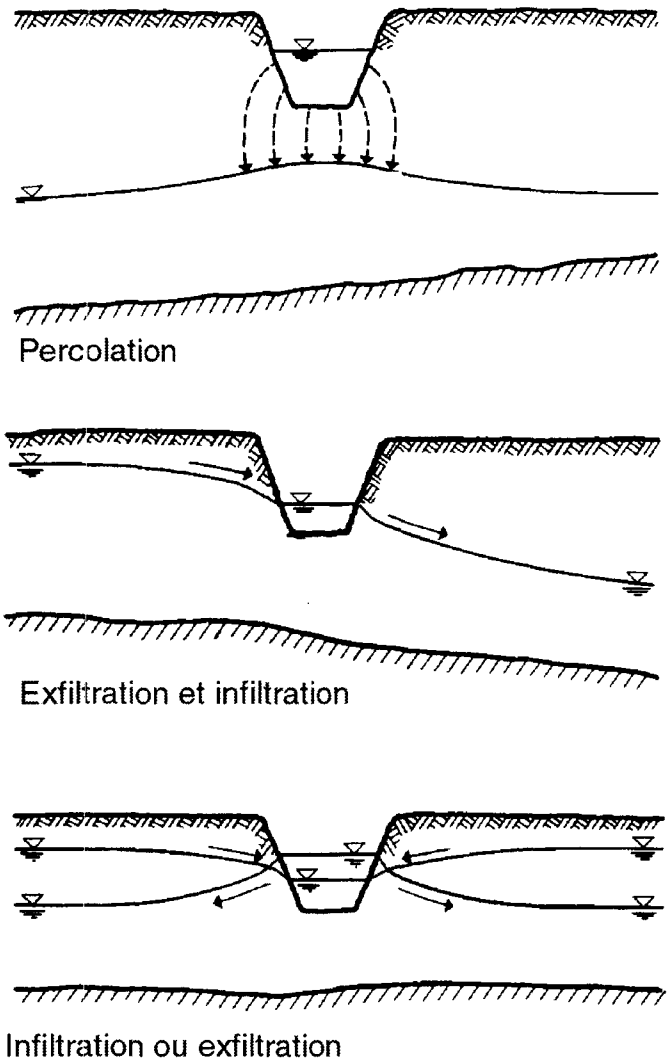


Figure 8.3: Les différents types de relations rivière-nappe identifiées dans la haute Sarine, schémas d'après Blau et al. (1984).

La Zone de l'aéroport constitue un cas particulier. En principe, il devrait s'agit d'une zone d'exfiltration importante de la nappe. Mais la construction de l'aérodrome et de ses importants systèmes de drainage a selon nous influencé les conditions naturelles. En effet, les mesures de conductivité électriques très supérieures de la Sarine en hiver par rapport à celles observées dans la nappe nous poussent à expliquer l'augmentation de cette dernière par une infiltration importante des eaux de surfaces, induite essentiellement par le système de drainage. Les phénomènes d'infiltration des eaux de la Sarine y sont très nets comme on peut le voir lors de la période de fonte des neige du printemps 1998 (fig. 8.4).

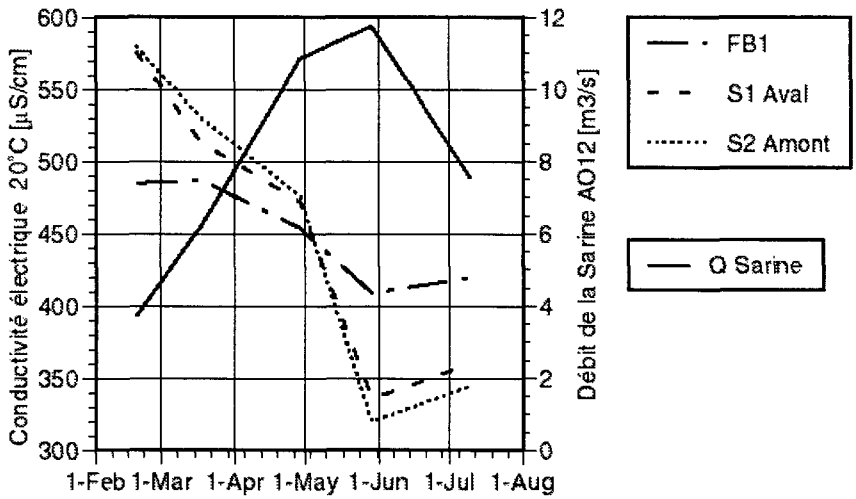


Figure 8.4: Détail des échanges rivière-nappe à la hauteur de l'aérodrome de Saanen entre février et août 1998.

Cette figure nous montre bien le changement de relation existant entre la Sarine et la nappe à la hauteur de l'aérodrome de Saanen. Avant la crue de printemps, l'eau moins minéralisée de la nappe exfiltre dans le secteur de S1 (Dorfrütti) ce qui conduit à une diminution de la conductivité observée à l'aval. Après la crue, c'est le phénomène inverse qui apparaît. Les eaux de la Sarine encore peu minéralisées se retrouvent "enrichies" à l'aval par l'exfiltration de la nappe.

Exfiltration

L'exfiltration de la nappe alluviale vers la Sarine a été identifiée de manière qualitative à plusieurs endroits, elle concerne environ 6 à 7 km du cours de la Sarine avec un débit de l'ordre de 200 l/s en moyenne par année. Il s'agit des zones situées à l'aval du glissement de terrain de Saali au nord de Gsteig (SB12) et A3, de la zone au nord du cône d'alluvions de Feutersoey et surtout de la zone de l'aérodrome de Saanen où comme nous l'avons vu précédemment, les relations rivière-nappe ont été fortement influencés par la construction de l'aérodrome dans les années 40.

Zones à régime intermédiaire

Il s'agit d'une part des zones où les variations du niveau de la nappe permettent une inversion de relations hydrauliques entre elles. En terme de débit d'infiltration ou d'exfiltration, elles ont été intégrée dans les estimations globales des deux phénomènes décrits dans les paragraphes précédents. Typiquement, la zone de Rütti-Ebnit, où l'on constate que le niveau de la nappe aux points FB13 et FB14 descend au-dessous du niveau de la Sarine en période de basses eaux prononcées comme en novembre-décembre 1997. Une autre variante des processus d'échanges entre la Sarine et la nappe se trouve dans le secteur de Moosfang (SB5 et SB6). Alors que sur la rive gauche de la Sarine nous constatons une infiltration continue, ce n'est plus le cas en rive droite. Le point SB6 se situe régulièrement au-dessus du niveau de la Sarine.

8.5. LES INFILTRATIONS INDIRECTES (ALIMENTATION DE TYPE B, KARST ET VERSANTS)

L'ampleur de ce type d'alimentation essentiellement souterraine ne nous est pas connue de manière quantitative mais nous estimons sur la base de notre connaissance des débits de sources karstiques des Préalpes qu'elle peut être de l'ordre de 50 l/s à 100 l/s (Mandia, 1991; OEHE, 1999a). L'importante teneur en sulfates constatée dans la région de Gsteig Bode (SB12) au nord du village du même nom et au nord de Gstaad dans le secteur de Matte-Rütti (SB5 et SB6) représentent des zones d'exutoires karstiques des roches évaporitiques de la Zone des Cols et de celle de la Zone Submédiane. Nous ne disposons d'aucune données piézométrique sur la distribution des potentiels hydrauliques à l'intérieur de ces massifs. Il en est de même pour le karst calcaire de la chaîne du Rübli qui selon toute vraisemblance se vide dans la plaine de la haute Sarine à la hauteur de Rübelsdorf au sud du village de Saanen (FB2 et A1). Les apports de ces zones jouent un rôle important dans l'alimentation souterraine de l'aquifère.

Il est intéressant de constater à ce sujet que la valeur moyenne de l'exfiltration annuelle de la nappe calculée plus haut correspond à un débit de 0.2 m^3/s que l'on peut attribuer à sa contribution moyenne au débit de base de la Sarine. Or, le baseflow mesuré et retenu dans le cadre du calcul du Q_{347} et de 1.4 m^3/s. La différence de débit exprime l'influence des terrains aquifères karstiques de la Zones des Cols qui sont en partie drainés par le Reuschbach et le Saalibach. Ces derniers représentent le seul exutoire de surface que nous avons repéré dans le cadre de cette thèse.

8.6. SYNTHÈSE DES ASPECTS QUANTITATIFS ET QUALITATIFS DE LA RESSOURCE

Nous avons abordé un nombre important d'aspects hydrogéologiques, géochimiques et hydrauliques du fonctionnement de l'aquifère alluvial de la haute Sarine dont nous avons pu apprécier les nombreuses interactions. Le but de ce paragraphe est de souligner et de résumer les aspects caractéristiques de la nappe de la haute Sarine en relation avec son environnment alpin.

Aspects quantitatifs

Les ressources en eau souterraines de la haute Sarine sont importantes. Le calcul des réserves basé sur le principe des réserves permanentes et des réserves renouvelables nous permet d'en apprécier les quantités. Nous appelons réserves permanentes ou séculaires (Castany, 1967), la quantité d'eau comprise dans la partie de l'aquifère non influencée par les variations saisonnières du niveau de la nappe, calculée par le produit du volume de sédiments aquifères saturés multiplié par la porosité des terrains considérés. La réserve renouvelable ou régulatrice (Castany, 1967) a été calculée sur la base du produit de la surface, de la porosité des sédiments et de l'amplitude annuelle des variations de la nappe dans le bassin considéré (fig. 8.5). La réserve totale correspond à la somme de la réserve renouvelable et de la réserve permanente.

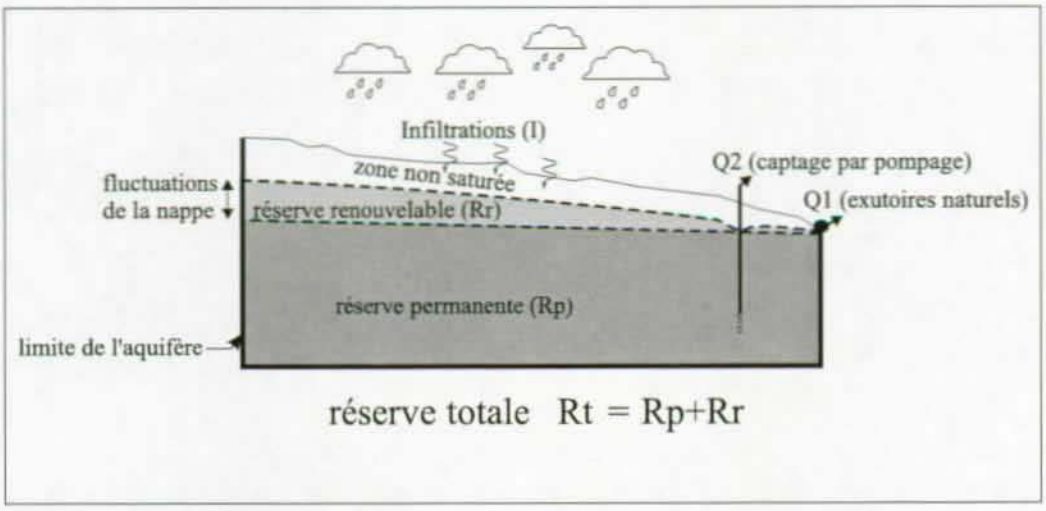


Figure 8.5: Les différents types de réserves d'après Parriaux (1999).

Pour la haute Sarine, nous avons obtenu les résultats présentés dans le tableau 8.2 ci-après.

Bassin	Porosité [%]	Réserve renouvelable [m³/a]	Réserve permanente [m³]
Gsteig	14	93'000	1'900'000
Grund	20	300'000	1'500'000
Saanen	21	720'000	14'500'000

Tableau 8.2: Tableau de calcul des réserves permanentes. La porosité a été calculée à partir des valeurs de perméabilités obtenues lors des essais de pompages en appliquant la formule de Marotz d'après Hölting (1992).

Nous attirons l'attention du lecteur sur l'aspect très conservateur du calcul des réserves renouvelables. En effet, nous ne connaissons pas le débit total d'exfiltration de la nappe de manière satisfaisante. Nous avons par conséquent simplement calculé la différence de volume entre la cote maximum et celle minimum de la nappe dans les différents bassins considérés. Nous sommes conscients de la nature simplificatrice de cette approche, mais le calcul de la quantité réelle d'eau qui a transité dans l'aquifère pendant une période donnée n'est véritablement possible que dans les cas où l'on connaît le débit exact à l'exutoire ce qui n'est pas le cas dans notre vallée.

L'alimentation de la nappe se fait de manière quasiment équivalente entre les infiltrations de la Sarine et celle directe des précipitations. Nous avons déjà vu que les augmentations subites des enregistrements limnigraphiques reflètent bien ces aspects typiques d'un aquifère alluvial alpin. L'importance de ces volumes de recharge s'explique en partie par le faible volume de l'aquifère en général.

Aspects qualitatifs

Du point de vue qualitatif, la ressource étudiée peut être qualifiée de manière globale de remarquable. Nous avons déjà commenté dans le chapitre précédent les différents aspects particuliers des valeurs limites dont le tableau 8.3 offre une synthèse en comparaison avec les valeurs mesurées durant notre thèse.

Données	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Ca [mg/l]	Cl [mg/l]	SO_4 [mg/l]	NO_3 [mg/l]	HCO_3 [mg/l]	Dureté °f	PO_4 [mg/l]	NO_2 [mg/l]
Moyenne	3.01	2.25	11.83	104.30	3.34	100.13	1.33	264.38	30.95	0.02	0.01
Max.	11.5	8	17	149	15	210	11	365	46.25	0.06	0.03
Min.	0.6	0	5	39	0.5	5	0.2	107	14.6	0.01	0
Qualité	20	10	30	40 - 125	20	50	25	-	7.5 - 12.5	0	0
Tolérance	150	-	50	-	200	200	40	-	-	-	1
Oeaux	-	-	-	-	40	40	25	-	-	-	-

Tableau 8.3: Valeurs de tolérance et valeurs de qualités des teneurs en sels minéraux définies par le Manuel Suisse des Denrées Alimentaires ainsi que par l'OEaux.

Néanmoins, en ce qui concerne l'approvisionnement en eau potable en particulier, le type d'eau rencontré dans la nappe alluviale de la haute Sarine se caractérise par sa teneur en sulfates qui dépasse régulièrement l'objectif de qualité défini par l'Oeaux et le Manuel Suisse des Denrées Alimentaires. La limite de tolérance est dépassée exclusivement dans les zones d'alimentation directe des karsts évaporitiques de la Zone de Cols et de la Zone Submédiane. Par rapport à l'utilisation de l'eau comme denrée alimentaire (eau de boisson dans les réseaux publics), nous tenons à rappeler que selon le Manuel Suisse des Denrées Alimentaires "la valeur de 200 mg/l mentionnée dans la colonne 2 tient compte de la vulnérabilité à la corrosion des matériaux des conduites et du béton (formation de sulfoaluminates). Du point de vue sanitaire, des concentrations élevées ne sont pas inquiétantes pour autant qu'elles soient imputables à des terrains riches en sulfates de clacium et que la teneur en magnésium indiquée sous le chiffre 3.12 (ndlr colonne 1 5 à 30 mg/l et colonne 2 50 mg/l) ne soit pas dépassée".

Nous relevons aussi l'extrême dureté totale de l'eau qui dépasse en permanence l'objectif de qualité. Ici aussi ce sont avant tout les activités industrielles et les réseaux de distribution qui sont concernés plus que la santé des consommateurs. Ainsi, mis à part la teneur en sulfates qui ne représente pas en soi un facteur d'exclusion pour les raisons mentionnées plus haut, nous insistons sur la qualité élevée des eaux souterraines de la haute Sarine. Ceci ne constitue pas en soi un hasard. En effet, les activités agricoles intensives y sont inexistantes et le réseau routier, bien que très fréquenté se trouve souvent loin de lieux de prélèvement d'eau. Nous pouvons aussi ajouter que les activités industrielles y sont minimes et de nature essentiellement artisanale, c'est-à-dire que l'on y a pas ou peu recours à des techniques potentiellement polluantes. Le cadastre cantonal des décharges nous a permis de constater qu'il n'y en a qu'une seule importante tout à l'aval de la zone aquifère à Dorfrütti. Nous relevons néanmoins la présence dans la partie avale du bassin de Grund une exploitation industrielle du bois dont les produits pour le traitement des troncs peuvent s'avérer dangereux pour la qualité des eaux souterraines. La présence d'alpages peut également être un facteur péjorant la qualité de ces dernières. Nous n'avons pas mis en évidence de telles pollutions durant notre thèse.

Le fait d'être située proche des parties les plus élevées du bassin versant confère généralement une grande sécurité à la ressource. En effet, on y rencontre en principe aucune activité industielle ou agricole dangereuse. En ce qui concerne les zones karstiques (Préalpes médianes rigides, Zone des Cols et Zone submédiane), nous contatons que bien qu'elles soient aujourd'hui peu menacées (très peu ou pas d'activité touristique ou agricole), il est nécessaire de considérer leur caractère extrêmement vulnérable dans une optique de développement durable de la région.

En résumé, l'eau souterraine de la nappe alluviale principale de la vallée de la haute Sarine ne pose pas de grands problèmes de qualité pour son utilisation en tant qu'eau de boisson. Les problèmes sont plutôt d'ordre technique pour le réseau de distribution d'eau sensible à la corrosion des sulfates ainsi que pour les ouvrages de génie civil ayant une prise importante dans la nappe (réaction possible avec le ciment). La présence de l'aérodrome de Saanen ne représente pas en soi un danger direct. Il y a néanmoins des possibilités d'accident et de largage d'hydrocarbures comme dans d'autres vallées alpines comme le Simmental ou la vallée de Conches en Valais. La présence du réseau de drainage permet malgré tout un confinement efficace pour une telle éventualité. Si les réserves de carburant contenues quand à elles dans des citernes blindées enfouies dans la zone aquifère de l'aérodrome venaient à être endommagée, il faudrait dans ce cas envisager des mesures plus importantes (OPEL Ordonnance sur la protection des eaux contre les liquides pouvant les altérer). Cette situation nous semble par ailleurs peu vraisemblable étant donné la situation actuelles.

8.7. TYPICITÉ DE LA HAUTE SARINE

Parallèlement à la caractérisation hydrogéologique globale de l'aquifère alluvial de la haute Sarine que nous avons considéré dans cette thèse, nous avons cherché à en déterminer les aspects typiques, représentatifs des aquifères alluviaux de haute altitude. Nous avons pour cela choisi une liste non exhaustive d'aquifères alpins auxquels nous avons attribué des notes afin de déterminer leur degré de parenté avec la plaine de la haute Sarine (fig. 8.6). Nous avons comparé les différents aspects particuliers de l'aquifères de la haute Sarine développés dans cette thèse comme les différents types d'alimentation ou la nature des activités anthropiques dans le bassin versant. Les résultats obtenus sont représentés dans l'annexe XV. L'attribution des notes s'est faite sur une base allant de 1 à 3. Lorsque le paramètre considéré est le plus proche, par exemple un total de précipitations annuelles moyennes identique, la note est de 3.

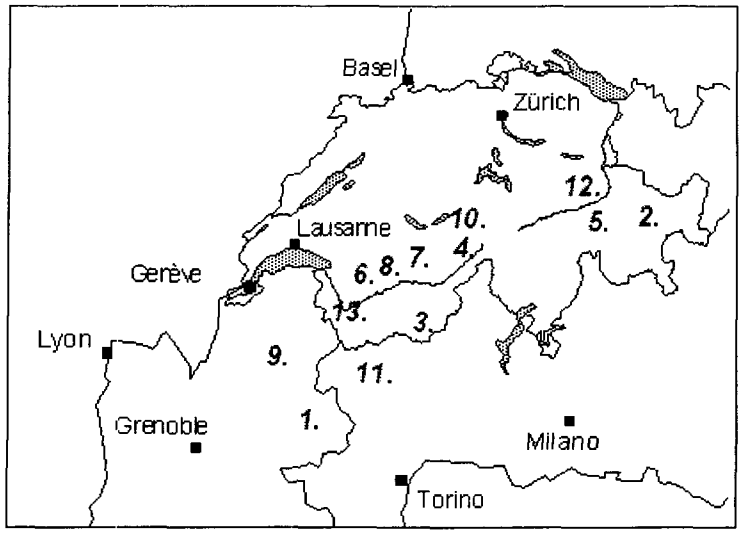


Figure 8.6: Situation des vallées alluviales alpines considérées dans notre comparaison. Pour la liste détaillée des points, voir le tableau 8.4 ci-dessous.

La note 1 indique qu'il n'y a qu'une faible ressemblance entre les deux bassins considérés. Nous avons ensuite calculé la différence de note entre les vallées considérées et celle de la haute Sarine afin de déterminer un degré de parenté résumés dans le tableau 8.4.

Vallée	Altitude moyenne de la plaine alluviale [msm]	Degré de parenté	
		[%]	|x|
Haute altitude (> 1000 msm)			
1. Vanoise (Isère)	1700	0.73	6
2. Engadine	1700	0.77	5
3. Mattertal (Täsch)	1400	0.77	5
4. Haut Rhône	1200	0.77	5
5. Valsertal	1200	0.86	3
6. Haute Sarine	***1100***	***1.00***	***0***
7. Kandertal	1100	0.82	4
8. Haute Simme	1000	1.00	0
Basse altitude (< 1000 msm)			
9. Savoie (Chéran)	700	0.82	4
10. Häslital	600	0.77	5
11. Aoste (Doire)	600	0.68	7
12. Rhin	500	0.55	10

Tableau 8.4: Résumé du degré de parenté entre différents aquifères alpins de haute et de basse altitude (voir AnnexeXV pour les détails).

Nous pouvons constater que la vallée voisine de la haute Simme est très semblable à la haute Sarine. C'est avant tout la géologie du bassin versant qui a influencé cette ressemblance (OEHE, 1999b). On constate aussi que la haute Sarine reflète le fonctionnement de nombreux autres aquifères alpins de haute altitude avec un fort degré de parenté si l'on exclu la présence des évaporites dans le bassin versant. Cette comparaison nous a ainsi permis de relever un certains nombre de critères typiques qui permettent une approche plus globale des aquifères alluviaux alpins et d'en définir les similitudes. Une conséquence directe de ces degrés de parenté est l'applicabilité d'un modèle de gestion à long terme des eaux souterraines semblable. Il s'agit bien sûr de s'adapter aux conditions locales, mais les principes fondamentaux restent les mêmes.

9. AMÉNAGEMENT ET GESTION DES EAUX SOUTERRAINES EN MILIEU ALPIN

9.1. CADRE GÉNÉRAL

On pourrait a priori se demander quel sens donner à l'aménagement et à la gestion des eaux souterraines dans un environnement encore peu industrialisé qui n'a jamais vraiment vécu de grande sécheresse et qui n'a jamais manqué d'eau. En réalité, l'aménagement des eaux et la gestion des ressources se place dans une politique de développement durable globale du milieu alpin en général. Nous avons montré dans cette thèse l'importance et l'imbrication des divers phénomènes responsables de l'alimentation de la nappe alluviale de la haute Sarine.

Les activités développées dans le milieu alpin ont conduit nombre de sociétés civiles ou privées à entrer en conflit pour l'utilisation de l'eau (Reynard, 2000). Certaines de ces querelles entraînèrent même plusieurs générations dans d'interminables luttes dont les habitants des vallées alpines gardent encore de chauds souvenirs (Bérard, 1982). Plus proche de nous, l'arrivée du tourisme dans les vallées a nécessité la mise en place de réseaux de distribution d'eau potable élaborés et capables de répondre aux besoins des hôtes et de leurs activités tout au long de l'année. Or les ressources en eaux ont toujours été exploitées et gérées au "fil de l'eau" pour ainsi dire, ce qui, étant donné les faibles quantités jusqu'alors nécessaires, ne s'était jamais heurté au grand paradoxe de ce genre d'exploitation. Il existe en effet une inadéquation importante entre l'offre et la demande en matière de ressources en eau (fig. 9.1).

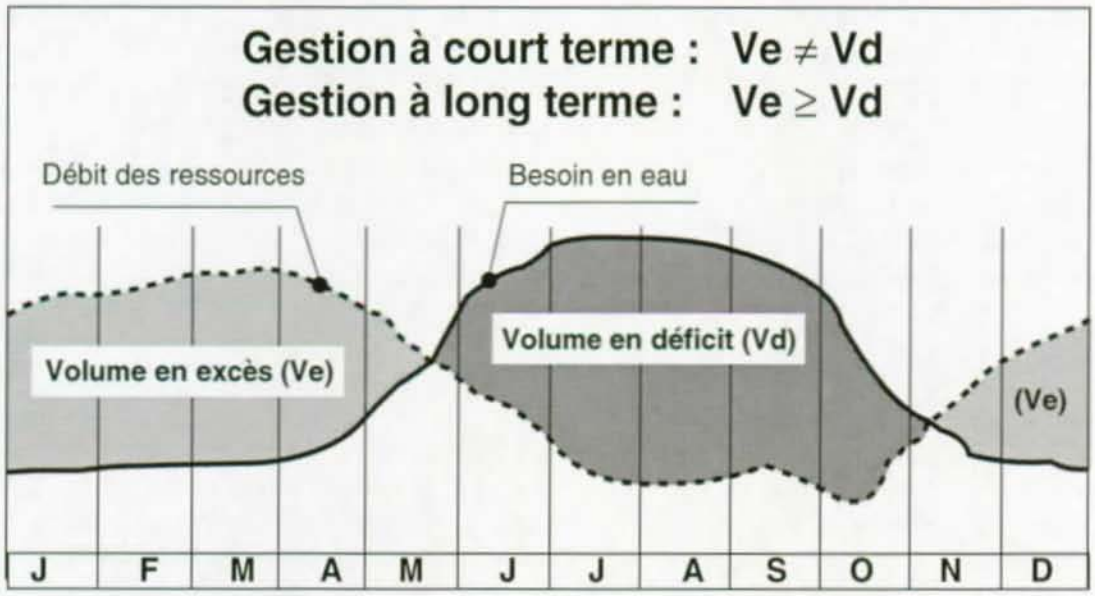


Figure 9.1: Inadéquation de l'exploitation gravitaire du régime naturel des eaux souterraines et de la demande au cours d'une année type d'après Parriaux et al. (2000)

Parallèlement à l'augmentation de la consommation existent de nombreuses possibilités de pollution des nappes. Dans le milieu alpin ce ne sont pas les pollutions dues aux cultures intensives qui sont critiques, mais des pollutions plus ponctuelles comme les stations d'épuration des eaux usées ou des alpages qui représentent un danger pour la qualité des eaux souterraines.

Ainsi, ce sont avant tout la protection et l'utilisation rationnelle des ressources (y c. l'optimisation de l'utilisation énergétique) qui déterminent le besoin d'un concept d'aménagement et de gestion à long terme des eaux souterraines en milieu alpin. La Suisse, comme de nombreux pays, possède un cadre légal qui permet à la Confédération et aux cantons de mettre en place, d'améliorer et d'adapter une structure de prospection et de gestion des aquifères alluviaux (OEaux, 1998; LEaux, 1991; LPE, 1983).

9.2. CONCEPT DE GESTION DES EAUX SOUTERRAINES EN MILIEU ALPIN

Le travail présenté dans cette thèse se rattache à un concept de gestion et d'aménagement des eaux souterraines mis au point par l'OEHE du canton de Berne afin de répondre au exigences imposées par la loi suisse qui veut que les bases scientifiques nécessaires soient produites par les autorités cantonales dans le but d'organiser la gestion des ressources en eaux souterraines (Art. 58 LEaux).

L'expérience du canton de Berne montre plusieurs aspects fondamentaux des études de base pour la gestion des eaux souterraines. En premier lieu, nous insistons sur le fait qu'il faut du temps pour réaliser de manière complète et optimale ce type de recherche. Le canton de Berne a mis environ 30 ans pour couvrir l'ensemble des vallées avec un potentiel hydrogéologique important. Il y a ensuite les aspects financiers, la facture globale des études commandées par l'OEHE s'élève à plus de 31 mio de francs. Ceci représente un investissement de l'ordre de 1 mio de francs par année. L'approche choisie par l'OEHE peut être qualifiée de "lourde" par rapport à des approches basées en grande partie sur des caractères géomorphologiques (Doerfliger et al., 1999; Gogu et Dassargues, 2000). Il apparaît malgré tout que la complexité des phénomènes étudiés ne soit vraiment mise en évidence que par une approche multidisciplinaire importante organisée en 3 phases que nous trouvons résumées dans la figure 9.2. Ce type d'approche par étapes, basées sur des sondages, des mesures géophysiques, géochimiques et différents types d'essais in situ, permet en outre de déterminer avec précision et d'une manière fiable les principales qualités d'une ressource et ses principales faiblesses.

9.2.1. LA PREMIÈRE PHASE : LES INVESTIGATIONS

Cette première phase est la plus lourde au sens technique du terme. En effet, comme nous l'avons montré dans cette thèse, la phase d'exploration nécessite la mise en oeuvre d'importantes ressources scientifiques et techniques soutenues par une logistique efficace. Nous avons vu comment l'application de la géophysique a permis de mettre en évidence les structures importantes des différents bassin aquifères dans la haute Sarine. D'une manière générale, l'utilisation des méthodes géophysiques représente un point de départ efficace et rentable en termes de résultats dans le cadre de la recherche d'eau. Les exemples d'application dans les Alpes sont encore plus nombreux et prometteurs (Hartmann, 1998; OEHE, 1998; Pugin et Wildi, 1999).

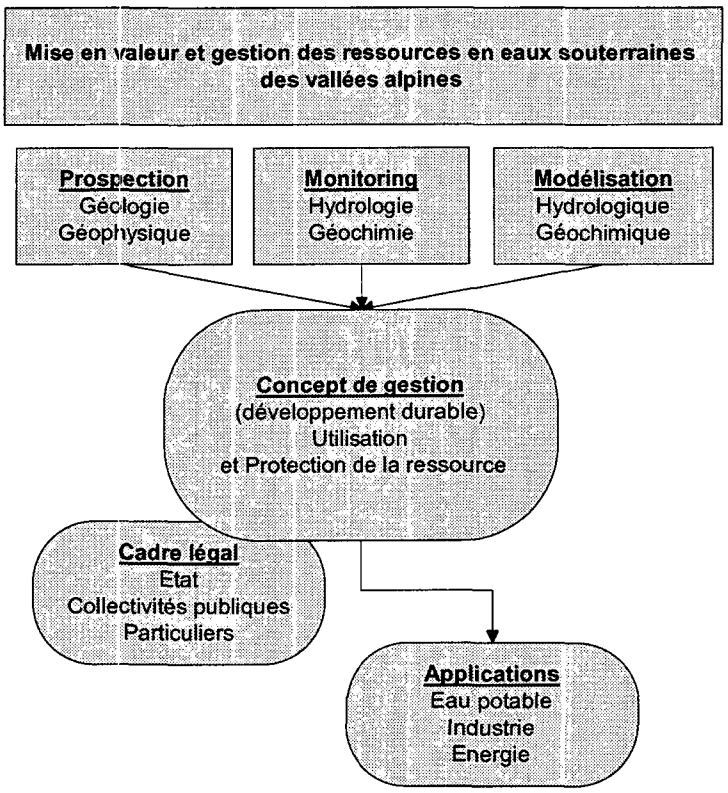


Figure 9.2: Principe d'aménagement en 3 phases des ressources en eaux souterraines en milieu alpin.

Un des buts de cette thèse est de montrer la spécificité des ressources en eau des aquifères alluviaux de haute et de moyenne montagne. La plupart des gisements d'eau souterraine actuellement exploités se situent à de altitudes bien inférieures aux 1000 msm de la plaine de la haute Sarine (WEA, 1999). Nous avons appliqué le concept de base de protection et de gestion des eaux souterraines type OEHE à l'aquifère de la haute Sarine et nous avons pu constater que les bases de cette approche globale permettaient une adaptation aux problèmes des milieux alpins.

9.2.2. LA DEUXIÈME PHASE : LE CONCEPT DE GESTION

IL s'agit d'appliquer un concept de gestion aux ressources en eau souterraines découvertes par les méthodes hydrogéologiques (s.l.). L'application d'une conception de protection et d'utilisation des eaux souterraines, en allemand (car c'est le terme "consacré" au niveau suisse !), le "Schutz- und Nutzungskonzept" (Blau et al., 1984), nous a permis d'élaborer une carte des zones d'utilisations de la nappe alluviale de la haute Sarine se basant à la fois sur des restriction (des réserves) au niveau de la qualité de l'eau et des restrictions sur la quantité potentiellement utilisable. L'utilisation du support cartographique offre l'avantage de pouvoir être intégré dans une base de données de type SIG à tout moment ce qui facilite par exemple l'accès aux données pour les privés et les collectivités publiques par le biais d'internet par exemple. L'accès aux données est en effet très important dans l'optique d'une politique de développement durable des ressources en eau et de leur utilisation.Nous avons appliqué le concept de gestion en 2 catégories définies par l'OEHE (fig. 9.3). Nous pouvons subdiviser l'aquifère de la haute Sarine de la manière suivante :

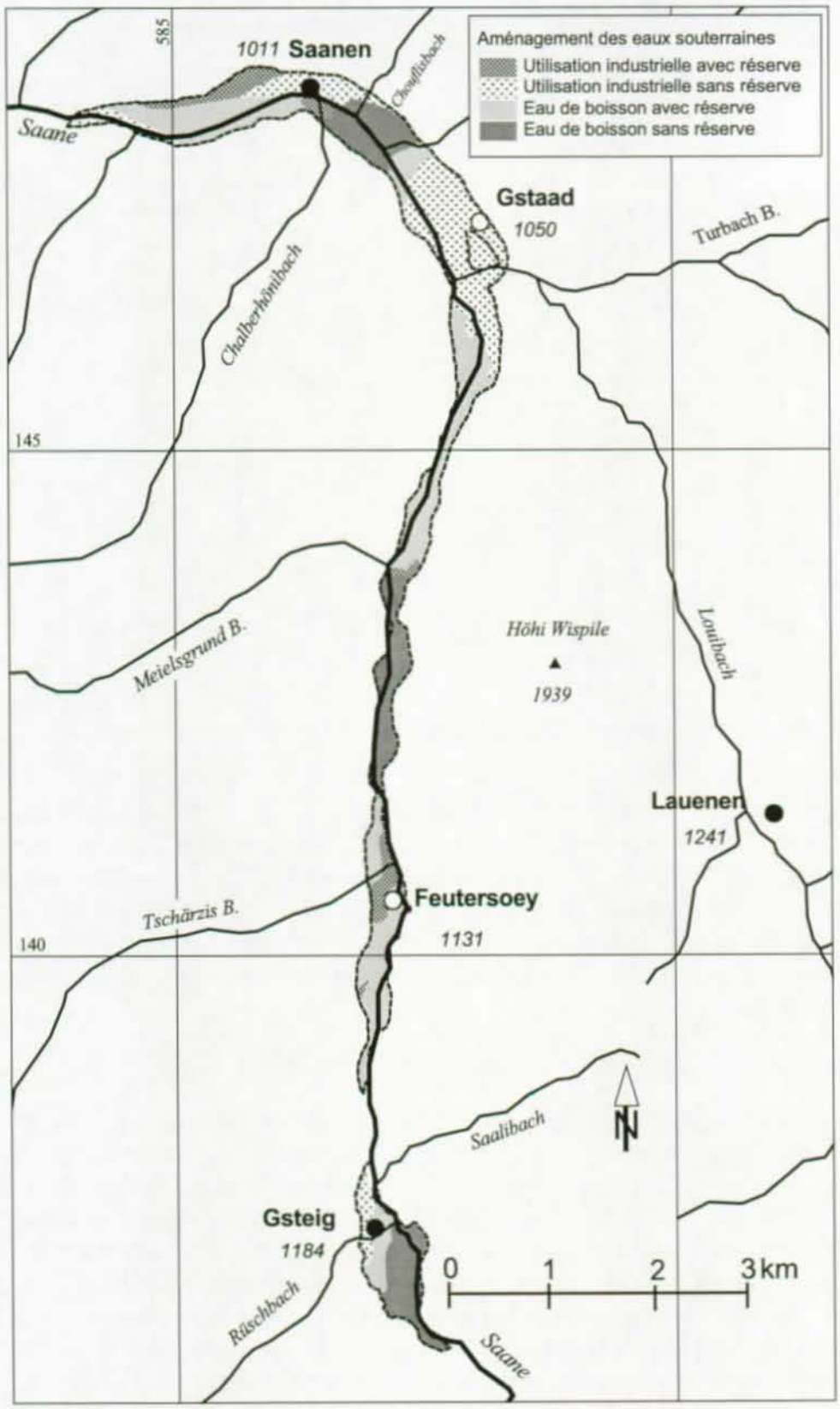


Figure 9.3: Concept d'utilisation des eaux souterraines de la haute Sarine.

Zones d'utilisation de la nappe pour eau de boisson

L'utilisation de l'eau souterraine pour l'alimentation d'un réseau public en eau potable est en principe idéale dans ces secteurs du point de vue de la qualité et de la quantité. En ce qui concerne l'aquifère de la haute Sarine, les hautes teneurs en sulfates dépassant la limite de qualité définie par l'OEaux étant d'origine géogène sans aucun doute, elles ne constituent par conséquent pas une facteur limitatif (LOEaux, annexe 1, ch. 22, al.2). Nous avons néanmoins tenu compte des teneurs les plus élevées en sulfates et les zones pour l'utilisation comme eau de boisson indiquées "sans réserve" correspondent aux secteurs où les concentrations en sulfates sont les plus basses. Pour les zones "avec réserve", il s'agit d'une part des secteurs à haute teneur en sulfates, comme les zones d'exutoires karstiques souterrains et d'autre part les secteurs où la qualité des eaux est potentiellement menacée par des accidents ou par les activités essentiellement industrielles (aval des zones à bâtir et industrielles). Du point de vue de la quantité, nous n'avons aucune réserve si ce n'est pour le petit bassin de Zälg-Bode au sud de Feutersoey où l'aquifère n'a pas été retenu comme très productif à cause de la présence du cône d'alluvions du torrent du Turbach qui a complètement obstrué la vallée à l'aval de cet endroit favorisant ainsi la mise en place de dépôts de type lacustres peu perméables.

Zones d'utilisation à caractère industriel

Nous appelons applications industrielle des eaux souterraines autant l'alimentation des entreprises nécessitant de l'eau pour leurs activités que les applications énergétiques de l'utilisation de la nappe comme l'utilisation des pompes à chaleur (PAC) de type doublet dont l'utilisation est assez répandue en Suisse. Les principales restrictions sont essentiellement dues aux complications techniques qu'entraînent les fortes teneurs en sulfates et la dureté de l'eau. Nous avons également tenu compte de la productivité des terrains car certaines applications industrielles doivent pouvoir disposer d'une grande quantité d'eau (pas forcément sur la durée, mais surtout lors des périodes de pompage).

9.2.3. LA TROISIÈME PHASE : L'UTILISATION

L'utilisation des ressources en eau souterraines en milieu alpin peut se faire sur plusieurs bases. En principe, il s'agit selon l'OEaux de 1998 d'utiliser en priorité le potentiel offert par les ressources renouvelables (OEaux, 1998; Freeze, 1979). C'est sur cette première base conservative que nous avons appliqué le concept d'utilisation des eaux souterraines de la vallée de la haute Sarine. Nous avons par ailleurs constaté que la définition des réserves renouvelables reste souvent quelque peu floue, en particulier dans la LEaux où elle est définie à l'art. 43 comme "la quantité d'eau qui l'alimente" (la nappe). Nous avons indentifié 4 types d'alimentation de la nappe : la rivière, les précipitations, les versants karstiques (spécificité de la haute Sarine) et les autres versants dont nous avons vu qu'il n'était pas aisé d'estimer les apports réels.

Comme dans la plupart des vallées alpines, l'utilisation actuelle de la nappe alluviale de la haute Sarine n'est pas importante. La station de pompage de Chäppeli construite dans les années 50 ne sert plus que dans les périodes d'extrême affluence. Les utilisations actuelles se font surtout sous la forme d'exploitation de chaleur au moyen de pompes à chaleur (doublet PAC).

Le tableau 9.1 offre un résumé de la situation actuelle. Les chiffres se passent de commentaire si l'on sait d'une part que l'eau utilisée à des fins énergétiques et économique est entièrement restituée à l'aquifère, c'est-à-dire que seuls les 80'000 m3/a de la station de pompage de Chäppeli sont véritablement retirés de la nappe.

Usage	Concession OEHE [l/min]	Débit effectif estimé/calculé [m3/a]
PAC	2'330	env. 120'000
Centre sportif	6'580	env. 300'000
Eau de boisson	1'500	80'000
Somme	10'410	env. 500'000

Tableau 9.1: Utilisation actuelle de la nappe. Il est important de relever le fait que seuls l'eau utilisée comme eau de boisson n'est pas restituée à l'aquifère.

Si nous comparons ces données avec le bilan des réserves calculé dans le chapitre 8, nous constatons qu'à ce rythme, ces dernières ont encore de beaux jours devant elles. En effet, la consommation actuelle représente 7 % des réserves renouvelables et 1.7 % de l'infiltration directe annuelle des précipitations. Nous sommes bien en-deça des critères de la LEaux.

9.3. LA MISE EN VALEUR À LONG TERME OU LA "QUATRIÈME PHASE"

C'est une phase que l'on pourrait qualifier d'approche "marketing" de la ressource. Nous considérons la nappe comme un bien que l'on peut mettre en valeur en tant que produit. Les ressources en eau de qualité forment un patrimoine public que les cantons gèrent. Dans l'optique du développement durable, les ressources en eau des vallées alpines représentent une sorte de bien stratégique. Si l'on compare la vallée de Lauenen où la commune de Saanen exploite un petit aquifère alluvial par le principe ingénieux et peu coûteux du siphon et que l'on imagine ce genre de système à une plus grande échelle, la position des vallées alpines situées à plus de 1'000 msm devient très intéressante.

La consommation actuelle des communes alpines ne requiert pas l'appel au techniques de "mining" de la ressource. Mais celles-ci sont tout à fait envisageables à l'échelle des cycles hydrologiques définis dans cette thèse étant donné les grandes quantités d'eau qui en définitive ne font que traverser le réservoir et filtre efficace naturel représenté par les plaines alluviales sans vraiment être exploitées. Si les prélèvements ont lieu dans les bassins "récepteurs" à l'amont d'un verrou comme celui de Saanen, il devient possible d'envisager une utilisation comme celle qui a lieu dans le cadre des aménagements hydroélectriques, c'est-à-dire à la demande. Les aquifères alpins offrent donc une ressource de qualité avec un grand degré de liberté dans leur utilisation.

Les modèles numériques de modélisation des écoulements représentent à ce titre un outil de gestion idéale. En effet, il devient possible d'intégrer de nombreux paramètres qui permettent de simuler, par exemple le concept de gestion mentionné ci-dessus. Les réseaux d'observation des cantons et de la confédération constituent pour leur part des points de contrôle efficaces afin de déterminer les évolutions à long terme.

Pour la vallée de la haute Sarine, les clients potentiels sont représentés déjà par les communes limitrophes ayant des problèmes d'approvisionnement en eau pendant les périodes d'affluence touristique. Nous sommes conscients du fait que de tels projets demandent des études complémentaires, en particulier sur les conséquences environnementales et une collaboration efficace entre les cantons et les communes.Les multiples plate-formes de travail interdisciplinaires existant en Suisse représentent les maillons de cette coordination. La mise en valeur des ressources en eaux souterraines de la haute Sarine, mais aussi des vallées semblables nécessite également une approche des problèmes liés aux changements climatiques. En effet, si à moyen terme les glaciers et les importantes chutes de neige constituent la garantie d'une alimentation directe et indirecte importante, il n'en sera pas de même si les conditions venaient à se détériorer et retourneraient en définitive la situation.

10. CONCLUSION

La mise en valeur des ressources naturelles représente un des aspects fondamentaux du développement durable. Les eaux souterraines font partie des matières premières des pays alpins tels que la Suisse. Dans un contexte de développement et de gestion de ces ressources, nous avons contribué à définir les caractéristiques typiques d'un aquifère alluvial alpin dont le siège est constitué par les sédiments fluvioglaciaires, glaciolacustres et fluviatiles qui ont comblé la vallée de la haute Sarine dans les Alpes Bernoises durant et après le dernier retrait glaciaire.

Cette thèse avait comme buts la compréhension du milieu et des phénomènes représentatifs et typiques des aquifère alluviaux alpins à l'exemple de la haute Sarine afin de définir une stratégie de gestion. Les résultats obtenus mettent en évidence une série d'interactions complexes à plusieurs niveaux. Le fonctionnement de cet aquifère dépend en grande partie des importantes quantités d'eau fournies durant la fonte des neiges. Il a de plus la particularité de se trouver dans un environnement géologique qui favorise l'alimentation de la nappe alluviale par le biais de réservoirs karstiques de types évaporitiques. La présence de ces roches dans le bassin versant marque tout le système hydrologique. Les très hautes concentrations en sulfates mesurées dans l'aquifère et dans la Sarine en période de basses eaux au début de l'automne et surtout en hiver sont caractéristiques de la région.

L'aquifère de la haute Sarine est à plus d'un titre représentatif de toute une série de ressources en eau souterraine semblables. Notre thèse en a démontré les aspects les plus typiques que l'on retrouve dans plusieurs autres vallées des Alpes.

En privilégiant une approche multidisciplinaire basée sur la mise en oeuvre de méthodes relativement complexes comme la modélisation numérique des écoulements souterrain, la sismique réflexion ou encore la représentation des données sous une forme de SIG, nous avons pu déterminer les paramètres principaux du fonctionnement de l'aquifère de la haute Sarine.

Ce type d'approche hydrogéologique globale représente une méthodologie applicable à tous les autres aquifères de haute montagne dont les ressources de qualité n'attendent que des travaux de prospection et des scénarios de gestion et d'exploitation ingénieux et peut-être quelque peu visionnaires. Il s'agit d'une méthodologie indispensable et efficace dans une optique de gestion visant à optimiser et à protéger les ressources en eaux souterraines alluviales dans une politique de développement durable des régions alpines.

Bibliographie

Ackermann, A. (1986). Le Flysch de la nappe du Niesen. *Eclogae geol. Helv.* **79,** 641-684.

Anderson, M. (1989). Hydrogeologic facies models to delineate large-scale spatial trends in glacial and glaciofluvial sediments. *Geol. Soc. of Am. Bull.* **101,** 501-511.

Anderson, M. et Woessner, W. (1992). Applied groundwater modelling. Academic Press Inc., London.

Aschwanden, H. et Kan, C. (1998). Table 5.8 : Etiages, éléments pour la détermination du débit Q347. *In* Atlas Hydologique de la Suisse. SHGN, Berne.

Badoux, H. (1963). Les unités ultrahelvétiques de la Zone des Cols. *Eclogae geol. Helv.* **56.**

Badoux, H. et Lombard, A. (1962). Notice explicative de la feuille 1266 Lenk. Atlas Géologique de la Suisse 1:25'000. Commission Géologique Suisse.

Balzari, S. A. (1991). Kleine Umfahrung Gstaad, Bericht zur Umweltverträglichkeit, Bern.

Banton, O., Bangoy, L., Chevalier, S., Houénou, P., Lafrance, P. et Rivard, C. (1997). Hydrogéologie, multiscience environnementale des eaux souterraines. Presses de l'Université du Québec.

Basabe, P. (1992). Typologie des eaux souterraines de la nappe tectonique du Niesen. Thèse EPFL No 1073.

Bassett, R. L. (1997). Chemical modelling on the bare rock or forested watershed scale. *In* Advances in Hydrological Processes. John Wiley and Sons, New York.

Bear, J. et Bachmat, Y. (1998). Introduction to modelling of transport phenomena in porous media. Kluwer Academic Publishers.

Bérard, C. (1982). Bataille pour l'eau, 500 ans de lutte sans trêve ni merci. Les éditions Monographic SA, Sierre.

Bieri, P. (1953). Grundwasserkarte des Kantons Bern, Thun.

Blau, R., Munchenberger, F., Trüeb, E. et Würsten, M. (1984). Quantitative Erkundung von Lockergesteins-Grundwasserleitern am Beispiel Emmental. *GWA : Gas, Wasser, Abwasser* **63,** 249-384.

Bodmer, P., Gunzenhauser, B.-F. et Manser, M. (1996). Quartärmächtigkeit der Hauptäler der Zentralschweiz. *Eclogae geol. Helv.* **1,** 37-53.

Bucher, B. (1999). Die Analyse von Grundwasserganglinien mit dem Wiener-Mehrkanal-Filter. *Grundwasser* **3,** 113-118.

Büker, F. (1998). Mapping the shallow subsurface using 2- and 3-D reflection seismic techniques. Diss. ETHZ Nr. 12671.

Büker, F., Green, A. et Horstmeyer, H. (1998). Shallow seismic reflection study of a glaciated valley. *Geophysics* **63,** 1395-1407.

Burga, C. et Perret, R. (1998). Vegetation und Klima der Schweiz seit dem jüngeren Eiszeitalter. Ott Verlag, Thun.

Campy, C. et Macaire, J. J. (1989). Géologie des formations superficielles, géodynamique, faciès, utilisation. Masson, Paris.

Caron, C. (1973). Survol géologique des Alpes occidentales. *Bull. soc. fri. sc. nat.* **62,** 73-81.

Castany, G. (1967). Traité pratique des eaux souterraines. Dunod, Paris.

Charollais, J. et Badoux, H. (1990). Suisse lémanique, pays de Genève et Chablais. Masson, Paris.

Chen, J. et Ohmura, A. (1990). On the influence of Alpine glaciers on runoff. *In* IAHS : Hydrology in Mountainous Regions. A. a. M. A. Lang, Ed., Lausanne.

Clark, I. et Fritz, P. (1997). Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers, New-York.

CSD, C. S. D. (1969). BE 1172 : ARA-Saanen, Bericht über die Baugrunduntersuchung, Bern.

CSD, C. S. D. (1983). BE 1330 : Grundwasserentnahme und -versickerung für Wärmepumpenbetrieb. Gemeinde Saanen, Bern.

Dassargues, A. (1997). Modelling Baseflow from an Alluvial Aquifer Using Hydraulic Conductivity Data Obtained from a Derived Relation with Apparent Electrical Resistivity. *Hydrogeology Journal* **5,** 97-108.

Dematteis, A., Hesske, S., Parriaux, A. et Tacher, L. (1996). Table 8.4 : Principaux types d'aquifères. *In* Atlas Hydrologique de la Suisse. SHGN, Berne.

Diersch, H.-J. (1998). FEFLOW, Finite Element subsurface Flow system : Reference manual. WASY, Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd.

Doerfliger, N., Zwahlen, F., Meylan, B., Tripet, J.-P. et Wildberger, A. (1999). Die Vulnerabilität von Grundwasserfassungen in Karstgebierten -Multikriterien-Methode EPIK - Eine neue Methode zur Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen. *GWA : Gas, Wasser, Abwasser* **7,** 585-592.

Dray, M. (1993). Les terrasses de Thonon : aspects géologiques de la déglaciation würmienne et intérêt hydrogéologique. *Quaternaire* **4,** 77-82.

Drewry, D. (1986). Glacial geologic processes. Arnold, London.

Etcheverry, D. et Parriaux, A. (1998). Les méthodes isotopiques dans la pratique de l'hydrogéologie. *GWA : Gas, Wasser, Abwasser* **1,** 10-17.

Etcheverry, D., Parriaux, A. et Vaudan, J. (in prep.). Table 6.2 : Isotopes. *In* Atlas Hydrologique de la Suisse. SHGN, Berne.

Flück, W. (1973). Die Flysche der präalpinen Decken im Simmental und Saanenland. Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz. Schweizerischen Geologischen Kommission, Bern.

Fountain, A. G. (1998). Effect of snow and firn hydrology on the physical and chemical characteristics of glacial runoff. *In* Advances in hydrological processes. John Wiley and Sons, New York.

Freeze, R. A. et Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice-Hall Inc. New Jersey.

Fürst, J., Nachtnebel, H. P. et Reichel, G. (1990). Multi-cell model for modelling and managing aquifers in narrow alpine valleys. *In* Water resources in mountainous regions. AIH, Ed., Lausanne.

Gat, J. et Rietti-Shati, M. (1999). The meteorological vs. the hydrological altitude effect on the isotopic composition of meteoric waters. *In* Isotopes techniques in water resources development and management. IAEA, Ed., Vienna.

Gibson, J. J. et Prowse, T. D. (1999). Isotopic characteristics of ice cover in a large northern river basin. *Hydrological processes* **13,** 2537-2548.

Gogu, R. C. et Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology* **39,** 549-559.

Hannah, D., B., S., Gurnell, A. et G., M. (2000). An approach to hydrograph classification. *Hydrological processes* **14,** 317-338.

Hantke, R. (1972). Spätwürmzeitliche Gletscherstände in den Romanischen Voralpen (Westschweiz). *Eclogae geol. Helv.* **65,** 279-291.

Hantke, R. (1980). Eiszeitalter. Die jüngste Erdgeschichte der Schweiz und ihrer Nachbargebiete. OTT Verlag Thun.

Hartmann, P. (1998). Mineralwasservorkommen im nördlichen Bündnerschiefergebiet mit Schwerpunkt Walsertal. Diss. ETH Nr. 12632.

Hölting, B. (1992). Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie 4. Auflage. Enke Verlag, Stuttgart.

Hürliman, A., Besson, A. et Masson, H. (1996). Stratigraphie et tectonique de la partie orientale de l'écaille de la Gummfluh. Mémoires de Géologie de l'Université de Lausanne vol. 28.

Iorgulescu, I. (1997). Analyse du comportement hydrologique par une approche intégrée à l'échelle du bassin versant application au bassin versant de la Haute Mentue. Thèse EPFL No 1613.

Jäckli, H. (1970). Kriterien zur Klassifikation von Grundwasservorkommen. *Eclogae geol. Helv.* **63,** 389-434.

Kellerhals, P. et Haefeli, C. (1990). Schutzzonenausscheidung Gemeinde Gsteig, Bern.

Kinzelbach, W. (1995). Grundwassermodellierung. Gebr. Bornträger, Stuttgart.

Kirchhofer, W. et Sevruk, B. (1991). Table 1.2 : Hauteurs annuelles moyennes corrigées des précipitations. *In* Atlas Hydrologique de la Suisse. SHGN, Berne.

Kissling, O. (1941). Flugplatz Saanen, Detailentwässerung : Situation 1:1000, Bern.

Kissling, Z. I. A. (1964). Projekt VIII für die Verbauung der Saane in Saanen. Kanton Bern, Oberingenieur Kreis I, Bern.

Kissling, Z. I. A. (1984). Projekt II für die Verbauung der Saane, Kanton Bern, Oberingenieur Kreis I, Bern.

Kuhlmann, U., Jordan, P. et Trösch, J. (2000). Zuströmbereiche von Grundwasserentnahmen. *GWA : Gas, Wasser, Abwasser* **4,** 278-286.

Küttel, M. (1979). Pollenanalytische Untersuchungen zur Vegtationsgeschichte und zum Gletscherrückzug in den westlichen Schweizer Alpen. *Ber. Schweiz. Bot. Ges.* **89,** 9-62.

Lang, A., Moya, J., Corominas, J., Schrott, L. et Dikau, R. (1999). Classic and new dating methods for assessing the temporal occurence of mass movements. *Geomorphology* **30,** 33-52.

Looser, M.-O., De Coulon, S., Maréchal, J.-C., Dematteis, A. et Hesske, S. (1995). Apport des traces minérales dans la typologie des eaux souterraines : le projet AQUITYP. *In* 2ème rencontre internationale des jeunes chercheurs en géologie appliquée. (P. d. Torino, Ed.), Peveragno, Italia.

Luder, B. (1996). Digitale Messverfassung in Hydrologie. *GWA : Gas, Wasser, Abwasser* **5,** 387-392.

Mac Donald, A., Burleigh, J. et Burgess, W. (1999). Estimating transmisivity from surface resistivity soundings : an example from the Thames Gravels. *Quarterly Journal of Engineering Geology* **32,** 199-205.

Maisch, M. (1981). Glazialmorphologische und gletschergeschichtliche Untersuchungen im Gebiet zwischen Landwasser- und Albulatal. *Physische Geographie* **3**.

Maisch, M. (1982). Zur Gletscher- und Klimageschichte des alpinen Spätglazials. *Geographica Helvetica* **2,** 93-104.

Maisch, M. (1992). Die Gletscher Graubündens. *Physische Geographie* **33**.

Mandia, Y. (1991). Typologie des aquifères évaporitiques du Trias dans le bassin lémanique du Rhône (Aples occidentales). Thèse EPFL No 948.

Maréchal, J.-C. (1998). Les circulations d'eau dans les massifs cristallins alpins et leurs relations avec les ouvrages souterrains. Thèse EPFL No 1769.

Margot, A., Schädler, B., Sigg, R. et R., W. (1991). Table 5.3 : Influence sur les cours d'eau des aménagements hydro-électriques. *In* Atlas Hydrologique de la Suisse. SHGN, Berne.

Mari, J.-L., Arens, G., Chapellier, D. et Gaudiani, P. (1998). Géophysique de gisement et de génie civil. Edition Technip, Paris.

Mari, J.-L., Glangeaud, F. et Coppens, F. (1997). Traitement du signal pour géologues et géophysiciens. Edition Technip, Paris.

Martinec, J. (1976). Snow and Ice. *Mitteilungen des Eidgenössischen Institutes für Schnee- und Lawinenforschung* **31**.

Masson, H. (1976). Un siècle de géologie des Préalpes : de la découverte des nappes à la recherche de leur dynamique. *Eclogae geol. Helv.* **69,** 527-575.

Mattess, G. (1994). Die Beschaffenheit des Grundwassers 3. Auflage. Lehrbuch der Hydrogeologie Band 2. Gebrüder Bornträger, Berlin.

Mauerhofer, D. (1980). Hydrologische Untersuchungen im Saanenland. Diss. Universität Bern.

Mazor, E. (1991). Applied chemical and isotopic goundwater hydrology. Open University Press, Buckingham.

Mazor, E. (1997). Chemical and isotopic groundwater hydrology : the applied approach. Mercel Dekker, Inc. New-York.

Menzel, L., Lang, H. et Rohman, M. (1989). Table 2.1 : Evaporation réelle annuelle moyenne 1973-1992. *In* Atlas Hydrologique de la Suisse.

Meyer de Stadelhofen, C. (1991). Applications de la géophysique aux recherches d'eau. Lavoisier, Paris.

Monachon, C. (1978). Essai de reconstruction des stades glaciaires de la haute Sarine entre la crête des hautes alpes calcaires et Gstaad. Mémoire de Licence Université de Lausanne.

Mosar, J. et Borel, G. (1992). Paleostress from the Préalpes Médianes (Switzerland). *Annales Tectonicae* **VI,** 115-133.

Mosar, J. et Borel, G. (1995). Préalpes geology: A non-exhaustive reference list. Dept. Geology, Lausanne University. Ressource internet http://www-sst.unil.ch/research/prealps/REFPAPER.htm.

Mosar, J., Stampfli, G. et F., G. (1996). Western Préalpes Médianes Romandes : Timing and structure A review. *Eclogae geol. Helv.* **89,** 389-425.

Moser, H. et Rauert, W. (1980). Isotopenmethoden in der Hydrologie. Lehrbuch der Hydrogeologie Band 8. Gebrüder Bornträger, Berlin.

Nicoud, G., Coddet, E., Blavoux, B. et Dray, M. (1993). Les complexes détritiques de marge glaciaire active dans le bas Chablais (Bassin Lémanique, France), Implications hydrogéologiques. *Quaternaire* **4,** 69-76.

Nicoud, G., De Los Cobos, G., Fudral, S., Dray, M., Pollicini, F., Parriaux, A., Zuppi, A., Bonetto, F., Paillet, A., Olive, P. et Puig, J.-M. (1999). Les étapes du comblement alluvial de la plaine d'Aoste (Italie) : une dynamique lacustre complexe. *Eclogae geol. Helv.* **92,** 139-147.

Nicoud, G. et Maillet-Guy, G. (1990). L'hydrogéologie des vallées glaciaires alpines à partir de l'exemple du bassin Chambérien. *In* Water resources in mountainous regions. IAH, Ed., Lausanne.

Nicoud, G., Monjuvent, G. et Maillet-Guy, G. (1987). Contrôle du comblement quaternaire des vallées alpines du Nord par la dynamique lacustre. *Géologie Alpine, Mém. h.s.* **13,** 457-467.

Novel, J.-P. (1995). Contribution de la géochimie à l'étude d'un aquifère alluvial de montagne. Thèse Université Paris 6.

Nussbaum, F. (1906). Die Eiszeitliche Vergletscherung des Saanegebietes. Diss. Universität Bern.

OEHE (1983). Hydrogeologie Emmental Teil IV. Office de l'Economie hydraulique et énergétique du Canton de Berne, Berne.

OEHE (1989). Seeland : Infiltration aus Hagneckkanal und Alter Aare. Office de l'Economie hydraulique et énergétique du Canton de Berne, Berne.

OEHE (1994a). Annuaire hydrographique. Office de l'Economie hydraulique et énergétique du Canton de Berne, Berne.

OEHE (1994b). Hydrogeologie Haslital. Office de l'Economie hydraulique et énergétique du Canton de Berne, Berne.

OEHE (1998). Prospection d'eau souterraine par forages profonds dans le vallon de St-Imier. Office de l'Economie hydraulique et énergétique du Canton de Berne, Berne.

OEHE (1999). Nutzungs- Schutz- und Ueberwachungskonzept für den Grundwasserleiter des Seelands : Synthtesebericht. Office de l'Economie hydraulique et énergétique du Canton de Berne, Berne.

OEHE (1999a). Hydrogeologie Oberes Saanetal. Office de l'Economie hydraulique et énergétique du Canton de Berne, Berne.

OEHE (1999b). Hydrogeologie Oberes Simmental. Office de l'Economie hydraulique et énergétique du Canton de Berne, Berne.

OFAEM, O. F. d. A. M. (1994). Militärflugplatz Saanen. *Info* **4.**

OFT, O. F. d. T. (1998). DHM25 Matrixmodelle Karten Nr 1245, 1246 und 1266, Auftrag Nr. 3310-98037.

Parriaux, A. (1981). Contribution à l'étude des ressources en eau du bassin de la Broye. Thèse EPFL No 393.

Parriaux, A. (1999). Cours EPFL : Gestion des eaux souterraines. Non publié.

Parriaux, A. et Bensimon, M. (1990). Some rules for the design and the management of observation networks for groundwater resources. *In* Water resources in mountainous regions. (AH, Ed., Lausanne.

Parriaux, A., Dubois, J. D., Mandia, Y., Basabe, P. et Bensimon, M. (1990a). The AQUITYP Project : towards an aquifer typology in the Alpine Orogen. *In* Water resources in mountainous regions. AIH, Ed., Lausanne.

Parriaux, A., Mandia, Y. et Dubois, J. D. (1990b). The concept of protection zones in karstic mountains. *In* Water resources in mountainous regions. AIH, Ed., Lausanne.

Parriaux, A. et Nicoud, G. (1993). Les formations glaciaires et l'eau souterraine. *Quaternaire* **4,** 61-67.

Pearson, F., Balderer, W., Loosli, H., Lehman, B., Matter, A., Peters, T., Schmassmann, H. et Gautschi, A. (1991). Applied istope hydrogeology : a case study in northern Switzerland. NAGRA Technical Report 88-01, Baden.

Plancherel, R. (1979). Aspects de la déformation en grand dans les préalpes médianes plastiques entre le Rhône et l'Aar. *Eclogae geol. Helv.* **72,** 145-214.

Primault, B. (1972). Etude meso climatique du canton de Vaud 1:200 000 & 1:500 000. Office Cantonal Vaudois de l'Urbanisme, Lausanne.

Pugin, A. (1989). Analyse sédimentologique des depôts du glacier du Rhône sur le Plateau Suisse. Thèse Université de Genève.

Pugin, A., Marchant, R., Besson, O. et Stampfli, G. (1997). Seismic modeling of lines Martigny and Vetroz (p. 272-275). Birkhäuser Verlag, Basel.

Pugin, A. et Pullan, S. E. (1998). Statics applied to shallow seismic reflection data. *In* Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP). R. S. Bell, Powers, M. H. and Larson, T., Ed.. Environmental and Engineering Geophysical Society, Chicago, IL.

Pugin, A. et Wildi, W. (1999). Structures des aquifères profonds des vallées alpines, une ressource en eau potable ou géothermale ? Exemple de la vallée du Rhône. *In* Nachhaltige Nutzung geologischer Ressourcen. SANW, Ed., SANW Jahresversammlung Luzern.

Reynard, E. (2000). Cadre institutionnel et gestion des ressources en eau dans les Alpes : deux études de cas dans des stations touristiques valaisannes. *Swiss Political Science Review* **6,** 53-85.

Richards, K., Sharp, M., Arnold, N., Gurnell, A., Clark, M., Tranter, M., Nienow, P., Brown, G., Willis, I. et Lawson, W. (1998). An integrated approach to modelling hydrology and water quality in glacierized catchments. *In* Advances in hydrological processes. John Wiley and Sons, New York.

Schaffter, N. (1999). Impact de l'exploitation des alpages sur la qualité des eaux. Thèse EPFL No 2038.

Schoeneich, P. (1998). Le retrait glaciaire dans les vallées des Ormonts, de l'Hongrin et de l'Etivaz (Préalpes vaudoises). Travaux et recherches, IGUL, Institut de géographie Université de Lausanne.

Schoeneich, P. et Imfeld, P. (1997). Un karst dans les conglomérats du flysch de la nappe du Niesen (Chaîne du Pic Chaussy, Préalpes vaudoises). Rapports et recherches n° 8, Institut de Géographie de l'Université de Lausanne.

Schotterer, U., Stocker, T., Hunziker, J., Buttet, P. et Tripet, J.-P. (1995). Isotope im Wasserkreislauf. Ein neues eidgenössisches Messnetz. *GWA : Gas, Wasser, Abwasser* **1,** 714-720.

Sigg, L., Stumm, W. et Behra, P. (1992). Chimie des milieux aquatiques. Masson, Paris.

Signer, C.-J. (1996). Géométrie sédimentaire des bassins glaciaires péri-alpins (Quaternaire-Suisse). Etude par sismique réflexion haute résolution. Thèse Université de Genève.

Singh, P., Huebl, H. et Weinmeister, H. W. (2000). Use of the recession characteristics of snowmelt hydrographs in the assesment of snow water storage in a basin. *Hydrological processes* **14,** 91-101.

Stampfli, G., Marcoux, J. et Baud, A. (1991). Tethyan margins in space and time. *Paleogeogr., paleoclimat., paleoecol.* **87,** 373-409.

Stumm, W. et Morgan, J. J. (1996). Aquatic chemistry. John Wiley and Sons, New York.

Sueker, J., Ryan, J., Kendall, C. et Jarrett, D. (2000). Determination of hydrologic pathways during snowmelt for alpine/subalpine basins, Rocky Mountain National Park, Colorado. *Water resources research* **36,** 63-75.

Szilagyi, J. (1999). On the use of semi-logarithmic plots for baseflow separation. *Groundwater* **37,** 660-662.

Telford, W. M., Geldart, L. P. et Sheriff, R. E. (1990). Applied geophysics. Cambridge University Press, Cambridge.

Thierrin, J. (1990). Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg Suisse occidentale. Thèse CHYN, Université de Neuchâtel.

Tissières, P. (1990). Etude sédimentologique et géotechnique des dépôts deltaïques de Granges-Près-Marnand. Thèse EPFL No 818.

Trümpy, R. (1980). An Outline of the Geology of Switzerland. Wepf&Co., Basel.

Ulrych, T., Sacchi, M. et Graul, M. (1999). Signal and noise separation : Art and science. *Geophysics* **64,** 1648-1656.

Vitvar, T. (1998). Water residence times and runoff generation in a small prealpine catchment. Zürcher Geographische Schriften 71. Geographisches Institut ETHZ.

WEA. (1999). Grundwasser-Bilanzierung : Lockergesteinsübersichstkarte des Kantons Bern. Wasser- und Energiewirtschaftsamts des Kantons Bern.

Weidmann, M., Homewood, P., Caron, C. et Baud, A. (1976). Réhabilitation de la Zone Submédiane des Préalpes. *Eclogae geol. Helv.* **69,** 265-277.

Weingartner, R. (1990). Application of the unit hydrograph model to swiss catchments. *In* IAHS : Hydrology in mountainous regions A. a. M. A. Lang, Ed., Lausanne.

Weingartner, R. et Aschwanden, H. (1989). Table 5.2 : Régimes d'écoulement. *In* Atlas Hydrologique de la Suisse. SHGN, Berne.

Welten, M. (1982). Vegetationsgeschichtliche Untersuchungen in den westlichen Schweizer Alpen: Bern Wallis Birkhäuser, Basel.

Welten, M. et Schlüchter, C. (1988). Neue pollenanalytische Ergebnisse über das Jüngere Quartär des nördlichen Alpenvorlandes der Schweiz (Mittel und Jungpleistozän). Landeshydrologie und geologie, Bern.

West, R. G. (1977). Pleistocene Geology and Biology. Longman Group Limited.

Weyer, K. U. (1972). Ermittlung der Grundwassermengen in den Festgesteinen der Mittelgebirge aus den Messungen des Trockenwetterabflusses. Inaugural Dissertation der Math.Natw. Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn, Deutschland.

Wicht, J.-M. (1984). Le Flysch de la nappe de la Simme dans les Préalpes romandes. Thèse université de Fribourg No 877.

Yilmaz, O. (1987). Seismic data processing. Society of Exploration Geophysicists.

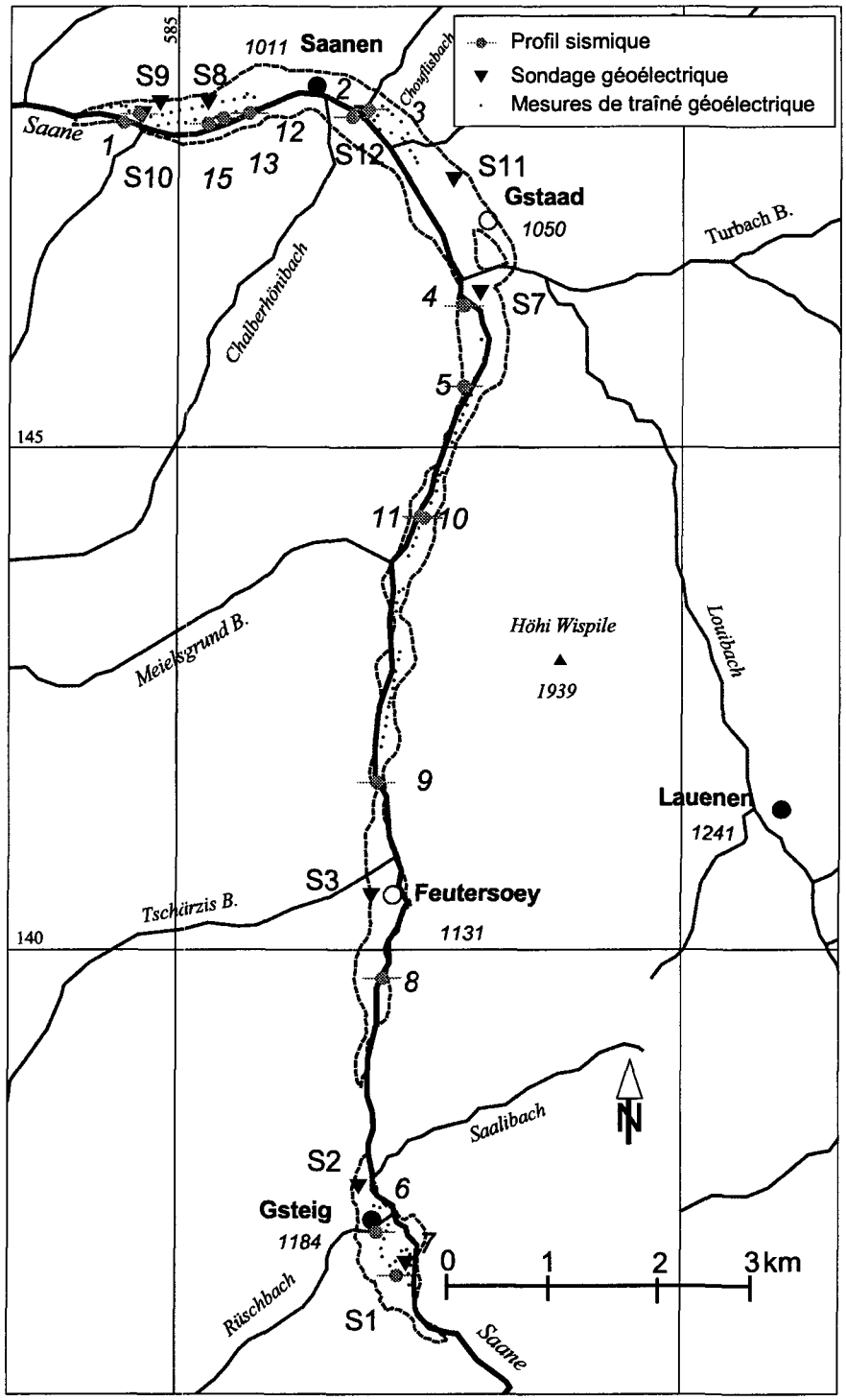
Annexes

Annexe I : Archive des sondages mécaniques

Code	Description	x	y	No OEHE	Rapport	K [m/s]
KB1	ARA	584050	148280	584.148/8	CSD	2,30E-03
KB2	ARA	583980	148250	583.148/1	CSD	2,30E-03
KB3	ARA	584050	148240	584.148/7	CSD	2,30E-03
KB4	KVA	584780	148440	584.148/1	GTI	-
KB5	KVA	584810	148420	584.148/3	GTI	-
KB6	KVA	584830	148450	584.148/4	GTI	-
KB7	KVA	584880	148460	584.148/5	GTI	-
KB8	KVA	584920	148450	584.148/6	GTI	-
KB9	KVA	585010	148460	585.148/2	GTI	-
KB10	KVA	585130	148470	585.148/3	GTI	-
KB11	KVA	584800	148450	584.148/2	GTI	-
FB3	WVSaanen	586823	148328	586.148/3	inconnu	2,50E-03
FB4	Mettlen	587305	147476	587.147/5	CSD	-
KB12	Saanen	586550	148560	586.148/1	GTI	-
KB13	Saanen	586350	148650	586.148/10	GTI	-
KB14	Saanen	586335	148625	586.148/11	GTI	-
KB15	UMFAHRg	587920	147150	n.i.	CSD	-
KB16	UMFAHRg	587880	146900	n.i.	CSD	1,00E-04
KB17	UMFAHRg	587940	146820	n.i.	CSD	-
KB18	UMFAHRg	587810	146940	n.i.	CSD	-
KB19	UMFAHRg	587940	147030	n.i.	CSD	8,00E-04
KB20	UMFAHRg	587910	147250	n.i.	CSD	-
KB21	UMFAHRg	587980	146770	n.i.	CSD	-
KB22	UMFAHRg	587900	147200	587.147/7	CSD	-
FB10	HALLENBAD	587880	146505	587.146/2	CSD	3,00E-04
FB11	HALLENBAD	587883	146494	587.146/1	CSD	3,00E-04
KB23	HALLENBAD	588060	146615	588.146/1	CSD	1,00E-03
KB24	HALLENBAD	587925	146665	588.146/3	CSD	6,00E-03
KB25	Migros	588009	147445	n.i.	CSD	3,00E-04
KB26	Migros	588057	147472	n.i.	CSD	-
KB27	Erdsonde	587960	146740	587.146/8	Morat AG, DE	-
KB28	COOP	588070	147250	588.147/8	CSD	-
KB29	COOP	588025	147220	588.147/5	CSD	-
KB30	BhfGstaad	588210	147005	588.147/4	Dicht AG	-
FB6	Eisbahn	588122	147125	588.147/10	GTI	7,50E-05
FB7	Eisbahn	588141	147236	588.147/11	GTI	1,20E-04
FB8	Eisbahn	588170	147200	588.147/9	GTI	3,50E-05
FB9	Eisbahn	588110	147215	588.147/15	GTI	1,30E-04
FB12	Hôtel	588160	146320	588.146/6	CSD	
FB13	Hôtel	588050	146345	588.146/7	CSD	

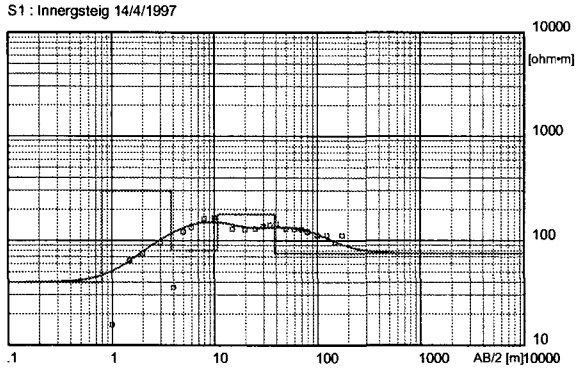
Annexe II : Sondages géoélectriques

Carte de situation des sondages et des traînés géoélectriques ainsi que des emplacements des profils sismiques. Les données de terrains sont disponibles au GEOLEP.



Electrical sounding Schlumberger - Saanen1.WS3

S1 : Innergsteig 14/4/1997



Location X = 587300 Y = 136880 Z = 1180 Azim = EO

Model Resistivity [ohm•m]	Thickness [m]	Depth [m]	Altitude [m]
40	.8		1180
300	3	.8	1179.2
80	7	3.8	1176.2
180	28	11	1169
75		39	1141

Electrical sounding Schlumberger - Saanen1.WS3

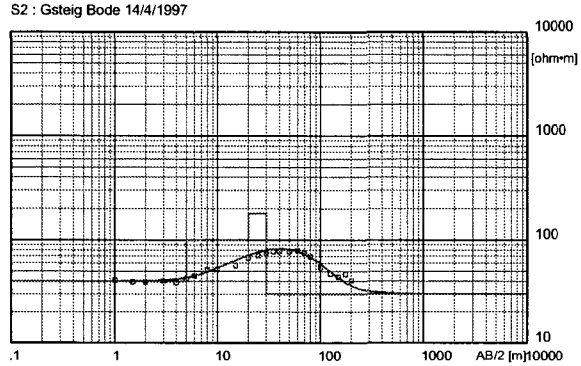
S1 : Haute Sarine 14/4/1997

Field data and calculated values

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm•m]
.5	1	930	140	2.35	15.61
.5	1.5	460	45	6.28	64.2
.5	2	260	41	11.78	74.7
.5	3	110	32	27.48	94.5
.5	4	26	36	49.48	35.7
.5	5	55	35	77.75	122.2
2	6	165	31	25.13	134
2	8	110	32	47.12	162
2	10	34	15.5	75.39	165
2	15	57	76	174	130
4	20	50	59	151	128
4	25	60	110	239	130
4	30	69	175	347	137
4	35	19	64	475	141
4	40	18	78	622	144
5	50	17	102	778	130
5	60	12	105	1123	128
5	70	10	120	1532	128
7.5	80	11	120	1329	122
7.5	100	7	130	2083	112
10	125	9	195	2439	113
10	150	5.3	195	3519	96
10	175	3.5	150	4795	111.9

Electrical sounding Schlumberger - Saanen2.WS3

S2 : Gsteig Bode 14/4/1997



Location X = 586830 Y = 137650 Z = 1160 Azim = NS

Model Resistivity [ohm•m]	Thickness [m]	Depth [m]	Altitude [m]
40	5		1160
100	15	5	1155
180	10	20	1140
30		30	1130

Electrical sounding Schlumberger - Saanen2.WS3

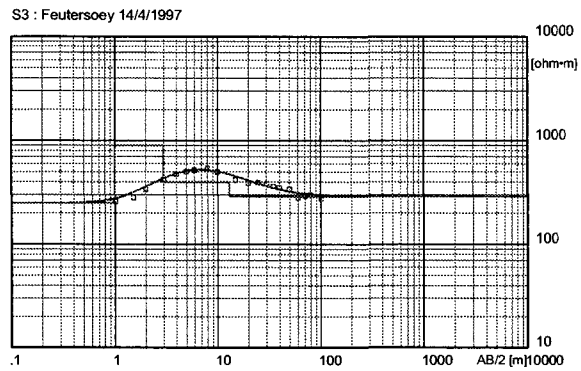
S2 : Haute Sarine 14/4/1997

Field data and calculated values

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm•m]
.5	1	680	39	2.35	40.97
.5	1.5	220	35	6.28	39.5
.5	2	140	42	11.78	39.3
.5	3	59	40	27.48	40.5
.5	4	86	110	49.48	38.7
.5	5	58	107	77.75	42.1
2	6	180	100	25.13	45.2
2	8	110	100	47.12	51.8
2	10	65	95	75.39	51.6
2	15	31	95	174	56.8
2	20	41	190	311	67.1
4	25	67	228	239	70.2
4	30	48	220	347	75.7
4	35	31	190	475	77.5
4	40	24.5	195	622	78.1
5	50	22	220	778	77.8
5	60	7	100	1123	78.6
5	70	11	225	1532	74.9
7.5	80	11	212	1329	69
7.5	100	4.6	175	2083	54.8
10	125	3.1	160	2439	47.3
10	150	4	320	3519	44
10	175	1.8	185	4795	46.7
10	200	2.6	400	6267	40.7

Electrical sounding Schlumberger - Saanen3.WS3

S3 : Feutersoey 14/4/1997



Location X = 586950 Y = 140550 Z = 1145 Azim = NS

Model Resistivity [ohm•m]	Thickness [m]	Depth [m]	Altitude [m]
250	1		1145
900	2	1	1144
400	10	3	1142
290		13	1132

Electrical sounding Schlumberger - Saanen3.WS3

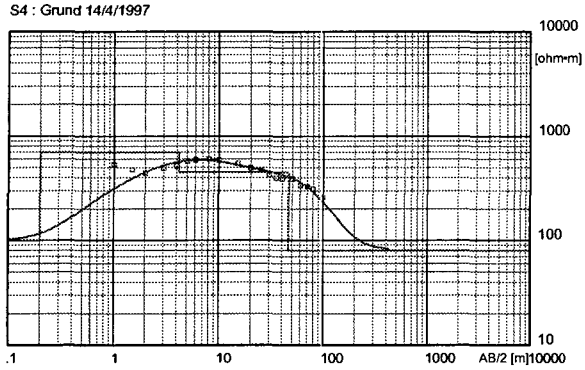
S3 : Haute Sarine 14/4/1997

Field data and calculated values

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm•m]
.5	1	610	5.5	2.35	260.64
.5	1.5	260	5.8	6.28	282
.5	2	145	5.1	11.78	335
.5	3	79	5.2	27.48	417
.5	4	54	5.6	49.48	477
.5	5	33	5.1	77.75	503
2	6	105	5.1	25.13	517
2	8	49	4.3	47.12	537
2	10	29	4.4	75.39	497
2	15	65	27	174	419
2	20	35	28	311	389
4	25	53	32	239	396
4	30	31	28	347	384
4	35	18	23.5	475	364
4	40	26	46	622	352
5	50	21	48	778	340
5	60	12	48	1123	281
5	70	9	47	1532	293
7.5	80	13	58	1329	298
7.5	100	12	90	2083	278

Electrical sounding Schlumberger - Saanen4.WS3

S4 : Grund 14/4/1997



Location X = 587130 Y = 142420 Z = 1090 Azim = NS

Model Resistivity [ohm•m]	Thickness [m]	Depth [m]	Altitude [m]
100	.2		1090
700	4	.2	1089.8
450	42	4.2	1085.8
80		46	1044

Electrical sounding Schlumberger - Saanen4.WS3

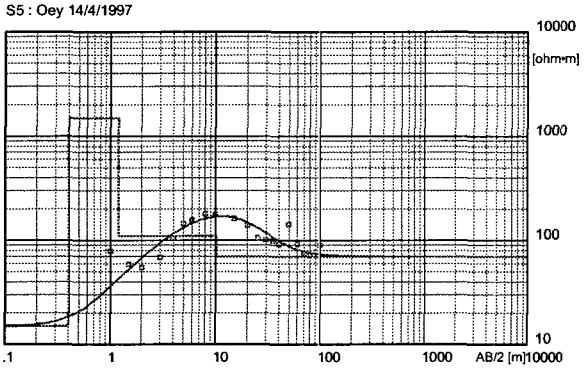
S4 : Haute Sarine 14/4/1997

Field data and calculated values

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm•m]
.5	1	900	4	2.35	528.75
.5	1.5	250	3.3	6.28	476
.5	2	180	4.8	11.78	442
.5	3	90	5	27.48	495
.5	4	240	23	49.48	516
.5	5	170	23	77.75	575
2	6	610	26	25.13	590
2	8	550	43	47.12	603
2	10	280	36	75.39	586
2	15	135	43	174	546
2	20	73	46	311	494
4	25	100	51	239	469
4	30	56	46	347	422
4	35	46	55	475	397
4	40	43	69	622	388
5	50	28	56	778	389
5	60	27	90	1123	337
5	70	16	75	1532	327
7.5	80	18	77	1329	311
7.5	100	10	82	2083	254

Electrical sounding Schlumberger - Saanen5.WS3

S5 : Oey 14/4/1997



Location X = 587260 Y = 144200 Z = 1070 Azim = NS

Model Resistivity [ohm•m]	Thickness [m]	Depth [m]	Altitude [m]
15	.4		1070
1500	.8	.4	1069.6
110	9	1.2	1068.8
70		10	1060

Electrical sounding Schlumberger - Saanen5.WS3

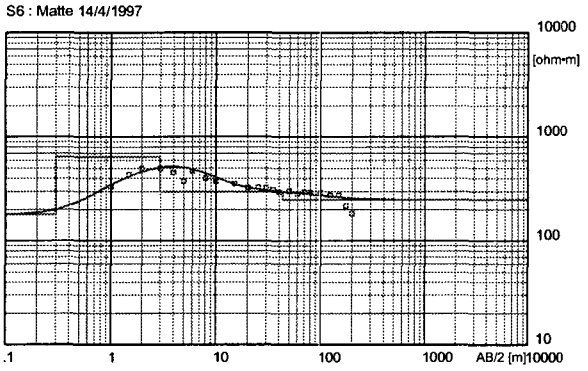
S5 : Oey 14/4/1997

Field data and calculated values

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm•m]
.5	1	200	6	2.35	78.33
.5	1.5	47	5	6.28	59
.5	2	28	6	11.78	55
.5	3	10	4	27.48	68.7
.5	4	100	47	49.48	105.3
.5	5	120	65	77.75	144
2	6	510	82	25.13	156
2	8	210	55	47.12	180
2	10	70	30	75.39	176
2	15	73	79	174	161
2	20	30	67	311	139
4	25	26	59	239	105
4	30	14	48	347	101
4	35	10	48	475	99
4	40	9	61	622	91.8
5	50	22	120	778	142.6
5	60	14	170	1123	92
5	70	4.8	98	1532	75
7.5	80	7	130	1329	71.6
7.5	100	6	140	2083	89.3

Electrical sounding Schlumberger - Saanen6.WS3

S6 : Matte 14/4/1997



Location X = 588040 Y = 145730 Z = 1040 Azim = EO

Model Resistivity [ohm•m]	Thickness [m]	Depth [m]	Altitude [m]
180	.3		1040
650	2.7	.3	1039.7
300	40	3	1037
250		43	997

Electrical sounding Schlumberger - Saanen6.WS3

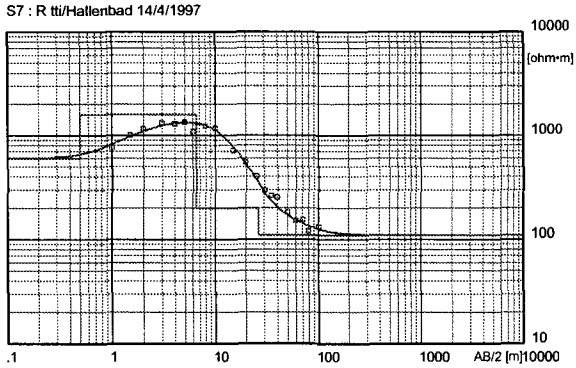
S6 : Haute Sarine 14/4/1997

Field data and calculated values

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm•m]
.5	1	740	5.3	2.35	328.11
.5	1.5	320	4.6	6.28	437
.5	2	220	5.2	11.78	498
.5	3	490	27	27.48	499
.5	4	230	25	49.48	455
.5	5	150	31	77.75	376
2	6	560	30	25.13	469
2	8	230	27	47.12	401
2	10	135	27	75.39	377
2	15	47	23	174	356
2	20	21	20	311	327
4	25	44	32	239	329
4	30	24	25.5	347	327
4	35	21	32	475	312
4	40	26	54	622	299
5	50	21	54	778	303
5	60	16	63	1123	285
5	70	9.5	49	1532	297
7.5	80	18	81	1329	295
7.5	100	8	57	2083	292
10	125	4.1	36	2439	278
10	150	5.7	73	3519	275
10	175	5	110	4795	218
10	200	3.5	120	6267	183

Electrical sounding Schlumberger - Saanen7.WS3

S7 : R tti/Hallenbad 14/4/1997



Location X = 588000 Y = 146550 Z = 1040 Azim = EO

Model Resistivity [ohm•m]	Thickness [m]	Depth [m]	Altitude [m]
600	.5		1040
1600	6	.5	1039.5
200	20	6.5	1033.5
110		26	1014

Electrical sounding Schlumberger - Saanen7.WS3

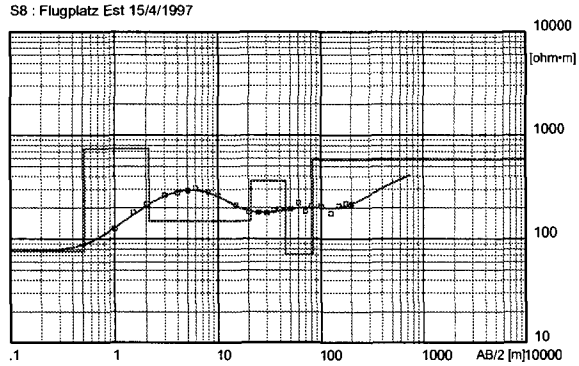
S7 : Haute Sarine 14/4/1997

Field data and calculated values

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm•m]
.5	1	650	2	2.35	763.75
.5	1.5	450	2.8	6.28	1009
.5	2	265	2.7	11.78	1156
.5	3	120	2.5	27.48	1319
.5	4	89	3.4	49.48	1295
.5	5	450	26	77.75	1346
2	6	520	12	25.13	1089
2	8	260	10	47.12	1225
2	10	140	9	75.39	1173
2	15	41	10	174	713
2	20	39	22	311	551
4	25	32	19	239	403
4	30	18.5	21.5	347	299
4	35	25	45	475	264
4	40	9.4	23	622	254
5	50	13	55	778	184
5	60	8	59	1123	152
5	70	7.5	74	1532	155
7.5	80	8.5	93	1329	121
7.5	100	4.5	71	2083	132

Electrical sounding Schlumberger - Saanen8.WS3

S8 : Flugplatz Est 15/4/1997



Location X = 585300 Y = 148440 Z = 1000 Azim = EO

Model Resistivity [ohm•m]	Thickness [m]	Depth [m]	Altitude [m]
76	.52		1000
746	1.6	.52	999.5
148	19	2.1	997.9
361	24	21	979
71	38	45	955
581		83	917

Electrical sounding Schlumberger - Saanen8.WS3

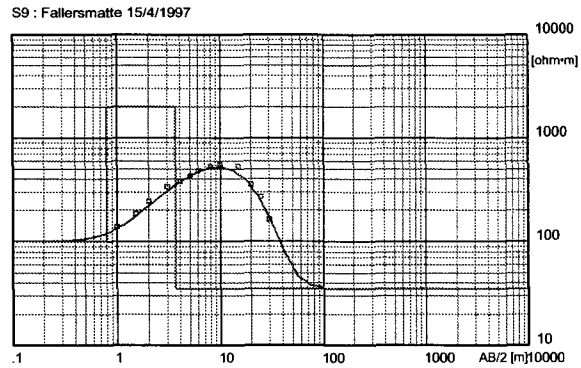
S8 : AB 100 m 15/4/1997

Field data and calculated values

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm•m]
.5	1	480	9	2.35	125.33
.5	1.5	245	8.5	6.28	181
.5	2	160	8.7	11.78	217
.5	3	73	7.6	27.48	264
.5	4	115	20.5	49.48	278
.5	5	105	28	77.75	292
2	6	320	26	25.13	309
2	8	150	25	47.12	283
2	10	110	31	75.39	268
2	15	34	28	174	211
2	20	47	80	311	183
4	25	69	92	239	179
4	30	39	76	347	178
4	35	32	81	475	188
4	40	22	71	622	193
5	50	23.5	94	778	194
5	60	14	71	1123	221
5	70	12	100	1532	184
7.5	80	14	90	1329	207
7.5	100	10	100	2083	208
10	125	9	125	2439	176
10	150	10	170	3519	207
10	175	5	110	4795	218
10	200	6	175	6267	215

Electrical sounding Schlumberger - Saanen9.WS3

S9 : Fallersmatte 15/4/1997



Location X = 584820 Y = 148430 Z = 1000 Azim = EO

Model Resistivity [ohm•m]	Thickness [m]	Depth [m]	Altitude [m]
100	.8		1000
2000	2.8	.8	999.2
35		3.6	996.4

Electrical sounding Schlumberger - Saanen9.WS3

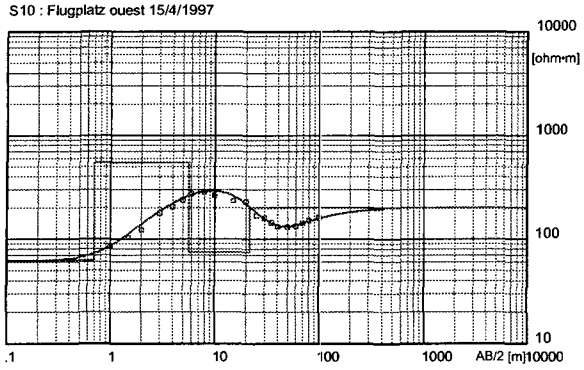
S9 : Haute Sarine 15/4/1997

Field data and calculated values

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm•m]
.5	1	710	12	2.35	139.04
.5	1.5	500	17	6.28	185
.5	2	250	12	11.78	245
.5	3	135	11	27.48	337
.5	4	100	13	49.48	381
.5	5	40	7.2	77.75	432
2	6	440	23	25.13	481
2	8	280	25	47.12	528
2	10	250	34	75.39	554
2	15	110	36	174	532
2	20	40	35	311	355
4	25	42	37	239	271
4	30	19	40	347	165

Electrical sounding Schlumberger - Saanen10.WS3

S10 : Flugplatz ouest 15/4/1997



Location X = 584650 Y = 148320 Z = 995 Azim = NS

Model Resistivity [ohm•m]	Thickness [m]	Depth [m]	Altitude [m]
62	.7		995
550	5	.7	994.3
75	16	5.7	989.3
200		22	973

Electrical sounding Schlumberger - Saanen10.WS3

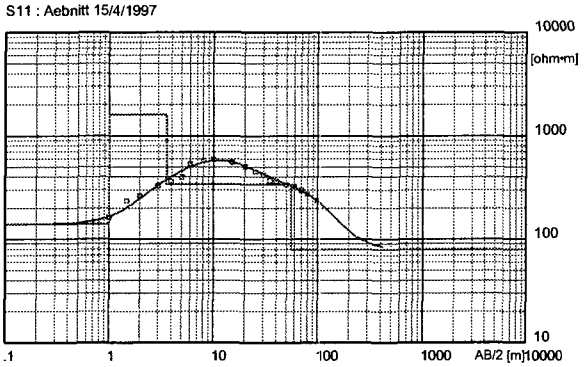
S10 : Haute Sarine 15/4/1997

Field data and calculated values

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm•m]
.5	1	220	6	2.35	86.17
.5	1.5	140	8.5	6.28	103.4
.5	2	60	5.8	11.78	122
.5	3	39	6.1	27.48	176
.5	4	33	8	49.48	204
.5	5	22	7.2	77.75	238
2	6	63	5.8	25.13	273
2	8	45	7.5	47.12	283
2	10	140	40	75.39	264
2	15	39	29	174	234
2	20	17	23	311	230
4	25	40	57	239	168
4	30	32	70	347	159
4	35	20	66	475	144
4	40	18	85	622	132
5	50	12	71	778	131
5	60	10	85	1123	132
5	70	14	150	1532	143
7.5	80	17	150	1329	151
7.5	100	17	220	2083	161

Electrical sounding Schlumberger - Saanen11.WS3

S11 : Aebnitt 15/4/1997



Location X = 587740 Y = 147670 Z = 1035 Azim = NS

Model Resistivity [ohm•m]	Thickness [m]	Depth [m]	Altitude [m]
140	1		1035
1600	2.6	1	1034
340	52	3.6	1031.4
80		56	979

Electrical sounding Schlumberger - Saanen11.WS3

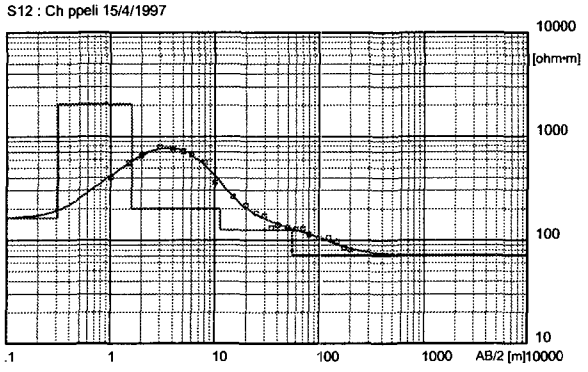
S11 : Haute Sarine 15/4/1997

Field data and calculated values

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm•m]
.5	1	360	5.2	2.35	162.69
.5	1.5	160	4.3	6.28	234
.5	2	100	4.5	11.78	262
.5	3	56	4.7	27.48	327
.5	4	35	4.8	49.48	361
.5	5	26	5.1	77.75	396
2	6	100	4.7	25.13	535
2	8	72	5.9	47.12	575
2	10	220	28	75.39	592
2	15	86	27	174	554
2	20	47	29	311	504
4	25	47	25	239	449
4	30	36	30	347	416
4	35	24	31	475	368
4	40	21	36	622	363
5	50	30	70	778	333
5	60	15	52	1123	324
5	70	13	67	1532	297
7.5	80	12	58	1329	275
7.5	100	8	71	2083	235

Electrical sounding Schlumberger - Saanen12.WS3

S12 : Ch ppeli 15/4/1997



Location X = 586830 Y = 148340 Z = 1015 Azim = EO

Model Resistivity [ohm•m]	Thickness [m]	Depth [m]	Altitude [m]
163	.31		1015
2061	1.3	.31	1014.7
200	9.7	1.6	1013.4
125	44	11	1004
72		55	960

Electrical sounding Schlumberger - Saanen12.WS3

S12 : Haute Sarine 15/4/1997

Field data and calculated values

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm•m]
.5	1	900	5.3	2.35	399.06
.5	1.5	460	5.2	6.28	556
.5	2	300	5.4	11.78	654
.5	3	145	5.1	27.48	781
.5	4	60	3.9	49.48	761
.5	5	45	4.9	77.75	714
2	6	850	32	25.13	668
2	8	300	25	47.12	565
2	10	95	20	75.39	358
2	15	9.8	6.5	174	262
2	20	16	23	311	216
4	25	91	120	239	181
4	30	4.4	9	347	170
4	35	22	80	475	131
4	40	35	155	622	140
5	50	31	180	778	134
5	60	29	255	1123	128
5	70	20	240	1532	128
7.5	80	20	235	1329	113
7.5	100	16	320	2083	104
10	125	12	280	2439	105
10	150	8	290	3519	97
10	175	3.2	180	4795	85.2
10	200	2	155	6267	80.9

Annexe III : Profils sismiques

No	Lieu	x	y	Type	Azimut	Matériel	Source
1	Dorfrütti	584457	148247	Rr	OE	Strataview R24 GEOLEP	Shotgun 12"
2	Chäppeli1	586733	148300	Rr	NNO-SSE	Strataview R24 GEOLEP	Shotgun 12"
3	Chäppeli2	586892	148379	Rr/Rf	OE	Strataview R24 GEOLEP	Shotgun 12"
4	Rütti	587841	146427	Rr	EO	Strataview R24 GEOLEP	Shotgun 12"
5	Matte	587848	145623	Rr/Rf	SN	Strataview R24 GEOLEP	Shotgun 12"
6	Gsteig Bode	587004	137200	Rr/Rf	OE	Strataview R24 GEOLEP	Shotgun 12"
7	Innergsteig	587207	136764	Rr/Rf	SN	Strataview R24 GEOLEP	Shotgun 12"
8	Zälg Bode	587060	139732	Rr/Rf	OE	Strataview R24 GEOLEP	Shotgun 12"
9	Feutersoey	587001	141689	Rr/Rf	NS	Strataview R24 GEOLEP	Shotgun 12"
10	Oey1	587460	144313	Rr/Rf	OE	Strataview R24 GEOLEP	Shotgun 12"
11	Oey2	587421	144329	Rr/Rf	SN	Strataview R24 GEOLEP	Shotgun 12"
12	Flugplatz1	585706	148331	Rr/Rf	OE	Strataview R24 GEOLEP	Shotgun 12"
13	Flugplatz2	585447	148284	Rr/Rf	OE	Strataview R24 GEOLEP	Shotgun 12"
14	Flugplatz3	584611	148326	Rf	OE	Strataview R48 UNIGE	Shotgun 12"
15	Flugplatz4	585299	148236	Rr	SN	Strataview R24 GEOLEP	Shotgun 12"

Les données des enregistrements sont disponibles au GEOLEP-EPFL sur CD-Rom.

Annexe IV : Logs des sondages OEHE

Hydrogeologie Oberes Saanetal
Kernbohrung KB31
Flugplatz Saanen
WEA Nr. 585/148.18

Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern	Anhang Nr. 1
Bohrfirma: Hydrogéo S.A., Delémont	Situation:
Bohrverfahren: Rotationskernbohrung	Logs: Flowmeter
Bohrmeister: Moreira Pedro Bohrgerät	
ausgeführt vom 12.4.1999 bis 30.4.1999	
Koordinaten: 585695/148300 OK Terrain 1003.45 m ü. M. OK Rohr 1003.82 m ü. M.	
Geol. Aufnahme: Vaudan J., Bussard T.	1: 200

Tiefe (m)	Kote m.ü.M.	Limites (prof. m)	Lithologie	Geologische Deutung
	1001.75	1.7	Humus, dunkelbraun	Deckschicht, Boden
	1001.35	2.1	Siltiger Kies, fein bis mittel, mit Steinen, dunkelgrau	Alluvialer Schotter
	999.25	4.2	Leicht siltiger Kies, fein bis mittel, mit Steinen, braun-beige	
			Kies, fein bis mittel, teilweise siltig, beige	
	993.75	9.7	Siltiger Kies, fein bis mittel, mit Sandlinsen, braun	
	988.25	15.2	Leicht siltiger-sandiger Kies, mittel, braun-grau	
	984.25	19.2		
	983.45	20.0	Leicht siltiger Sand, braun	Delta Ablagerungen (topset und foreset)
			Leicht siltiger Kies, mittel, braun	
	980.45	23.0	Leicht kiesiger Sand, mittel, grau-braun	
	977.05	26.4		
	975.75	27.7	Leicht siltiger Kies, mittel, grau	
			Sand, fein bis mittel, teilweise geschichtet, mit Dropstones, grau	
	964.75	38.7	Sandiger Silt, gut geschichtet, mit dropstones, grau	See Ablagerungen (bottom set)
	956.95	46.5	Siltiger Sand mit Kies, teilweise geschichtet, grau	Fluvio-glaziale Ablagerungen
	950.95	52.5	Kies, mittel, sauber, beige	
	949.45	54.0	Leicht toniger Silt mit Kies und Steine, festgelagert, beige-grau	Grundmoräne
			Leicht toniger Silt mit Kies und Steine, festgelagert, beige-grau	Grundmoräne
	942.45	61.0	Siltiger Kies, mittel, Kanten eckig, festgelagert, dunkelgrau-schwartz	Grundmoräne (Lodgement till)
	937.45	66.0	Kalkstein, ganz zertrümmert	Fels, "couches rouges"
	935.45	68.0	Kalkstein (Mergelkalk, rötlich, mit Foramimiferen)	
	927.45	76.0		

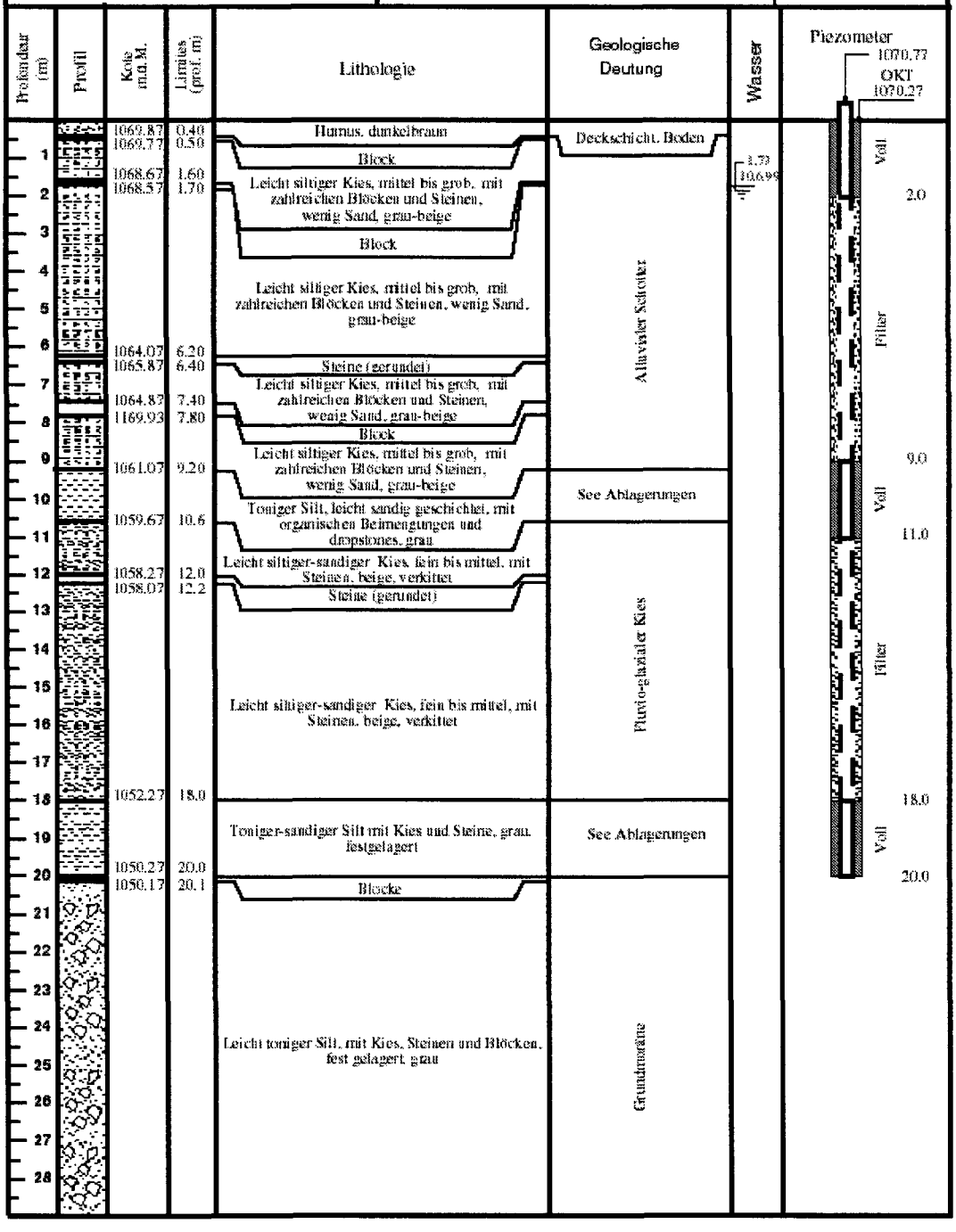
Wasser: 161 / 8669

Piezometer: 1003.82 / OKT 1003.45

Voll 2.0 — Filter — 26.0 — Voll — 46.0 — Filter — Voll 54.0

Hydrogeologie Oberes Saanetal
Kernbohrung KB32
Grund bei Gstaad
WEA Nr. 587/143.6

Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern	Anhang Nr. 2
Bohrfirma: Hydrogéo S.A., Delémont	Situation:
Bohrverfahren: Rotationskernbohrung	Logs:
Bohrmeister: Moreira Pedro Bohrgerät	
ausgeführt vom 30.4.1999 bis 10.5.1999	
Koordinaten: 587.250/143.740 OK Terrain 1070.27 m ü. M. OK Rohr 1070.77 m ü. M	
Geol. Aufnahme: Vaudan J., Bussard T.	1: 100



Hydrogeologie Oberes Saanetal
Kernbohrung KB33
Gstaad Chlösterli
WEA Nr. 587/142.2

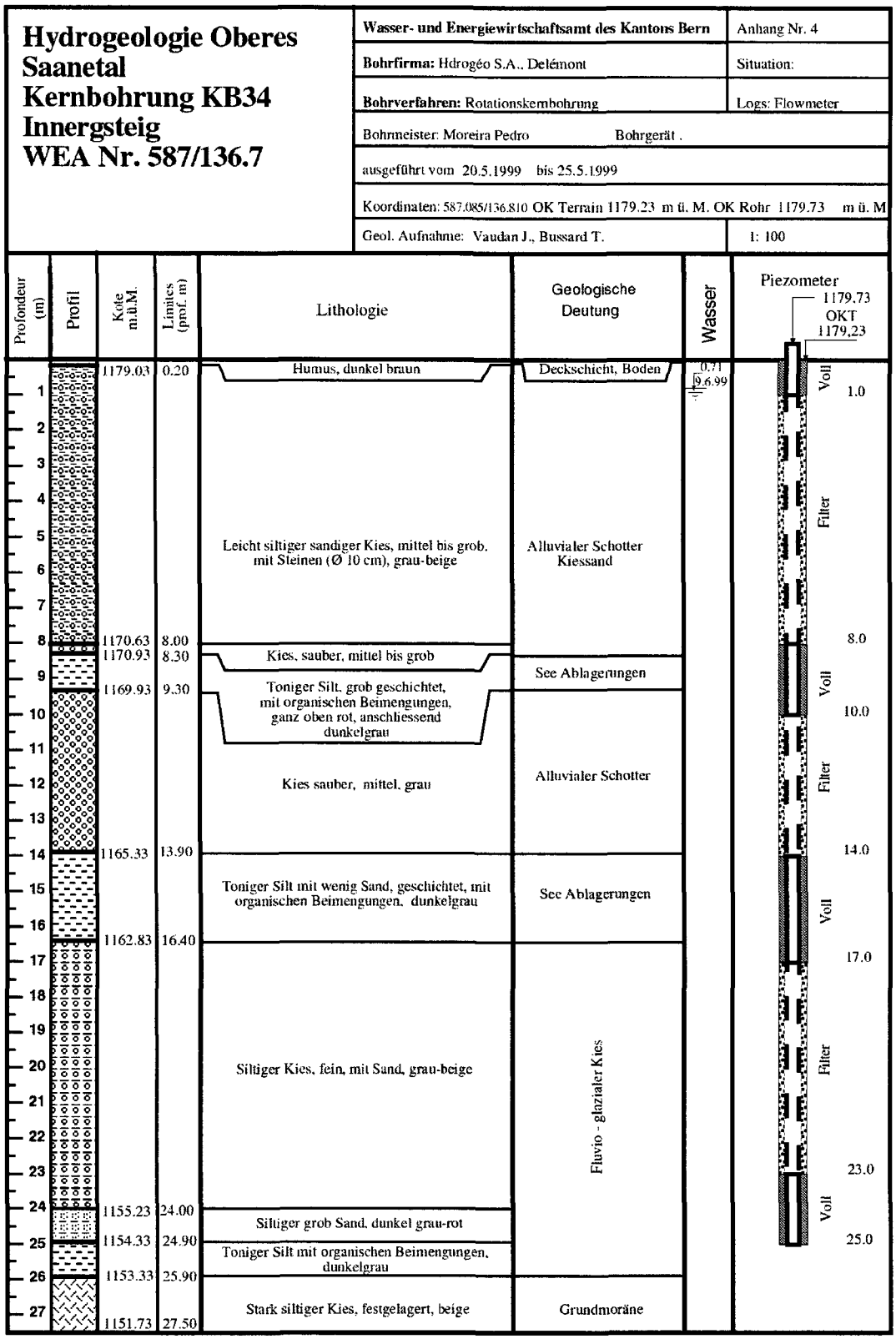
Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern	Anhang Nr. 3
Bohrfirma: Hydrogéo S.A., Delémont	Situation:
Bohrverfahren: Rotationskernbohrung	Logs: Flowmeter
Bohrmeister: Moreira Pedro Bohrgerät:	
ausgeführt vom 10.5.1999 bis 19.5.1999	
Koordinaten: 587.090/142.300 OK Terrain 1088.80 m ü. M. OK Rohr 1089.30 m ü. M	
Geol. Aufnahme: Vaudan J., Bussard T.	1: 100

Profondeur (m)	Kote m.ü.M.	Limites (prof. m)	Lithologie	Geologische Deutung
	1088.00	0.80	Humus, dunkel braun	Deckschicht, Boden
	1087.10	1.70	Siltiger Kies, mittel, braun	Alluvialer Schotter
	1086.90	1.90	Steine (gerundet), ø 8-10 cm	
	1086.60	2.20		
	1086.40	2.40	Siltiger leicht sandiger Kies, mittel, mit Steinen, braun	
			Block (Kalkstein)	
			Kies, fein bis mittel, mit Steinen, beige	
	1082.00	6.80		
	1081.80	7.00	Steine (gerundet)	Fluvio-glaziale Ablagerungen, z.T. Verschwemmtes Moränenmaterial.
	1080.80	8.00	Siltiger Kies, mittel bis grob, mit Steinen, braun	
	1080.50	8.30	Steine (gerundet)	
			Siltiger Kies, mittel bis grob, mit gerundeten Steinen (8-10 cm), braun, Vohandensein von Blöcken (vorwiegend Kalk), Sandlinsen, z.T. verkittet	
	1071.80	17.00	leicht toniger Silt mit Kies und Steine, fest gelagert, beige	Moräne
	1065.10	23.70		

Wasser: 2.62 / 9.6.99

Piezometer: 1089.30 OKT 1088.80

Voll 2.00 — Filter — Voll 17.00 — 18.00



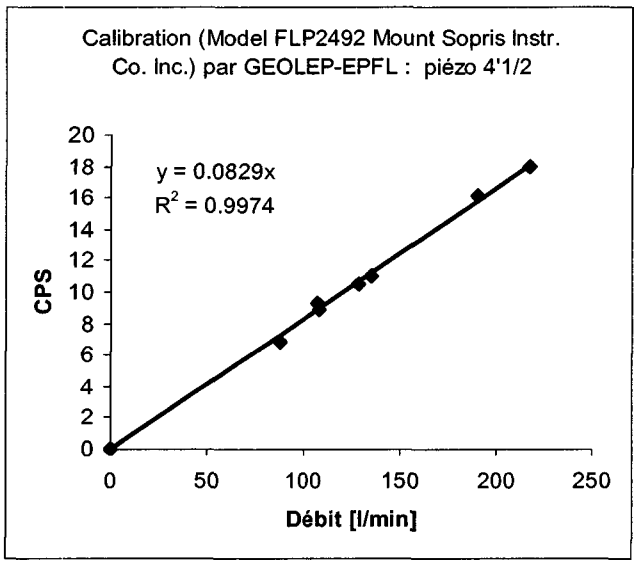
Nota Bene : L'échelle indiquée ne correspond plus à la taille de l'image pour des raisons de mise en page. Le lecteur pourra retrouver l'échelle de la représentation en se basant sur les données en profondeur absolues.

Annexe V : Essais de pompage

1) Matériel utilisé

Type	Marque	Internet (au 3.7.00)
Pompe	Homelite (pompe aspirante)	
Moulinet	FLP-2492/KLP-4492 Mount Sopris Instrument Co. USA	www.mountsopris.com
Logger et treuil	5MCA-1000/5MGB-1000 MGX II Mount Sopris Instrument Co. USA	www.mountsopris.com
Software	Logshell Mount Sopris Instrument Co. USA	www.mountsopris.com
Matériel divers	Tuyaux, PC portable, bidon de jaugeage	

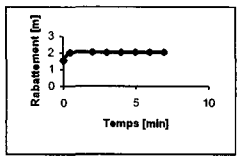
2) Calibration du moulinet de forage en laboratoire



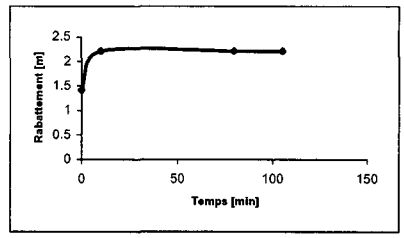
3) Essais de pompage de courte durée : courbes temps/profondeur. La saillie des piézomètre est de 0.5 m pour KB32, KB33, KB34 et de 0.4 m pour KB31.

Pompage KB31

Q=200 l/min	
t [min]	z [m]
0	1.51
0.5	2.01
2	2.03
3	2.01
4	2.01
5	2.04
6	2.04
7	2.04

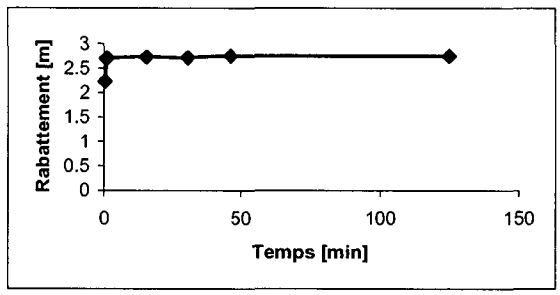


Q=764 l/min	
t [min]	z [m]
0	1.41
10	2.21
80	2.21
105	2.21



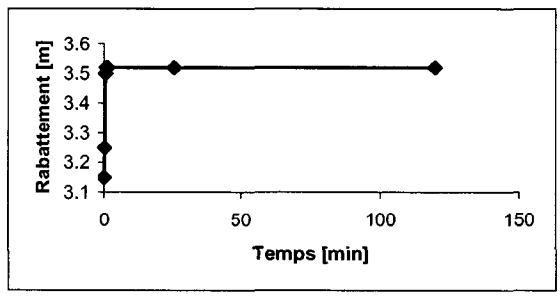
Pompage KB32

Q=764 l/min	
t [min]	z [m]
0.3	2.23
0.8	2.7
1	2.71
15	2.73
30	2.72
46	2.75
125	2.75



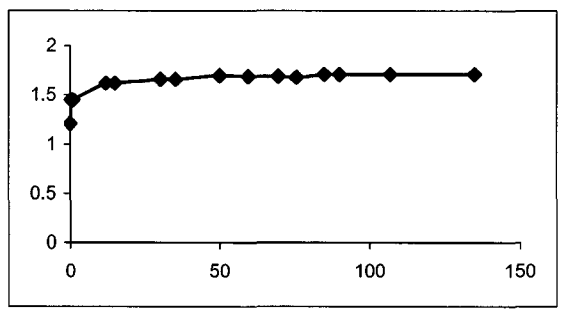
Pompage KB33

Q=424 l/min	
t [min]	z [m]
0	3.15
0.16	3.25
0.5	3.5
0.8	3.52
1.16	3.52
25	3.52
120	3.52



Pompage KB34

Q=955 l/min	
t [min]	z [min]
0	1.21
0.3	1.45
0.7	1.45
1	1.45
12	1.62
15	1.62
30	1.66
35	1.66
50	1.7
60	1.69
70	1.69
76	1.68
85	1.71
90	1.71
107	1.71
135	1.71



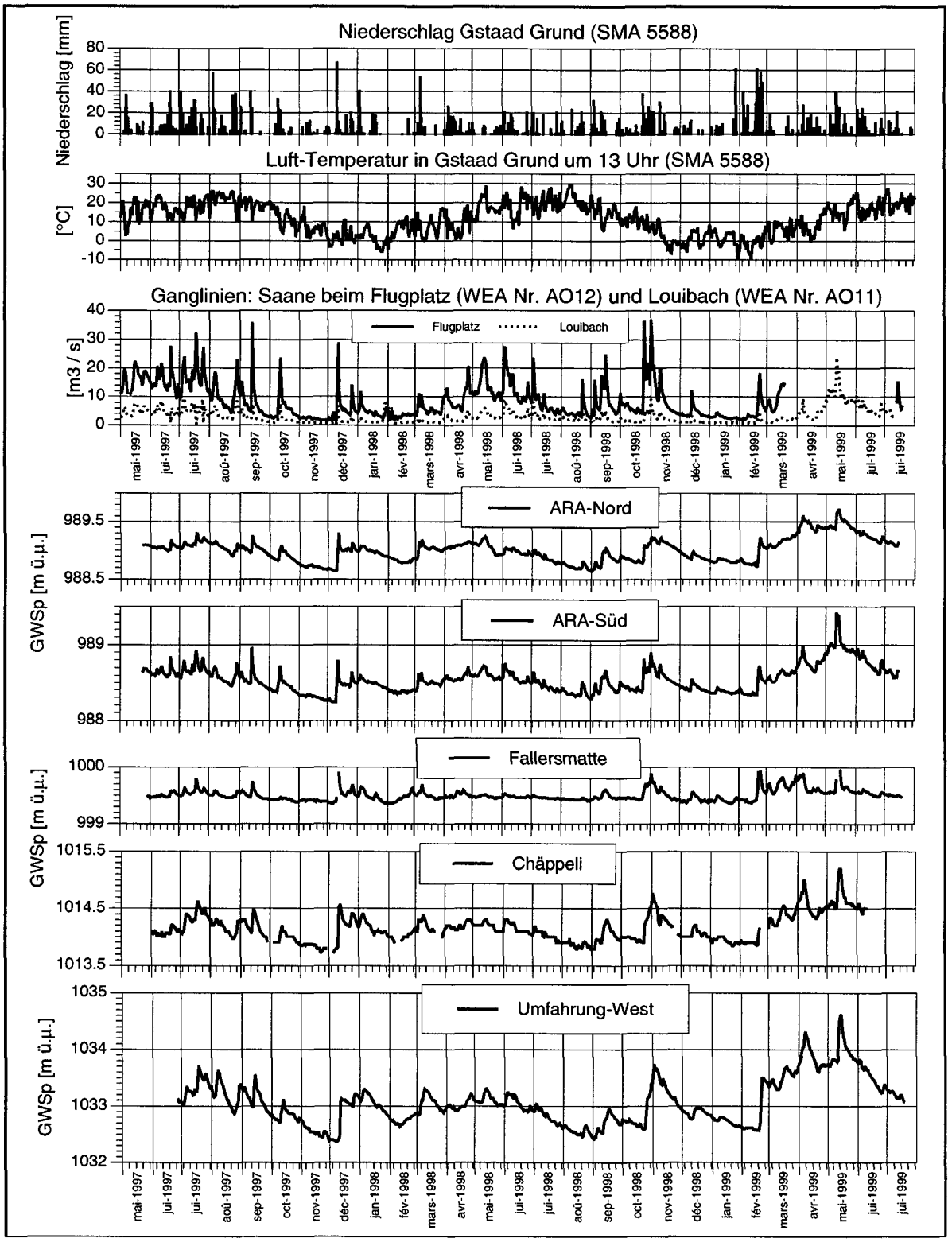
Annexe VI : Lieux et types de mesures chimiques et physico-chimiques

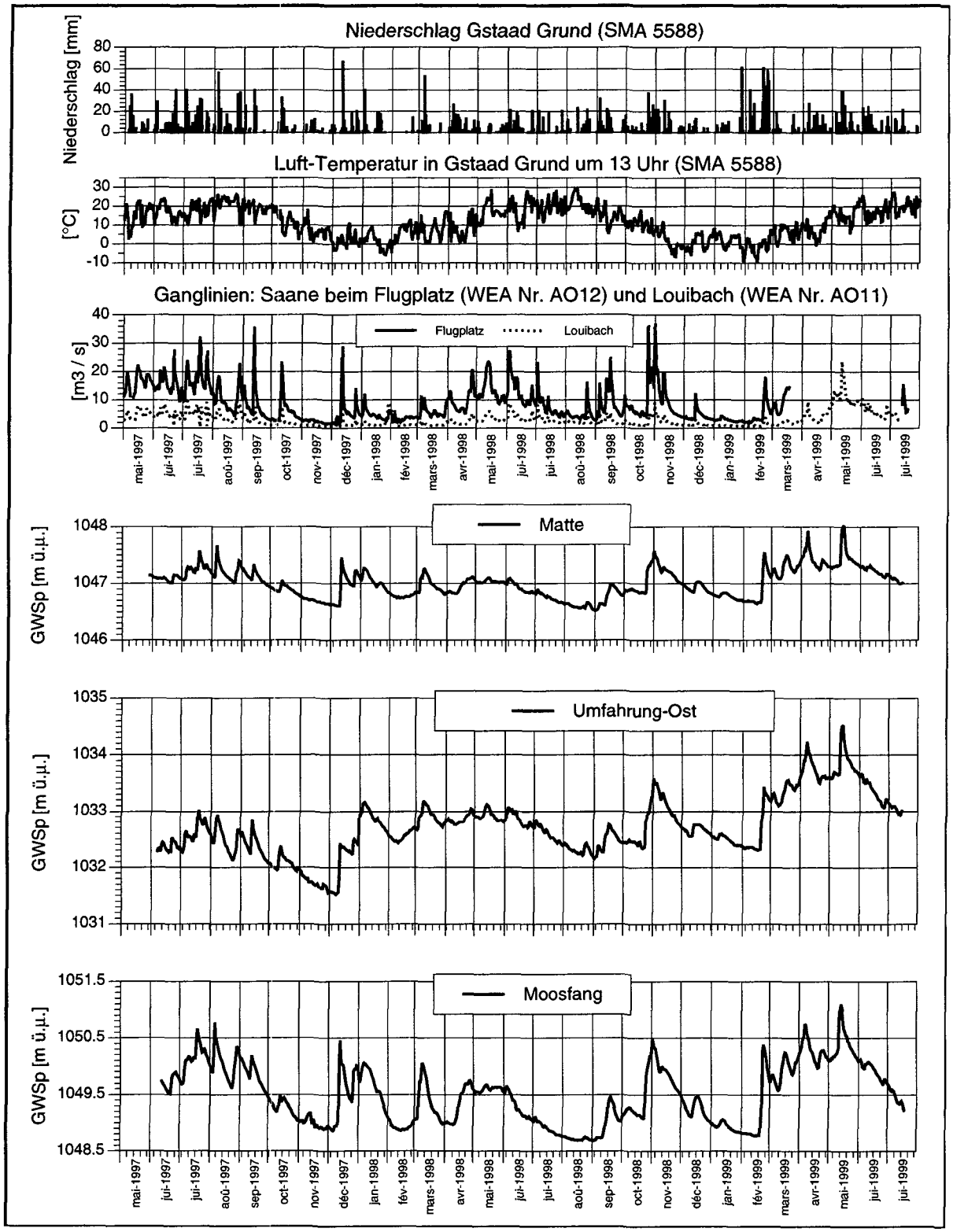
Code	Lieu	x	y	WEA Nr	Piézo. No	PC	Bac.	$\delta^{18}O$
FB1	Flugplatz	585400	148210	16		xc		x
FB2	Festung	585824	148283	17		xc		x
FB3	Chäppeli	586823	148328	3		xc	x	x
FB4	Mettlen	587305	147476	5		xc		x
FB7	Eisbahn	588141	147236	11		xc		x
FB10	Rütti	587880	146505	2		x		x
FB13	Umf. Ost	587870	146860	13	993	xc		x
FB14	Umf. West	587860	146820	14	GO15/997	xc		x
KB1	ARA1	584050	148280	8	990	xc		x
KB3	ARA3	584050	148240	7	991	xc		x
KB31	Flugplatz	585540	148280	18		xc	x	x
KB32	Oey	587250	143740	6		xc	x	x
KB33	Grund	587090	142300	2		xc	x	x
KB34	Innergsteig	587085	136810	7		xc	x	x
SB1	Fallersmatte	585400	148530	20	GO13/995	xc		x
SB4	Rütti	587997	145864	7		xc		x
SB5	Matte	587860	145510	8	992	xc		x
SB6	Moosfang	587960	145380	9	GO16/998	xc		x
SB9	Grund Bode	587599	144366	6		x		x
SB11	Grund	587150	143310	5	GO14/996	xc		x
SB12	Gsteig Bode	586880	137530	5	994	xc		x

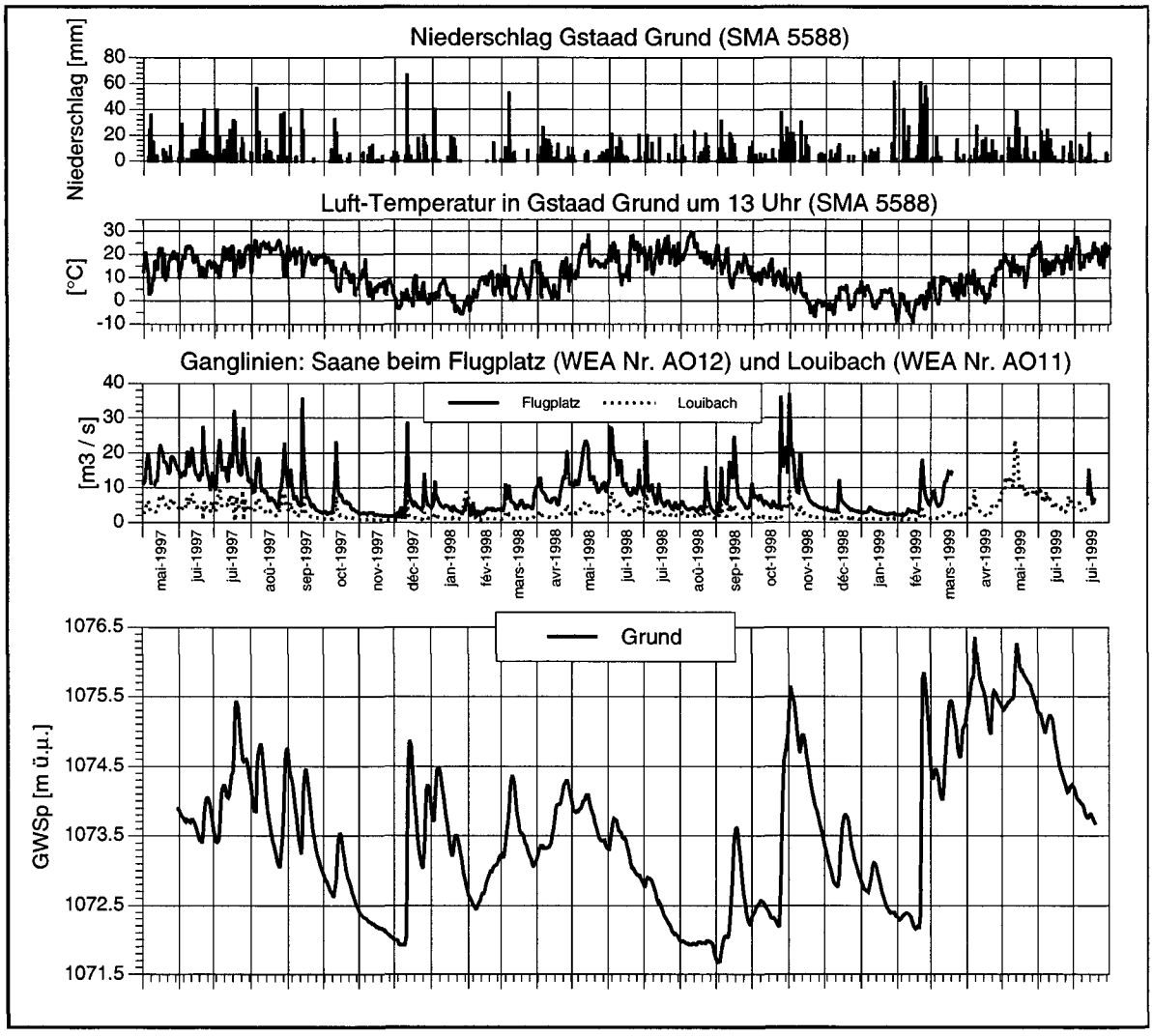
Paramètre	Grandeur mesurée	Appareillage
Conductivité électrique	µS/cm à 20°C	Conductivimètre type WTW
Température de l'eau	°C	WTW/Logger type Kern
pH	unités pH	WTW
Eh	mV	WTW
Taux d'oxygène dissous	%	WTW

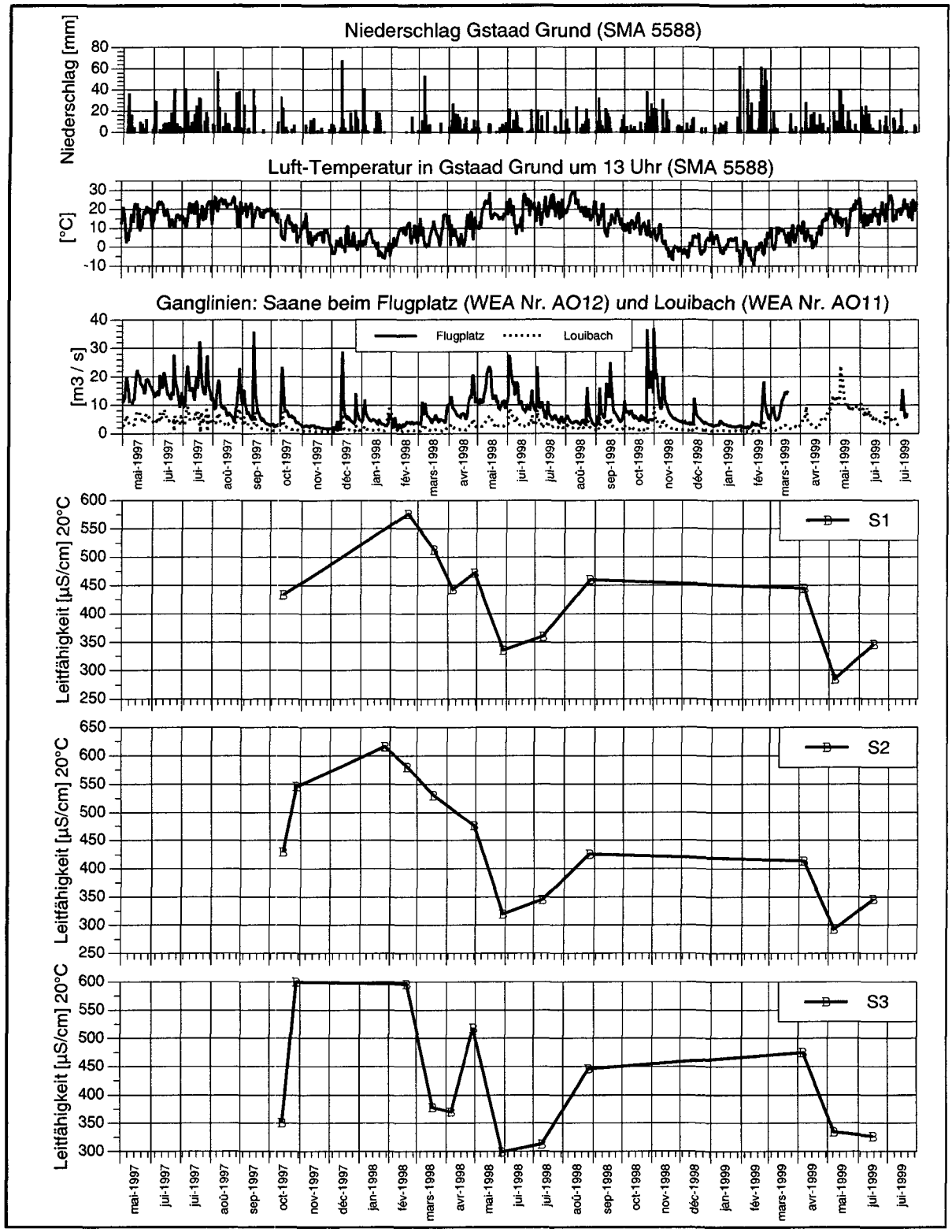
Code	Lieu	x	y
A1	Quelle Bahnhof	586240	148370
A2	Quelle Lädiwald	587000	141540
A3	Quelle Gsteig	587160	137280

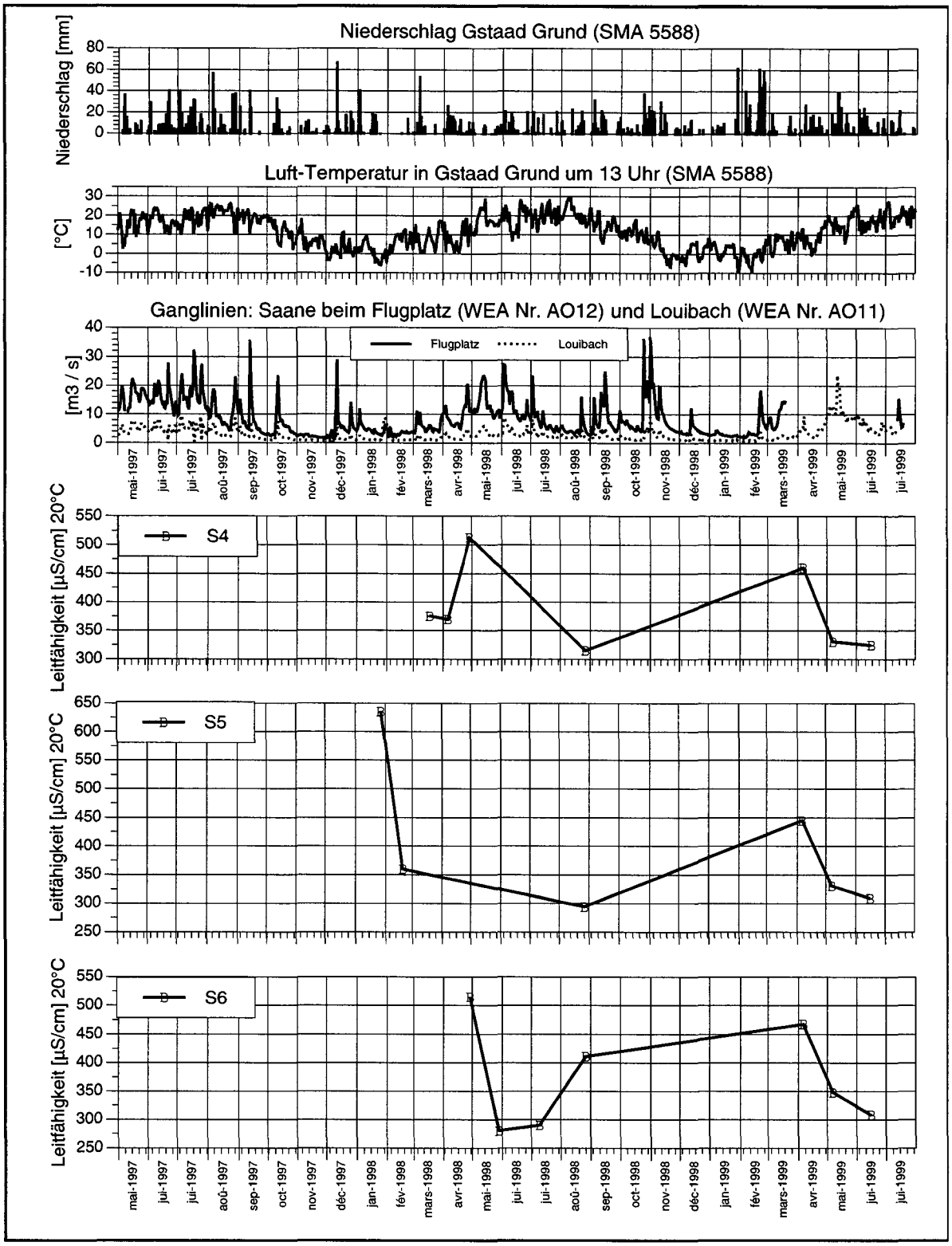
Annexe VII : Enregistrements limnigraphiques et données géochimiques

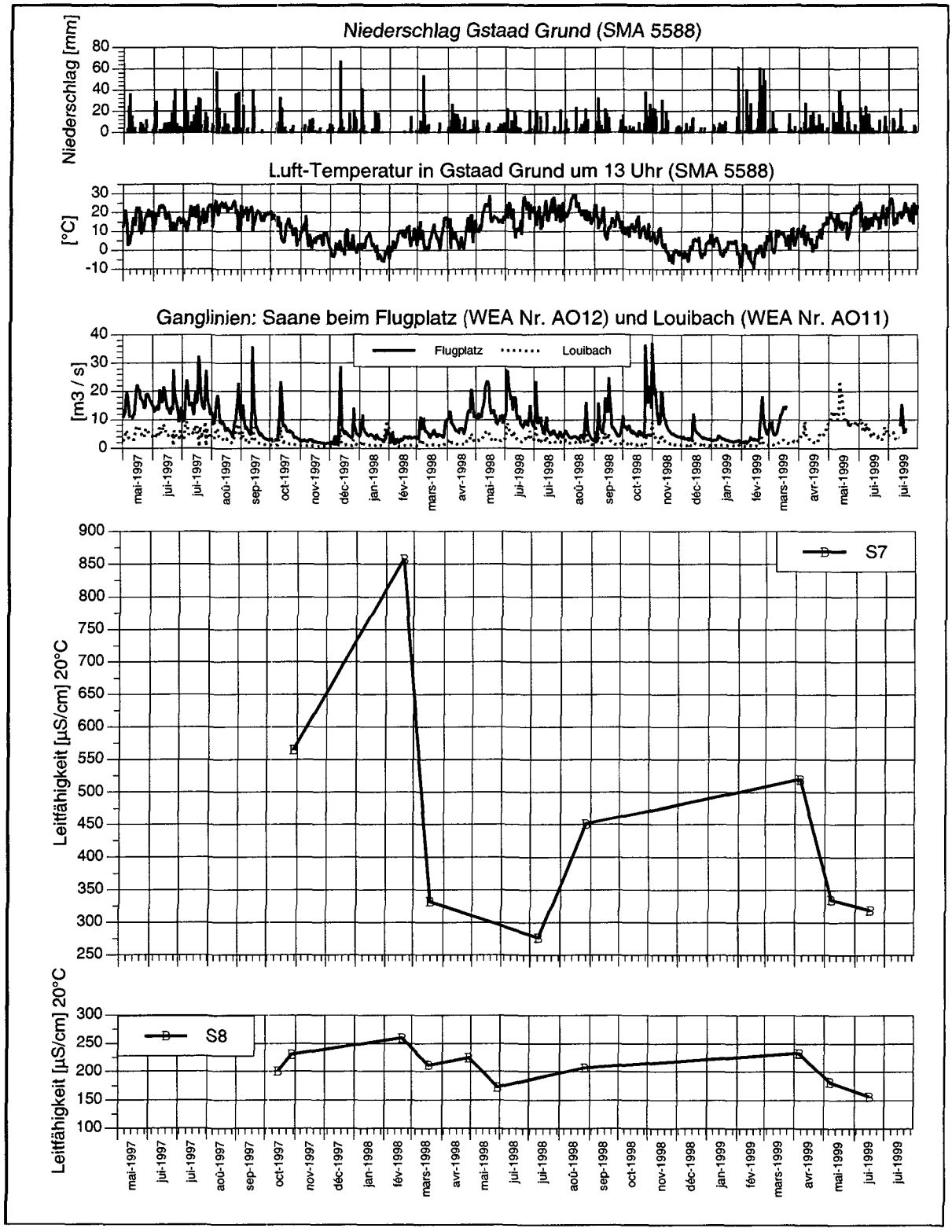


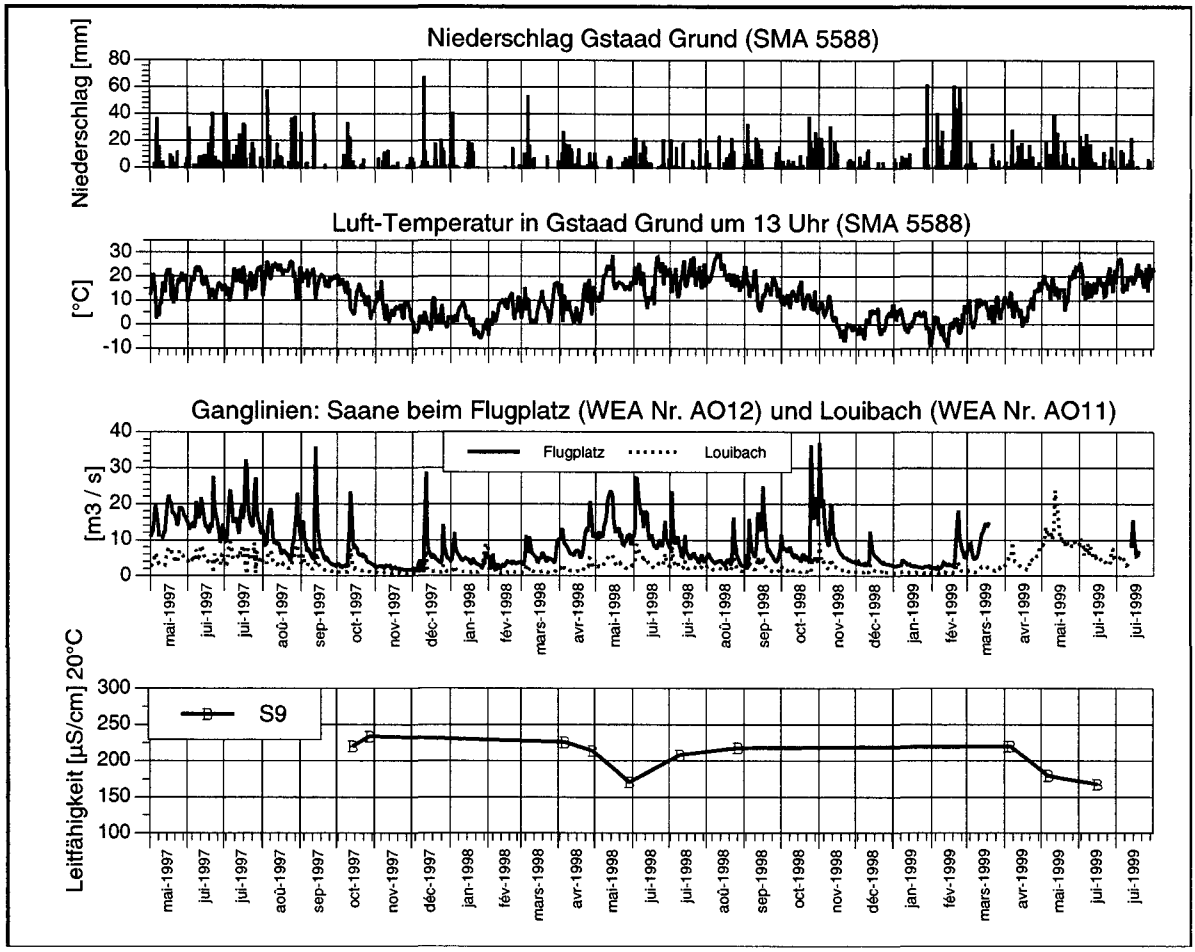

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
80
60
40
20
0
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
30
20
10
0
-10
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
[m3 / s]
40
30
20
10
0
Flugplatz
Louibach
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999
Matte
GWSp [m ü.µ.]
1048
1047
1046
Umfahrung-Ost
GWSp [m ü.µ.]
1035
1034
1033
1032
1031
Moosfang
GWSp [m ü.µ.]
1051.5
1050.5
1049.5
1048.5

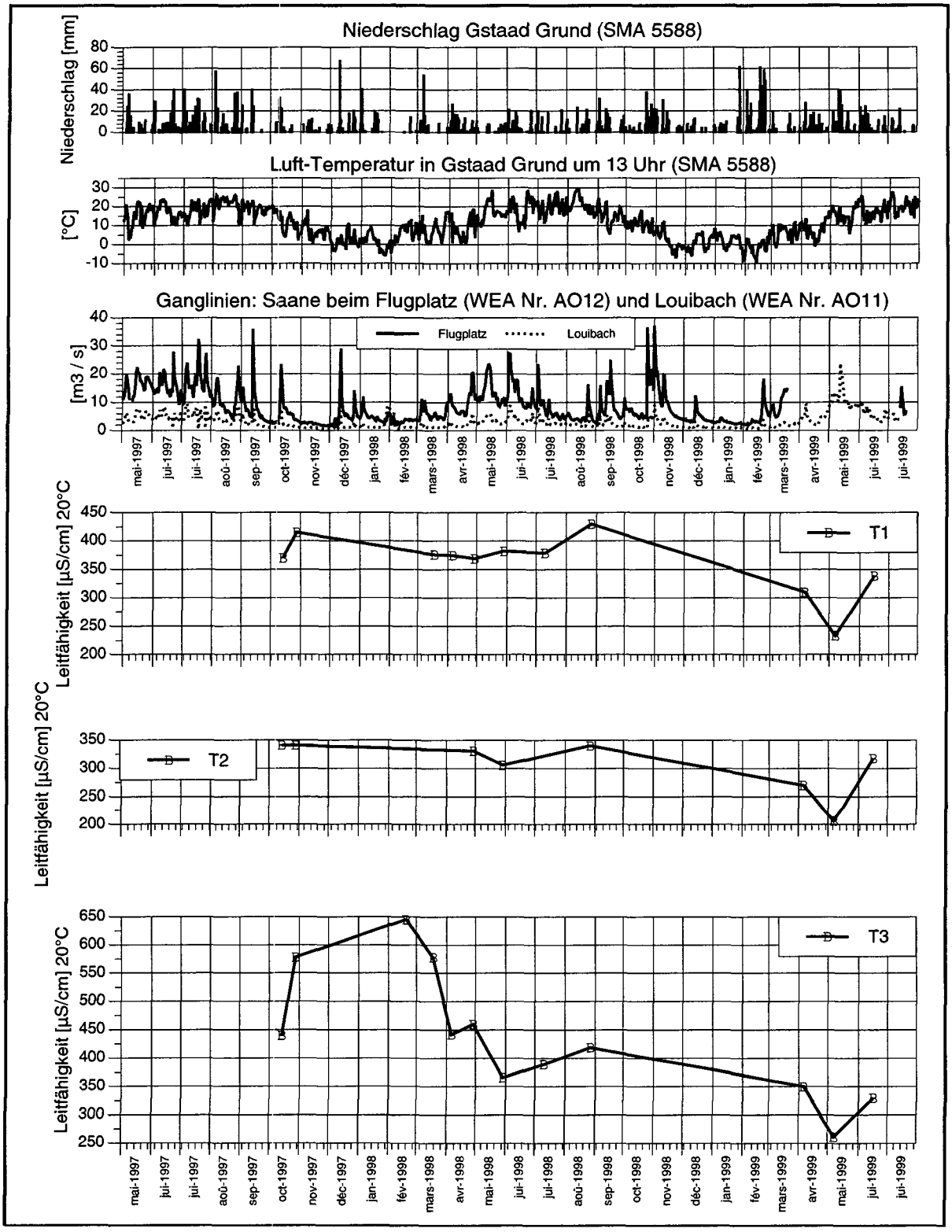

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
80
60
40
20
0
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
30
20
10
0
-10
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
[m3 / s]
40
30
20
10
0
Flugplatz
Louibach
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999
GWSp [m ü.µ.]
1076.5
1075.5
1074.5
1073.5
1072.5
1071.5
Grund

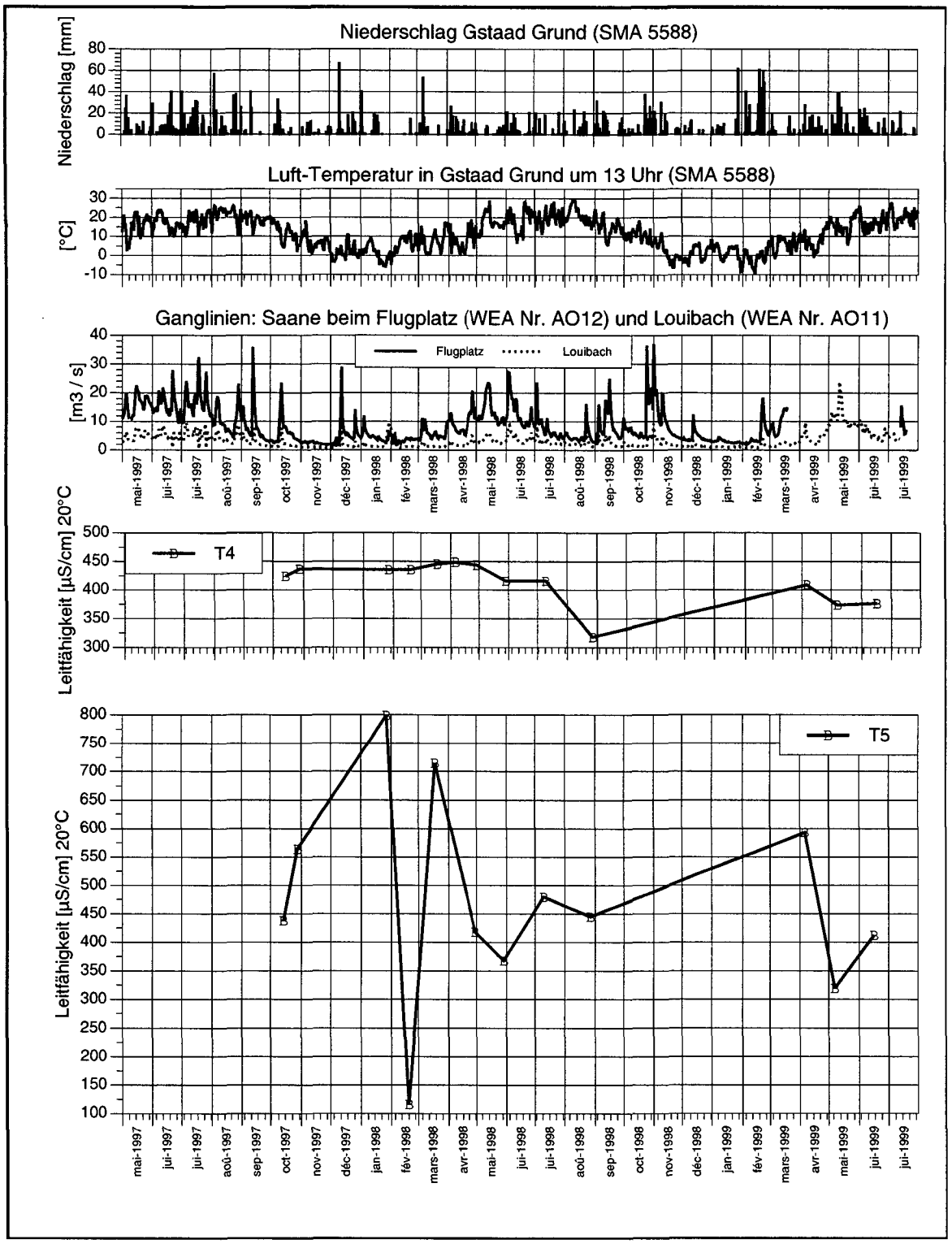

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
Flugplatz
Louibach
[m3 / s]
S1
S2
S3
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999

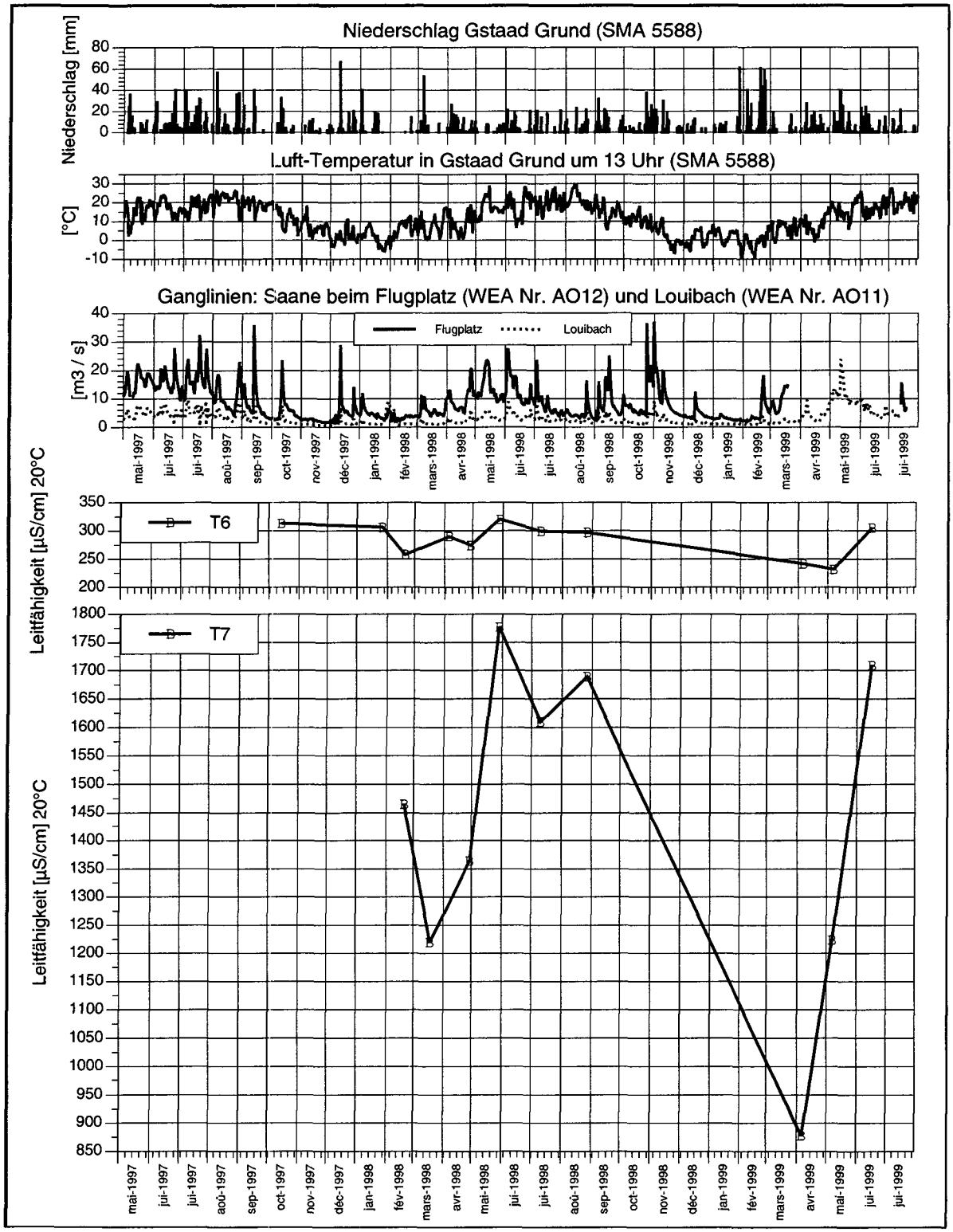

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
[m3 / s]
Flugplatz
Louibach
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
S4
S5
S6
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999

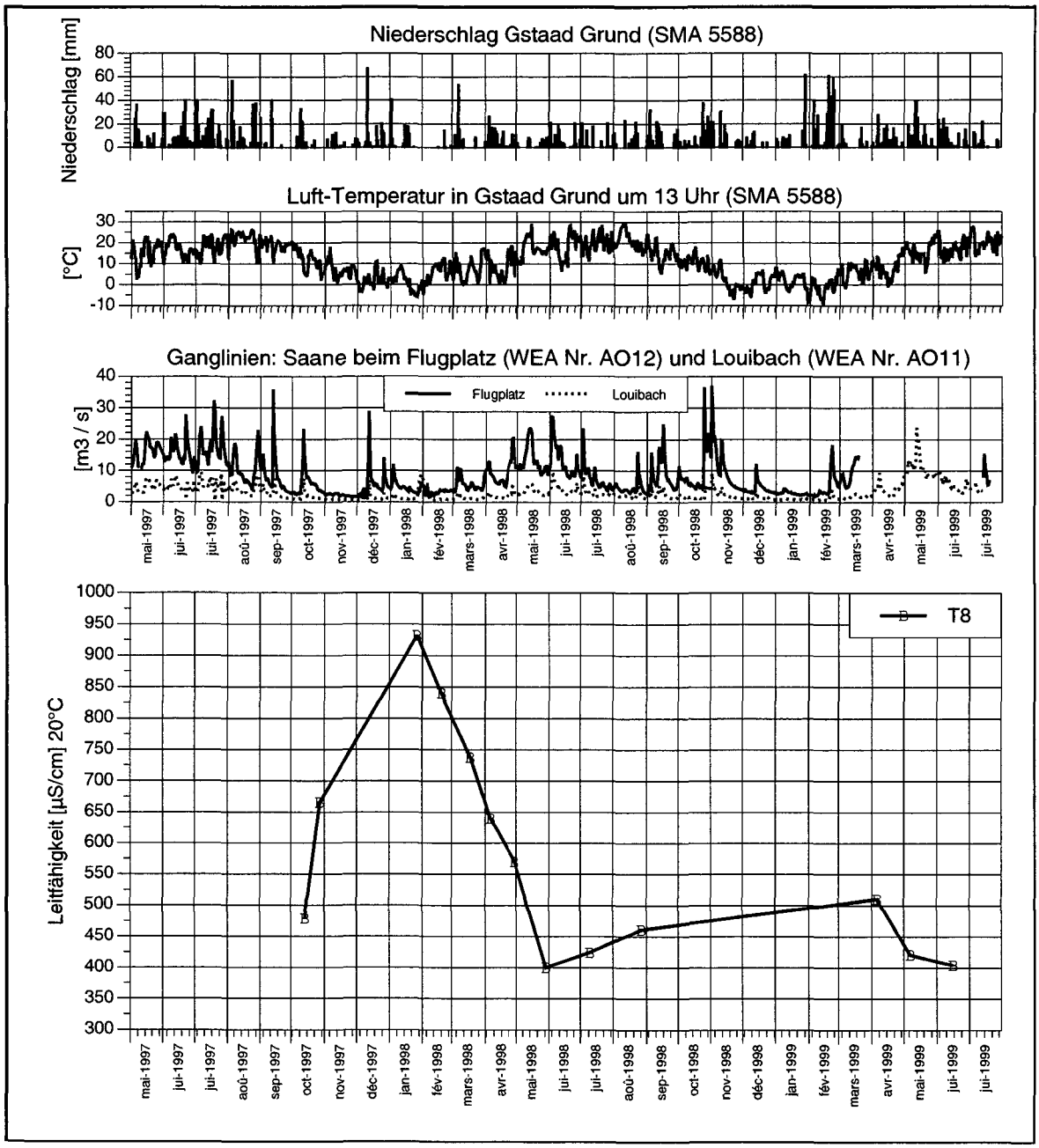

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
[m3 / s]
Flugplatz
Louibach
S7
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
S8
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999

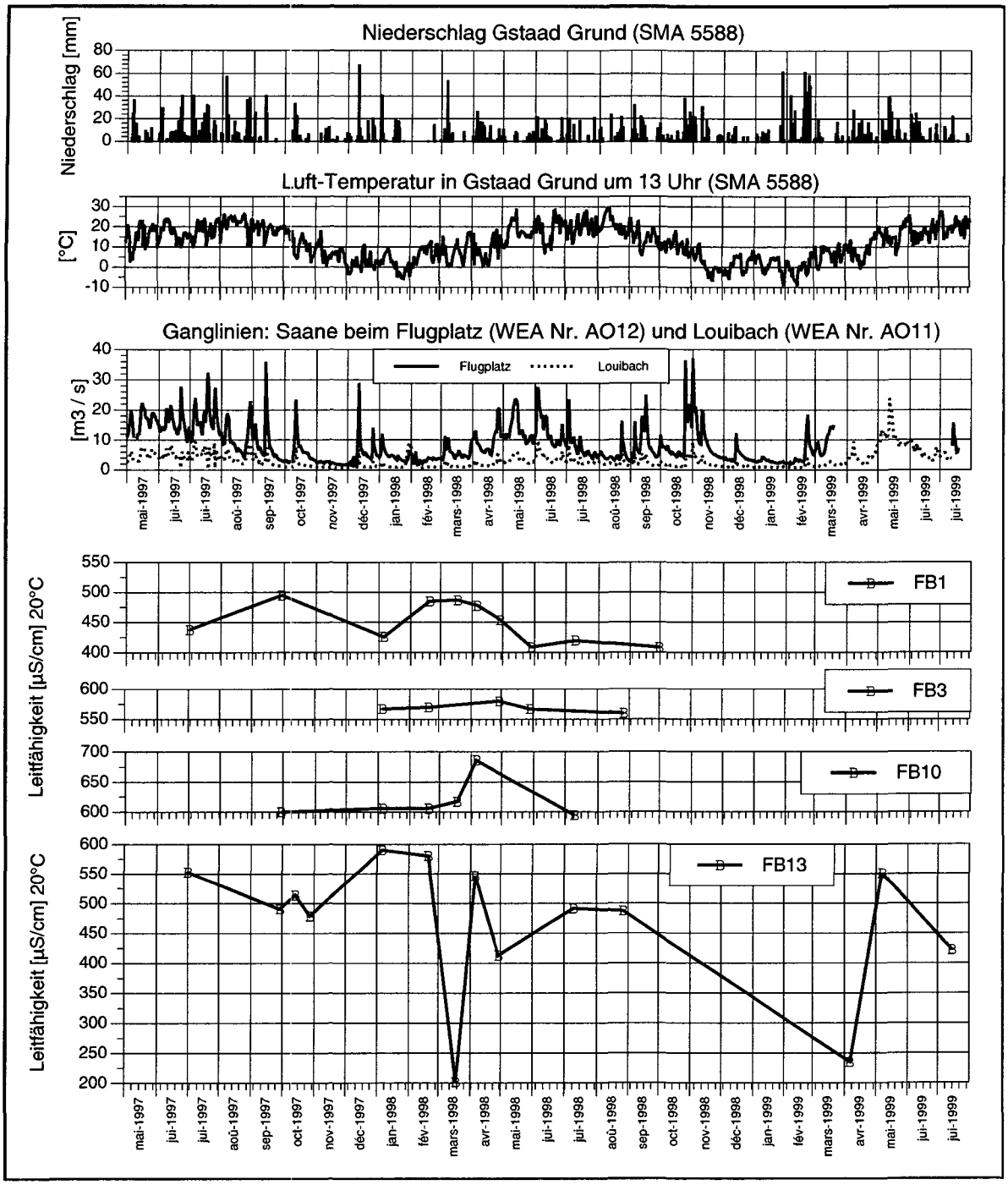

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
80
60
40
20
0
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
30
20
10
0
-10
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
[m3 / s]
40
30
20
10
0
Flugplatz
Louibach
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
300
250
200
150
100
S9

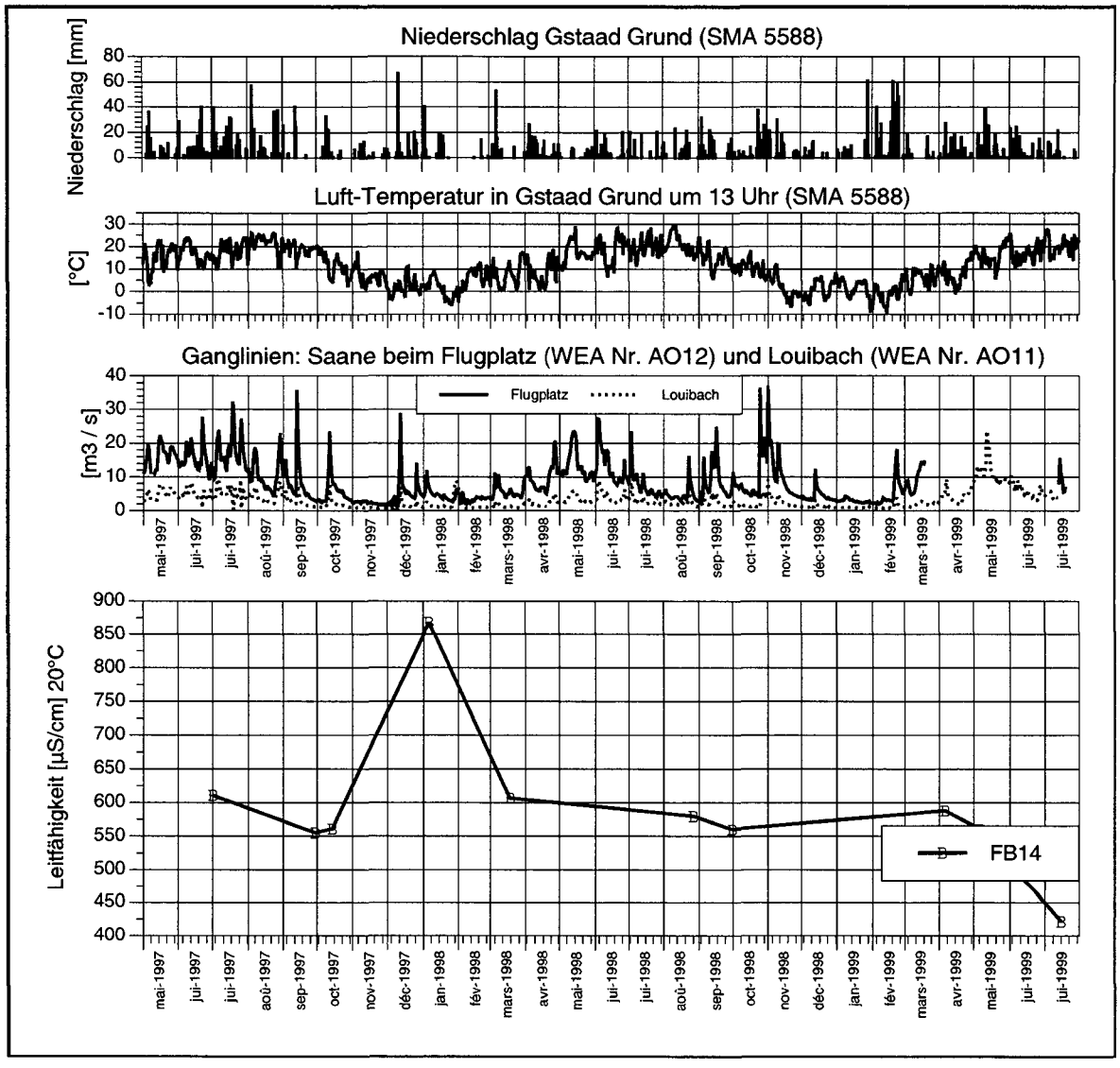

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
[m3 / s]
Flugplatz
Louibach
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
T1
T2
T3
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999

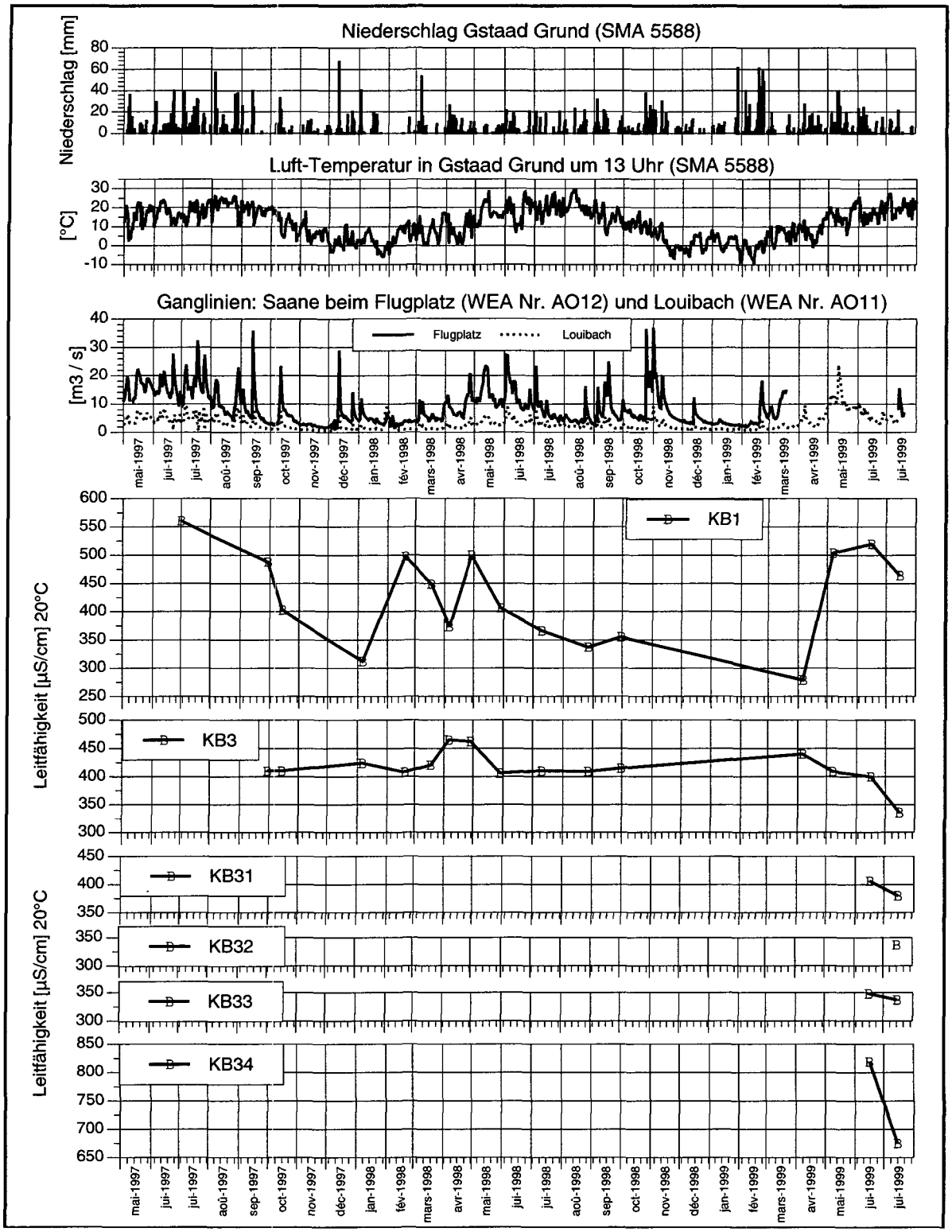

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
Flugplatz
Louibach
[m3 / s]
T4
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
T5
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999

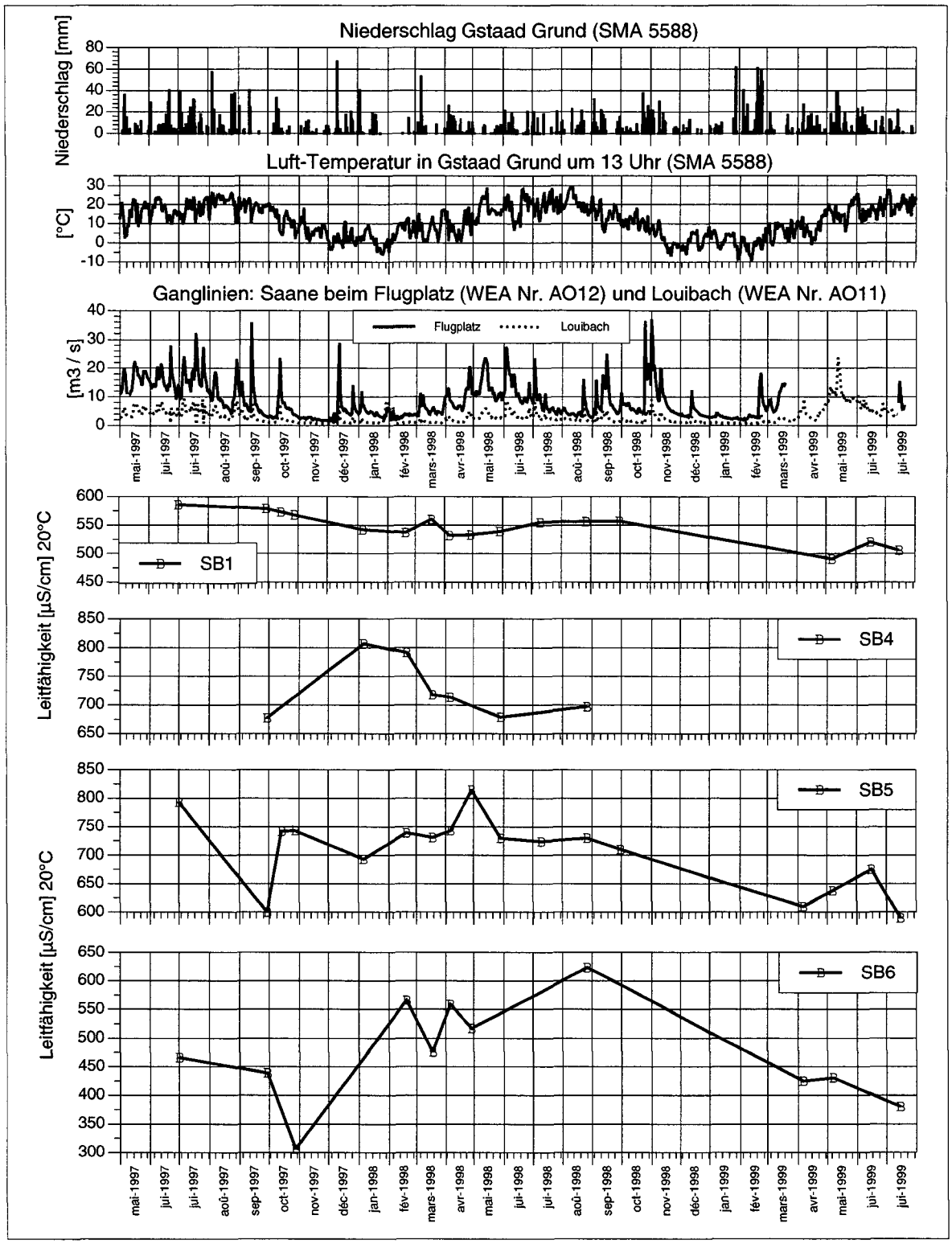

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
Flugplatz
Louibach
[m3 / s]
T6
T7
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999

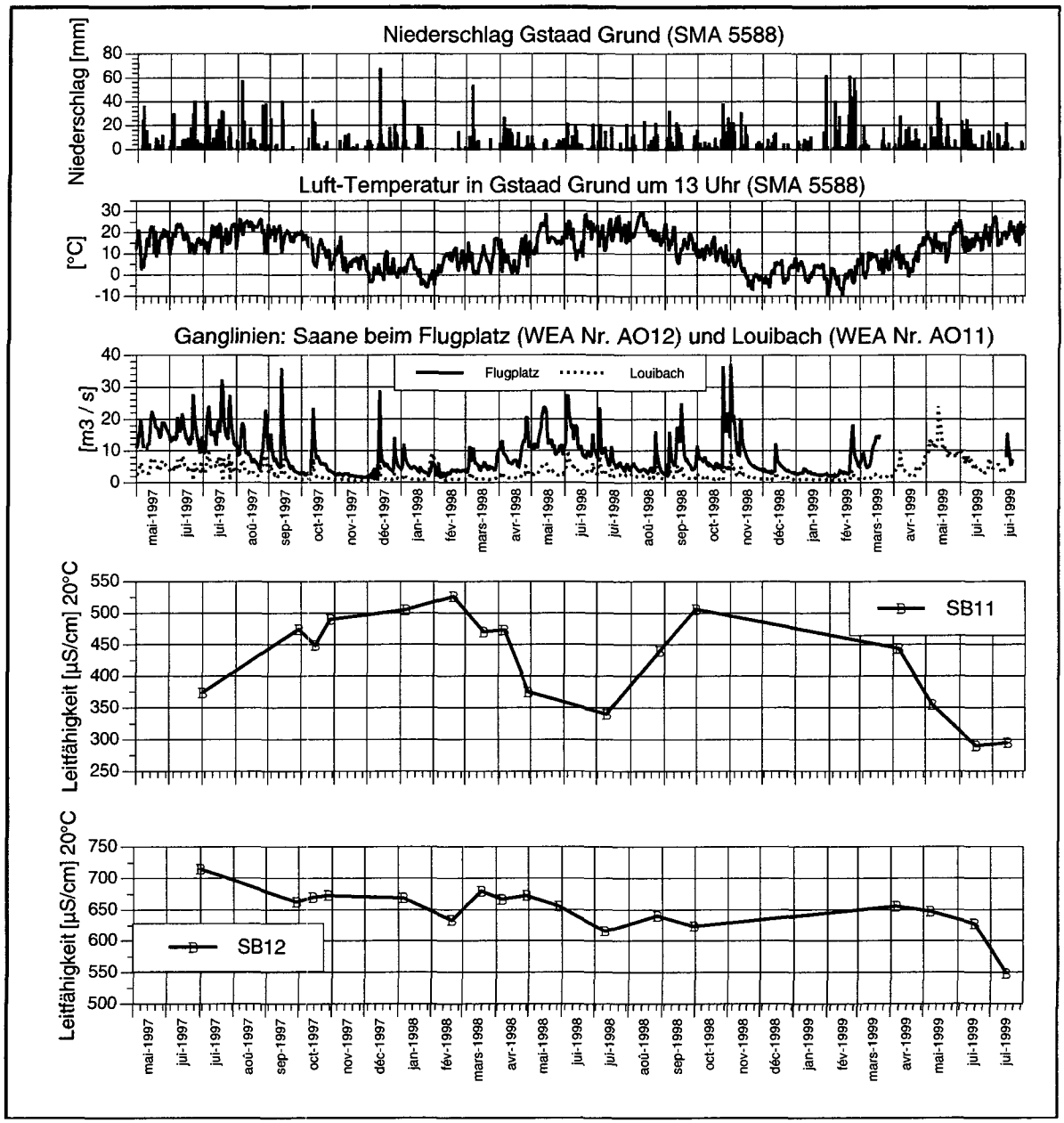

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
[m3 / s]
Flugplatz
Louibach
T8
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999

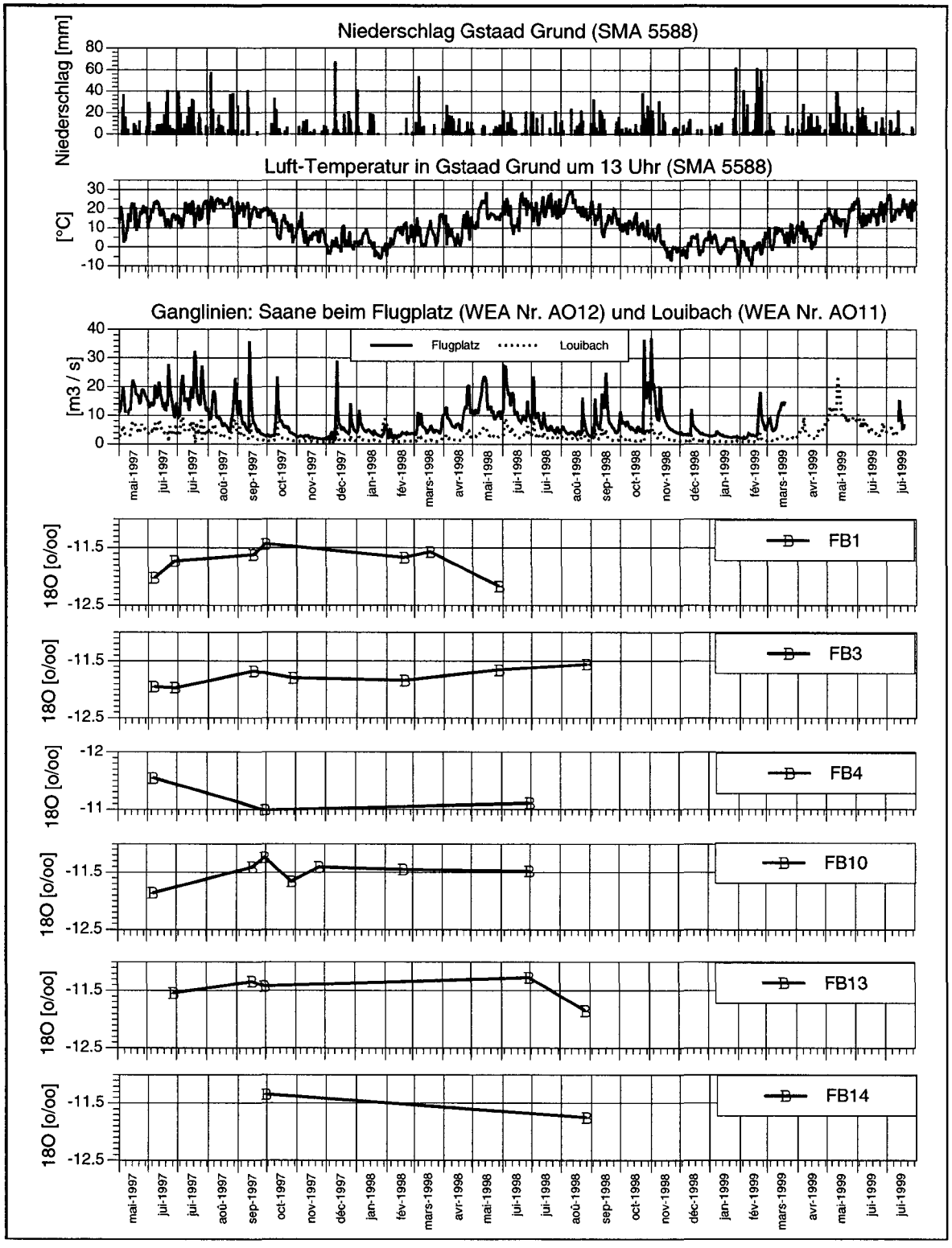

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
[m3 / s]
Flugplatz
Louibach
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
FB1
FB3
FB10
FB13
mai-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999

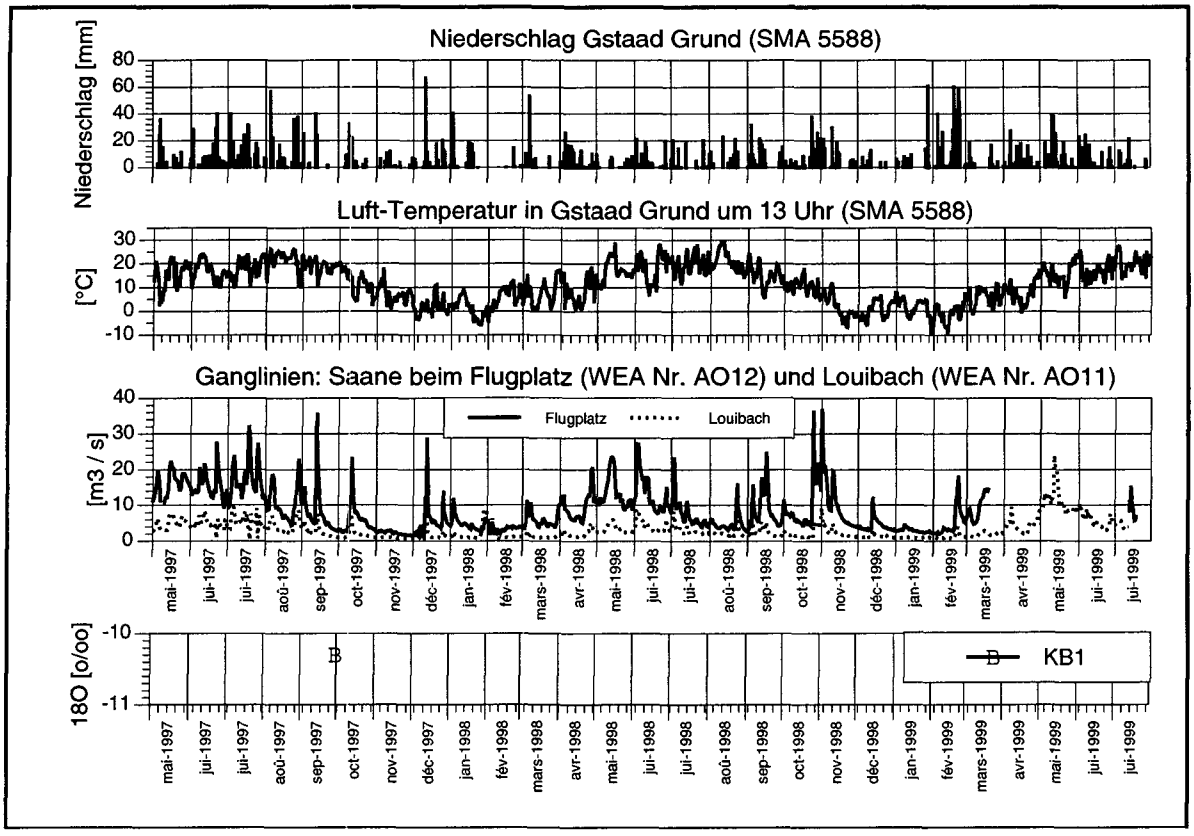

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
[m3 / s]
Flugplatz
Louibach
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
FB14
mai-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999

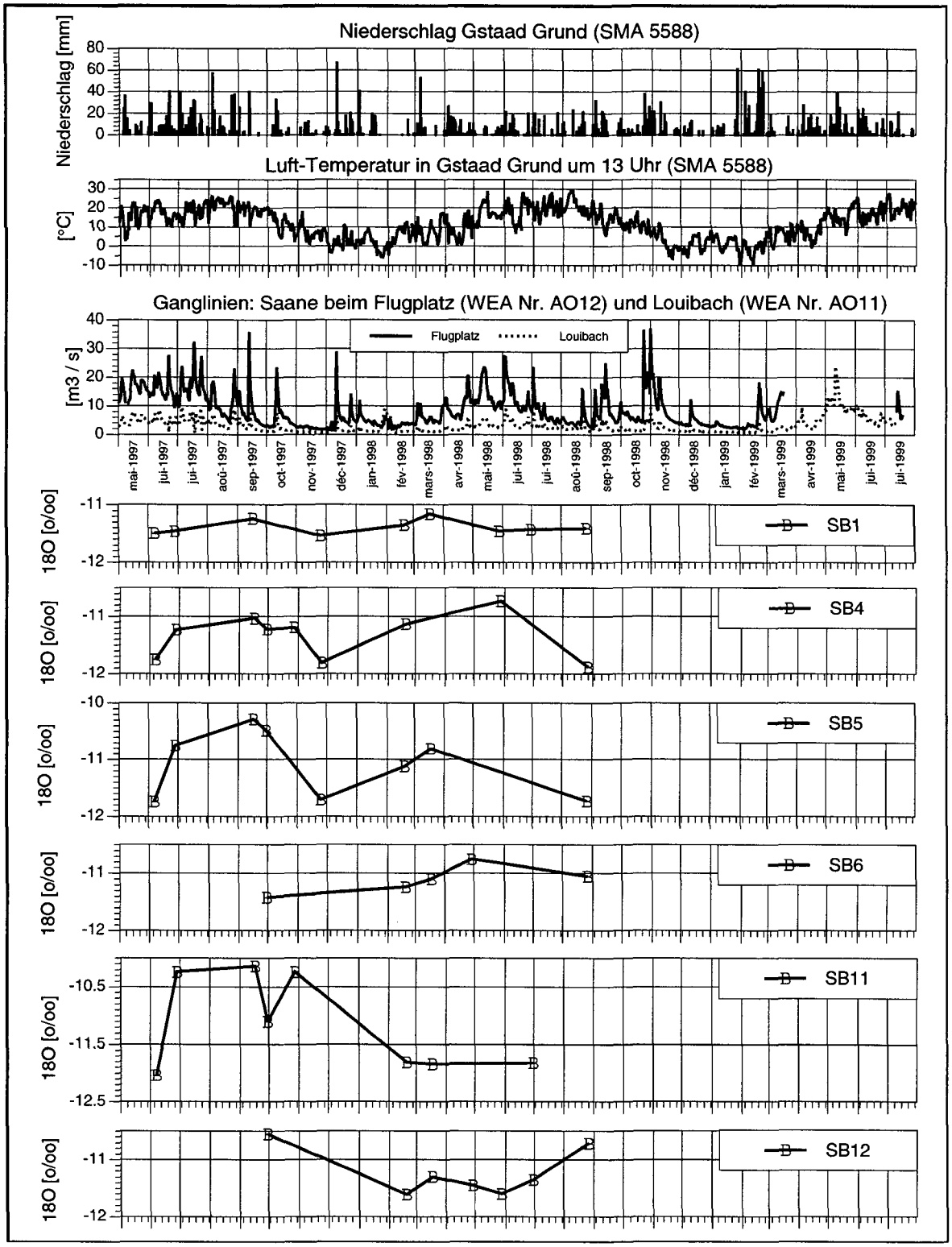

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
Flugplatz
Louibach
[m3 / s]
KB1
KB3
KB31
KB32
KB33
KB34
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
mai-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999

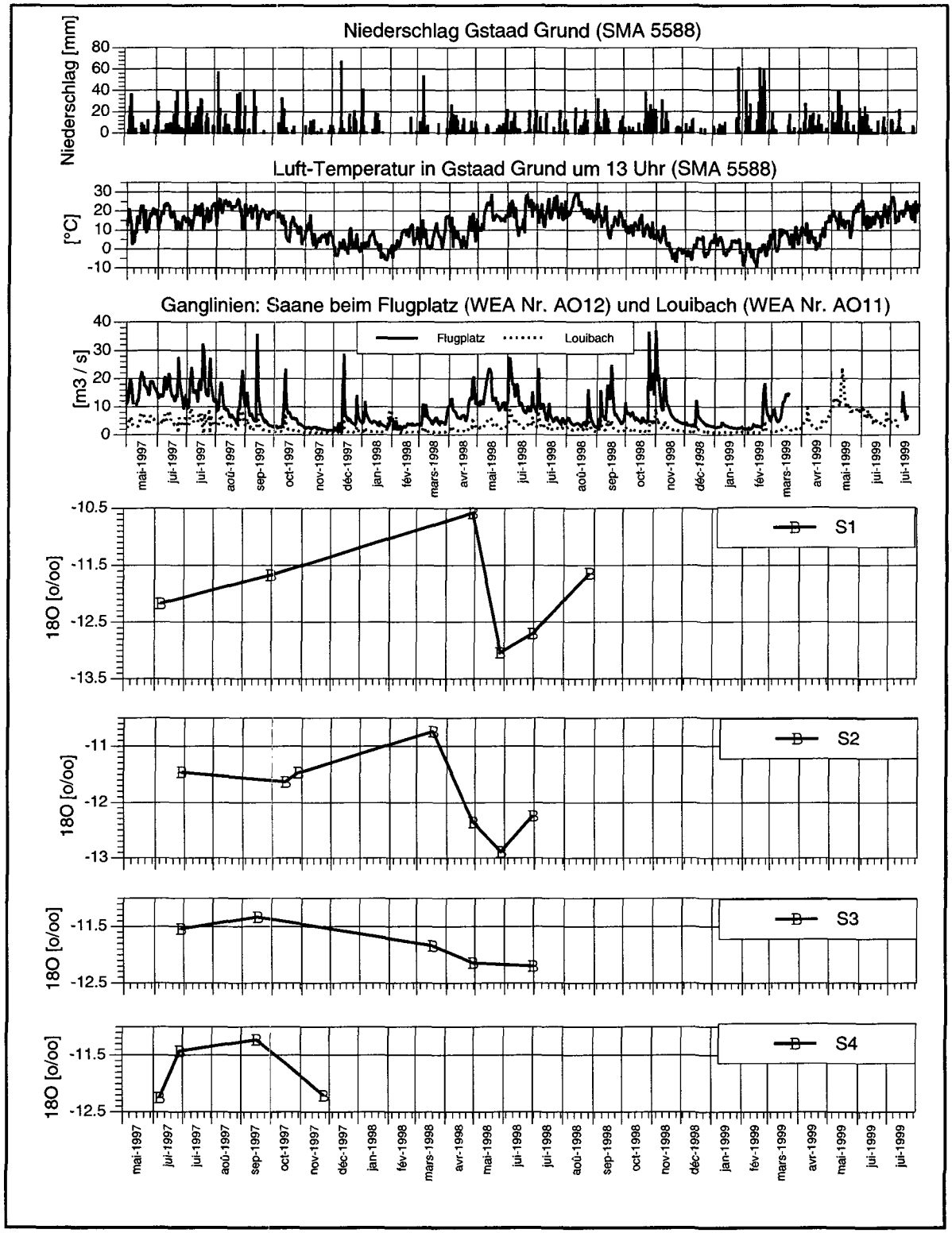

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
[m3 / s]
Flugplatz
Louibach
SB1
SB4
SB5
SB6
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999

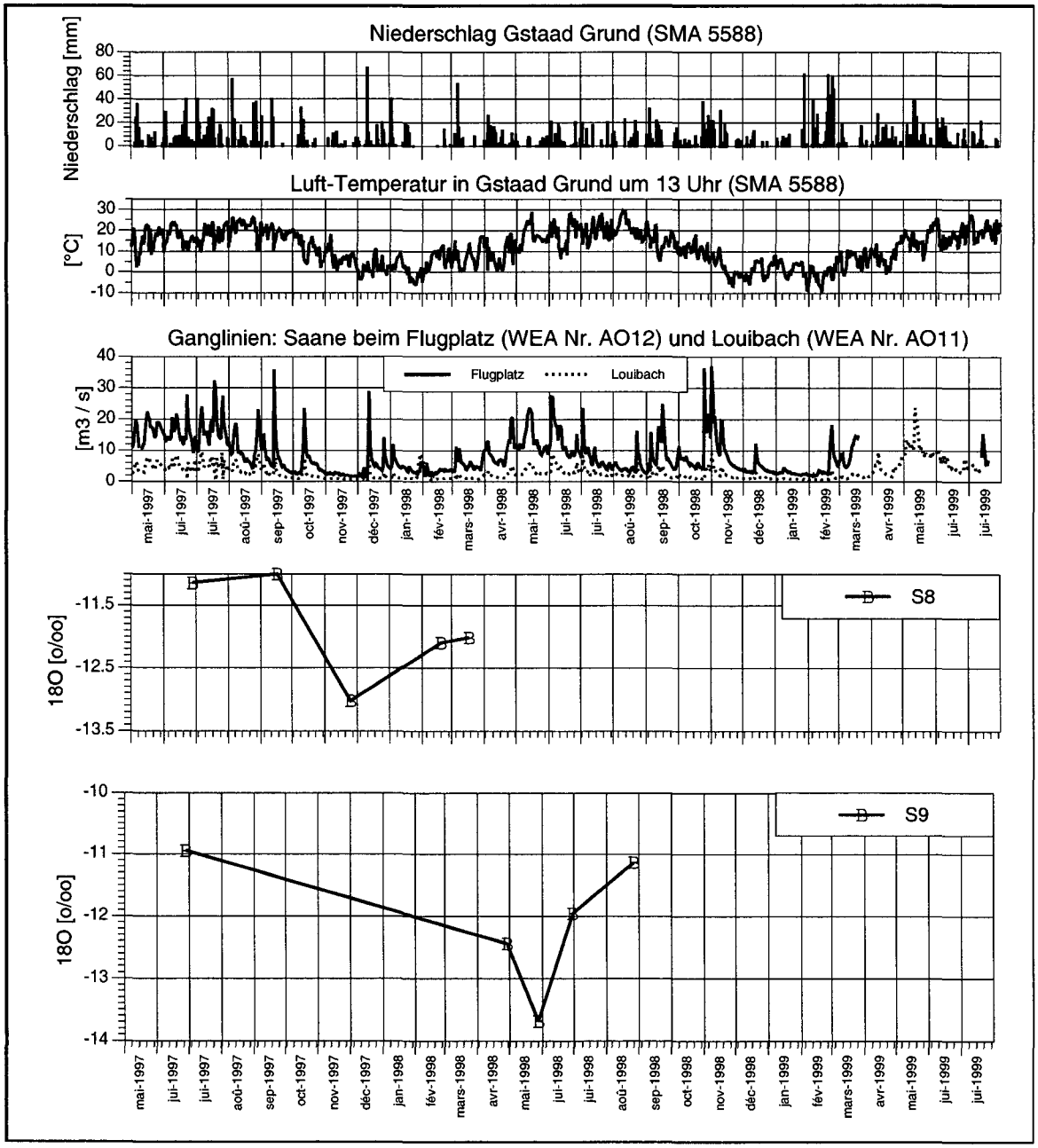

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
Flugplatz
Louibach
[m3 / s]
SB11
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
SB12
Leitfähigkeit [µS/cm] 20°C
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999

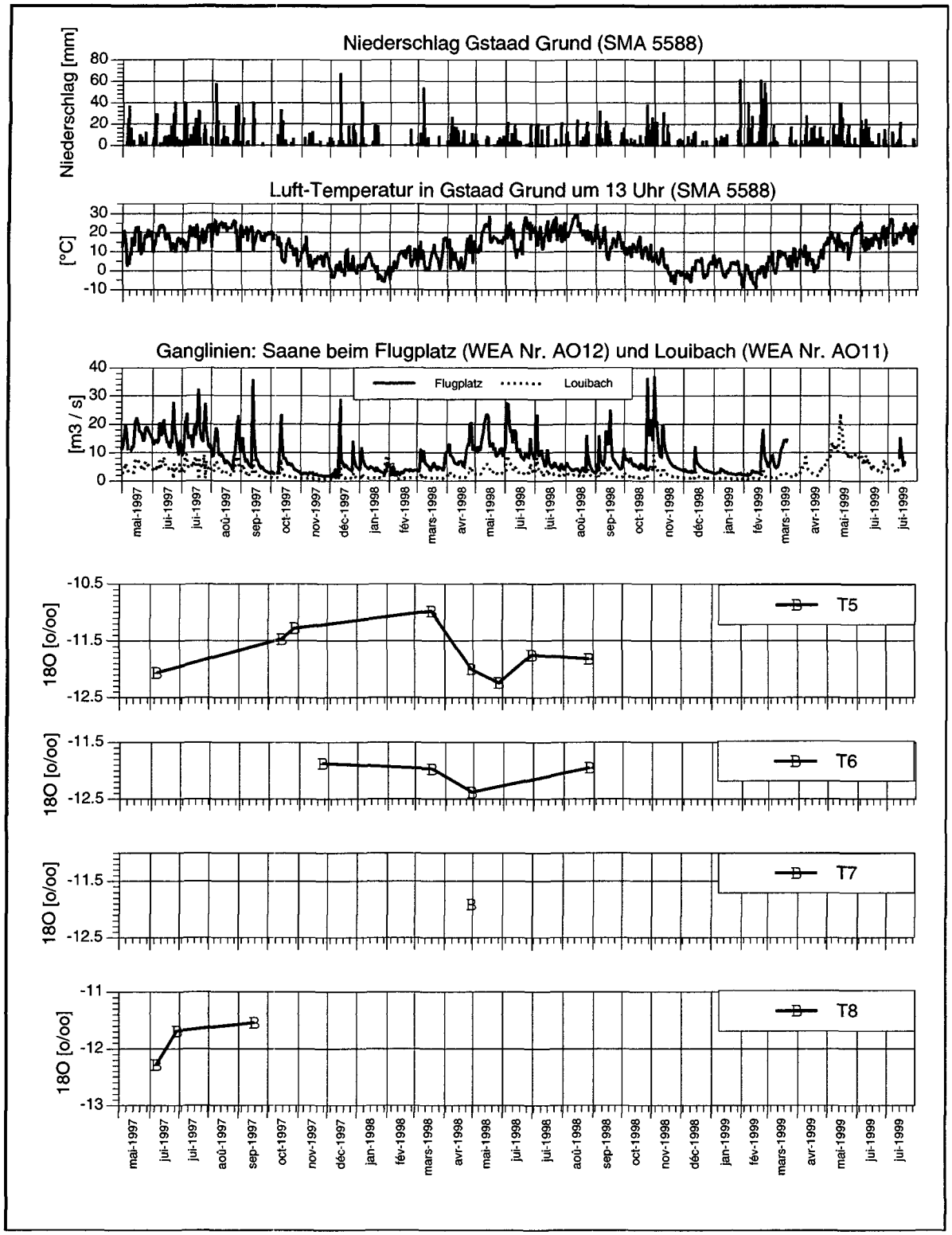

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
[m3 / s]
Flugplatz
Louibach
18O [o/oo]
FB1
FB3
FB4
FB10
FB13
FB14
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999

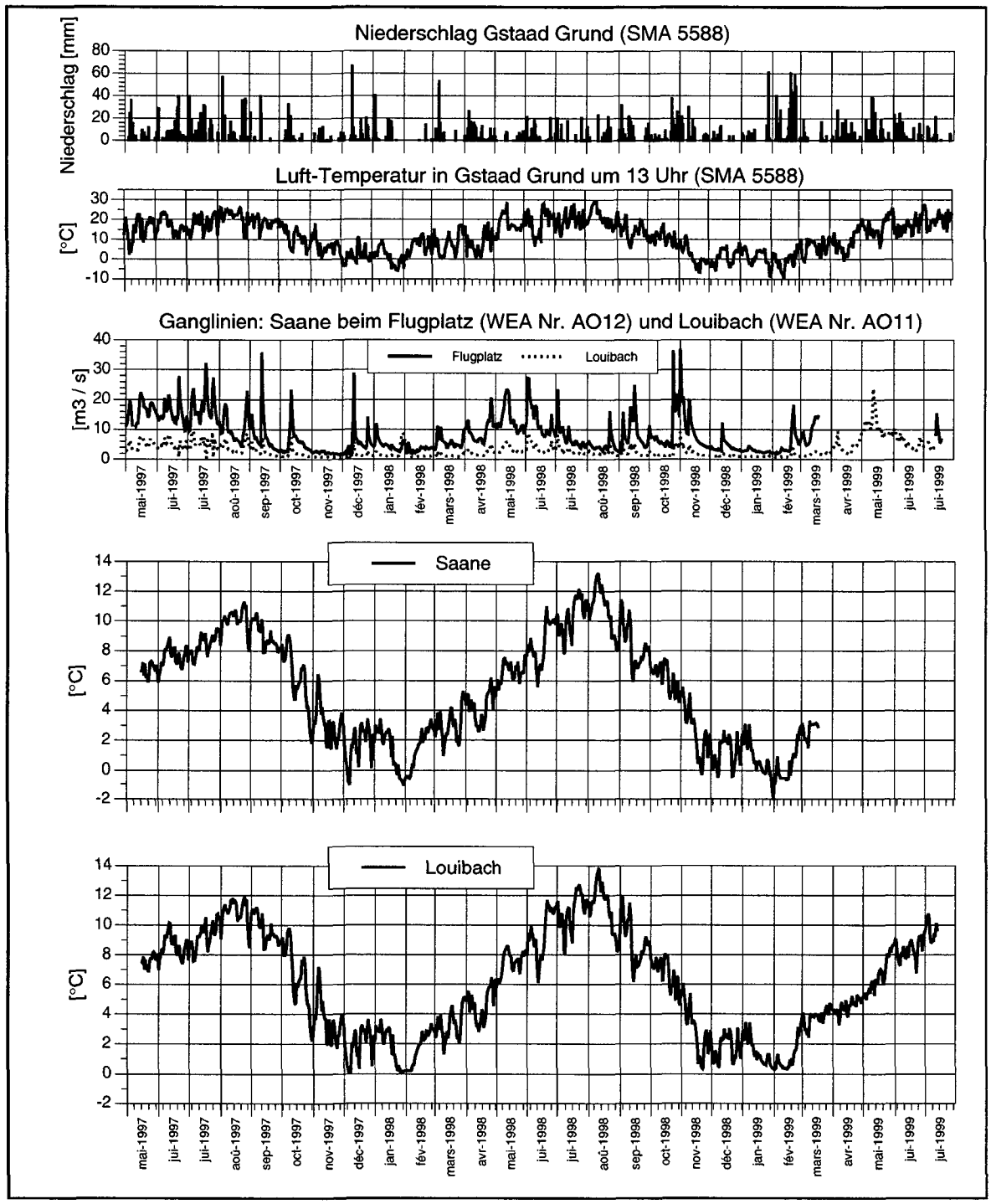

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
80
60
40
20
0
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
30
20
10
0
-10
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
Flugplatz
Louibach
[m3 / s]
40
30
20
10
0
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999
18O [o/oo]
-10
-11
KB1

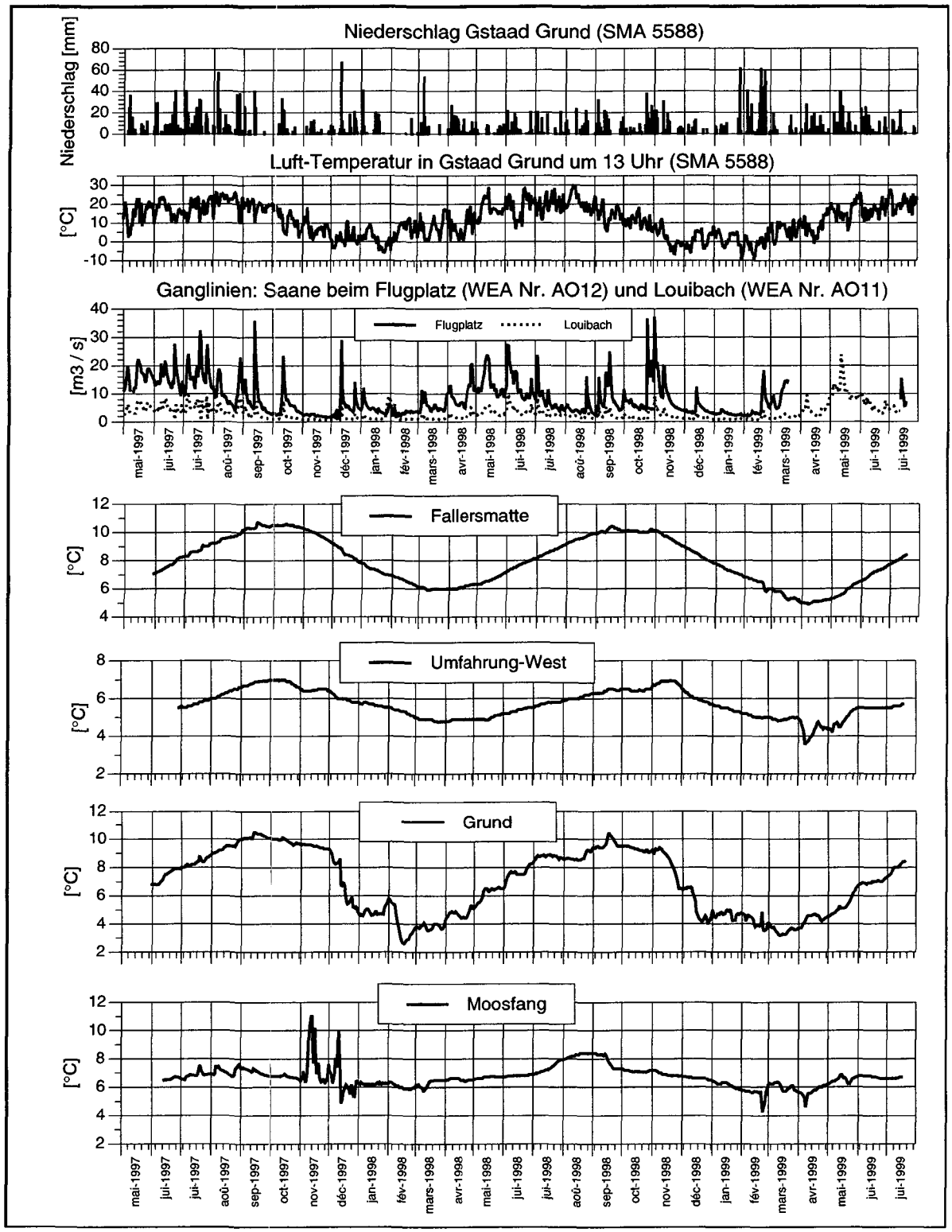

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
[m3 / s]
Flugplatz
Louibach
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999
18O [o/oo]
SB1
SB4
SB5
SB6
SB11
SB12

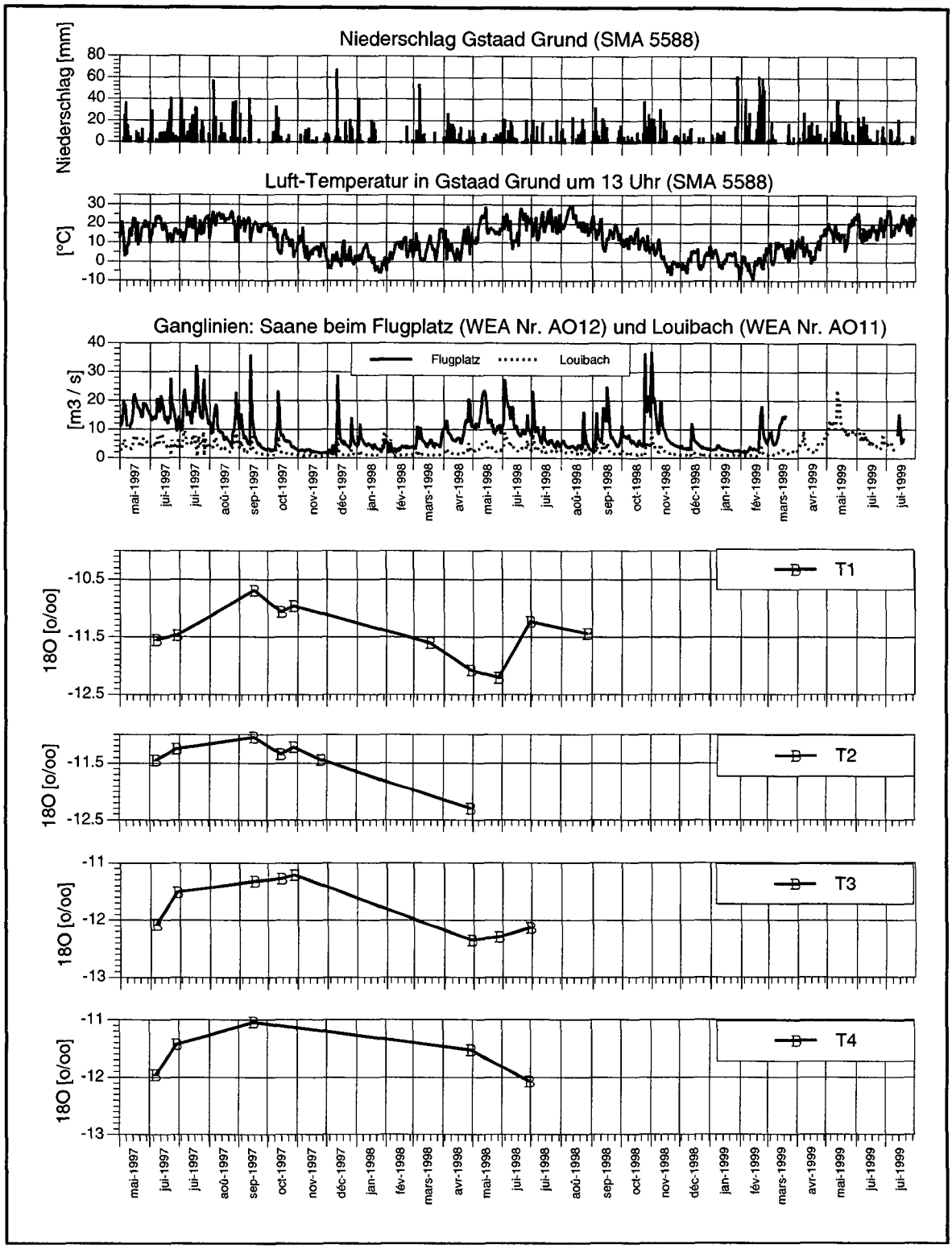

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
Flugplatz
Louibach
[m3 / s]
18O [o/oo]
S1
S2
S3
S4
mai-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999


Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
Flugplatz
Louibach
[m3 / s]
S8
18O [o/oo]
S9
18O [o/oo]
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999


Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
80
60
40
20
0
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
30
20
10
0
-10
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
Flugplatz
Louibach
[m3 / s]
40
30
20
10
0
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999
18O [o/oo]
-10.5
-11.5
-12.5
T5
T6
T7
-11
-12
-13
T8


Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
Flugplatz
Louibach
[m3 / s]
Saane
[°C]
Louibach
[°C]
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999

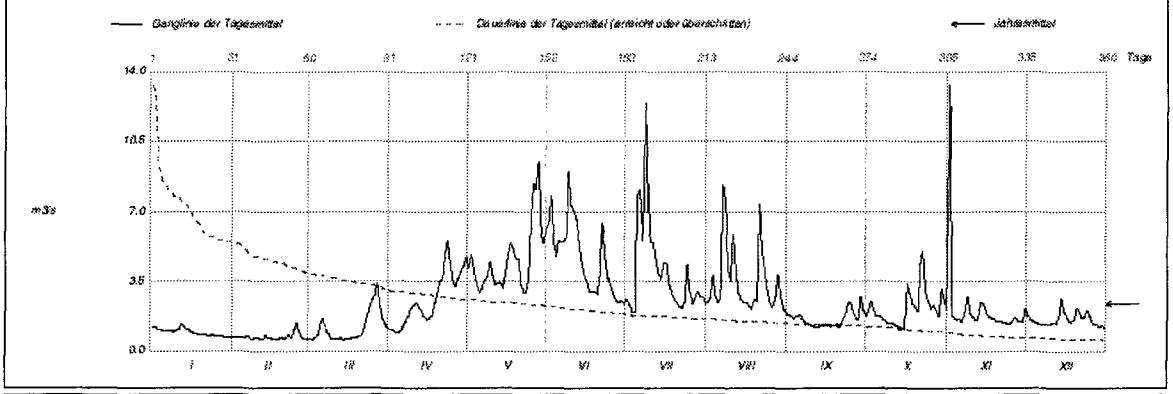

Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
Flugplatz
Louibach
[m3 / s]
Fallersmatte
Umfahrung-West
Grund
Moosfang
mai-1997
juin-1997
juil-1997
août-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
juin-1998
juil-1998
août-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
juin-1999
juil-1999


Niederschlag Gstaad Grund (SMA 5588)
Niederschlag [mm]
Luft-Temperatur in Gstaad Grund um 13 Uhr (SMA 5588)
[°C]
Ganglinien: Saane beim Flugplatz (WEA Nr. AO12) und Louibach (WEA Nr. AO11)
[m3 / s]
Flugplatz
Louibach
18O [o/oo]
T1
T2
T3
T4
mai-1997
jui-1997
jui-1997
aoû-1997
sep-1997
oct-1997
nov-1997
déc-1997
jan-1998
fév-1998
mars-1998
avr-1998
mai-1998
jui-1998
jui-1998
aoû-1998
sep-1998
oct-1998
nov-1998
déc-1998
jan-1999
fév-1999
mars-1999
avr-1999
mai-1999
jui-1999
jui-1999

Annexe VIII : Données limnigraphiques de la Sarine à Saanen WEA AO12

Abfluss	Louibach, Saanen	A011 - 598/146.003
	Koordinaten 598 115 / 146 130	Stations Höhe 1082.0 m — Fläche km2
		Mittlere Höhe m — Vergletscherung %

1996		Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	
	1	1.26	0.68	0.90	1.13	4.19	6.37	2.56	2.46	1.82	1.99	13.26 +	1.75	1
	2	1.20	0.67	0.59 -	1.07	4.83	7.81	2.28	2.63	1.73	2.52	1.80	1.57	2
	3	1.13	0.66	0.64	0.99	3.95	5.38	1.98 -	3.78	1.65	2.01	1.67	1.49	3
	4	1.05	0.67	0.62	0.93 -	3.23	4.76	1.96 -	2.77	1.74	1.75	1.57	1.44	4
	5	1.04	0.65	1.31	1.02	2.91	5.56	7.92	2.42	1.83	1.74	1.62	1.39	5
Tagesmittel	6	1.01	0.76	1.66	1.22	3.15	5.51	6.07	2.56	1.64	1.72	1.49	1.36	6
	7	1.00	0.73	1.10	1.51	3.80	5.52	5.59	6.33 +	1.50	1.59	2.13	1.35	7
	8	1.01	0.64	0.69	1.80	3.76	5.77	12.40 +	7.23	1.41	1.50	2.70	1.33	8
	9	0.98	0.65	0.63	2.15	4.46	9.00 +	7.61	4.12	1.35	1.41	1.67	1.34	9
	10	1.00	0.72	0.60	2.27	3.63	7.32	5.50	3.55	1.29	1.45	1.68	1.40	10
	11	1.13	0.63	0.60	2.44	3.32	7.06	5.50	5.92	1.23	1.37	1.56	1.45	11
	12	1.39 +	0.62	0.60	2.15	3.35	6.64	4.48	3.91	1.21 -	1.29	1.59	1.38	12
	13	1.26	0.80	0.65	1.98	3.44	5.79	3.80	2.93	1.31	1.21	2.48	1.68	13
	14	1.12	0.69	0.59 -	1.76	3.10	4.59	3.59	2.57	1.33	1.14	2.33	2.86 +	14
	15	1.02	0.65	0.80	1.59	3.82	3.90	4.30	2.47	1.29	1.12 -	1.68	2.00	15
m3/s	16	0.95	0.62	0.61	1.63	4.71	3.45	4.42	2.42	1.28	3.36	1.71	1.68	16
	17	0.89	0.61	0.65	1.78	5.42	3.03	3.35	2.34	1.25	2.50	1.65	1.52	17
	18	0.85	0.61	0.65	2.42	5.12	2.97	2.91	2.12	1.30	2.36	1.62	1.45	18
	19	0.82	0.70	0.68	2.86	4.65	2.93	2.57	2.58	1.29	2.23	1.50	1.59	19
	20	0.80	0.61	0.75	3.51	4.63	2.80	2.38	2.53	1.22	2.02	1.52	2.20	20
	21	0.80	0.68	0.88	3.70	3.35	3.52	2.22	7.42	1.37	4.43	1.46	1.69	21
	22	0.76	0.79	1.29	4.76	2.90 -	6.47	2.20	5.23	1.73	5.01 +	1.44	1.69	22
	23	0.77	0.72	1.72	5.55 +	2.94	4.61	2.43	4.04	2.38	2.98	1.36	1.73	23
+ Maximum	24	0.78	1.08	2.24	4.22	3.55	3.70	4.31	2.97	2.48	2.42	1.34 -	2.06	24
	25	0.76	1.41 +	2.80	3.35	6.88	3.23	2.67	2.33	1.91	2.11	1.43	1.75	25
- Minimum	26	0.75	1.01	2.80	3.25	3.42	2.87	2.37	2.18	1.67	2.26	1.68	1.48	26
	27	0.73	0.65	3.39 +	3.65	3.11	2.49	2.59	2.59	1.59	2.00	1.51	1.35	27
	28	0.70	0.59 -	2.15	3.98	3.51 +	2.43	2.96	3.69	2.69 +	1.76	1.52	1.33	28
	29	0.70	0.60	1.65	4.26	5.67	2.49	2.68	2.64	2.03	3.10	1.44	1.20	29
	30	0.68		1.35	4.67	5.40	2.34 -	2.71	2.12	1.75	2.64	2.11	1.27	30
	31	0.68 -		1.19		6.13		2.36	1.90 -		2.11		1.17 -	31
Monatsmittel		0.94	0.72 -	1.18	2.59	4.59	4.69 +	3.97	3.45	1.61	2.18	2.10	1.58	m3/s
Maximum (Spitze) Datum		1.49 - 12.	1.09 25.	3.60 27.	6.98 22. / 23.	11.57 25.	21.56 + 9.	15.23 8.	13.65 7.	3.33 26.	6.16 21.	6.98 7.	3.12 14.	m3/s
Jahresmittel							2.47 m3/s							

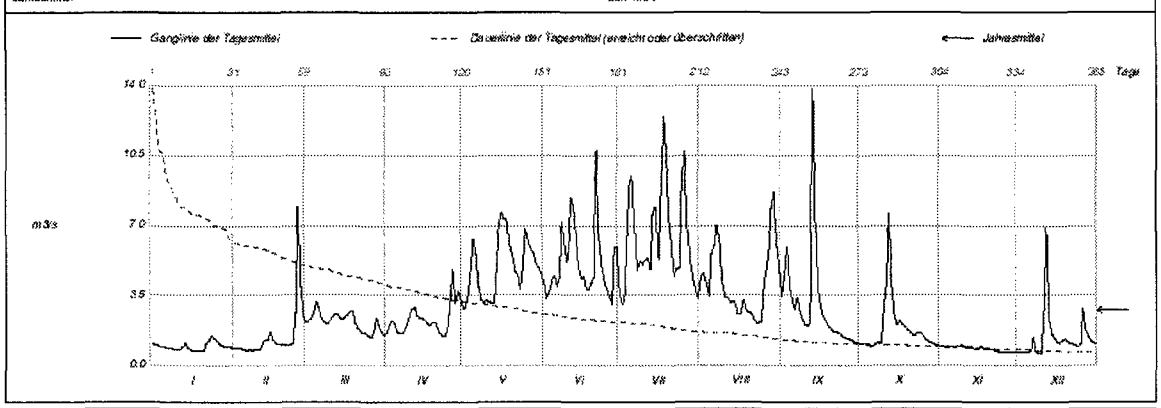


Periode	1994 - 1996												(3 Jahre)
Monatsmittel	1.35	1.04 -	1.56	2.87	5.87 +	5.47	4.81	3.36	2.83	1.55	1.44	1.30	m3/s
Maximum (Spitze) Jahr	8.14 1995	4.49 - 1995	8.91 1994	7.65 1995	15.32 1994	21.56 1996	45.20 + 1994	14.88 1994	14.68 1994	8.16 1996	6.98 1995	7.47 1995	m3/s
Minimum (Tagesmittel) Jahr	0.65 1996	0.59 1996	0.59 - 1996	1.14 1994	3.24 + 1995	2.34 1996	1.98 1996	1.97 1994	1.62 1994	0.85 1995	1.34 1996	1.17 1996	m3/s
Periode	Grösstes Jahresmittel 2.99 (1995)					Periodenmittel 2.79					Kleinstes Jahresmittel 2.47 (1996)		m3/s

Dauer der Abflüsse (erreicht oder überschritten)													
Tage	1	3	6	9	16	36	55	73	91	114	137	160	
1996	13.26	9.51	8.33	7.82	6.47	5.12	4.19	3.55	3.10	2.56	2.42	2.15	m3/s
1994 - 1996	11.19	9.78	9.33	8.57	7.33	5.88	5.07	4.41	3.83	3.23	2.75	2.42	m3/s
Tage	182	205	228	251	274	292	310	329	347	366	362	365	
1996	1.87	1.68	1.51	1.38	1.26	1.10	0.88	0.70	0.65	0.61	0.60	0.59	m3/s
1994 - 1996	2.11	1.73	1.51	1.32	1.17	1.06	0.95	0.83	0.70	0.64	0.60	0.58	m3/s

Abfluss	**Louibach, Saanen**	A011 - 598/146.003
	Koordinaten 598 115 / 146 130	Stations Höhe 1082.0 m — Fläche km2
		Mittlere Höhe m — Vergletscherung %

1997		Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	
	1	1.06	0.86	2.17	1.62	2.63 -	4.14	3.60	4.40	3.44	1.12	0.97	0.71	1
	2	1.02	0.87	2.21	1.95	2.90	3.35	3.06 -	4.62	4.50	1.12	0.94	0.67	2
	3	1.00	0.87	2.35	2.24	3.60	3.65	3.21	3.99	5.91	1.07	0.91	0.67	3
	4	0.97	0.84	2.58	2.13	4.93	4.17	8.18	3.47	3.62	1.02	0.89	0.65	4
	5	0.94	0.80	3.21 +	1.69	6.31	4.50	6.94	5.59	3.15	0.99	0.95	0.65	5
Tagesmittel	6	0.90	0.78	2.92	1.81	5.53	3.94	9.45	5.93	2.79	0.97 -	0.91	0.74	6
	7	0.87	0.79	2.31	1.81	3.93	4.35	6.78	7.01	3.40	1.06	0.93	1.43	7
	8	0.86	0.77 -	2.19	1.74	3.22	7.19	4.72	6.00	2.63	1.17	0.94	0.67	8
	9	0.85	0.79	2.11	2.05	3.11	5.60	5.22	4.16	2.25	1.10	1.02 +	0.63	9
	10	0.93	0.79	2.12	2.50	3.23	5.17	5.03	3.40	2.05	2.95	0.98	0.62 -	10
	11	0.81	0.82	2.33	2.62	3.20	5.93	5.28	3.37	1.98	4.08	0.95	2.94	11
	12	0.95	1.13	2.54	2.22	3.12	8.42	5.34	3.10	2.11	7.57 +	0.96	6.82 +	12
	13	1.15	1.31	2.58	2.50	3.09	7.80	4.62	3.21	13.79 +	3.83	0.92	2.27	13
	14	0.92	1.31	2.39	2.36	4.84	6.04	7.54	3.01	7.51	2.47	0.84	1.56	14
	15	0.82	1.73	2.31	2.40	6.99	4.97	7.95	2.55	3.90	2.03	0.80	1.36	15
m3/s	16	0.75	1.31	2.36	2.29	7.88 +	4.32	5.33	2.62	2.91	2.23	0.94	1.18	16
	17	0.74	1.15	2.52	2.11	7.29	4.44	7.50	3.96	2.42	2.07	0.93	1.11	17
	18	0.77	1.08	2.68	2.00	7.32	3.62	12.50 +	2.75	2.14	1.89	0.83	1.24	18
	19	0.73 -	1.07	2.68	2.18	5.93	3.78	10.40	2.86	1.92	1.76	0.78	1.35	19
	20	0.75	1.03	2.12	2.21	5.42	4.15	7.48	2.61	1.79	1.63	0.81	1.20	20
	21	1.10	1.02	1.82	1.84	4.69	4.40	5.68	2.28	1.68	1.52	0.81	1.13	21
	22	1.25	1.02	1.67	1.61	4.48	10.79 +	4.45	2.10 -	1.66	1.49	0.77	1.06	22
	23	1.50 +	1.05	1.60	1.49 -	3.78	6.11	4.62	2.14	1.60	1.67	0.73	1.00	23
+ Maximum	24	1.37	1.03	1.60	1.52	4.89	5.04	4.87	2.18	1.49	1.66	0.69	0.95	24
	25	1.20	2.84	1.47	1.78	6.86	4.26	9.18	4.19	1.41	1.45	0.70	1.12	25
- Minimum	26	1.09	7.95 +	1.40 -	2.99	8.06	3.77	10.69	4.90	1.36	1.32	0.68	2.57	26
	27	1.02	3.93	1.61	4.60 +	5.76	3.43	8.97	6.00	1.31	1.23	0.66	1.74	27
	28	0.96	2.42	2.39	3.12	5.69	3.08 -	5.09	7.86	1.25	1.15	0.65 -	1.44	28
	29	0.92		2.02	3.72	5.05	5.68	4.30	6.66 +	1.18	1.07	0.70	1.21	29
	30	0.92		1.83	3.48	4.89	5.57	3.65	5.89	1.13 -	1.03	0.69	1.15	30
	31	0.89		1.52		4.51		3.33	4.62		0.98		1.10	31
Monatsmittel		0.98	1.47	2.18	2.31	4.87	5.09	6.24 +	4.15	2.95	1.83	0.84 -	1.40	m3/s
Maximum (Spitze) Datum		1.57 23.	11.07 26.	4.20 5.	8.66 27.	10.08 18.	14.00 22.	17.62 14.	28.77 + 5.	20.68 13.	13.51 10.	1.19 - 9.	14.66 12.	m3/s
Jahresmittel							2.87 m3/s							

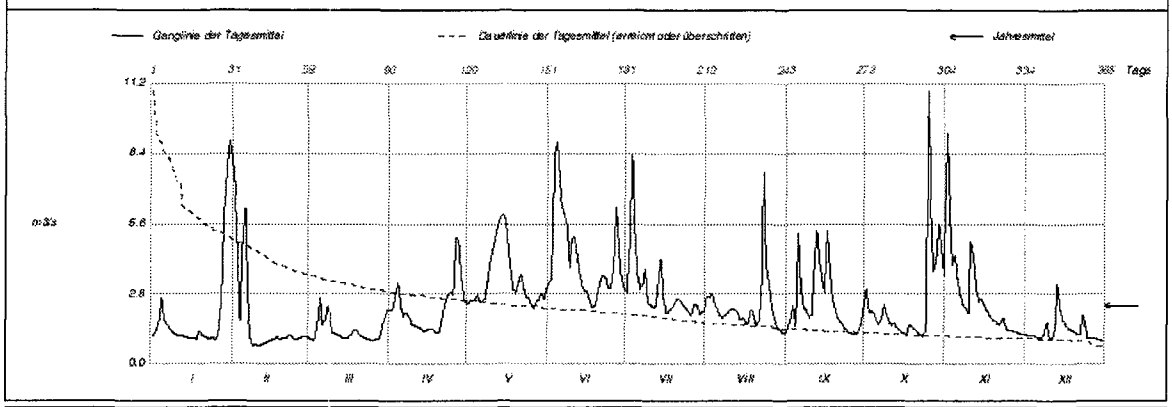


Periode	1994 - 1997											(4 Jahre)	
Monatsmittel	1.26	1.15 -	1.71	2.73	5.69 +	5.38	5.02	3.57	2.88	1.84	1.29	1.32	m3/s
Maximum (Spitze) Jahr	8.14 1995	11.07 1997	8.91 1994	7.65 1995	15.32 1994	21.56 1996	45.20 + 1994	28.77 1997	20.68 1997	13.51 1997	6.36 - 1996	14.66 1997	m3/s
Minimum (Tagesmittel) Jahr	0.68 1996	0.89 1994	0.59 - 1996	1.14 1994	3.02 1994	3.08 1997	3.20 + 1995	1.90 1996	1.62 1994	0.88 1995	0.84 1995	0.62 1997	m3/s
Periode	Größtes Jahresmittel 2.98 (1995)					Periodenmittel 2.81				Kleinstes Jahresmittel 2.47 (1996)			m3/s

Dauer der Abflüsse (erreicht oder überschritten)													
Tage	1	3	6	9	18	36	55	73	91	114	137	160	
1997	13.79	10.79	9.48	8.66	7.51	6.00	5.17	4.62	4.08	3.37	2.92	2.42	m3/s
1994 - 1997	12.40	10.36	9.33	8.57	7.42	5.92	5.09	4.45	3.87	3.25	2.79	2.42	m3/s
Tage	182	205	228	251	274	292	310	329	347	356	362	365	
1997	2.17	1.79	1.52	1.24	1.09	1.00	0.93	0.83	0.74	0.68	0.65	0.62	m3/s
1994 - 1997	2.11	1.74	1.51	1.31	1.13	1.04	0.94	0.83	0.70	0.65	0.61	0.58	m3/s

Abfluss	**Louibach, Saanen**	A011 - 598/146.003
	Koordinaten 598 115 / 146 130 — Stations Höhe 1082.0 m	Fläche km2
	Mittlere Höhe m	Vergletscherung %

1998	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	
1	1.12	7.25 +	1.04	2.15	2.40	3.21	2.85	2.74	1.27	2.97	9.19 +	1.17	1
2	1.27	4.73	0.95	2.15	2.55	3.37	4.74	2.68	1.67	2.07	6.08	1.15	2
3	1.57	1.75	0.93	2.76	2.54	8.38	8.93 +	2.85	2.31	2.10	3.98	1.12	3
4	2.64	4.80	1.44	3.25	2.75	6.62 +	5.34	2.35	1.53	2.06	4.36	1.14	4
5	1.79	6.20	2.65 +	2.24	2.54	7.22	3.51	2.20	5.24	1.71	3.42	1.08	5
Tagesmittel 6	1.63	2.71	1.58	1.91	2.47	6.32	3.00	1.94	3.11	1.58	2.75	1.07	6
7	1.46	1.10	1.71	2.08	2.62	6.02	3.15	1.85	2.24	1.84	2.39	1.04	7
8	1.33	0.71	2.32	1.93	3.30	5.51	3.79	1.99	2.18	2.38	2.19	1.19	8
9	1.23	0.73	1.63	1.66	3.95	3.95	2.43	2.06	1.64	1.88	2.10	1.68	9
10	1.17	0.70 -	1.27	1.56	4.50	4.81	2.34	2.14	1.96	1.65	4.89	1.03	10
11	1.14	0.72	1.22	1.52	5.00	5.13	2.27	2.23	3.60	1.53	4.27	1.04	11
12	1.13	0.77	1.16	1.48	5.53	4.49	2.31	2.14	5.31	1.62	2.95	1.14	12
13	1.11	0.82	1.08	1.41	5.81	3.64	3.24	2.00	4.03	1.45	2.50	3.20 +	13
14	1.07	0.88	1.00	1.33	5.96 +	3.13	4.20	1.78	3.32	1.34	2.61	2.20	14
15	1.02	0.93	1.02	1.35	5.80	2.91	2.58	1.84	2.89	1.26	2.36	1.75	15
m3/s 16	1.04	0.97	1.02	1.42	4.85	2.90	2.08	1.64	5.31 +	1.19	2.17	1.64	16
17	1.02	1.06	1.16	1.43	3.65	2.45	2.08	1.60	3.66	1.15	1.93	1.50	17
18	0.99	1.01	1.35	1.33	3.00	2.25 -	2.19	2.19	2.84	1.56	1.77	1.41	18
19	1.33	1.00	1.35	1.24 -	2.65	2.35	2.36	1.95	2.11	1.51	1.71	1.35	19
20	1.14	1.03	1.20	1.32	3.29	2.82	2.58	1.61	1.83	1.40	1.64	1.29	20
21	1.08	1.05	1.12	1.95	3.59	3.30	2.61	1.60	1.67	1.25	1.59	1.20	21
22	1.02	1.15	1.04	2.53	2.93	3.50	2.46	2.56	1.55	1.17	1.68	1.18	22
23	0.98	1.09	0.99	2.78	2.66	3.41	2.32	7.64 +	1.41	1.11 -	1.58	1.93	23
+ Maximum 24	1.05	1.01	0.97	2.90	2.64	3.01	2.21	3.94	1.31	1.29	1.40	1.52	24
25	0.93 -	1.01	0.92 -	2.77	2.30	3.07	2.01	3.20	1.24	10.91 +	1.35	1.04	25
- Minimum 26	1.16	1.04	0.93	5.05 +	2.25 -	3.85	1.99 -	2.22	1.20 -	5.19	1.33	1.05	26
27	2.83	1.09	0.95	4.66	2.52	6.23	2.42	1.81	1.20	3.70	1.30	1.03	27
28	5.55	1.10	1.06	3.38	2.55	4.40	2.35	1.55	1.24	4.12	1.24	1.01	28
29	7.65		1.42	2.59	2.82	3.38	2.01	1.40	1.52	5.60	1.23	0.98	29
30	6.88 +		1.89	2.40	2.81	2.98	2.09	1.25	2.31	4.49	1.21 -	0.95	30
31	6.17		2.19		3.02		2.11	1.25 -		3.55		0.91 -	31
Monatsmittel	2.12	1.73	1.31 -	2.22	3.39	4.23 +	2.90	2.27	2.42	2.47	2.64	1.32	m3/s
Maximum (Spitze)	10.76	10.28	4.09	7.02	8.25	12.33	16.14	11.45	6.31	21.63 +	13.57	4.05 -	m3/s
Datum	30.	1.	5.	28.	14.	4.	2.	23.	5.	25.	1.	13.	
Jahresmittel						2.42 m3/s							

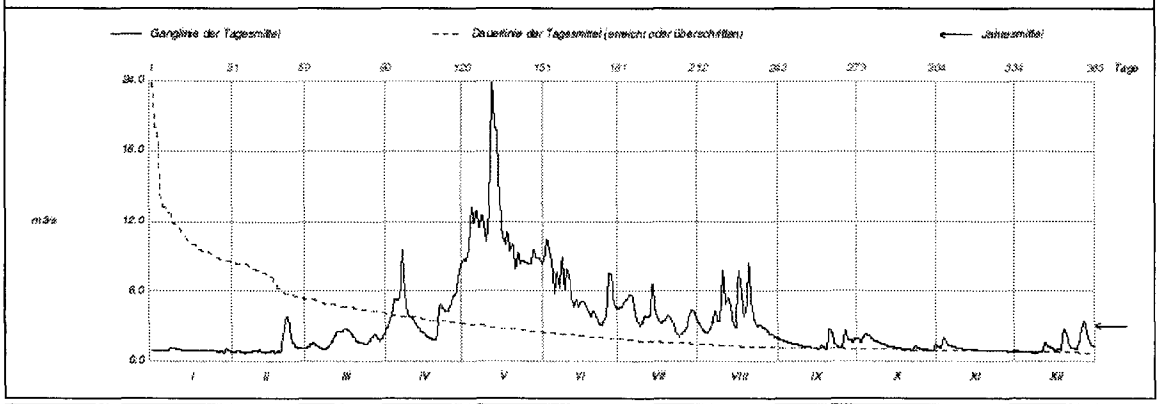


Periode	1994 - 1998											(5 Jahre)	
Monatsmittel	1.43	1.25 -	1.63	2.63	5.23 +	5.15	4.60	3.31	2.77	1.81	1.56	1.32	m3/s
Maximum (Spitze) Jahr	10.76 1998	11.07 1997	8.91 1994	7.65 - 1995	15.32 1994	21.56 1996	45.20 + 1994	28.77 1997	20.68 1997	21.63 1998	13.57 1998	14.68 1997	m3/s
Minimum (Tagesmittel) Jahr	0.73 1997	0.70 - 1998	0.99 1994	1.49 1997	2.90 1996	3.08 1997	3.20 + 1995	1.25 1995	1.21 1996	0.90 1994	1.02 1997	0.91 1998	m3/s
Periode	Grösstes Jahresmittel 2.98 (1995)					Periodenmittel 2.73				Kleinstes Jahresmittel 2.42 (1998)			m3/s

Dauer der Abflüsse (erreicht oder überschritten)													
Tage	1	3	6	9	18	36	55	73	91	114	137	160	
1998	10.91	8.88	8.30	7.64	5.81	4.74	3.66	3.04	2.90	2.61	2.36	2.19	m3/s
1994 - 1998	11.19	9.78	9.15	8.42	7.22	5.75	4.89	4.26	3.64	3.08	2.64	2.35	m3/s
Tage	182	205	228	251	274	292	310	329	347	356	362	365	
1998	1.99	1.75	1.56	1.40	1.25	1.17	1.10	1.04	0.96	0.93	0.73	0.70	m3/s
1994 - 1998	2.10	1.74	1.52	1.33	1.17	1.07	0.99	0.88	0.74	0.67	0.61	0.58	m3/s

Abfluss	Louibach, Saanen	A011 - 598/146.003
	Koordinaten 598 115 / 146 130	Stations Höhe 1082.0 m — Fläche km2
		Mittlere Höhe m — Vergletscherung %

1999		Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	
	1	0.82	0.88	1.12	2.94	6.72	5.55	4.52	3.23	1.69	1.99	1.29	0.73	1
	2	0.90	0.89	1.26	3.29	8.62	10.53 +	4.68	2.71	1.60	1.57	1.17	0.83	2
	3	0.91	0.92	1.53	4.07	9.48	9.38	4.92	2.51	1.72	2.13	2.04 +	0.81	3
	4	0.95	0.82	1.56	5.35	13.28	6.43	5.31	2.45	1.87	2.27 +	1.64	0.80	4
	5	0.97	0.78 -	1.35	5.27	11.86	5.84	5.65	2.77	1.61	2.19	1.38	0.80	5
Tagesmittel	6	0.96	0.78	1.20	5.43	12.87	7.63	5.88	3.41	1.55	1.97	1.38	0.81	6
	7	0.99	0.79	1.12	9.48 +	11.09	6.33	4.45	4.32	1.56	1.74	1.32	0.76 -	7
	8	1.23	0.88	1.05 -	5.63	12.54	8.94	3.48	3.43	1.45	1.73	1.19	0.78	8
	9	1.23 +	0.99	1.16	4.07	11.52	6.17	3.08	3.52	1.38	1.65	1.13	0.77	9
	10	1.10	0.86	1.33	3.82	10.18	7.90	3.25	7.80	1.31	1.54	1.12	0.78	10
	11	1.05	1.04	1.74	3.72	13.15	7.18	3.92	4.86	1.28	1.46	1.07	0.88	11
	12	1.01	0.83	2.18	3.22	23.61 +	5.30	3.82	5.45	1.25	1.37	1.04	1.63	12
	13	1.00	0.77	2.56	2.90	20.02	4.72	3.99	4.86	1.20	1.29	1.03	1.32	13
	14	0.98	0.81	2.52	2.56	18.89	5.31	6.66 +	3.10	1.15	1.25	1.04	1.15	14
	15	0.98	0.85	2.63	2.48	14.33	4.60	4.43	2.93	1.13	1.21	1.03	1.07	15
m3/s	16	0.94	0.88	2.61 +	2.21	10.66	5.19	2.52	7.79	1.10	1.16	0.99	0.96	16
	17	0.94	0.77	2.70	2.06	10.07	5.08	3.22	6.16	1.36	1.11	0.96	1.06	17
	18	0.90	0.95	2.40	1.99	11.04	4.59	3.38	3.89	1.20	1.07	0.92	1.00	18
	19	0.91	0.81	2.09	1.52	9.43	4.16	3.54	4.24	1.04 -	1.07	0.94	2.85	19
	20	0.90	2.04	1.76	1.82 -	10.03	3.67	3.90	6.49 +	2.74 +	1.08	0.90	2.40	20
	21	0.92	3.50	1.68	3.17	7.84 -	4.28	3.65	4.90	2.48	1.00	0.93	1.44	21
	22	0.94	3.89 +	1.69	4.90	9.27	3.68	3.15	3.61	1.48	0.97	0.90	1.21	22
	23	0.94	2.12	1.52	4.51	8.39	3.19	2.39	3.05	1.26	1.37	0.89	1.12	23
+ Maximum	24	0.98	1.59	1.48	4.34	6.82	3.10 -	2.13 -	3.19	1.18	1.17	0.89	1.06	24
	25	0.89	1.32	1.73	4.28	8.45	3.40	2.34	2.93	1.26	1.09	0.87	1.71	25
- Minimum	26	0.87	1.15	2.08	4.70	8.35	3.94	2.56	2.84	2.72	1.08	0.91	2.65	26
	27	0.88	1.19	2.35	5.59	6.32	7.55	2.81	2.61	1.86	1.01	0.87	3.46 +	27
	28	0.74 -	1.18	2.00	5.74	9.58	7.39	3.71	2.36	1.98	0.97	0.88	2.28	28
	29	1.11		1.79	7.19	8.65	4.28	4.37	2.29	1.58	0.96	0.80 -	1.69	29
	30	0.89		2.00	6.21	8.83	4.61	4.21	2.12	2.02	0.95 -	0.85	1.40	30
	31	0.87		2.44		6.42		3.64	2.08 -		1.52		1.27	31
Mittelwert		0.96 -	1.22	1.83	4.23	11.21 +	5.68	3.88	3.86	1.57	1.36	1.08	1.35	m3/s
Maximum (Spitze) Datum		2.30 - 29.	5.09 22.	3.13 18.	12.89 7.	29.93 + 12.	14.89 2.	10.58 14.	19.66 16.	10.90 20.	3.76 3.	2.47 3.	5.67 27.	m3/s
Jahresmittel							3.22 m3/s							



Periode	1994 - 1999												(6 Jahre)
Mittelwert	1.35	1.26 -	1.68	2.89	6.23 +	5.26	4.48	3.40	2.57	1.74	1.46	1.33	m3/s
Maximum (Spitze) Jahr	10.76 1998	11.07 1997	8.91 - 1994	12.89 1999	29.93 1999	21.56 1998	45.20 + 1994	25.77 1997	20.68 1997	21.63 1998	13.57 1998	14.88 1997	m3/s
Minimum (Tagesmittel) Jahr	0.73 1997	1.15 1994	0.92 1998	1.24 1998	2.90 1996	2.93 + 1994	2.41 1994	1.25 1998	1.62 1994	1.11 1998	0.66 - 1997	0.76 1998	m3/s
Periode	Grösstes Jahresmittel 3.22 (1999)					Periodenmittel 2.61				Kleinstes Jahresmittel 2.42 (1996)			m3/s

Dauer der Abflüsse (erreicht oder überschritten)													
Tage	1	3	6	9	18	36	55	73	91	114	137	160	
1999	23.81	19.69	13.15	11.86	9.58	8.35	5.68	4.70	4.07	3.43	2.84	2.35	m3/s
1994 - 1999	13.28	10.91	9.58	9.07	7.79	5.88	4.98	4.33	3.71	3.12	2.68	2.35	m3/s
Tage	182	205	228	251	274	292	310	329	347	356	362	365	
1999	1.99	1.61	1.35	1.19	1.07	1.00	0.94	0.89	0.82	0.79	0.77	0.74	m3/s
1994 - 1999	2.08	1.72	1.50	1.30	1.15	1.06	0.98	0.88	0.76	0.68	0.62	0.58	m3/s

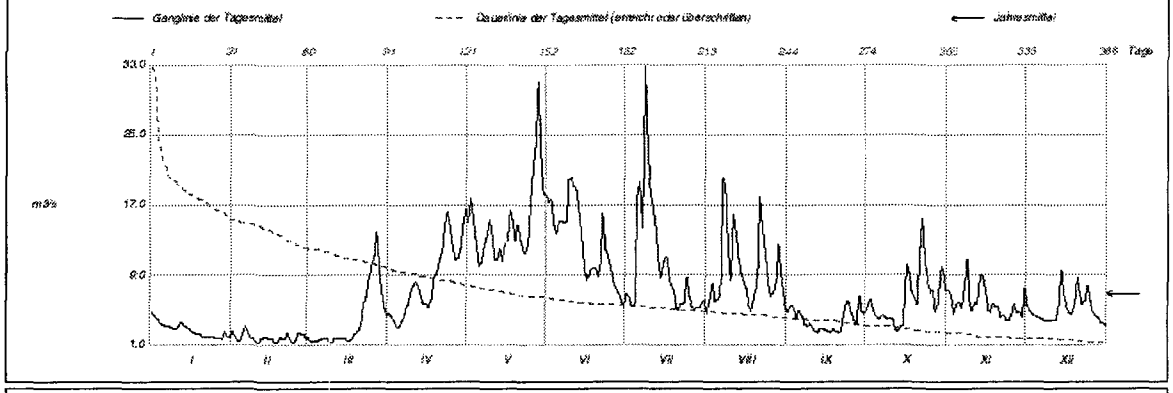
Abfluss	**Saane, Saanen**	A012 - 585/148.005
	Koordinaten 585 800 / 148 300	Stations Höhe 1004.0 m — Fläche km2
		Mittlere Höhe m — Vergletscherung %

1996 — Tagesmittel, m3/s

	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	
1	4.65 +	2.52	1.85	4.52	15.02	17.31	6.87	4.88 -	4.86	5.12	7.31	5.58	1
2	4.05	1.99	1.36	4.22	17.71	17.61	6.33	6.41	5.68	6.34	6.44	4.95	2
3	3.90	1.51	1.43	3.75	15.01	14.70	5.81	6.15	5.20	5.56	4.52	4.53	3
4	3.52	1.48	1.45	3.00 -	12.01	13.63	5.51	6.09	4.11	4.51	5.65	4.34	4
5	3.34	2.40	1.58	3.13	9.94 -	15.00	17.59	6.30	5.03	3.97	5.94	4.15	5
6	3.18	3.26 +	1.89	3.73	10.41	15.11	19.51	6.54	4.15	3.95	5.37	3.97	6
7	3.13	2.44	1.78	4.59	12.11	14.90	14.27	20.00 +	3.39	4.36	7.62	3.65	7
8	3.06	1.82	1.78	5.65	13.33	15.08	32.78 +	19.04	3.18	4.11	10.80 +	3.77	8
9	2.95	1.83	1.32 -	6.97	15.19	19.68	23.54	11.91	3.43	3.93	5.82	3.73	9
10	2.93	1.36	1.34	7.74	13.91	20.04 +	18.28	6.42	3.20	3.90	4.99	3.63	10
11	3.18	1.35	1.83	8.32	10.78	19.18	16.81	15.96	2.58	3.65	6.03	3.89	11
12	3.70	1.78	1.81	7.54	10.62	18.67	14.16	13.45	2.47	2.69	5.61	3.75	12
13	3.48	1.99	1.83	6.59	11.58	16.70	9.94	10.93	2.89	2.47 -	5.12	5.15	13
14	3.13	1.91	1.61	5.62	10.89	13.60	8.71	9.27	2.81	3.18	6.80	9.55 +	14
15	2.85	1.83	1.83	5.60	12.45	9.46	10.58	8.21	2.73	3.12	7.22	6.69	15
16	2.62	1.85	1.44	5.34	12.90	8.38	11.08	7.47	2.58	10.20	5.09	5.49	16
17	2.41	1.35	1.57	6.42	16.37	9.39	8.65	5.43	2.43	9.19	4.82	4.62	17
18	2.24	1.35 -	2.02	8.44	15.18	9.81	7.98	4.94	2.94	7.23	5.83	4.52	18
19	2.33	1.91	2.25	9.43	13.00	9.04	7.21	8.60	2.61	6.32	5.49	5.35	19
20	1.99	1.82	2.80	10.85	14.67	8.67	5.39	7.78	2.36 -	5.75	5.44	8.71	20
21	1.95	1.81	3.29	11.67	12.98	10.25	4.98	17.64	2.68	12.22	4.20	6.73	21
22	1.91	2.35	5.72	14.52	11.63	16.03	5.81	14.73	4.32	15.48 +	4.44	5.87	22
23	1.91	1.69	6.65	16.11	11.48	11.92	5.90	11.78	6.09	10.37	3.94	6.09	23
24	1.92	1.40	8.61	14.19	12.37	10.90	8.75	8.41	5.92	6.20	3.71 -	7.76	24
25	1.85	1.58	10.25	11.99	17.16	9.56	6.59	6.65	4.51	7.06	4.44	6.18	25
26	1.79	2.38	11.32	10.77	21.58	8.43	5.53	6.85	3.81	7.93	5.86	5.04	26
27	1.74	2.30	13.84 +	10.92	23.70	7.43	4.84 -	7.50	3.57	4.90	4.73	4.34	27
28	1.69 -	2.34	9.23	12.00	31.04 +	7.05	5.42	12.46	6.67 +	5.77	4.93	4.19	28
29	2.65	1.84	6.98	14.79	21.15	5.84	5.30	8.93	4.65	9.98	4.05	3.58	29
30	2.03		5.21	16.47 +	18.17	5.54 -	5.82	6.78	4.51	9.27	7.51	3.51	30
31	1.91		4.35		16.20		6.24	5.24		7.31		3.26 -	31
Monatsmittel	2.72	1.91 -	3.67	6.51	14.93 +	12.67	10.20	9.50	3.86	6.36	5.86	5.07	m3/s
Maximum (Spitze)	4.98	4.68 -	17.07	18.90	37.16	51.66 +	35.39	32.98	6.78	22.06	22.10	11.03	m3/s
Datum	19.	9.	27.	30.	29.	9.	8.	7.	28.	29.	7.	13. / 14.	
Jahresmittel						7.14 m3/s							

+ Maximum

- Minimum



Periode	1993 - 1996											(4 Jahre)	
Monatsmittel	4.98	3.42 -	6.68	12.65	21.35 +	19.03	14.85	9.39	10.19	6.27	4.15	5.41	m3/s
Maximum (Spitze)	27.60	21.52 -	37.66	43.90	41.87	51.66	55.46	33.26	41.70	31.60	22.10	70.70 +	m3/s
Jahr	1993	1995	1994	1993	1995	1996	1993	1995	1993	1993	1996	1993	
Minimum (Tagesmittel)	0.28 -	1.80	2.11	4.22	11.82 +	5.54	7.81	5.89	3.77	1.24	1.70	3.26	m3/s
Jahr	1993	1993	1995	1993	1993	1996	1994	1995	1993	1994	1994	1996	
Periode	Grösstes Jahresmittel 11.29 (1994)					Periodenmittel 9.91					Kleinstes Jahresmittel 7.15 (1996)		m3/s

Dauer der Abflüsse (erreicht oder überschritten)

Tage	1	3	6	9	18	36	55	73	91	114	137	160	
1996	32.78	23.70	21.15	19.88	17.71	15.01	12.90	10.93	9.84	8.41	7.05	6.18	m3/s
1993 - 1996	36.54	34.91	31.15	28.61	25.45	21.13	18.15	16.47	14.70	12.43	10.65	8.87	m3/s
Tage	182	205	228	251	274	292	310	329	347	356	362	365	
1996	5.65	5.09	4.51	3.90	3.26	2.65	2.36	1.85	1.74	1.45	1.35	1.34	m3/s
1993 - 1996	7.57	6.42	5.46	4.65	3.85	3.18	2.58	2.06	1.57	1.08	0.48	0.30	m3/s

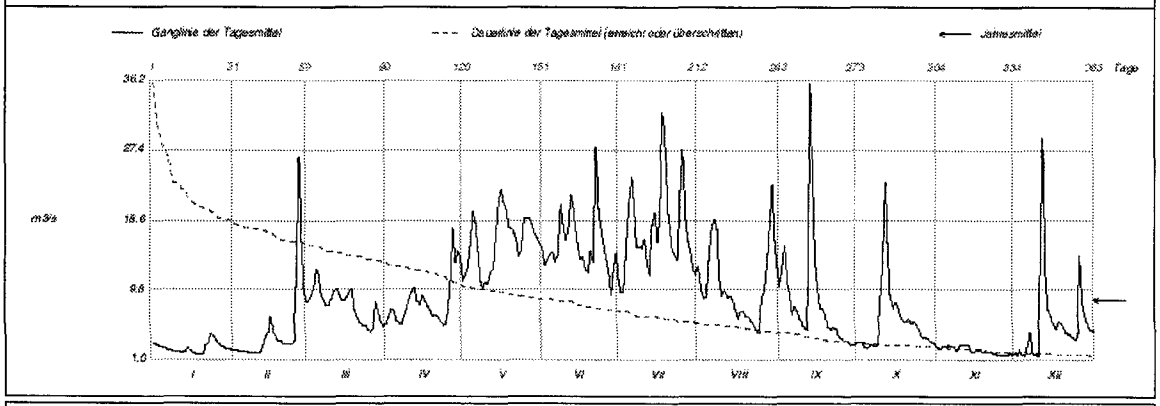
Abfluss | **Saane, Saanen** | **A012 - 585/148.005**

Koordinaten 585 800 / 148 300 | Stations Höhe 1004.0 m | Fläche km2

Mittlere Höhe m | Vergletscherung %

1997

	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	
1	3.09	2.19	8.37	5.36	10.80	14.99	10.67	12.71	10.29	3.16	2.47	1.83	1
2	2.69	2.17	8.31	6.28	11.54	12.64	9.44 -	8.95	12.24	3.25	2.35	1.78	2
3	2.78	2.07	9.05	7.29	12.68	13.36	9.72	6.69	15.42	3.17	2.70	2.35	3
4	2.64	2.02	8.91	7.20	15.81	14.17	15.67	6.96	10.80	2.56	2.65	1.68	4
5	2.48	2.01	12.43 +	5.77	19.75	14.48	21.05	13.46	6.62	2.47 -	2.67	1.58	5
Tagesmittel 6	2.32	1.92	11.56	5.38	18.18	13.37	24.02	17.31	6.70	2.67	2.65	3.31	6
7	2.20	1.89	9.12	5.41	14.37	14.12	19.46	16.75	7.71	2.96	2.66	4.48	7
8	2.13	1.89 -	8.37	6.26	10.90	20.64	15.15	17.34	7.10	2.75	2.25	1.65	8
9	2.06	1.89	7.84	7.30	9.67 -	17.54	15.21	11.29	6.03	2.64	2.62	1.61	9
10	2.03	1.92	7.79	6.71	10.74	15.92	15.06	6.99	5.24	7.43	2.90 +	1.55 -	10
11	1.95	2.02	8.67	9.54	10.58	17.07	16.18	9.70	4.91	12.64	2.65	12.75	11
12	1.92	3.25	9.59	10.02	12.02	21.73	12.98	8.86	4.73	23.37 +	2.67	29.02 +	12
13	2.12	4.13	9.90	8.36	12.39	20.30	11.86	9.05	35.81 +	15.57	2.89	11.64	13
14	2.57	4.44	9.22	7.73	16.07	17.17	17.34	8.65	22.42	9.23	2.14	7.37	14
15	2.26	6.41	8.58	8.97	20.87	13.14	19.55	7.44	13.64	7.86	2.05	6.51	15
m3/s 16	1.61	4.37	8.47	8.37	22.41 +	13.62	15.79	6.06	10.21	8.23	2.35	5.37	16
17	1.78	3.61	8.68	7.69	20.57	13.87	18.75	7.10	7.39	7.60	2.41	4.91	17
18	1.76	3.33	9.46	7.22	20.25	12.27	32.24 +	7.11	7.41	6.43	2.14	5.71	18
19	1.71 -	3.30	9.23	6.47	17.55	11.99	29.53	8.49	6.51	5.68	2.03	5.50	19
20	1.60	3.08	7.37	6.59	17.45	14.63	20.01	6.41	5.14	5.81	2.05	4.59	20
21	2.94	3.01	6.16	6.48	16.88	13.37	17.02	5.75	4.69	6.04	2.08	4.38	21
22	3.32	3.01	5.59	5.66	15.93	27.62 +	14.66	5.24	5.12	5.60	1.95	4.19	22
23	4.19 +	3.11	5.30	5.32 -	13.99	20.03	14.05	4.36 -	4.88	5.78	1.86	3.65	23
+ Maximum 24	3.67	3.36	5.30	5.51	14.57	17.70	13.58	4.45	3.96	5.40	1.79	3.58	24
25	3.36	10.22	4.79	6.22	16.84	15.60	23.34	8.71	3.71	4.21	1.79	4.32	25
- Minimum 26	3.03	26.57 +	4.48 -	10.15	18.91	13.63	27.42	9.52	3.48	3.81	1.75	14.13	26
27	2.77	15.62	4.98	17.54 +	16.84	12.09	18.77	12.69	3.31	3.91	1.72 -	8.21	27
28	2.57	10.00	6.31	13.20	17.99	9.09 -	15.67	17.29	3.17	3.67	1.72	6.44	28
29	2.38		7.20	14.58	16.75	12.30	14.42	23.06 +	2.96	3.40	1.80	5.18	29
30	2.31		5.86	13.87	18.29	14.51	12.16	16.00	2.84 -	3.22	1.78	4.78	30
31	2.22		5.12		15.38		11.75	12.56		3.06		4.56	31
Monatsmittel	2.49	4.75	7.93	8.16	15.78	15.52	17.21 +	10.46	8.22	5.93	2.27 -	5.77	m3/s
Maximum (Spitze)	4.42 -	35.18	15.28	22.10	26.35	35.16	44.48	51.72	54.53	31.71	5.25	54.76 +	m3/s
Datum	23.	26.	5.	27.	15.	22.	18.	5.	13.	12.	12.	12.	
Jahresmittel							8.74 m3/s						



Periode | 1993 - 1997 | (5 Jahre)

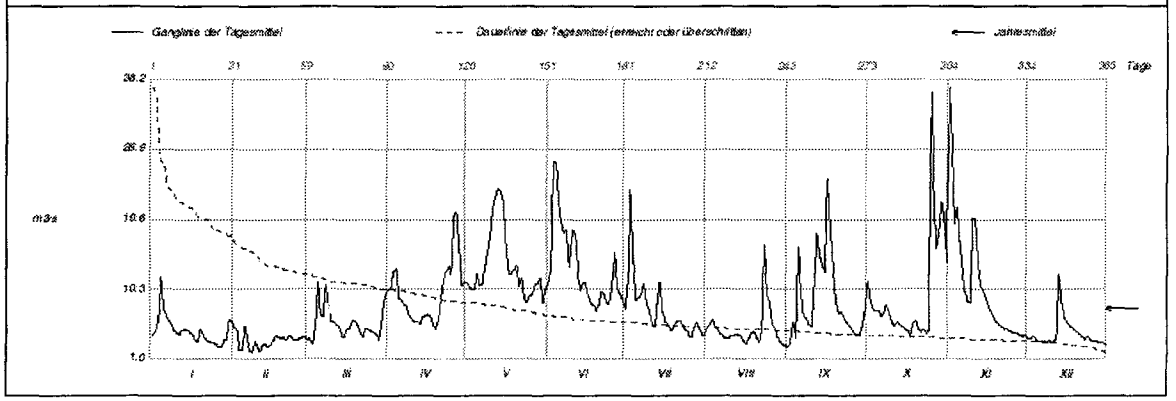
Monatsmittel	4.48	3.68 -	6.92	11.91	20.24 +	18.33	15.32	9.61	9.60	6.21	3.78	5.48	m3/s
Maximum (Spitze)	27.60	35.16	37.86	43.90	41.87	51.86	55.46	51.72	54.53	31.71	22.10 -	70.70 +	m3/s
Jahr	1993	1997	1994	1993	1995	1996	1993	1997	1997	1997	1996	1993	
Minimum (Tagesmittel)	1.60	1.89	1.54 -	3.00	15.47 +	5.54	7.81	4.34	6.36	3.93	1.72	1.55	m3/s
Jahr	1996	1997	1993	1996	1995	1996	1994	1997	1995	1993	1997	1997	
Periode	Grösstes Jahresmittel 11.29 (1994)					Periodenmittel 9.58				Kleinstes Jahresmittel 7.15 (1996)			m3/s

Dauer der Abflüsse (erreicht oder überschritten)

Tage	1	3	6	9	18	36	55	73	91	114	137	160	
1997	35.61	29.50	27.42	23.37	20.54	17.55	15.67	14.43	13.20	11.29	8.46	5.37	m3/s
1993 - 1997	35.99	33.13	30.30	28.34	24.91	20.04	17.54	15.94	14.35	12.18	10.35	8.73	m3/s
Tage	182	205	228	251	274	292	310	329	347	356	362	365	
1997	7.20	5.86	5.14	4.19	3.17	2.67	2.47	2.07	1.83	1.76	1.65	1.55	m3/s
1993 - 1997	7.49	6.33	5.37	4.52	3.75	3.08	2.56	2.06	1.72	1.21	0.52	0.30	m3/s

Abfluss	**Saane, Saanen**	A012 - 585/148.005
	Koordinaten 585 800 / 148 300	Stations Höhe 1004.0 m — Fläche km2
		Mittlere Höhe m — Vergletscherung %

1998		Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	
	1	4.10	5.12	3.54	10.28	11.30	10.98	7.73	5.18	2.66 -	11.54	37.03 +	3.72	1
	2	4.88	4.76	3.67	10.38	10.49	12.60	11.37	5.71	3.13	8.56	29.32	3.65	2
	3	6.38	2.21	3.07 -	12.67	10.37	27.19 +	23.55 +	6.37	6.03	7.46	18.99	4.02	3
	4	11.99 +	2.31	5.35	13.05	10.41	27.05	14.14	5.16	3.86	7.56	21.22	3.47	4
	5	7.76	5.32 +	11.28 +	9.09	12.34	21.58	8.91	4.71	15.97	7.55	16.88	3.38	5
Tagesmittel	6	6.68	3.59	6.97	6.81	10.99	19.44	9.32	4.16	10.26	8.77	12.99	3.30	6
	7	6.01	2.08	6.80	6.32	11.05	17.70	9.63	3.93	6.81	7.24	10.05	3.39	7
	8	5.40	1.99 -	10.85	7.63	13.64	16.07	11.15	3.65	6.46	8.18	6.73	3.12	8
	9	4.62	3.39	8.01	6.81	15.24	13.35	9.20	3.68	5.62	6.97	6.50	3.46	9
	10	4.45	2.44	6.13	6.30	17.31	15.84	7.55	4.05	5.31	5.89	19.75	3.10	10
	11	4.30	2.06	5.94	6.09	21.04	19.11	5.54	4.13	9.77	5.46	19.63	3.41	11
	12	4.73	2.81	5.58	6.03	22.40	17.35	5.30	4.22	17.74	5.97	13.50	3.56	12
	13	4.98	3.05	5.10	5.61	23.64 +	11.79	8.37	4.15	14.59	5.79	10.77	12.32 +	13
	14	4.77	2.67	3.98	6.73	23.16	10.23	11.32	3.74	13.36	5.25	10.03	8.64	14
	15	4.50	2.88	3.89	6.94	21.95	11.21	7.38	3.30	12.64	5.00	9.14	6.56	15
m3/s	16	4.13	3.57	4.92	7.04	15.55	11.18	6.07	3.04	24.99 +	4.73	8.09	6.04	16
	17	3.58	4.02	4.97	6.77	12.32	9.31	5.69	3.75	18.08	4.00 -	7.21	5.54	17
	18	3.32	3.80	6.22	5.34	12.33	8.36	4.94	4.44	12.98	5.71	6.42	5.23	18
	19	4.92	3.73	6.26	4.98 -	12.65	8.18	4.89	4.54	8.67	6.23	6.12	4.91	19
	20	4.13	3.66	5.52	6.40	13.42	7.53 -	5.99	3.74	7.19	5.01	5.74	4.84	20
	21	3.72	3.52	4.32	8.73	10.80	8.31	8.24	3.11	7.26	4.47	5.27	4.24	21
	22	3.37	4.02	3.93	11.13	11.73	10.08	6.21	4.60	6.52	5.05	5.09	3.67	22
	23	3.15	3.86	4.94	12.66	8.98	8.57	5.04	16.22 +	5.99	4.35	5.13	3.60	23
+ Maximum	24	3.08	3.48	4.90	13.43	8.53 -	8.47	4.83	8.49	5.55	4.76	4.73	3.60	24
	25	2.94	3.52	4.61	12.37	9.45	8.42	4.01	8.49	4.68	36.47 +	4.57	3.46	25
- Minimum	26	2.67	3.67	4.56	20.08	9.63	10.43	3.83 -	5.73	4.17	21.68	4.39	3.38	26
	27	2.57 -	3.68	4.34	20.66 +	11.06	15.24	5.24	4.87	4.10	15.82	4.23	3.35	27
	28	3.37	3.68	3.64	15.43	11.07	10.37	8.07	3.87	4.33	17.89	4.07	3.25	28
	29	3.54		4.96	10.85	11.75	9.62	4.87	3.38	5.38	21.90	4.00 -	3.11	29
	30	8.43		8.23	11.27	8.58	8.77	4.07	3.05	7.54	19.76	4.09	3.19	30
	31	6.00		9.65		10.30		4.04	2.77 -		14.05		2.87 -	31
Monatsmittel		4.73	3.41 -	5.69	9.74	13.35 +	13.22	7.47	4.69	8.72	9.58	10.86	4.31	m3/s
Maximum (Spitze)		25.51	23.09	16.13	25.51	28.45	36.06	34.72	25.23	31.56	66.89 +	57.22	15.04 -	m3/s
Datum		31.	1.	5.	26.	14.	4.	3.	23.	16.	25.	1.	13.	
Jahresmittel							8.00 m3/s							



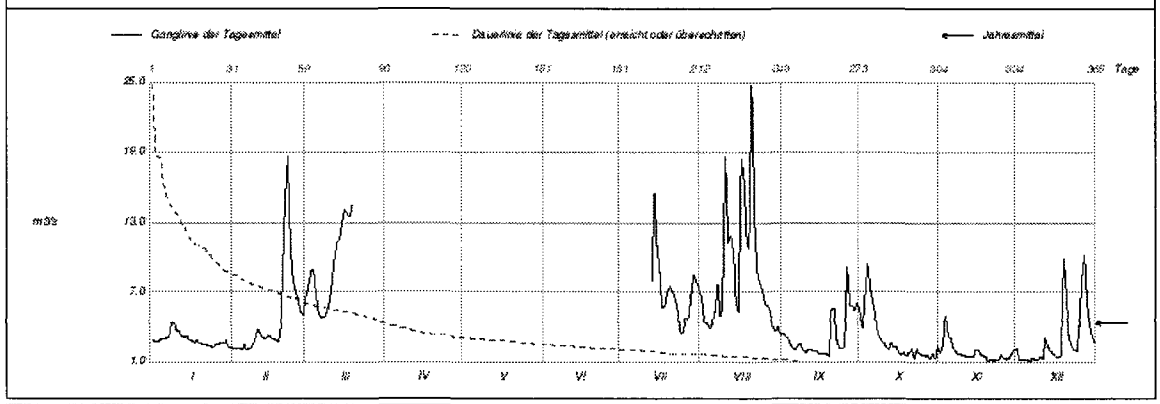
Periode	1993 - 1998											(6 Jahre)	
Monatsmittel	4.52	3.64 -	6.71	11.55	19.09 +	17.46	14.01	8.62	9.62	6.77	4.96	5.29	m3/s
Maximum (Spitze)	27.60 -	35.16	37.86	43.90	41.87	51.58	55.46	51.72	54.53	66.99	57.22	70.70 +	m3/s
Jahr	1993	1997	1994	1993	1995	1996	1993	1997	1997	1996	1998	1993	
Minimum (Tagesmittel)	1.69	1.57 -	4.48	5.32	15.47 +	12.37	9.69	4.38	3.77	2.43	2.90	2.87	m3/s
Jahr	1996	1994	1997	1997	1995	1993	1993	1997	1993	1997	1997	1998	
Periode	Gleistes Jahresmittel 11.29 (1994)					Periodenmittel 9.40				Kleinstes Jahresmittel 7.15 (1996)			m3/s

Dauer der Abflüsse (erreicht oder überschritten)													
Tage	1	3	6	9	18	36	55	73	91	114	137	160	
1998	37.03	29.32	24.99	23.16	20.08	15.82	12.66	11.21	10.37	8.77	7.76	6.73	m3/s
1993 - 1998	36.47	33.12	29.59	27.69	24.11	19.63	17.16	15.25	13.46	11.37	9.82	8.37	m3/s
Tage	182	205	228	251	274	292	310	329	347	366	362	365	
1998	6.03	5.08	4.96	4.61	4.10	3.67	3.65	3.38	3.07	2.67	2.21	1.89	m3/s
1993 - 1998	7.15	6.07	5.25	4.54	3.88	3.34	2.78	2.27	1.79	1.35	0.57	0.30	m3/s

Abfluss	Saane, Saanen	A012 - 585/148.005
	Koordinaten 585 800 / 146 300	Stations Höhe 1004.0 m — Fläche km2
Daten unvollständig		Mittlere Höhe m — Vergletscherung %

1999

		Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	
	1	2.81	2.16	6.46					6.66	3.46	5.16	1.82	2.14	1
	2	2.74	2.20	7.46					4.59	3.27	3.91	2.48	1.26	2
	3	2.78	2.24	8.79					4.34	3.06	7.03	5.01 +	1.29	3
	4	2.93	2.04	8.95					3.91	2.40	9.36 +	3.29	1.25	4
	5	3.01	2.49	6.65					4.27	2.18	7.17	3.14	1.21	5
Tagesmittel	6	3.00	2.02 -	5.23					5.30	2.08	6.01	2.32	1.09 -	6
	7	3.08	2.16	4.72 -					7.65	2.51	4.74	1.93	1.33	7
	8	4.32	2.41	4.84					4.97	2.43	3.46	1.74	1.22	8
	9	4.36 +	2.90	5.19					5.77	1.98	3.01	1.64	1.21	9
	10	3.79	3.61	5.96					18.65	1.87	2.68	1.61	1.47	10
	11	3.68	3.56	7.46					11.20	1.97	2.34	1.51	1.40	11
	12	3.20	3.16	9.73					11.84	2.05	2.10	1.45	5.08	12
	13	3.15	3.00	11.30				7.94	10.34	1.88	2.67	1.42	2.24	13
	14	3.26	3.28	11.60				15.55 +	8.17	1.89	2.27	1.41	1.89	14
	15	2.93	3.20	12.01				10.97	5.35	1.74	2.25	2.10	1.71	15
m3/s	16	2.81	2.85	14.12				8.68	13.47	1.71	1.76	2.05	1.48	16
	17	2.70	2.90	13.78				5.59	18.44	1.68	1.84	1.64	1.45	17
	18	2.80	2.73	13.53				5.75	11.04	1.65	1.81	1.56	1.66	18
	19	2.57	3.39	14.44 +				7.09	10.72	1.53 -	1.57	1.49	8.69	19
	20	2.53	8.39					7.49	24.70 +	5.48	1.83	1.09 -	6.62	20
	21	2.49	14.80					7.02	12.88	5.58	2.18	1.28	3.35	21
	22	2.41	18.62 +					6.48	8.66	2.87	1.35	1.17	2.44	22
	23	2.34	10.73					5.38	7.77	2.16	2.12	1.21	2.10	23
+ Maximum	24	2.26	8.37					3.44 -	7.18	2.14	1.73	1.21	1.96	24
	25	2.40	7.15					3.81	8.08	2.40	1.60	1.65	4.12	25
- Minimum	26	2.54	6.51					4.76	5.91	9.07 +	1.50	1.40	8.02	26
	27	2.61	5.26					4.60	5.48	5.74	1.80	1.30	10.14 +	27
	28	2.61	5.10					6.77	4.08	5.80	1.32 -	1.41	5.66	28
	29	2.60						8.46	3.67	5.38	1.71	1.75	4.16	29
	30	2.32						7.85	4.03	6.01	1.36	2.02	3.18	30
	31	2.20 -						7.38	3.37 -		2.41		2.72	31
Monatsmittel		2.89	4.91	9.11 +				7.09	8.44	3.13	2.96	1.84 -	3.00	m3/s
Maximum (Spitze) Datum		6.15 - 11.	23.85 22.	16.35 17.				25.72 14.	43.28 + 18.	22.90 20.	12.43 3.	7.00 3.	18.01 27.	m3/s
Jahresmittel								452 m3/s						



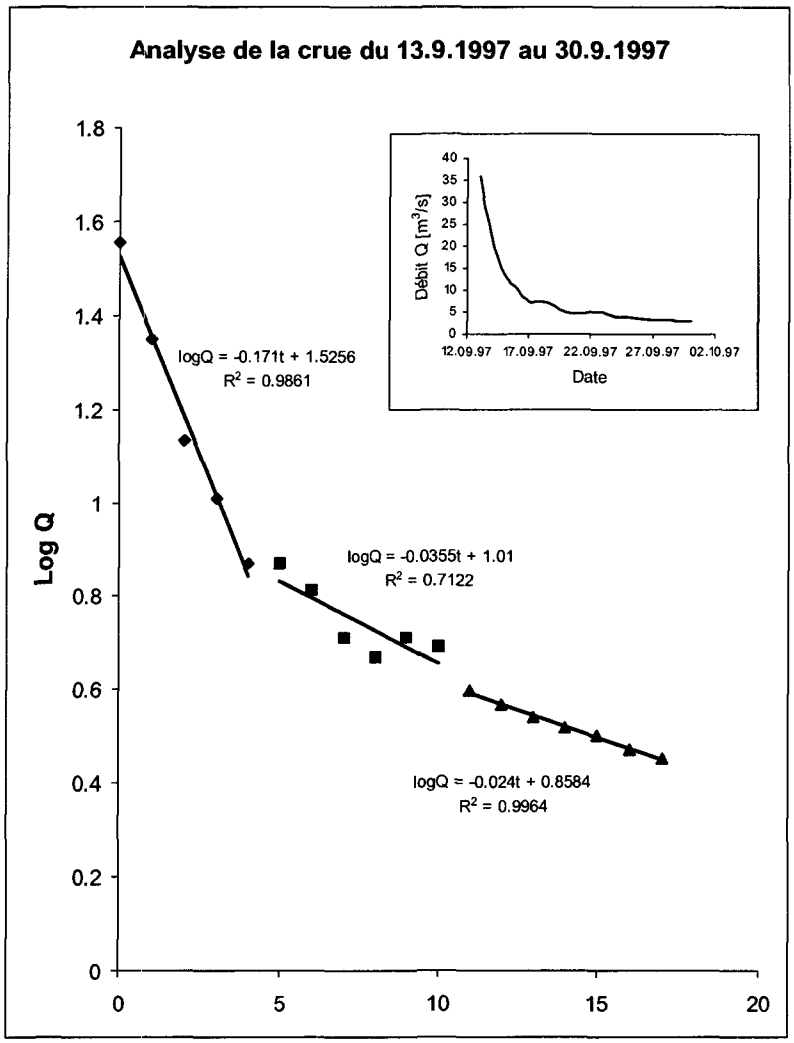
Periode	1993 - 1999											(7 Jahre)	
Monatsmittel	4.29	3.82						8.77	8.69	6.22	4.51	4.86	m3/s
Maximum (Spitze) Jahr	27.60 1993	35.16 1997						51.72 1997	54.53 1997	66.09 1996	57.22 1996	70.70 1993	m3/s
Minimum (Tagesmittel) Jahr	1.71 1997	1.57 1994						5.39 1994	1.53 1998	4.00 1996	2.00 1997	1.09 1999	m3/s
Periode	Grösstes Jahresmittel					Periodenmittel					Kleinstes Jahresmittel		m3/s

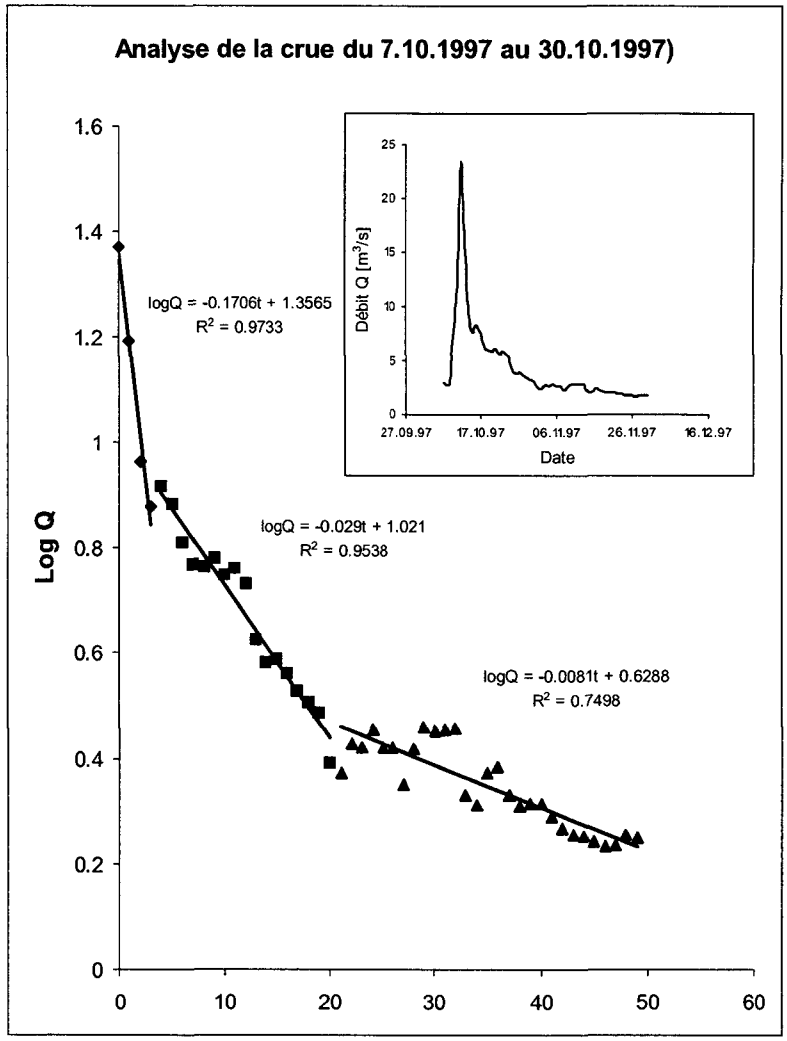
Dauer der Abflüsse (erreicht oder überschritten)

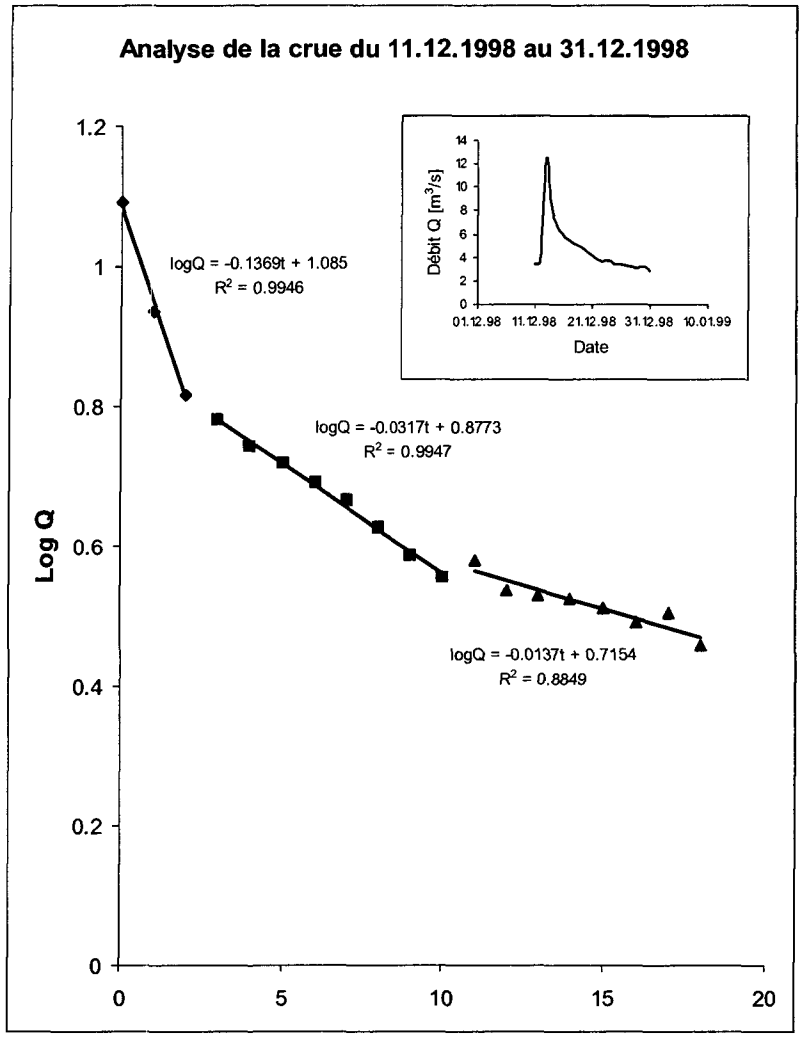
Tage	1	3	6	9	18	36	55	73	91	114	137	180	
1999													m3/s
1993 - 1999													m3/s
Tage	182	205	228	251	274	292	310	329	347	356	362	365	
1999													m3/s
1993 - 1999													m3/s

Du 20 mars au 13 juillet sonde abîmée. Choc lors d'une crue.

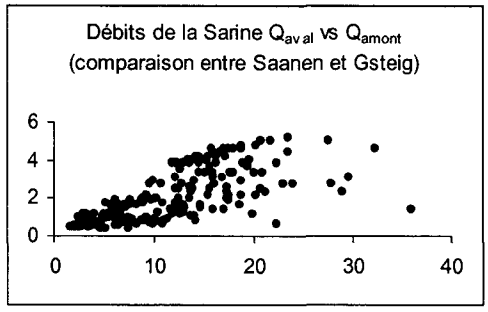
Annexe IX : Etude des courbes de tarissement



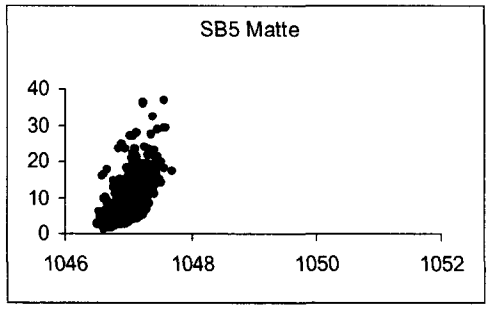

Analyse de la crue du 7.10.1997 au 30.10.1997)
Log Q
logQ = -0.1706t + 1.3565
R² = 0.9733
logQ = -0.029t + 1.021
R² = 0.9538
logQ = -0.0081t + 0.6288
R² = 0.7498
Débit Q [m³/s]
Date
27.09.97
17.10.97
06.11.97
26.11.97
16.12.97

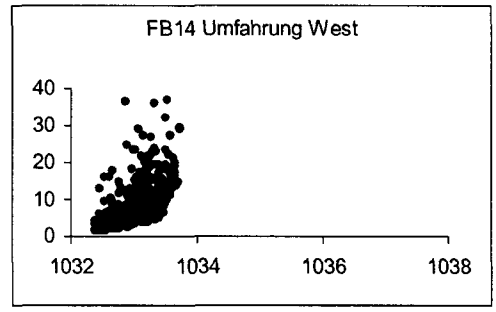

Analyse de la crue du 11.12.1998 au 31.12.1998
Log Q
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
5
10
15
20
logQ = -0.1369t + 1.085
R² = 0.9946
logQ = -0.0317t + 0.8773
R² = 0.9947
logQ = -0.0137t + 0.7154
R² = 0.8849
Débit Q [m³/s]
14
12
10
8
6
4
2
0
01.12.98
11.12.98
21.12.98
31.12.98
10.01.99
Date

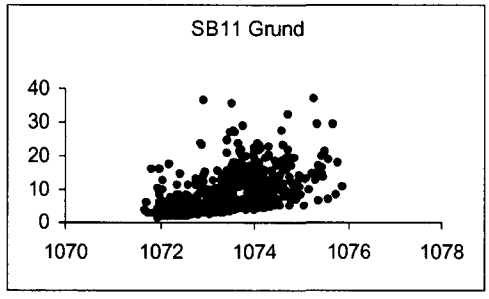
Annexe X : Comparaisons limnigraphiques nappe-rivière

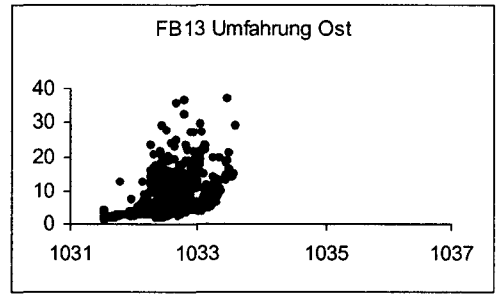


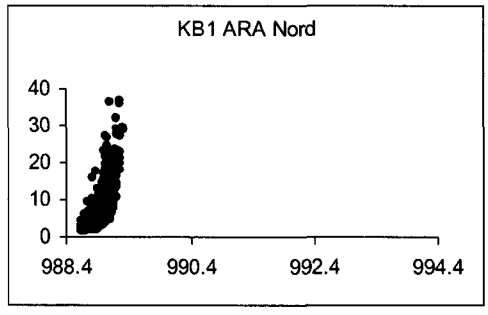
Légende de la figure :
Période : 23.5.97 au 20.7.99
1) L'axe horizontal représente le niveau de la nappe en [msm] au point d'observation indiqué
2) L'axe vertical représente le débit de la Sarine en [m3/s] à Saanen

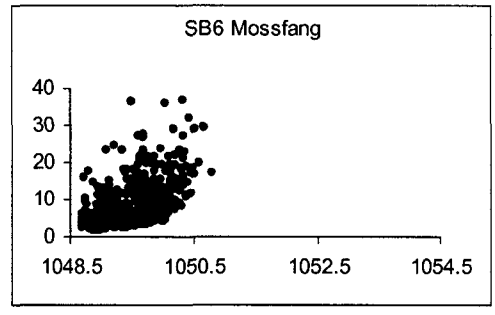


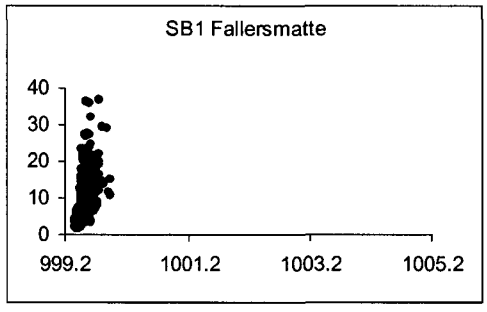


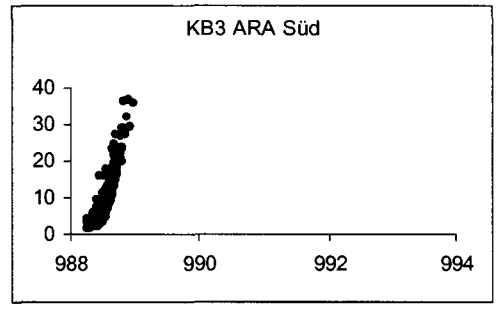












Annexe XI : Analyses des éléments majeurs

Code	Date	Na	Na	K	Na+K	K	Mg	Mg	Ca	Ca
		[mg/l]	[mmol/l]	[mg/l]	[mmol/l]	[mmol/l]	[mg/l]	[mmol/l]	[mg/l]	[mmol/l]
FB1	02.07.97	1.3	0.06	0.7	0.08	0.02	8.8	0.37	75	1.88
SB1	02.07.97	5.6	0.25	5	0.38	0.13	10	0.42	107	2.68
SB11	02.07.97	1.3	0.06	0.6	0.07	0.02	4.9	0.20	68	1.70
SB12	02.07.97	2.9	0.13	1.2	0.16	0.03	8.9	0.37	138	3.45
SB6	02.07.97	1.47	0.07	0.9	0.09	0.02	5	0.21	89	2.23
SB5	02.07.97	2.3	0.10	1.9	0.15	0.05	17	0.71	146	3.65
KB1	02.07.97	3.15	0.14	2.8	0.21	0.07	16.7	0.70	94	2.35
FB13	02.07.97	4.3	0.20	2.6	0.26	0.07	7.5	0.31	100.6	2.52
FB14	02.07.97	2.8	0.13	1.6	0.17	0.04	10.6	0.44	112	2.80
FB1	29.09.97	1.3	0.06	0.7	0.08	0.02	10.8	0.45	85	2.13
SB1	29.09.97	5.1	0.23	4.7	0.35	0.12	10.4	0.43	110	2.75
SB12	29.09.97	2.6	0.12	1.2	0.15	0.03	9.6	0.40	135	3.38
SB6	29.09.97	1.2	0.05	1.1	0.08	0.03	5.5	0.23	94	2.35
KB1	29.09.97	1.8	0.08	2.3	0.14	0.06	15.4	0.64	91	2.28
SB5	29.09.97	2	0.09	1.7	0.13	0.04	17.8	0.74	138	3.45
FB13	29.09.97	2.5	0.11	1.5	0.15	0.04	10.8	0.45	114	2.85
FB14	29.09.97	4.8	0.22	3.2	0.30	0.08	7.6	0.32	99	2.48
SB4	29.09.97	2	0.09	2.2	0.15	0.06	15.5	0.65	137	3.43
FB4	29.09.97	3	0.14	6.1	0.29	0.16	15.4	0.64	101	2.53
FB10	29.09.97	2.2	0.10	3.6	0.19	0.09	13.1	0.55	122	3.05
FB1	06.01.98	1.6	0.07	1.2	0.10	0.03	11.3	0.47	84	2.10
SB1	06.01.98	6.5	0.30	4.9	0.42	0.13	8.6	0.36	103	2.58
SB11	06.01.98	3.5	0.16	0.8	0.18	0.02	7.7	0.32	115	2.88
SB12	06.01.98	3	0.14	1.2	0.17	0.03	8.5	0.35	135	3.38
KB1	06.01.98	1.7	0.08	1.8	0.12	0.05	10.1	0.42	85	2.13
SB5	06.01.98	2.5	0.11	0	0.11	0.00	17	0.71	149	3.73
FB14	06.01.98	2.3	0.10	1.8	0.15	0.05	10.2	0.43	109	2.73
FB13	06.01.98	5	0.23	2.8	0.30	0.07	8.9	0.37	125	3.13
SB4	06.01.98	2.7	0.12	2.4	0.18	0.06	16.2	0.68	149	3.73
FB10	06.01.98	2.6	0.12	1.5	0.16	0.04	10.7	0.45	121	3.03
FB3	06.01.98	2.9	0.13	1.5	0.17	0.04	11.6	0.48	113	2.83
SB1	06.04.98	4.8	0.22	4.4	0.33	0.11	9.6	0.40	101	2.53
SB4	06.04.98	2.4	0.11	2.4	0.17	0.06	16.8	0.70	143	3.58
SB6	06.04.98	1.4	0.06	1.1	0.09	0.03	6.1	0.25	109	2.73
FB13	06.04.98	5.8	0.26	5.8	0.41	0.15	8.4	0.35	98	2.45
FB1	06.04.98	1.2	0.05	0.5	0.07	0.01	11.9	0.50	87	2.18
SB5	06.04.98	2.3	0.10	2.2	0.16	0.06	18.3	0.76	133	3.33
KB3	06.04.98	1.2	0.05	0.8	0.08	0.02	14.4	0.60	70	1.75
FB2	06.04.98	2.5	0.11	4.5	0.23	0.12	3.3	0.14	61	1.53
FB10	06.04.98	2.3	0.10	2.1	0.16	0.05	12.9	0.54	99	2.48
KB1	06.04.98	0.6	0.03	0.7	0.05	0.02	2.9	0.12	70	1.75
SB11	06.04.98	2.5	0.11	0.6	0.13	0.02	6.8	0.28	92	2.30
SB9	06.04.98	6	0.27	3.1	0.35	0.08	3.3	0.14	82	2.05
SB12	06.04.98	3	0.14	1.9	0.19	0.05	9.3	0.39	132	3.30
SB11	30.09.98	2.1	0.10	1.1	0.12	0.03	6.4	0.27	96	2.40
SB5	30.09.98	2.5	0.11	2	0.16	0.05	14	0.58	130	3.25
KB1	30.09.98	0.76	0.03	1.2	0.07	0.03	3.7	0.15	81	2.03
SB12	30.09.98	3	0.14	1.8	0.18	0.05	7.3	0.30	121	3.03
FB1	30.09.99	1.26	0.06	0.82	0.08	0.02	8.5	0.35	72	1.80
FB4	30.09.98	2.6	0.12	3.2	0.20	0.08	9.5	0.40	39	0.98
FB14	30.09.98	2.2	0.10	1.8	0.15	0.05	10.1	0.42	110	2.75
SB1	30.09.98	5.6	0.25	5.1	0.39	0.13	9.8	0.41	110	2.75
FB2	30.09.98	1	0.05	0.72	0.06	0.02	10.2	0.43	76	1.90
FB7	09.04.98	11.5	0.52	8	0.73	0.21	8	0.33	85	2.13
FB7	09.04.98	9.35	0.43	2.22	0.48	0.06	11.47	0.48	92	2.30
		Na	Na	K	Na+K	K	Mg	Mg	Ca	Ca
		[mg/l]	[mmol/l]	[mg/l]	[mmol/l]	[mmol/l]	[mg/l]	[mmol/l]	[mg/l]	[mmol/l]
	Nbre	55	55	55	55	55	55	55	54	55.00
	Moy	3.01	0.14	2.25	0.19	0.06	11.83	0.43	104.30	2.61
	Max	11.50	0.52	8.00	0.73	0.21	17.00	0.76	149.00	3.73
	Min	0.60	0.03	0.00	0.05	0.00	5.00	0.12	39.00	0.98
	s	2.05	0.09	1.66	0.13	0.04	4.96	0.16	24.95	0.62

Code	Date	Cl	Cl	SO4	SO4	NO3	NO3	HCO3	HCO3	Dureté totale	PO4	NO2
		[mg/l]	[mmol/l]	[mg/l]	[mmol/l]	[mg/l]	[mmol/l]	[mg/l]	[mmol/l]	°f	[mg/l]	[mg/l]
FB1	02.07.97	1	0.03	52	0.54	0.57	0.01	208	3.41	23	<0.03	<0.002
SB1	02.07.97	8.9	0.26	43	0.45	1.96	0.03	322	5.28	30.6	<0.03	<0.002
SB11	02.07.97	1.3	0.04	65	0.68	0.35	0.01	159	2.61	19.1	<0.03	<0.002
SB12	02.07.97	3.2	0.09	198	2.06	0.72	0.01	227	3.72	37.9	<0.03	<0.002
SB6	02.07.97	0.9	0.03	25	0.26	0.7	0.01	274	4.49	24.7	<0.03	<0.002
SB5	02.07.97	2.5	0.07	210	2.19	0.78	0.01	267	4.38	43.3	<0.03	<0.002
KB1	02.07.97	2.6	0.08	47	0.49	1.41	0.02	312	5.11	30.1	<0.03	<0.002
FB13	02.07.97	5.7	0.17	77	0.80	1.91	0.03	250	4.10	32.4	<0.03	<0.002
FB14	02.07.97	3.2	0.09	108	1.13	1.13	0.02	262	4.30	28.35	<0.03	<0.002
FB1	29.09.97	1.2	0.03	73	0.76	0.5	0.01	233	3.82	26.15	<0.005	0.005
SB1	29.09.97	5.9	0.17	39	0.41	1.8	0.03	365	5.98	33.95	0.013	<0.002
SB12	29.09.97	1.9	0.06	206	2.15	0.6	0.01	235	3.85	39.95	<0.005	<0.002
SB6	29.09.97	0.9	0.03	20	0.21	0.7	0.01	295	4.84	26.5	<0.005	<0.002
KB1	29.09.97	1.4	0.04	39	0.41	1.3	0.02	303	4.97	29	0.016	<0.002
SB5	29.09.97	1.7	0.05	191	1.99	0.9	0.01	303	4.97	43.8	<0.005	<0.002
FB13	29.09.97	2.9	0.08	102	1.06	1.3	0.02	282	4.62	33.55	<0.005	<0.002
FB14	29.09.97	6.4	0.19	74	0.77	2	0.03	253	4.15	28.7	0.008	<0.002
SB4	29.09.97	1.8	0.05	165	1.72	0.9	0.01	306	5.02	41.2	<0.005	<0.002
FB4	29.09.97	3.4	0.10	46	0.48	1.4	0.02	334	5.48	31.7	<0.005	<0.002
FB10	29.09.97	3.9	0.11	122	1.27	1	0.02	291	4.77	36.2	<0.005	<0.002
FB1	06.01.98	1.12	0.03	82	0.85	0.56	0.01	224	3.67	-	-	<0.002
SB1	06.01.98	9.3	0.27	26	0.27	1.68	0.03	343	5.62	-	-	0.005
SB11	06.01.98	3.22	0.09	123	1.28	0.59	0.01	224	3.67	-	-	<0.002
SB12	06.01.98	2.47	0.07	192	2.00	0.97	0.02	242	3.97	-	-	<0.002
KB1	06.01.98	1.11	0.03	22	0.23	0.86	0.01	278	4.56	-	-	0.002
SB5	06.01.98	1.51	0.04	172	1.79	0.93	0.02	313	5.13	-	-	<0.002
FB14	06.01.98	3.24	0.09	116	1.21	2.08	0.03	298	4.89	-	-	0.006
FB13	06.01.98	5.28	0.15	115	1.20	3.08	0.05	266	4.36	-	-	<0.002
SB4	06.01.98	2.29	0.07	179	1.86	1.18	0.02	304	4.98	-	-	<0.002
FB10	06.01.98	1.79	0.05	118	1.23	0.84	0.01	285	4.67	-	-	<0.002
FB3	06.01.98	2.11	0.06	121	1.26	0.94	0.02	265	4.34	-	-	<0.002
SB1	06.04.98	6.9	0.20	36	0.38	1.5	0.02	326	5.34	30.9	0.014	<0.002
SB4	06.04.98	2.2	0.06	190	1.98	0.82	0.01	285	4.67	42.2	0.006	<0.002
SB6	06.04.98	1.1	0.03	56	0.58	0.69	0.01	302	4.95	30.95	<0.005	<0.002
FB13	06.04.98	4.5	0.13	107	1.11	1.6	0.03	254	4.16	31.8	0.007	0.029
FB1	06.04.98	1.4	0.04	92	0.96	0.6	0.01	220	3.61	26.5	<0.005	<0.002
SB5	06.04.98	1.8	0.05	208	2.17	0.8	0.01	288	4.72	46.25	<0.005	<0.002
KB3	06.04.98	1.2	0.03	38	0.40	1.2	0.02	252	4.13	25.15	<0.005	<0.002
FB2	06.04.98	1.9	0.06	25	0.26	0.35	0.01	194	3.18	18.25	<0.005	<0.002
FB10	06.04.98	1.9	0.06	129	1.34	0.82	0.01	286	4.69	37.25	<0.005	<0.002
KB1	06.04.98	0.61	0.02	5	0.05	0.81	0.01	236	3.87	20.1	0.062	0.003
SB11	06.04.98	1.7	0.05	116	1.21	0.4	0.01	180	2.95	26.85	0.005	<0.002
SB9	06.04.98	9.7	0.28	7	0.07	0.5	0.01	320	5.25	27.05	0.006	<0.002
SB12	06.04.98	2.7	0.08	207	2.16	0.58	0.01	225	3.69	40.25	<0.005	<0.002
SB11	30.09.98	1.24	0.04	103	1.07	0.73	0.01	255	4.18	30.35	<0.005	<0.002
SB5	30.09.98	1.8	0.05	210	2.19	0.71	0.01	271	4.44	43.8	<0.005	<0.002
KB1	30.09.98	0.5	0.01	7.4	0.08	0.78	0.01	282	4.62	24.1	0.043	<0.002
SB12	30.09.98	2.1	0.06	179	1.86	0.72	0.01	231	3.79	38.1	<0.005	<0.002
FB1	30.09.99	0.95	0.03	68	0.71	0.5	0.01	210	3.44	23.4	<0.005	<0.002
FB4	30.09.98	5.5	0.16	61	0.64	0.2	0.00	107	1.75	14.6	<0.005	<0.002
FB14	30.09.98	2.3	0.07	130	1.35	0.62	0.01	260	4.26	34.35	<0.005	<0.002
SB1	30.09.98	8.7	0.25	54	0.56	1.68	0.03	330	5.41	32.2	0.011	<0.002
FB2	30.09.98	0.83	0.02	78	0.81	0.59	0.01	210	3.44	24.65	<0.005	<0.002
FB7	09.04.98	15	0.43	58	0.60	11	0.18	245	4.02	24.7	-	-
FB7	09.04.98	13	0.38	82	0.85	9.2	0.15	249	4.08	27.7	-	-
		Cl	Cl	SO4	SO4	NO3	NO3	HCO3	HCO3	Dureté totale	PO4	NO2
		[mg/l]	[mmol/l]	[mg/l]	[mmol/l]	[mg/l]	[mmol/l]	[mg/l]	[mmol/l]	°f	[mg/l]	[mg/l]
	Nbre	55	55	55	55	55	55	55	55	44	42	53
	Moy	3.34	0.10	100.13	1.03	1.33	0.02	264.38	4.33	30.95	0.02	0.01
	Max	15.00	0.43	210.00	2.19	11.00	0.18	365.00	5.98	46.25	0.06	0.03
	Min	0.50	0.01	5.00	0.05	0.20	0.00	107.00	1.75	14.60	0.01	0.00

Annexe XII : Analyses des éléments en traces (ICPMS GEOLEP)

Elément	Zn [µg/l]	As [µg/l]	Rb [µg/l]	Sr [µg/l]	Mo [µg/l]	Cd [µg/l]	Ba [µg/l]	La [µg/l]	W [µg/l]	Pb [µg/l]	U [µg/l]
Le 2.7.97											
SB5	22.19	0.14	0.43	1375.06	0.54	0.03	34.45	0.01	0.02	0.41	0.69
SB6	4.85	0.06	0.23	281.07	0.09	0.01	21.68	0.01	0.07	0.08	0.13
SB11	2.22	0.11	0.18	433.64	0.32	0.01	12.71	0.01	0.2	0.06	0.14
KB1	117.93	0.1	0.74	569.79	0.37	0.05	88.34	0.04	0.08	19.01	0.36
FB14	2.05	0.03	0.22	572.35	0.18	0.01	17.87	0.01	0.04	0.1	0.22
FB13	23.82	0.12	0.5	1000.66	0.21	0.04	23.98	0.05	0.03	0.64	0.4
Le 30.9.97											
FB1	748.75	0.03	0.38	1341.85	0.68	0.26	23.93	0.01	0.04	0.23	0.54
SB1	6.94	0.14	1.54	775.37	0.48	0.02	33.74	0	0.01	0.13	0.38
FB10	1.74	0.14	0.45	1290.49	0.51	0.02	30.03	0	0.12	0.06	0.41
SB5	3.18	0.06	0.45	1216.82	0.85	0.05	29.58	0	0.04	0.13	0.57
SB6	4.03	0.25	0.34	387.41	0.16	0.01	37.68	0.01	0.09	0.09	0.19
SB12	4.13	0.06	1.11	1740.63	0.66	0.03	18.8	0.01	0.05	0.37	0.49
SB4	9.46	0.13	0.52	1302.8	0.66	0.02	33.94	0	0.03	0.08	0.62
SB11	22.69	0.1	0.53	742.73	0.64	0.05	32.58	0.01	0.05	0.49	0.26
KB1	62.96	0.14	0.66	528.52	0.76	0.04	71.91	0.01	0.05	0.6	0.27
FB14	7.68	0.08	0.38	902.99	0.54	0.02	29.25	0	0.03	0.15	0.39
FB13	8.42	0.07	0.44	847.43	0.62	0.02	24.12	0.01	0.02	0.08	0.38
FB4	31.6	0.05	0.8	429.48	11.14	0.02	39.86	0	0.01	0.09	0.31
Maximum	**748.75**	**0.25**	**1.54**	**1740.63**	**11.14**	**0.26**	**88.34**	**0.05**	**0.2**	**19.01**	**0.69**
Minimum	**1.74**	**0.03**	**0.18**	**281.07**	**0.09**	**0.01**	**12.71**	**0**	**0.01**	**0.06**	**0.13**
Moyenne	**60.26**	**0.1**	**0.55**	**874.39**	**1.08**	**0.04**	**33.58**	**0.01**	**0.05**	**1.27**	**0.37**

Elément	Li [µg/l]	B [µg/l]	Al [µg/l]	Sc [µg/l]	Ti [µg/l]	V [µg/l]	Cr [µg/l]	Mn [µg/l]	Co [µg/l]	Ni [µg/l]	Fe [µg/l]	Cu [µg/l]
Le 2.7.97												
SB5	6.36	15.4	7.25	0.12	< 0.2	0.04	0.2	1.17	0.07	0.78	2.06	1.49
SB6	1.43	4.16	3.53	0.04	< 0.2	0.02	0.16	0.12	0.04	0.45	2.63	0.38
SB11	1.9	4.35	4.33	0.06	< 0.2	0.03	0.26	0.18	0.05	0.36	3.67	0.65
KB1	3.96	15.51	62.37	0.07	0.22	0.13	0.42	13.14	0.24	0.81	260.77	1.32
FB14	2.91	6.36	3.25	0.1	< 0.2	0.05	0.2	0.25	0.06	0.39	8.92	0.44
FB13	5.2	14.35	90.08	0.11	0.33	0.18	0.63	6.01	0.15	0.59	460.7	4.58
Le 30.9.97												
FB1	2.04	9.48	4.79	0.09	< 0.2	0.02	0.1	41.07	0.21	1.07	6.31	0.6
SB1	2.36	11.87	2.83	0.1	< 0.2	0.06	0.21	0.16	0.04	0.43	1.32	0.77
FB10	4.63	14.37	4.51	0.65	< 0.2	0.04	0.2	0.16	0.08	0.92	0.61	0.48
SB5	3.01	10.59	2.06	0.06	< 0.2	0.03	0.17	0.07	0.04	0.39	1	0.42
SB6	1.83	8.82	6.21	0.12	< 0.2	0.03	0.24	0.08	0.07	0.47	1.04	0.34
SB12	6.2	12.82	14.81	0.22	0.22	0.04	0.19	0.11	0.08	0.47	1.76	0.86
SB4	5.21	11.11	5.24	0.15	< 0.2	0.04	0.13	0.97	0.1	1.34	1.25	1.69
SB11	4.99	16.36	5.1	0.16	< 0.2	0.04	0.29	0.16	0.05	1.3	1.52	1.08
KB1	3.1	13.06	4.17	0.05	0.32	0.06	0.64	0.26	0.07	0.6	1.54	0.77
FB14	3.82	14.47	4.37	0.07	< 0.2	0.02	0.21	0.23	0.04	0.51	1.74	0.41
FB13	4.33	17.94	3.49	0.1	< 0.2	0.03	0.27	0.15	0.05	0.53	2.15	0.4
FB4	2.46	17.22	3.85	0.06	< 0.2	0.03	0.08	0.4	0.06	3.71	1.77	4.57
Maximum	**6.36**	**17.94**	**90.08**	**0.65**	**0.33**	**0.18**	**0.64**	**41.07**	**0.24**	**3.71**	**460.7**	**4.58**
Minimum	**1.43**	**4.16**	**2.06**	**0.04**	**0.22**	**0.02**	**0.08**	**0.07**	**0.04**	**0.36**	**0.61**	**0.34**
Moyenne	**3.65**	**12.12**	**12.9**	**0.13**	**0.27**	**0.05**	**0.26**	**3.59**	**0.08**	**0.84**	**42.26**	**1.18**

Annexe XIII : Analyses isotopiques

1) Données brutes

Eaux souterraines													
Date	**FB1**	**FB3**	**FB4**	**FB10**	**FB13**	**FB14**	**KB1**	**SB1**	**SB4**	**SB5**	**SB6**	**SB11**	**SB12**
06.07.97	-12.02	-11.95	-11.55	-11.86				-11.5	-11.75	-11.74		-12.04	
6/28/97	-11.73	-11.97			-11.54			-11.46	-11.23	-10.75		-10.24	
9/17/97	-11.62	-11.68		-11.41	-11.34			-11.24	-11.03	-10.28		-10.14	
9/30/97	-11.43		-11.01	-11.24	-11.42	-11.34	-10.3		-11.22	-10.48	-11.42	-11.1	-10.55
10/15/97													
10/28/97		-11.8		-11.66					-11.19			-10.24	
11/25/97				-11.41				-11.54	-11.81	-11.71			
2/19/98	-11.67	-11.84		-11.45				-11.35	-11.13	-11.12	-11.24	-11.81	-11.61
3/18/98	-11.57							-11.16		-10.81	-11.1	-11.84	-11.3
4/29/98											-10.75		-11.45
5/28/98	-12.17	-11.66						-11.46	-10.73				-11.6
6/30/98			-11.11	-11.48	-11.27			-11.43				-11.82	-11.35
8/27/98		-11.56			-11.85	-11.75		-11.41	-11.88	-11.73	-11.05		-10.71
Données	**FB1**	**FB3**	**FB4**	**FB10**	**FB13**	**FB14**	**KB1**	**SB1**	**SB4**	**SB5**	**SB6**	**SB11**	**SB12**
n	7	7	3	7	5	2	1	9	9	8	5	8	7
moy	-11.74	-11.78	-11.22	-11.50	-11.48	-11.55	-10.30	-11.39	-11.33	-11.08	-11.11	-11.15	-11.22
max	-11.43	-11.56	-11.01	-11.24	-11.27	-11.34	-10.30	-11.16	-10.73	-10.28	-10.75	-10.14	-10.55
min	-12.17	-11.97	-11.55	-11.86	-11.85	-11.75	-10.30	-11.54	-11.88	-11.74	-11.42	-12.04	-11.61
s	0.26	0.15	0.29	0.20	0.23	0.29	-	0.12	0.39	0.59	0.25	0.83	0.42
Sarine													
Date	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S8**	**S9**							
06.07.97	-12.17			-12.25									
6/28/97		-11.46	-11.54	-11.43	-11.14	-10.94							
9/17/97			-11.33	-11.23	-11								
9/30/97	-11.67												
10/15/97		-11.63											
10/28/97		-11.47											
11/25/97				-12.21	-13.02								
2/19/98					-12.09								
3/18/98		-10.74	-11.84		-12.01								
4/29/98	-10.58	-12.36	-12.14			-12.44							
5/28/98	-13.04	-12.89				-13.68							
6/30/98	-12.7	-12.25	-12.2			-11.95							
8/27/98	-11.64					-11.13							
Données	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S8**	**S9**							
n	6	7	5	4	5	5							
moy	-11.97	-11.83	-11.81	-11.78	-11.85	-12.03							
max	-10.58	-10.74	-11.33	-11.23	-11.00	-10.94							
min	-13.04	-12.89	-12.20	-12.25	-13.02	-13.68							
s	0.88	0.72	0.38	0.53	0.82	1.11							
Affluents principaux													
Date	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**					
06.07.97	-11.55	-11.45	-12.08	-11.96	-12.06			-12.28					
6/28/97	-11.47	-11.25	-11.51	-11.43				-11.69					
9/17/97	-10.69	-11.05	-11.32	-11.04				-11.54					
9/30/97													
10/15/97	-11.06	-11.34	-11.27		-11.47								
10/28/97	-10.96	-11.22	-11.21		-11.28								
11/25/97		-11.44				-11.87							
2/19/98													
3/18/98	-11.6				-10.98	-11.97							
4/29/98	-12.08	-12.3	-12.35	-11.53	-12	-12.38	-11.91						
5/28/98	-12.21		-12.29		-12.24								
6/30/98	-11.23		-12.13	-12.07	-11.75								
8/27/98	-11.44				-11.82	-11.95							
Données	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**					
n	10	7	8	5	8	4	1	3					
moy	-11.43	-11.44	-11.77	-11.61	-11.70	-12.04	-11.91	-11.84					
max	-10.69	-11.05	-11.21	-11.04	-10.98	-11.87	-11.91	-11.54					
min	-12.21	-12.30	-12.35	-12.07	-12.24	-12.38	-11.91	-12.28					
s	0.47	0.41	0.49	0.42	0.43	0.23	-	0.39					

2) Statistiques

Code	n	moy	min	max	s
FB1	7	-11.74	-11.43	-12.17	0.26
FB3	7	-11.78	-11.56	-11.97	0.15
FB4	3	-11.22	-11.01	-11.55	0.29
FB10	7	-11.50	-11.24	-11.86	0.20
FB13	5	-11.48	-11.27	-11.85	0.23
FB14	2	-11.55	-11.34	-11.75	0.29
SB1	9	-11.39	-11.16	-11.54	0.12
SB4	9	-11.33	-10.73	-11.88	0.39
SB5	8	-11.08	-10.28	-11.74	0.59
SB6	5	-11.11	-10.75	-11.42	0.25
SB11	8	-11.15	-10.14	-12.04	0.83
SB12	7	-11.22	-10.55	-11.61	0.42
Total	77	-11.38			

Code	n	moy	min	max	s
S1	6	-11.97	-10.58	-13.04	0.88
S2	7	-11.83	-10.74	-12.89	0.72
S3	5	-11.81	-11.33	-12.2	0.38
S4	4	-11.78	-11.23	-12.25	0.53
S8	5	-11.85	-11	-13.02	0.82
S9	5	-12.03	-10.94	-13.68	1.11
Total	32	-11.88			

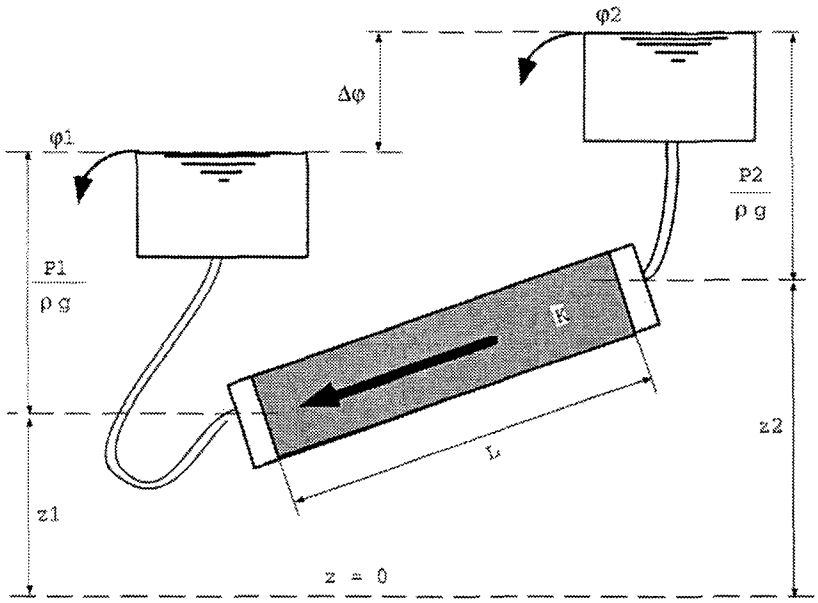
Code	n	moy	min	max	s
T1	10	-11.43	-10.69	-12.21	0.47
T2	7	-11.44	-11.05	-12.3	0.41
T3	8	-11.77	-11.21	-12.35	0.49
T4	5	-11.61	-11.04	-12.07	0.42
T5	8	-11.70	-10.98	-12.24	0.43
T6	4	-12.04	-11.87	-12.38	0.23
T7	1	-11.91	-11.91	-11.91	-
T8	3	-11.84	-11.54	-12.28	0.39
Total	46	-11.72			

3) Mesures isolées

Date	A1	A2	A3
19.02.98		-11.96	
18.03.98	-11.43	-11.97	-10.37
06.04.98			
29.04.98	-11.70	-11.93	-12.09
29.05.98	-12.31		
27.08.98		-12.01	-12.47

Annexe XIV : Equations de base dans les modèles numériques d'écoulements

Extrit du Cours de 3ème cycle en Géologie de l'ingénieur **Ecoulements souterrains** **par Dr. Laurent Tacher** 1999 - 2000	**Loi de Darcy (1853)**



$$i = S.K.\frac{(\varphi 1 - \varphi 2)}{L}$$

et ponctuellement:

$$\vec{i} = -K.\frac{(\varphi 1 - \varphi 2)}{L} = -K.\text{grad}\ \varphi$$

avec

φ	: charge ou potentiel hydraulique	[m]
K	: perméabilité du milieu	$[m.s^{-1}]$
i	: débit de l'appareil	$[m^3.s^{-1}]$
i	: flux hydraulique	$[m.s^{-1}]$
S	: section	$[m^2]$
L	: longueur	[m]
Pn	: pression au point n	$[kg.m^{-1}.S^{-2}]$
ρ	: masse spécifique (densité)	$[kg.m^{-3}]$
g	: accélération due à la gravité	$[m.s^{-2}]$

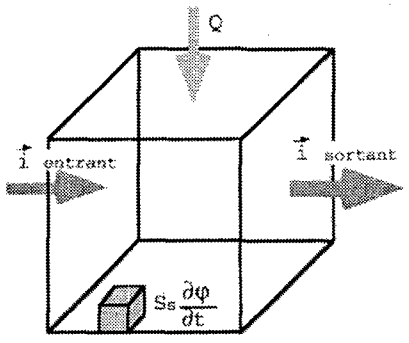
Le flux hydraulique est la vitesse du milieu continu équivalent. Ce n'est pas la vitesse de l'eau, qui vaut v=i/m (m: porosité [1]).

Remarque: Dans cet exemple, l'eau s'écoule des petites vers les grandes pressions.

Extrait du Cours de 3ème cycle en Géologie de l'ingénieur
Ecoulements souterrains
Par Dr. Laurent Tacher
1999 - 2000

Equation de continuité (1)

La loi de Darcy permet de connaître le vecteur flux hydraulique en tout point de l'aquifère saturé. L'équation de continuité dresse le bilan de la circulation d'eau dans un volume infinitésimal d'aquifère (VI). La fabrication des modèles consiste à intégrer cette équation sur le domaine d'étude, qu'il s'agisse de modèles numériques ou analytiques (solutions simplifiées correspondant à des géométries et des conditions aux limites simples, notamment les méthodes d'interprétation des essais de pompage).



Le bilan n'est possible que pour des quantités extensives telles que masse, volume ou énergie. Nous l'établissons pour des volumes d'eau. La variation du flux hydraulique entre son entrée et sa sortie du volume élémentaire d'aquifère vaut $\mathrm{div}(\vec{i})$. Si le flux entrant vaut le flux sortant, alors $\mathrm{div}(\vec{i}) = 0$. Nous considérons 2 causes pouvant provoquer une variation du flux, c'est à dire que $\mathrm{div}(\vec{i}) \neq 0$:

- Le potentiel hydraulique peut varier dans le temps, provoquant une compression (ou décompression) de l'eau et du squelette rocheux du VI. Un volume d'eau est ainsi consommé (produit) par le VI lui-même, valant

$$S_s \frac{\partial \varphi}{\partial t} \qquad [m^3.s^{-1}.m^{-3}]$$

où S_s $[m^{-1}]$ est le <u>coefficient d'emmagasinement spécifique</u> de l'aquifère. C'est le volume d'eau libéré par un volume unitaire d'aquifère sous l'effet d'une diminution unitaire de potentiel hydraulique.

- Il est également possible qu'un <u>terme de source</u> Q $[m^3.s^{-1}.m^{-3}]$ provoque une variation de flux. Il s'agit d'un apport (ou prélèvement) d'eau, en général sous forme de précipitations ou de pompages.

Extrait du Cours de 3ème cycle en Géologie de l'ingénieur
Ecoulements souterrains
Par Dr. Laurent Tacher
1999 - 2000

Equation de continuité (2)

L'équation de continuité décrit le fait que le bilan (ici en volume) est toujours nul. Si la divergence du flux dû au gradient n'est pas nul, alors il y a production/consommation par decompression /compression de l'aquifère ou par injection/prélèvement. Le bilan s'écrit:

$$S_s \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathrm{div}(\vec{i}) + Q = 0 \qquad [m^3.s^{-1}.m^{-3}]$$

L'unité de chacun des termes du bilan est le m^3 d'eau produit/dissipé par m^3 d'aquifère et par seconde. Une valeur négative de divergence du flux indiquant que le flux sortant est inférieur au flux entrant, les autres termes sont positifs lorsqu'ils correspondent à l'apport d'un volume d'eau.

Le flux peut être remplacé par son expression d'après la loi de Darcy

$$\vec{i} = -K.\mathrm{grad}\ \varphi \qquad [m^3.s^{-1}.m^{-2}]$$

et l'on obtient l'équation de continuité en termes volumiques pour le transport diffusif d'eau dans l'aquifère:

$$\boxed{S_s \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathrm{div}(-K.\mathrm{grad}\ \varphi) + Q = 0} \qquad [m^3.s^{-1}.m^{-3}]$$

qui peut se lire: " Il y a 2 manières pour que le flux volumique entrant dans un volume élémentaire d'aquifère soit différent du flux qui en sort ($\mathrm{div}(i) \neq 0$): soit il y a ajout (prélèvement) d'eau (Q) à l'intérieur même du volume élémentaire, soit une variation de potentiel dans le temps comprime (decomprime) le volume et admet (libère) de l'eau."

i	Flux volumique	$[m^3.s^{-1}.m^{-2}]$
K	Perméabilité ou conductivité hydraulique	$[m.s^{-1}]$
grad	Opérateur gradient	$[m^{-1}]$
φ	Potentiel hydraulique	$[m]$
S_s	Coefficient d'emmagasinement spécifique	$[m^{-1}]$
∂	Opérateur différentiel	$[1]$
t	Temps	$[s]$
div	Opérateur divergence	$[m^{-1}]$
Q	Terme de source volumique	$[m^3.s^{-1}.m^{-3}]$

Extraits du Cours de 3ème cycle en Géologie Appliquée *Ecoulements souterrains* *par Dr. Laurent Tacher* 1995 - 1996	**Transport de matière (1)**

• **QUANTITE EXTENSIVE TRANSPORTEE** Masse de la substance dissoute [Kg]
• **QUANTITE INTENSIVE ASSOCIEE** Concentration de la substance dissoute [Kg/m^3]

A la différence de l'équation de continuité formulée pour la circulation d'eau, le flux est ici composite. La matière dissoute est transportée d'une part avec le flux hydraulique, d'autre par par diffusion moléculaire, et enfin par dispersion autour des lignes de courant moyenne.

• **FLUX CONVECTIF OU ADVECTIF**

C'est la partie du flux total due au flux hydraulique. Dans cette composante, la substance dissoute se déplace avec les lignes de courant de l'eau:

$$\vec{i}_a = \vec{q}.C$$

où: i_a = flux convectif [Kg/m^2.s]
q = flux de Darcy [m^3/s.m^2]
C = concentration [Kg/m^3]

• **FLUX CONDUCTIF**

Outre son déplacement avec le flux hydraulique, la substance par la diffusion moléculaire et par la dispersion :

$$\vec{i}_c = -D.Grad.C$$

où: $i\,c$ = Flux [Kg/m^2.s]
D = Tenseur de diffusion moléculaire + dispersion [m^2/s]
$Grad.C$ = Gradient de concentration [Kg/m^4]

En tenant compte de ces 2 phénomènes, l'équation de continuité, c'est à dire le bilan de matière entrante et sortante dans un volume infinitésimal d'aquifère, s'écrit:

$$m_v \frac{\partial C}{\partial t} + div(-D.Grad.C + \vec{q}C) + Q_c = 0$$

où: m_v = porosité volumique [1]
Q_c = terme de source [Kg/m^3.s]

Etant donné que: $div(\vec{q}C) = \vec{q}.Grad\ C + \underbrace{C.div\ \vec{q}}_{\text{Terme de source}}$

on écrit: $$\underbrace{m_v \frac{\partial C}{\partial t}}_{\text{Variation de masse}} + \underbrace{div(-D.Grad\ C)}_{\text{Terme conductif}} + \underbrace{\vec{q}.Grad\ C}_{\text{Terme convectif}} + \underbrace{(C.div\ \vec{q} + Q_c)}_{\text{Terme de source}} = 0$$

Annexe XV : Typicité des aquifères alluviaux de montagne

Typicité des aquifères alluviaux de montagne

Vallée	Altitude moyenne de la plaine alluviale [msm]	Caractéristiques de la plaine alluviale)				Alimentation par la rivière			Alimentation par des versants karstiques		Total
		Précipitations	Anthropisation			Glacier	Barrages	Qualité	Gypses	Carbonates	
			Tourisme	Pâturages	Industrie						
Haute altitude (> 1000 msm)											
1. Vanoise (Isère)	1700	1	3	2	1	3	1	3	1	1	16
2. Engadine	1700	1	3	2	1	2	3	3	1	1	17
3. Mattertal (Täsch)	1400	1	3	2	1	3	2	3	1	1	17
4. Haut Rhône	1200	2	3	2	1	3	1	3	1	1	17
5. Valsertal	1200	2	3	2	1	2	3	3	2	1	19
6. Haute Sarine	***1100***	***2***	***3***	***3***	***1***	***3***	***1***	***3***	***3***	***3***	***22***
7. Kandertal	1100	2	3	2	1	3	1	3	1	2	18
8. Haute Simme	1000	2	3	3	1	3	1	3	3	3	22
Basse altitude (< 1000 msm)											
9. Savoie (Chéran)	700	2	3	2	1	3	1	3	1	2	18
10. Häslital	600	2	3	2	2	2	1	2	1	2	17
11. Aoste (Doire)	600	1	3	1	3	2	1	2	1	1	15
12. Rhin	500	1	2	1	2	1	1	2	1	1	12
13. Rhône	500	1	2	1	3	1	1	2	1	1	13

Typicité des aquifères alluviaux de montagne

Vallée	Altitude moyenne de la plaine alluviale [msm]	Caractéristiques de la plaine alluviale)				Alimentation par la rivière			Alimentation par des versants karstiques		Degré de parenté	
		Précipitations	Anthropisation			Glacier	Barrages	Qualité	Gypses	Carbonates	[%]	Ixl
			Tourisme	Pâturages	Industrie							
Haute altitude (> 1000 msm)												
1. Vanoise (Isère)	1700	1	0	1	0	0	0	0	2	2	0.73	6
2. Engadine	1700	1	0	1	0	1	2	0	2	2	0.77	5
3. Mattertal (Täsch)	1400	1	0	1	0	0	1	0	2	2	0.77	5
4. Haut Rhône	1200	0	0	1	0	0	0	0	2	2	0.77	5
5. Valsertal	1200	0	0	1	0	1	2	0	1	2	0.86	3
6. Haute Sarine	***1100***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***1.00***	***0***
7. Kandertal	1100	0	0	1	0	0	0	0	2	1	0.82	4
8. Haute Simme	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0
Basse altitude (< 1000 msm)												
9. Savoie (Chéran)	700	0	0	1	0	0	0	0	2	1	0.82	4
10. Häslital	600	0	0	1	1	1	0	1	2	1	0.77	5
11. Aoste (Doire)	600	1	0	2	2	1	0	1	2	2	0.68	7
12. Rhin	500	1	1	2	1	2	0	1	2	2	0.55	10
13. Rhône	500	1	1	2	2	2	0	1	2	2	0.59	9

Julien Vaudan

né le 5 avril 1971
de nationalité suisse et originaire de Bagnes, VS

FORMATION

1996-2000 École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire de Géologie (GEOLEP)
Docteur ès Sciences EPFL

1991-1996 Eidgenössische Technische Hochschule (ETHZ)
Geologisches Institut (Ingenieurgeologie)
Dipl. Natw. ETHZ

1986-1991 Lycée-Collège de l'Abbaye, Saint-Maurice
Maturité type C

EXPÉRIENCES PROFESSIONNELLES

1996 à ce jour GEOLEP - Laboratoire de Géologie (EPFL)
Assistant-doctorant
Travail de doctorat en relation avec la caractérisation des resources en eau souterraines et leur gestion dans le cadre d'une collaboration avec l'Office de l'Economie Hydraulique et Energétique du canton de Berne. Assistanat et enseignement à l'EPFL. Réalisation de mandats pour le GEOLEP dans les domaines de la géologie et de l'hydrogéologie (mise en valeur des ressources, prospection, impact des sondes géothermiques et protection des eaux).

1996 (2 mois) Ingenieurgeologie - ETHZ
Géologue
Compilation de données hydrogéologiques et géologiques dans le cadre du projet SISVAL : délimitation de l'aléa sismique en Valais.

1994 à 1996 Geologisches Institut ETHZ
Aide-Assistant
Enseignement, collaboration à la rédaction et à la réalisation de l'ouvrage "Die Rohstoffe der Schweiz" publié par la Commission Géotechnique Suisse.