



3-D Groundwater Flow Modeling in Heterogeneous Geologic Media : Integrated Approach Using Spatial and Temporal Database, Geostatistics and GIS

THESIS

Presented to the Faculty of Sciences of the Neuchâtel University
for the grade of

Docteur ès Sciences

by

Francesco Kimmeier

Geologist, graduated from the University of Lausanne (1977), Switzerland
M. Sc. in Hydrogeology at the Neuchâtel University (1980), Switzerland

Defence at October the 5th, 2001 for the jury composed of:

Prof Dr Ing. Rachid Ababou, IMFT Toulouse (France)
Dr Ing. Mahmoud Bouzelboudjen, University of Neuchâtel
Prof. Dr László Király, University of Neuchâtel
Prof Dr Ing. Luis Ribeiro, IST Lisbonne (Portugal)
Jean-Daniel Rouiller, Geologist of Valais canton
Prof Dr François Zwahlen, University of Neuchâtel

Examiner
Co-Director of Thesis
Director of Thesis
Examiner
Examiner
Examiner

IMPRIMATUR POUR LA THESE

3-D Groundwater Flow Modeling in Heterogeneous Geologic Media : an Integrated Approach Using Spatial and Temporal Database, Geostatistics and GIS

de M. Francesco Kimmeier

UNIVERSITE DE NEUCHÂTEL

FACULTE DES SCIENCES

La Faculté des sciences de l'Université de
Neuchâtel sur le rapport des membres du jury,

MM. L. Kiraly (directeur de thèse), F. Zwahlen,
M. Bouzelboudjen, R. Ababou (Toulouse),
L. Ribeiro (Lisbonne) et J.-D. Rouiller (Sion)

autorise l'impression de la présente thèse.

Neuchâtel, le 29 octobre 2001

Le doyen:

A handwritten signature in black ink, consisting of a series of loops and a long horizontal stroke at the end.

F. Zwahlen

TABLE OF CONTENTS

Citation	
Remerciements	
Résumé	

I. INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.	SYSTÈMES D'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN	1
2.	MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS.....	2
3.	RE-CONSTRUCTION DES CHAMPS DES PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES	2
4.	PLAN DE LA THÈSE	6
5.	RÉFÉRENCES	7

II. SPATIAL DATABASE AND GIS AS SUPPORT TO GROUNDWATER PROBLEM RESOLUTION

II.1 TRACES/VIEW - TRAÇAGE DES EAUX SOUTERRAINES : APPLICATION SIG EN MILIEU KARSTIQUE JURASSIEN (SUISSE)

	Abstract	1
	Résumé.....	1
1.	INTRODUCTION	2
2.	MODÈLE DE SAISIE DES DONNÉES DES ESSAIS DE TRAÇAGE.....	2
2.1	Bases de données des essais de traçage du canton de Neuchâtel : TRESOR (Traçages des Eaux Souterraines sous ORacle) et sous ACcess (TRESAC)	3
2.2	Intégration base de données TRESOR et système d'information géographique ArcInfo	3
3.	APPLICATION «TRACES/VIEW»	3
4.	CONCLUSIONS	7
5.	RÉFÉRENCES	8
6.	REMERCIEMENTS	10

II.2 GEOHYDROLOGICAL PARAMETERS IDENTIFICATION AND GROUNDWATER VULNERABILITY TO POLLUTION : A SWISS CASE STUDY

	Abstract	1
1.	STUDY PURPOSE	1
2.	HYDROGEOLOGICAL DATABASE.....	2
3.	THE POROUS AQUIFER OF THE VALAIS CANTON IN THE CONTEXT OF POROUS SWISS AQUIFERS	2

3.1	Hydraulic potential field reconstruction by kriging	4
4.	HYDROGEOLOGY OF SIERRE-VÉTROZ AREA	5
4.1	Aquifer system structure	5
4.2	Results of piezometric campaigns.....	6
4.3	Piezometry time series analysis.....	7
4.4	Hydrochemistry of groundwater	7
5.	VULNERABILITY TO POLLUTION OF THE SIERRE-VÉTROZ ZONE	9
5.1	Methods	9
5.2	Results and comparison.....	10
6.	CONCLUSIONS	12
7.	REFERENCES	14

III. GROUNDWATER MODELING AT DIFFERENT SCALE USING FINITE ELEMENTS METHOD AND STOCHASTIC MODELING FOR UNCERTAINTY ESTIMATION

III.1 3-D GROUNDWATER MODELING AT REGIONAL SCALE

	Abstract	1
1.	INTRODUCTION	2
2.	THE SYSTEM OF GROUNDWATER FLOW	2
3.	GROUNDWATER FLOW IN LARGE HETEROGENEOUS BASINS	4
4.	GROUNDWATER FLOW BETWEEN THE AAR AND THE BLACK FOREST MASSIFS	4
5.	GROUNDWATER FLOW SYSTEMS IN THE CRYSTALLINE BASEMENT, THE MUSCHELKALK AND THE MALM AQUIFERS.....	6
6.	MODEL VALIDATION.....	7
	Potentiometric Data.....	7
	Volumetric Discharge Rates.....	9
	Infiltration Rates/Water Table Surface	10
	Bulk Geochemistry.....	11
	Isotopic Geochemistry.....	11
	Temperature Distribution	11
	Some conclusions for groundwater model validation	12
7.	REFERENCES	12

III.2 BASE DE DONNÉES, SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE, GÉOSTATISTIQUE ET MODÉLISATION 3-D DES EAUX SOUTERRAINES À L'ÉCHELLE LOCALE : APPROCHE INTÉGRÉE APPLIQUÉE À LA RÉGION DE VISP (SUISSE)

	Résumé.....	1
1.	OBJECTIF.....	2
2.	BASE DE DONNÉES SPATIALES HYDROGÉOLOGIQUE EN MODE RASTER ET VECTEUR	3

2.1	Système d'information géographique ou système d'information géospatiale	3
2.2	Données de base	4
2.2.1	<i>Surfaces structurales</i>	8
2.2.2	<i>Mesures de piézométrie du complexe alluvionnaire</i>	9
2.2.3	<i>Mesures de débits dans les canaux</i>	10
2.2.4	<i>Valeurs de perméabilité</i>	11
2.2.5	<i>Paramètres physico-chimiques</i>	13
2.3	Base de données spatiales en modes vecteur et raster environnementales et hydrogéologiques dans la région de Visp	21
3.	APPROCHE GÉOSTATISTIQUE - LA MODÉLISATION ENVIRONNEMENTALE OU RE-CONSTRUCTION DES CHAMPS DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES	25
3.1	Méthodes usuelles d'interpolation	26
3.2	Méthode optimale d'interpolation - La géostatistique	26
3.3	Re-construction des champs des variables K, T et H	28
3.3.1	<i>Re-construction du champ des perméabilités 2D</i>	28
3.3.2	<i>Re-construction du champ des perméabilités 3D</i>	29
3.3.3	<i>Re-construction du champ des potentiels et effet d'échelle sur la précision de l'estimation. Résultats des approches multi-échelles (6.5 km² à 252 km²)</i>	30
4.	MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS	34
4.1	Définition du modèle conceptuel	35
4.2	Définition de la supermaille 2-D plan de surface	35
4.3	Maillage 2-D plan de surface	36
4.4	Maillage 3-D	36
4.5	Vérification du maillage 3-D	41
4.6	Conditions aux limites imposées	41
4.7	Imposition des propriétés intrinsèques au milieu modélisé	45
4.8	Définition des points de contrôle des débits et des potentiels hydrauliques	46
4.9	Variantes de calcul pour tester différentes hypothèses	47
4.10	Analyse et présentation des résultats	48
4.11	Validation des résultats	51
5.	APPLICATIONS DU MODÈLE 3-D DÉVELOPPÉ DANS LA RÉGION DE VISP	58
5.1	Étude de l'influence de la 3 ^{ème} correction du Rhône, phase II, sur les écoulements souterrains à Visp	58
5.2	Simulation 3-D d'une pollution fictive liée à la décharge de Gamsen	69
5.2.1	<i>Bases théoriques [in Rossier, 1990]</i>	69
5.2.2	<i>Choix du polluant modélisé, et conditions aux limites</i>	71
5.2.3	<i>Résultats</i>	72
6.	RÉFÉRENCES	74

III.3 TRAVEL PATH UNCERTAINTY : A CASE STUDY COMBINING STOCHASTIC AND DETERMINISTIC HYDRODYNAMIC MODELS IN THE RHÔNE VALLEY, SWITZERLAND

	Abstract	1
1.	INTRODUCTION	1
2.	MATERIALS AND METHODS	2
2.1	The geostatistical approach	4
2.2	The 2-D groundwater modeling approach	6
3.	APPLICATION AND RESULTS	6
3.1	Transmissivity field reconstruction by kriging and conditional simulations	6
3.2	Hydraulic potential field reconstruction by kriging	6
3.3	Analyze of hydrodynamic model results.....	9
4.	CONCLUSIONS	11
5.	FUTURE WORKS.....	12
6.	REFERENCES	13

IV. CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET TRAVAUX FUTURS

	CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	1
1.	DÉVELOPPEMENT D'UNE APPLICATION INTERACTIVE PAR SIG POUR LA GESTION DES ESSAIS DE TRAÇAGE DANS LE JURA KARSTIQUE NEUCHÂTELOIS	1
2.	APPLICATION POUR L'ÉTUDE DE LA VULNÉRABILITÉ À LA POLLUTION DES AQUIFÈRES EN MILIEU POREUX PAR APPROCHE SIG	1
3.	MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS 3-D PAR ÉLÉMENTS FINIS À L'ÉCHELLE RÉGIONALE (1 : 200'000).....	2
4.	MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS 2-D ET 3-D PAR ÉLÉMENTS FINIS À L'ÉCHELLE LOCALE (1 : 5'000 ET 1 : 1'000).....	3
5.	MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS 2-D PAR ÉLÉMENTS FINIS À L'ÉCHELLE LOCALE (VISP, 1 : 5'000) ET QUANTIFICATION DE L'INCERTITUDE DES RÉSULTATS	4
	TRAVAUX FUTURES.....	5
6.	RÉFÉRENCES	6

KIMMEIER'S SHORT CURRICULUM VITAE AND LIST OF PUBLICATIONS

DES CARTES ...



*«N'y ayant qu'une vérité de chaque chose, quiconque la trouve en sait autant qu'on peut savoir ...
L'action de la pensée par laquelle on croit une chose, étant différente de celle par laquelle on connaît qu'on la croit, elles sont souvent l'une sans l'autre.»*

DESCARTES R,
Discours de la Méthode

René Descartes, Philosophe, Mathématicien et Physicien Français, 1596-1650
Le «Discours de la Méthode» (1637) énumère les principes de la logique cartésienne

Remerciements

Au terme de mon travail, il m'est agréable de remercier les personnes et organismes qui ont contribué à la réalisation de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent au Prof. François Zwahlen, directeur du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, qui m'a intégré dans son équipe en 1993, après plusieurs années d'absence (1987-1993) de la scène hydrogéologique, dans le «Programme National de Recherche PNR 31 N° 4031-033148 du Fonds National de la Recherche Scientifique Suisse». Ce projet concernait l'étude de l'impact des changements climatiques sur les aquifères suisses (1992-1996). Je tiens également à le remercier pour avoir accepté ma candidature en tant que doctorant en 1996 malgré mon âge avancé.

Je remercie le Fonds National de la Recherche Scientifique qui a financé pendant 2 ½ ans (d'octobre 1996 à mars 1999) mes recherches dans le cadre de la 2^{ème} phase du projet FN N° 2047-064.96.

Cette thèse découle en partie de mes travaux et recherches effectués lors du Fonds national N° 21-39357.93 et 2047-064.96 initié par le Dr Mahmoud Bouzelboudjen, Chargé de cours et Chef de projet au Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel et par M. Jean-Daniel Rouiller, géologue cantonal du Valais et directeur du Centre de Recherches en Environnement Alpin (CREALP) à Sion. Elle a nécessité plusieurs années d'efforts et de sacrifices et n'aurait jamais vu son accomplissement sans l'engagement permanent du Dr Bouzelboudjen. Il a su me diriger d'une manière experte et m'a guidé en vrai professionnel vers des sphères de compétence complétant d'une manière inestimable ma formation d'hydrogéologue. J'ai particulièrement apprécié sa politique des petits pas pour me faire admettre mes errances ou alors pour «m'imposer» ses points de vue qui étaient le plus souvent fort judicieux. J'aimerais le remercier, en particulier pour avoir mis à disposition ses travaux antérieurs dans la région de Visp concernant la modélisation 3-D des écoulements souterrains, dans le cadre de l'expertise pour le futur tracé de l'autoroute N9, et pour avoir mis la main à la pâte à de très nombreuses reprises. J'aimerais également le remercier pour m'avoir initié et formé au monde fascinant et «incontournable» des SIG. Outre ses inestimables qualités d'ingénieur en hydrogéologie, il m'a toujours soutenu moralement dans les moments difficiles de découragement et à fait preuve à mon égard de rares qualités humaines qui, il faut le reconnaître hélas se font de plus en plus rares à notre époque ou tout est géré par le profit et l'égoïsme. Il s'est comporté à mon égard non seulement comme un guide mais aussi comme un véritable ami. Qu'il soit ici chaleureusement remercié pour ce qu'il m'a apporté tant au point de vue scientifique qu'au point de vue humain.

J'aimerais également remercier les personnes suivantes pour leur participation à la réalisation de ma thèse :

- M. Jean-Daniel Rouiller, géologue cantonal du Valais et requérant principal du projet Fonds National cités plus haut pour m'avoir accepté comme successeur de Pascal Ornstein. Il a mis à ma disposition un matériel informatique performant, du personnel et des moyens pour la réalisation de 4 forages et pour l'acquisition de nouvelles données de perméabilité par flowmètre et des données physico-chimiques par sonde multiparamètres,
- M. François Veuthey, co-requérant du projet Fonds National cités plus haut, qui par son grand intérêt dans mes travaux de recherche m'a encouragé à continuer dans la voie choisie,

- Le Prof. László Király, qui a accepté d'être mon directeur de thèse et qui m'a initié dans les années 80 au monde de la modélisation 3-D des écoulements souterrains,
- Les Prof. Rachid Ababou et Luis Ribeiro d'avoir accepté d'être membres du jury et de relire mon manuscrit en y apportant remarques et suggestions constructives. J'ai bénéficié de leurs connaissances scientifiques lors de leurs passages à Neuchâtel durant les années 1998 à 2000 ainsi que par nos nombreux échanges de courrier électronique. Ces échanges ont été concrétisés par la rédaction d'un article commun lié à la modélisation stochastique des écoulements souterrains,
- Le Prof. André Burger, ancien directeur du Centre d'Hydrogéologie, qui m'a initié au monde de l'hydrogéologie et qui m'a choisi en 1981 pour réaliser le mandat de la NAGRA (1981-1986),
- Pascal Ornstein qui a réalisé un immense travail de collecte de données dans la région de Sierre-Vétroz (Valais, Suisse) et qui a réalisé la base de données hydrogéologiques ayant servi notamment à l'étude de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère dans le cadre de la 1^{ère} phase du projet Fonds National N° 21-39-357.93. Je tiens particulièrement à le remercier pour sa gentillesse et sa disponibilité durant la 2^{ème} phase du projet,
- J'ai bénéficié durant ce projet Fonds National de résultats de nombreux travaux de mémoire d'étudiants du cycle postgrade d'Hydrogéologie : Aviolat & Rey (1994), Fröhlich (1997), Oukaci (1997), Schürch (1995), Weber (1998). Ces travaux de diplôme, dirigés par le Dr M. Bouzelboudjen, ont été réalisés dans le cadre des Fonds Nationaux N° 21-39357.93 et 2047-064.96,
- J'ai également profité de l'apport des travaux de diplôme et de thèse de M. Steeve Ebener réalisés respectivement en 1994 et en 2000 à l'Université de Genève sous la direction du Prof. W. Wildi et du Dr M. Bouzelboudjen dans le cadre du Fonds National N° 5001-40013,
- Salim Oukaci & Farid Achour pour les mesures physico-chimiques des eaux souterraines réalisées au mois de décembre 1997, dans des conditions sibériennes, dans 30 forages à l'aide d'une sonde multiparamètres,
- De la même manière j'ai utilisé les rapports des expertises de Mme M. Geister-Frantz dans la région de Gamsen,
- Le Dr Udo Schröder de Berne pour ses conseils concernant l'utilisation de Feflow,
- Les bureaux Clavien, Teyssere et Schmid pour la mise à disposition de données intégrées dans la base de données hydrogéologiques de Visp,
- Le Prof. Pierre Perrochet qui m'a aidé à déterminer les paramètres concernant la zone non saturée dans le cadre de la 2^{ème} phase de l'expertise de la 3^{ème} correction du Rhône (2000),
- Enfin, je remercie les collaborateurs du SITEL, en particulier MM. Jean-Pierre Maradan (Ingénieur système) et François Burri (Analyste programmeur), les collaborateurs du Centre d'Hydrogéologie et de l'Institut de Géologie qui de près ou de loin ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

J'exprime ma plus profonde reconnaissance à toute ma famille pour leur inestimable soutien durant ces années.

Résumé

L'objectif de ce travail est de présenter, à travers plusieurs articles et plusieurs approches, l'identification des systèmes hydrogéologiques dans la résolution de problèmes pratiques. Une partie majeure de ce travail montre l'évolution des méthodes et des techniques numériques les plus récentes essentiellement dans l'organisation des données hydrogéologiques spatiales et temporelles, la re-construction des divers champs structuraux et hydrodynamiques jusqu'au traitement et représentation des résultats des simulations numériques tridimensionnelles des écoulements souterrains par la méthode des éléments finis. Les approches que nous avons utilisées sont globales ou empiriques, déterministes ou stochastiques. La combinaison des techniques des systèmes d'information géographique, de géostatistique, et de simulation numérique déterministe des écoulements souterrains, représente un apport original et indéniable. Cette démarche intégrée du traitement numérique des données spatiales nous a permis de proposer un modèle mathématique 3-D opérationnel, dans la région de Visp (Valais), permettant la gestion des eaux souterraines. De plus, on peut noter trois thèmes abordés à travers les articles intégrés dans la thèse. Le premier traite des aspects de la création d'une base de données tabulaires reliée à un système d'information géographique dans un environnement du karst neuchâtelois. Le second montre les limites des méthodes classiques empiriques dans l'étude de la vulnérabilité des aquifères à la pollution. Le troisième permet d'évaluer l'incertitude des trajectoires en terme de migration de polluant par combinaison de modèles déterministes d'écoulement et des modèles probabilistes.

Mots-clefs : Hydrogéologie, milieu poreux, milieu karstique, base de données, systèmes d'information géographique, statistiques, géostatistique, modélisation des écoulements et du transport des eaux souterraines, éléments finis 3-D.

3-D Groundwater Flow Modeling in Heterogeneous Geologic Media : Integrated Approach Using Spatial and Temporal Database, Geostatistics and GIS

Francesco Kimmeier

SHORT TABLE OF CONTENTS

I. INTRODUCTION GENERALE

II. GIS DATABASE AS SUPPORT TO GROUNDWATER PROBLEM RESOLUTION

- II.1 TRACES/VIEW - TRAÇAGE DES EAUX SOUTERRAINES : APPLICATION SIG EN MILIEU KARSTIQUE JURASSIEN (SUISSE)
- II.2 GEOHYDROLOGICAL PARAMETERS IDENTIFICATION AND GROUNDWATER VULNERABILITY TO POLLUTION: A SWISS CASE STUDY

III. GROUNDWATER MODELING AT DIFFERENT SCALE USING FINITE ELEMENTS METHOD AND STOCHASTIC MODELING FOR UNCERTAINTY ESTIMATION

- III.1 3-D GROUNDWATER MODELING AT REGIONAL SCALE
- III.2 BASE DE DONNEES, SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE, GEO-STATISTIQUE ET MODELISATION 3-D DES EAUX SOUTERRAINES A L'ECHELLE LOCALE DANS LA REGION DE VISP (SUISSE)
- III.3 TRAVEL PATH UNCERTAINTY : A CASE STUDY COMBINING STOCHASTIC AND DETERMINISTIC HYDRODYNAMIC MODELS IN THE RHÔNE VALLEY, SWITZERLAND

IV. CONCLUSIONS GENERALES ET TRAVAUX FUTURS

KIMMEIER'S SHORT CURRICULUM VITAE AND LIST OF PUBLICATIONS

Introduction générale

Etant donné la grande complexité des processus hydrogéologiques, due à l'interaction entre le terrain et l'eau, la connaissance des variations, dans l'espace et dans le temps, d'un grand nombre de paramètres physiques, essentiellement hydrodynamiques et structuraux, est nécessaire. La représentation de tous ces paramètres, par rapport à un certain nombre de points repères topographiques et géomorphologiques, sur une carte, est très utile. Cependant, les problèmes d'eau souterraine se présentent en trois dimensions [Margat, 1978]. Comment représenter une information tridimensionnelle sur une carte qui est à l'origine bidimensionnelle ? [Collin, 1991]. Quels sont les éléments hydrogéologiques les plus significatifs à incorporer dans les cartes ? [Bouzelboudjen, 1989, 1993]. Qu'il s'agisse d'une carte du champ de perméabilité, issue de l'interprétation de la carte géologique ou de valeurs de la piézométrie issues de mesures ponctuelles dans des piézomètres, l'identification et la re-construction des champs bidimensionnels et tridimensionnels, des paramètres hydrodynamiques, constituent le travail de base de l'hydrogéologue.

1. Systèmes d'écoulement souterrain

En 1986, l'AISH (Association Internationale des Sciences Hydrologiques) publie : «Developments in the analysis of groundwater flow systems» [Engelen & Jones]. Dans ce recueil, les concepts et les cas d'étude, relatifs aux idées fondamentales de Tóth sur les «hierarchical nesting of gravity driven groundwater flow systems [Tóth, 1963], sont présentés en détail. En 1996, 10 ans après, Engelen & Kloosterman publient : «Hydrological system analysis, methods and applications». Ce livre permet, à travers des cas d'étude hydrogéologiques aux Pays-Bas, d'apprécier les applications des concepts de Tóth, à différents environnements, à différentes échelles et pour diverses problématiques. Force est de reconnaître que la dégradation de la qualité des eaux, et de l'écosystème, a représenté l'élément «déclencheur» d'une nouvelle prise en compte des processus dynamiques dans ce pays. Un des points forts est l'intégration des données hydrologiques, écologiques et environnementales en général qui a permis de «révolutionner» la cartographie hydrogéologique aux Pays-Bas.

Il est clair que, face à la demande croissante en eau, aux pollutions de toutes sortes, le passage de l'échelle du puits ou de la source (observation ponctuelle), à l'échelle de l'aquifère (roche réservoir) jusqu'aux systèmes aquifères (écoulements souterrains régionaux) s'avère nécessaire [Bredehoeft & al., 1982]. A l'heure actuelle, il est admis que les systèmes d'écoulement souterrain hiérarchisés (locaux, intermédiaires, régionaux), définis par Tóth, forment un cadre idéal pour la synthèse cohérente de tous les renseignements que l'on possède sur les aquifères. Un système d'écoulement est l'ensemble des lignes d'écoulement fictives dans lesquels deux lignes d'écoulement, voisines en un point quelconque du bassin, restent adjacentes, depuis la région alimentaire jusqu'à la région d'exutoire [Tóth, 1963]. Nous distinguons trois types de systèmes d'écoulement : local, intermédiaire et régional. Dans un système local, les régions d'alimentation et d'exutoire sont voisines. Dans un système intermédiaire, la région d'alimentation et la région d'exutoire peuvent être séparées

par un ou plusieurs systèmes locaux. Dans un système régional, la répartition de la région d'alimentation s'étend jusqu'aux limites supérieures du bassin hydrogéologique et la région d'exutoire occupe les limites inférieures. Le comportement d'une nappe, dans des conditions naturelles, et sous l'effet perturbateur de l'intervention humaine, est appréhendé par la connaissance de la distribution des potentiels hydrauliques, des vitesses d'écoulement, des paramètres physico-chimiques des eaux, de la position des régions alimentaires et d'exutoires entre autres, ainsi que de la variation dans le temps de tous les facteurs précédents.

2. Modélisation des écoulements souterrains

Un modèle d'écoulement souterrain est contrôlé par la configuration de la surface piézométrique et par la distribution des perméabilités des roches [Tóth, 1963 ; Freeze & Witherspoon, 1966, 1967, 1968]. De plus, la surface piézométrique est fonction de la topographie et est contrôlée par le climat. Ainsi, le modèle d'écoulement est fonction de la topographie, du climat et de la géologie. Ces trois derniers paramètres représentent «the hydrogeologic environment» selon Tóth [1970]. L'identification et la caractérisation des relations entre le réseau hydrographique et les eaux souterraines sont importantes [Ophori & Tóth, 1990]. Les écoulements souterrains sont régis par la distribution des champs de perméabilité, de la porosité, du coefficient d'emménagement spécifique et des «conditions aux limites». Ces facteurs résultent de la transformation des paramètres climatiques, géomorphologiques et géologiques en paramètres hydrodynamiques. Burger [1983] résume l'incidence de ces paramètres sur les aquifères carbonatés et karstiques du Jura. L'utilisation des modèles mathématiques dans la compréhension des écoulements souterrains est maintenant très courant [Ababou, 1992 ; Kinzelbach, 1986 ; Király, 1972, 2000a, 2000b ; Kimmeier & al., 2001d].

3. Re-construction des champs des paramètres hydrodynamiques

Les résultats théoriques des auteurs mentionnés ci-dessus abordent la notion de la re-construction des champs bidimensionnels et tridimensionnels des écoulements souterrains. Cette re-construction des champs doit être effectuée à partir des données et informations de base recueillies sur le terrain. Malheureusement, en raison des coûts et du temps investi, l'intervention directe atteint ses limites. C'est à partir de ces données brutes qu'il faudra valider (méthode de mesures, etc.), interpoler, extrapoler, reconstituer ces champs, qu'il s'agisse de milieux poreux continus, fissurés et karstiques. Sous l'impulsion, en particulier, de Delhomme, à la fin des années 70, une étape fondamentale dans le développement de la géostatistique, dans les sciences de l'eau, a été franchie [Delhomme, 1976]. Ces techniques numériques d'interpolation ont permis de régionaliser des variables aussi bien spatiales que temporelles [Chilès & Delfiner, 1999]. Roth & Chilès [1997] modélisent géostatistiquement les écoulements souterrains en prenant en compte les lois physiques (conditions aux limites des aquifères). Ribeiro & al., 1997 utilisent d'autres techniques géostatistiques (indicator geostatistics) dans le but de caractériser les hétérogénéités des aquifères. Ces techniques permettent à l'hydrogéologue de disposer d'outils supplémentaires dans l'identification et la caractérisation des aquifères [Rouiller & al., 1998].

Les développements des bases de données, en sciences hydrologiques [Maidment, 1996 ; Kovar & Nachtnebel, 1996] et en sciences environnementales en général [Maxwell & Costanza, 1997 ; Pouliot, 1999 ; Bouzelboudjen 1996; Bouzelboudjen &

al., 1998, 2001], permettent, à l'heure actuelle, à l'hydrogéologue de prendre en compte aisément des variables aussi diverses que le réseau hydrographique numérisé (avec hiérarchisation automatique), l'utilisation du sol, etc.

Nous montrons plusieurs exemples de base de données spatiales sous SIG (Système d'Information Géographique ou Géospatiale). Ces variables stockées dans la base de données peuvent être ponctuelles, linéaires ou surfaciques. La distribution de ces variables est soit continue soit discrète et peut être représentée en mode vecteur ou raster.

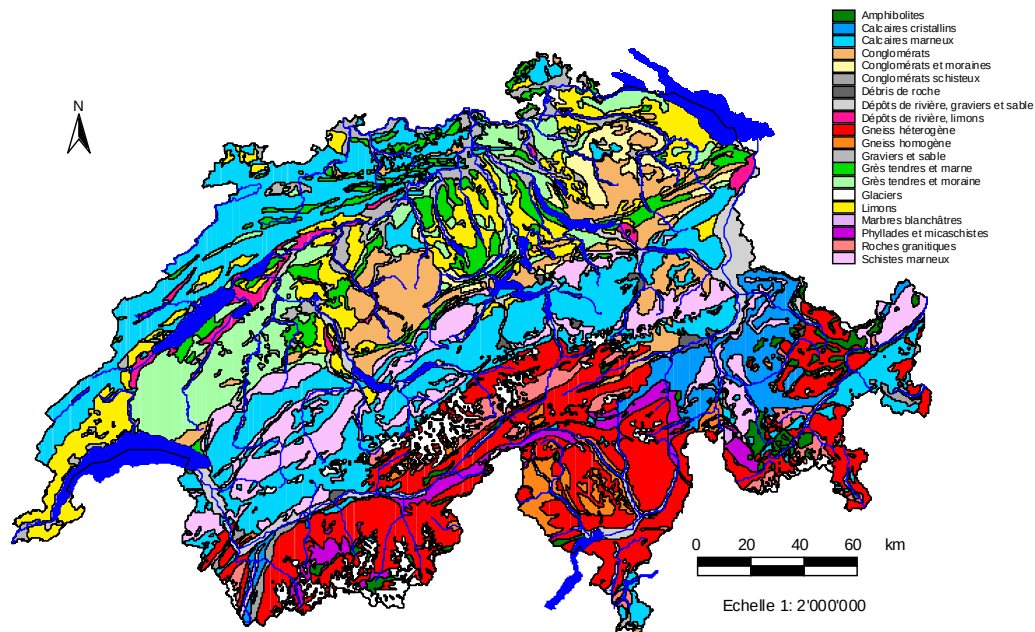


Figure 1 : Carte lithologique numérique sous ArcInfo-ArcView [1994], Université de Neuchâtel, groupe SIGNE. Source : Géologie 1: 500'000, Feuille 4 de l'Atlas de la Suisse [A. Spicher 1972], E. Imhof 1965-1978. Service topographique fédéral Wabern – Berne.

La figure 1 montre en mode vecteur la nature lithologique des roches à l'échelle de la Suisse. Dans cette base de données sont intégrés les 69 forages profonds réalisés en Suisse [Buttet, 1992] dont la profondeur varie de 200 à plus de 6'000 mètres (Fig. 2).

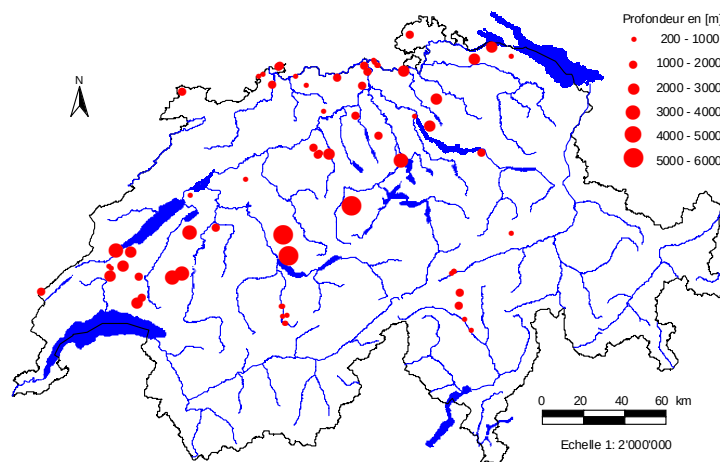


Figure 2 : Base de données des 69 forages profonds sous Oracle [1995]. Source des données papier : Buttet, SHGN, 1992. Réseau hydrographique numérique extrait de la base données SIG (Fig. 1), Université de Neuchâtel, groupe SIGNE, 1995.

Dans sept de ces forages, la distribution verticale de la perméabilité a été mesurée, avec des techniques d'acquisition très sophistiquées [Grisak & Pickens, 1985 ; Küpfer & al., 1989]. De plus, un travail géologique très important a été réalisé dans la

reconnaissance des aquifères profonds (Schmassman [1980] et Jäckli [1980]). Ce travail a permis d'établir des coupes géologiques et des cartes en isopaches des différentes formations, au niveau du plateau suisse, depuis le Tertiaire jusqu'au Primaire. Toutes ces données sont à la base du modèle régional présenté dans : «3-D Groundwater modeling at regional scale», dans ce volume [Bouzelboudjen & al., 1997].

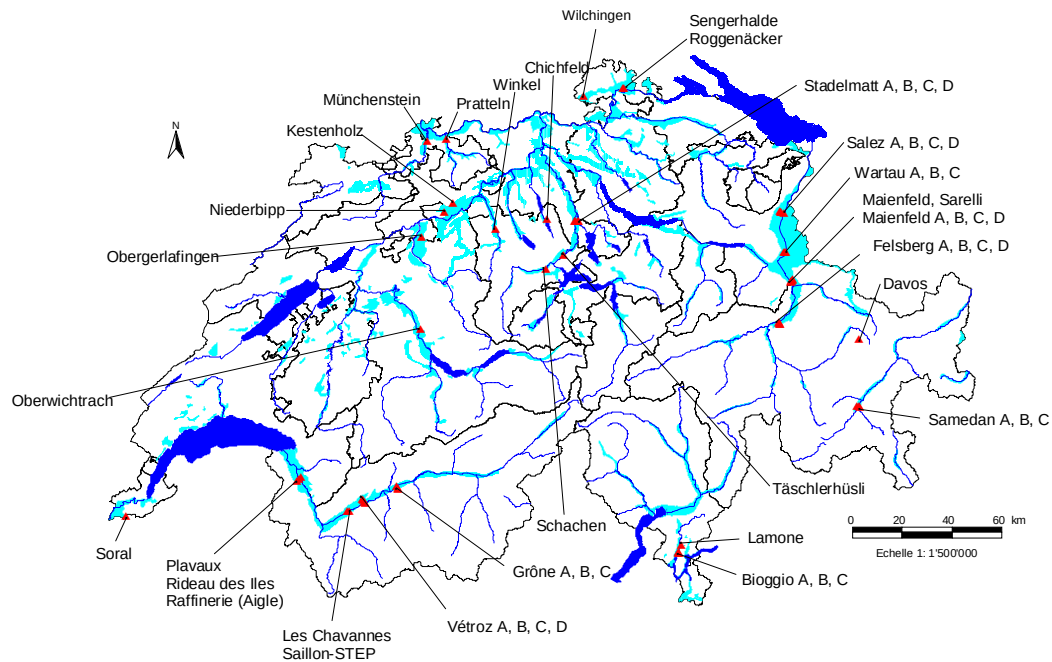


Figure 3 : Base de données temporelles des limnigrammes journaliers sous MS Access du réseau national [Kimmeier & al., 2001b]. Source des données : réseau d'observation SHGN : Buttet & Eberhard, 1995. Réseau hydrographique et aquifères poreux quaternaires numériques extraits de la base de données SIG (Fig. 1), Université de Neuchâtel, groupe SIGNE [1995].

La figure 3 illustre la répartition à l'échelle suisse du réseau d'observation des eaux souterraines [Buttet & Eberhardt, 1995]. La figure 4 montre l'évolution temporelle de 25 limnigrammes journaliers des aquifères poreux alluvionnaires [Kimmeier & al., 2001b]. Ces limnigrammes montrent la diversité des réponses hydrodynamiques et par conséquent la difficulté d'établir une typologie de ces aquifères en fonction d'un nombre restreint de piézomètres «représentatifs».

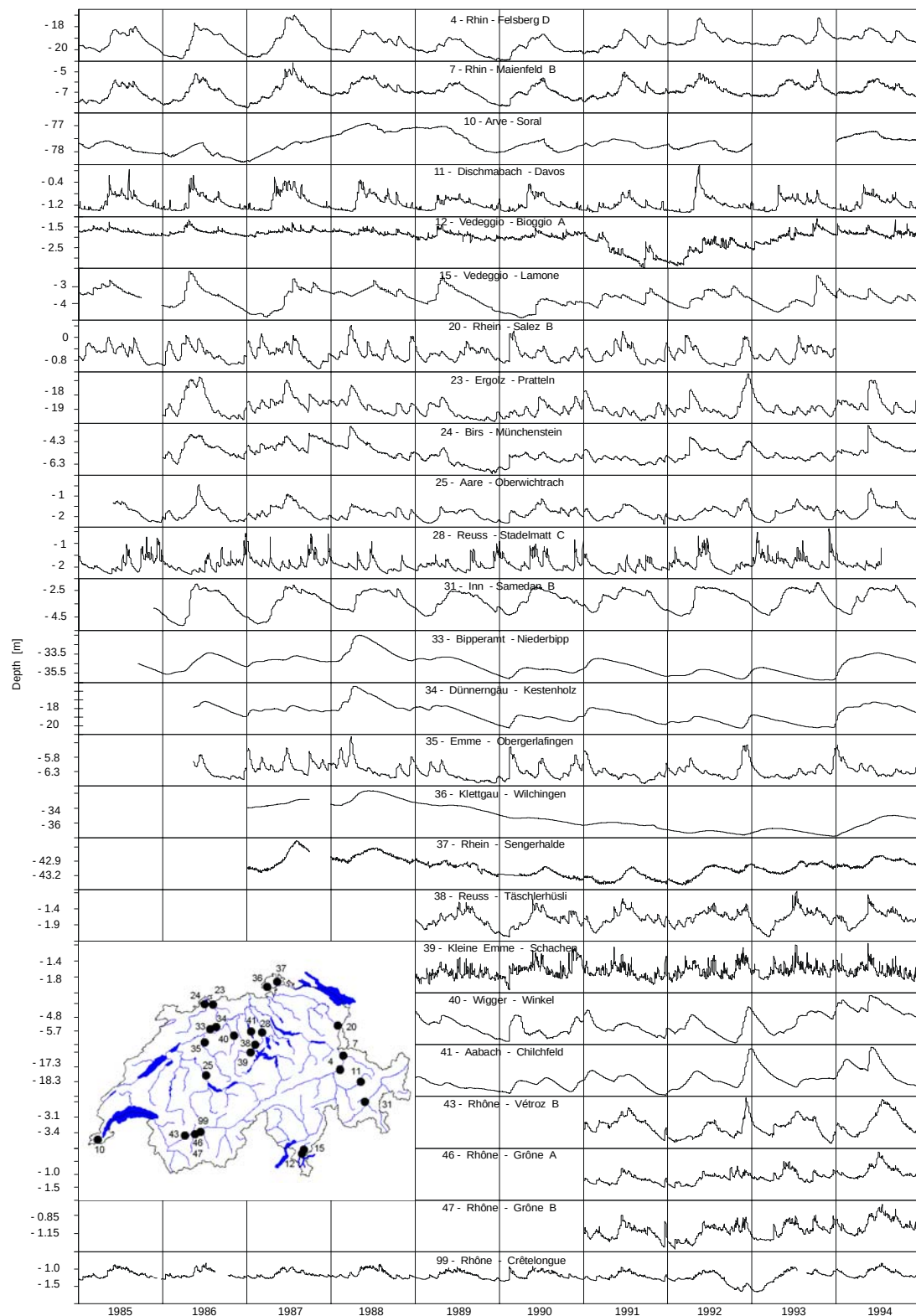


Figure 4 : Comparaison de 25 limnigrammes journaliers du réseau d'observation national des eaux souterraines en milieu poreux (source: Buttet P. & Eberhard A., 1995). Tiré de «Impact des changements climatiques sur le comportement des systèmes aquifères» [Bouzelboudjen, Kimmeyer & al, 1998].

4. Plan de la thèse

Cette thèse montre à travers plusieurs approches la problématique de **l'identification, de la caractérisation et de la détermination du mode de fonctionnement des systèmes aquifères**. Dans ce contexte tridimensionnel, les propriétés hydrogéologiques du système aquifère sont fortement hétérogènes tant sur le plan spatial (distribution hétérogène des paramètres structuraux et hydrodynamiques de l'aquifère [Kimmeier & al., 2001c et d], de ses conditions aux limites, etc.), que sur le plan temporel [Kimmeier & al., 2001a et b].

Il est évident que la **re-construction des différents champs hydrogéologiques 3-D est un objectif majeur dans cette démarche**. En effet, la reconnaissance des systèmes aquifères n'est possible, pour des raisons de coûts et de temps, que par endroits, soit directement par forages, galeries et résultats d'essais de pompage ou indirectement, par prospection géophysique ou par prélèvements des eaux souterraines, à des fins d'analyses hydrochimiques et isotopiques.

5. Références

- Ababou R., Saghar B., Wittmeyer G., 1992. *Testing procedures for spatially distributed flow models*. Advances in Water Resources, 15 p., pp. 181-198.
- Bouzelboudjen M., 1989. *Cartographie hydrogéologique et gestion des ressources en eau*. Cours de 3^{ème} cycle, Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, inédit.
- Bouzelboudjen M., 1993. *Cartographie Hydrogéologique et Systèmes d'Écoulement Souterrain*. Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel – Service hydrologique et géologique national, 15 p., 21 fig., 3 tab. 2 ann, 2 photos, inédit.
- Bouzelboudjen M., 1996. *Base de Données et Systèmes d'Information Spatiale*. Cours Université de Neuchâtel, Faculté des sciences, inédit.
- Bouzelboudjen M., Király L., Kimmeier F., Zwahlen F., 1997. *Coupes géologiques et hydrogéologiques, 2^{ème} partie : hydrogéologie. Représentation schématique des écoulements souterrains en Suisse*. Planche 8.3 de l'Atlas Hydrologique de la Suisse. Institut de Géographie de l'Université de Berne, Office Fédéral de la Topographie Berne et Service Hydrologique et Géologique National, Berne.
- Bouzelboudjen M., Kimmeier F., 1998. *GIS Vector and Raster Database, Advanced Geostatistics, 3-D Groundwater Flow and Transport Modeling in Strongly Heterogeneous Geologic Media : An Integrated Approach*. The Eighteenth Annual Environmental Systems Research Institute Users Conference, San Diego, USA.
- Bouzelboudjen, M., Kimmeier, F., Eisenhor, L., Rossier, Y., Zwahlen, F., 1998. *Impact des changements climatiques sur le comportement des systèmes aquifères*. Rapport final du projet PNR 31, v/dlf-ETH Zürich, 116 p., 46 fig., 24 tab.
- Bouzelboudjen M., Ornstein P., Kimmeier F., 2001. *TracES/View - Traçage des Eaux Souterraines : Application SIG en milieu karstique jurassien (Suisse)*. 7^{ème} Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire et Milieu Fissuré, Besançon, France, 14 p., 5 fig., 4 ann., pp., 59-73.
- Bredehoeft J. D., Back W., Hanshaw B. B., 1982. *Regional Ground-water Flow Concept in the United States : Historical Perspective*. Geol. Soc. of Am., Spec. Paper 189 p., pp. 297-316.
- Burger A., 1983. *Prospection et captage des eaux souterraines des roches carbonatées du Jura*. Gaz, eaux, eaux usées, Zürich N° 1037, pp. 533-583.
- Buttet P., 1992. *Liste des Forages profonds de Suisse*. Service hydrologique et géologique national, Berne, communication personnelle.
- Buttet P., Eberhard A., 1995. *Das Eidgenössische Grundwasser Beobachtungsnetz*. Hydrologische Mitteilungen N° 22, 162 s., Landeshydrologie und –geologie, Bern.
- Chilès J. P. & Delfiner P., 1999. *Geostatistics : modelling spatial uncertainty*. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, 695 p.
- Collin J.-J., 1991. *Renouveau de la cartographie hydrogéologique : la rencontre des concepts et des outils*. Hydrogéologie, 1, 3-6, BRGM, Orléans.
- Delhomme, J. P., 1976. *Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau*. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Pierre & Marie Curie, laboratoire de géologie dynamique.

- Engelen G. B., Jones G. F., 1986. *Developments in the analysis of groundwater flow system*. IAHS publ., 163, 356 p.
- Engelen G. B. & Kloosterman F. H., 1996. *Hydrological Systems Analysis, Methods and Applications*. TNO Institute of Applied Geoscience, Delft, The Netherlands. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. 149 p.
- Freeze R.-A., Witherspoon P. A., 1966. *Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow : 1. Analytical and Numerical Solutions to the Mathematical Model*. Water Resources Research, Vol. 2, N° 4, pp. 641-656.
- Freeze R.-A., Witherspoon P. A., 1967. *Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow : 2. Effect of Water-Table Configuration and Subsurface Permeability Variation*. Water Resources Research, Vol. 3, N° 2, pp. 623-634.
- Freeze R.-A., Witherspoon P. A., 1968. *Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow : 3. Quantitative Interpretations*. Water Resources Research, Vol. 4, N° 3, pp. 581-590.
- Grisak G., Pickens J. F., 1985. *Hydrogeological Testing of Crystalline Rocks during the NAGRA Deep Drilling Program*. NTB 85-08, NAGRA, Baden, Switzerland.
- Jäckli H., 1980. *Coupes géologiques au 1: 100'000*, inédites.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Eisenlohr L., Rossier Y., Zwahlen F., 2001a. *A statistical analysis of hydro-climatic stress on karst aquifer system (Switzerland)*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal, 13 p., 8 fig., 9 tab.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Eisenlohr L., Rossier Y., 2001b. *Drought risk analysis applied to porous Swiss aquifers*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal, 11 p., 6 fig., 6 tab.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Ornstein P., Weber I., Rouiller J.-D., 2001c. *Geohydrological parameter identification and groundwater vulnerability to pollution : A Swiss case study*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal, 16 p., 12 fig., 1 tab., 1 ann.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Ababou R., Ribeiro L., 2001d. *Travel path uncertainty : a case study combining stochastic and deterministic hydraulic models in the Rhône valley, Switzerland*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal, 15 p., 9 fig., 1 ann.
- Kinzelbach W., 1986. *Groundwater modelling*. Elsevier, 333 p.
- Király L., 1972. *Modèles en hydrogéologie et statistiques*. Cours pour le certificat d'étude approfondie en hydrogéologie, 3^{ème} cycle, Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, Université de Neuchâtel, inédit.
- Király L., 2000a. *Introduction à l'utilisation des modèles en hydrogéologie. Bases théoriques à l'intention des hydrogéologues*. 240 p., cours 3^{ème} cycle, Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, Université de Neuchâtel, inédit.
- Király L., 2000b. *Hydrogéologie des roches fissurées et karstiques*. 180 p., cours 3^{ème} cycle, Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, Université de Neuchâtel, inédit.
- Kovar K., & Nachtnebel H. P., 1996. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*. IAHS Publication N° 235.

- Küpfer Th., Hufshmiel P., Pasquier F., 1989. *Tests hydrauliques dans les forages profonds de la Cédra*. Cédra informe 3+4/89, pp. 7-23, Baden, Suisse.
- Maidment D. R., 1996. *Environmental modeling within GIS*. GIS and Environmental Modeling with GIS : Progress and Research Issues, M. F. Goodchild & al (eds), Ford Collins : GIS World, pp. 315-324.
- Margat J., 1978. *Nouvelle légende de carte hydrogéologique*. BRGM, Orléans, 30 p.
- Maxwell T. & Costanza R., 1997. *An open geographic modeling environment*. Simulation, 68 (3), pp. 175-185.
- Ophori D. U., Tóth J., 1990. *Relationships in regional groundwater discharge to streams : an analysis by numerical simulation*. J. of Hydrology, 119 p., pp. 215-244.
- Pouliot J., 1999. *Définition d'un cadre géosémantique pour le couplage des modèles prévisionnels de comportement et des SIG – Application pour les écosystèmes forestiers*. Ph.D. thesis N° 2087, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- Ribeiro L. T., Pina P., Muge F. H., 1997. *Contribution of indicator geostatistics and mathematical morphology to the characterization of aquifer heterogeneities in the vicinities of waste disposal sites*. Engineering Geology and the Environ., Marinós, Koukis, Tsiambaos & Stournaras (eds), pp. 2127-2132.
- Roth C., Chilès J.-P., 1997. *Modélisation géostatistique des écoulements souterrains : comment prendre en compte les lois physiques*. Hydrogéologie N° 1, pp. 23-32, 8 fig.
- Rouiller J.-D., Ornstein P., Rey J.-M., Kimmeier F., Weber I., Bouzelboudjen M., 1998. *Systèmes d'Information Spatiale Orientés vers la Gestion et l'Optimisation des Ressources en Eaux du Canton du Valais*. GeoloGIS-CH'98 Atelier sur l'application des SIG en géologie. Service Hydrologique et Géologique National (SHGN), Berne, Suisse.
- Schmassmann H., 1980. *Coupes géologiques au 1:25'000 et carte des potentiels hydrauliques au 1:200'000*, inédites.
- Spicher A., 1972. *Géologie 1: 500'000*, Feuille 4 de l'Atlas de la Suisse. Ed. E. Imhof. Service topographique fédéral Wabern, Berne.
- Tóth J., 1963. *A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins*. Journal of Geophysical Research 68/16, pp. 4795-4812.
- Tóth J., 1970. *A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment*. J. of Hydrology, 10, pp. 164-176.

3-D Groundwater Flow Modeling in Heterogeneous Geologic Media : Integrated Approach Using Spatial and Temporal Database, Geostatistics and GIS

Francesco Kimmeier

SHORT TABLE OF CONTENTS

I. INTRODUCTION GENERALE

II. GIS DATABASE AS SUPPORT TO GROUNDWATER PROBLEM RESOLUTION

II.1 TRACES/VIEW - TRAÇAGE DES EAUX SOUTERRAINES : APPLICATION SIG EN MILIEU KARSTIQUE JURASSIEN (SUISSE)

II.2 GEOHYDROLOGICAL PARAMETERS IDENTIFICATION AND GROUNDWATER VULNERABILITY TO POLLUTION: A SWISS CASE STUDY

III. GROUNDWATER MODELING AT DIFFERENT SCALE USING FINITE ELEMENTS METHOD AND STOCHASTIC MODELING FOR UNCERTAINTY ESTIMATION

III.1 3-D GROUNDWATER MODELING AT REGIONAL SCALE

III.2 BASE DE DONNEES, SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE, GEO-STATISTIQUE ET MODELISATION 3-D DES EAUX SOUTERRAINES A L'ECHELLE LOCALE DANS LA REGION DE VISP (SUISSE)

III.3 TRAVEL PATH UNCERTAINTY : A CASE STUDY COMBINING STOCHASTIC AND DETERMINISTIC HYDRODYNAMIC MODELS IN THE RHÔNE VALLEY, SWITZERLAND

IV. CONCLUSIONS GENERALES ET TRAVAUX FUTURS

KIMMEIER'S SHORT CURRICULUM VITAE AND LIST OF PUBLICATIONS

TracES/View - Traçage des Eaux Souterraines : Application SIG en milieu karstique jurassien (Suisse)

Mahmoud Bouzelboudjen¹, Pascal Ornstein², Francesco Kimmeier¹

¹ Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, 11 rue Emile-Argand, 2007 Neuchâtel (Suisse),

² Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin, 45 rue de l'Industrie, 1951 Sion (Suisse)

ABSTRACT

The use of artificial tracers is a specially well-established method to investigate karstic aquifers. In this case, tracing (artificial and biological tracers) enables to delimit watercatchment boundaries, to identify relation between a sinkhole and an outlet, to assess diffluent phenomena, transit time, etc. More recently tracer methods have been used in pollution transport studies. Tracer studies being time-consuming and expensive, an application (TracES/View) combining ArcInfo and ArcView Geographical Information Systems (GIS), both coupled with MSAccess database has been developped to provide an efficient way to plan the implementation and the planning of new tracer tests. An ArcView application developped with Avenue object-oriented scripting language allows GIS non-specialists to easily access data from tracer tests database in an interactive and intuitive way. Used in conjunction with other thematic maps (hydraulic conductivity, landuse, groundwater resources, and so on), it can provide a powerful decision-support tool for groundwater resources management.

Key words : karstic hydrogeology, tracing, hydrogeology mapping, spatial database, GIS

RÉSUMÉ

L'usage de traceurs artificiels est une méthode spécialement bien établie pour étudier les aquifères karstiques. Dans ce contexte, les traçages (avec des traceurs artificiels et biologiques) permettent de déterminer les limites des bassins versants, d'identifier la relation entre une perte et une résurgence, d'évaluer les phénomènes de difffluence, de déterminer le temps de transit, etc. Plus récemment les méthodes de traçage sont utilisées dans les études quantitatives de transport de polluant. Les essais de traçage prenant du temps et étant coûteux, une application (TracES/View) combinant les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) ArcInfo et ArcView, les deux couplés avec une base de données MS Access a été développée afin de planifier de façon efficace la réalisation de nouveaux essais de traçage. Une application utilisant ArcView, développée avec le langage de programmation orienté-objets Avenue permet à des non-spécialistes en SIG d'accéder facilement aux éléments de la base de données des essais de traçage d'une manière graphique intuitive et interactive

à l'écran. Utilisée conjointement avec d'autres cartes thématiques (la topographie, les surfaces structurales des formations géologiques, la délimitation des aquifères, les perméabilités, l'utilisation du sol, etc.), elle peut fournir un outil puissant d'aide à la décision pour la gestion des ressources en eaux souterraines.

Mots-clefs : hydrogéologie karstique, traçage, cartographie hydrogéologique, base de données spatiales, SIG

1. INTRODUCTION

La réalisation finale des cartes hydrogéologiques classiques passe inévitablement par un travail manuel minutieux et laborieux. Les cartes préparées sont ensuite confiées à un cartographe spécialisé. Lorsque l'hydrogéologue a terminé sa carte, il s'écoule un certain temps pour que celle-ci soit dessinée, imprimée et éditée [Pasquier, Bouzelboudjen, Zwahlen 1999]. Il est clair que durant ce temps la demande des utilisateurs a évolué. Cette méthode ne permet pas une réactualisation aisée de l'information, et suite à une quelconque modification la carte doit être en grande partie redessinée.

Certains hydrogéologues utilisent en partie l'informatique pour stocker les données (inventaire de sources, etc.) et numérisent certaines informations nécessaires pour résoudre leurs problèmes (cartes en isovaleurs, extension de l'aquifère, simulation des écoulements souterrains), [Bouzelboudjen, 1993]. Cette démarche demande un effort considérable dans la «structuration» des données de base. Cependant, elle trouve ses limites quand des modifications surgissent, et dans la plupart des cas seule la personne initiale au projet (si elle se rappelle les programmes utilisés et des étapes de l'étude) peut intervenir [Bouzelboudjen, Király & al., 1997]. Dans la plupart des cas, il faut tout recommencer.

Nous montrons à travers l'application TracES/View d'une part l'intégration de données des essais de TRAçages des Eaux Souterraines sous ORacle (TRESOR) et/ou sous ACcess (TRESAC) au sein de la Base de Données HYDROGEologiques spatiales numériques du canton de NEuchâtel (BD HYDROGENE) et d'autre part une approche permettant la sélection, l'interrogation interactive, le traitement des résultats de ces traçages ainsi que leurs représentation graphiques. Ce travail montre l'apport des bases de données spatiales numériques et des systèmes d'information géographique dans l'élaboration des cartes hydrogéologiques basées sur la détermination des systèmes d'écoulement souterrain [Bouzelboudjen, 1993, Bouzelboudjen & Kimmeier, 1998].

TracES/View peut servir de base aux études sur la gestion et la protection des ressources en eau souterraine du Canton de Neuchâtel et peut être appliquée à d'autres cantons ou régions.

2. MODÈLE DE SAISIE DES DONNÉES DES ESSAIS DE TRAÇAGE

Une première réflexion a été engagée en 1990 par le Centre d'hydrogéologie de l'université de Neuchâtel (CHYN) dans le cadre d'un travail de diplôme postgrade [Brasey, 1990]. La méthodologie retenue pour l'acquisition et la saisie des données relatives aux essais de traçage du canton de Neuchâtel s'est largement appuyé sur les travaux réalisés en Franche-Comté par l'université de Besançon [Chauve & al., 1987].

La première étape de cette réflexion a consisté à définir un modèle de saisie des données des essais de traçage permettant de documenter chaque essai de traçage de manière la plus complète possible.

2.1 Bases de données des essais de traçage du canton de Neuchâtel : TRESOR (TRaçages des Eaux Souterraines sous ORacle) et sous ACcess (TRESAC)

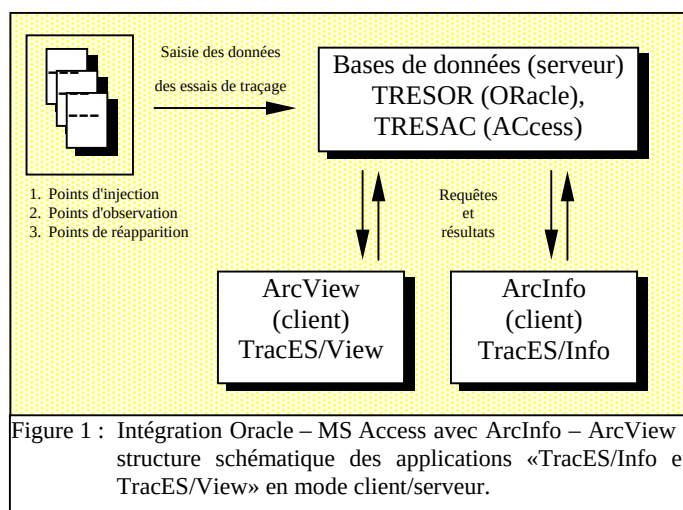
L'inventaire entrepris par J. Brasey en 1990 a été complété jusqu'en 1994, portant le nombre des essais actuellement répertoriés à un peu plus de 200 [Aeschlimann-Adatte, 1994]. Celui-ci englobe les essais de traçage réalisés dans le canton de Neuchâtel ainsi qu'une trentaine d'essais réalisés dans les cantons périphériques de Berne, Vaud et du Jura. En 1994, le CHYN a initié le projet de créer une base de données informatisée pour l'archivage des essais de traçage réalisés dans le canton de Neuchâtel. Ce projet avait notamment pour but de migrer l'inventaire existant sous FileMaker Pro 2.0 [Claris, 1992] vers un véritable système de gestion de bases de données relationnelles sous ORACLE [Tollo, Bouzelboudjen, Ornstein, 1995] afin de garantir une plus grande ouverture et une meilleure intégrité des données. En 1996, la même base de données a été implémentée aussi sous Access (TRESAC), [Bouzelboudjen & al., 1997].

2.2 Intégration base de données TRESOR et système d'information géographique ArcInfo

Les données des essais de traçages correspondent à des objets géoréférencés : points d'injection, d'observation et de réapparition. L'utilisation d'un SIG est tout à fait adaptée pour le traitement de ces informations notamment pour leurs représentations, leurs interrogations et leurs analyses.

Dans cette optique, un premier essai a conduit à la réalisation sous ArcInfo de l'application (TracES/Info) sur la région du Val-de-Ruz (TracES/Info VdR), [Bouzelboudjen & al., 1993], puis de la carte des essais de traçage du canton de Neuchâtel (TracES/Info Ne, Annexe 3), [Bouzelboudjen & Ornstein, 1995]. Ces deux projets combinent ArcInfo et la base de données traçage sous ORacle (TRESOR), [Bouzelboudjen, Burri, Ornstein, 1996].

3. APPLICATION «TRACES/VIEW»



L'application TracES/Info décrite précédemment a été transposée sous MS Access et ArcView (TracES/View). Cette dernière a pour but de fournir un moyen d'accès convivial et interactif aux informations de la base de données «Essais de traçage» sans connaissances préalables d'Access et/ou d'ArcView (par exemple la possibilité d'accéder aux données directement à partir d'une représen-

tation cartographique à l'écran (Fig. 3) L'application est bâtie sur le mode client/serveur (Fig. 1).

Le lien ArcView - Access est réalisé via une liaison de type SQLconnect [ESRI, 1996]. Cette liaison permet d'accéder aux informations de la base de données TRESAC (serveur) directement à partir d'ArcView (client) par l'intermédiaire de requêtes SQL (Standard Query Language). ArcView ne stocke pas automatiquement le résultat des requêtes mais simplement leurs définitions. Ces requêtes sont exécutées à chaque ouverture de l'application. Cette solution offre l'avantage de créer des tables dynamiques qui reflètent automatiquement les mises à jour apportées à la base de données (ajout, suppression, modification de données).

La Fig. 2 illustre la requête : «Sélection des essais de traçage réalisés dans le canton de Neuchâtel» et l'Annexe 1 montre la cartographie des résultats de la requête : «Sélection des essais de traçage réalisés dans le canton de Neuchâtel dont la

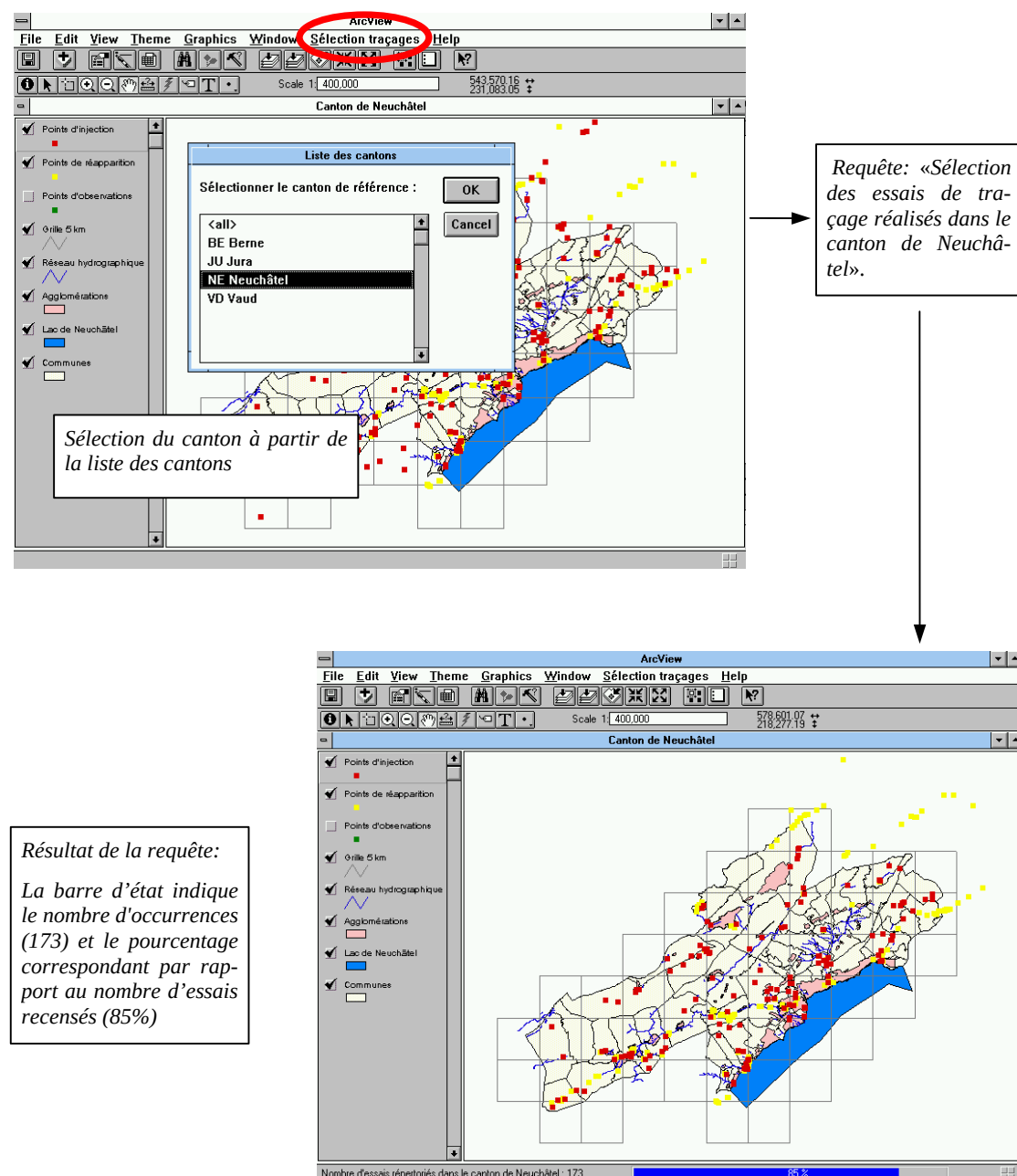


Figure 2 : Sélection des essais de traçage réalisés dans le Canton de Neuchâtel.

longueur est supérieure ou égale à 4 km». De la même manière, une requête peut être effectuée en utilisant la liste des communes ou la liste des traceurs à travers le menu «Sélection traçages».

Une fois la liaison SQLconnect établie, la «redirection» du lien sur le serveur Access pourra être effectuée sans qu'il soit nécessaire de redéfinir les requêtes SQL servant à la création des tables ArcView. L'application est organisée sous la forme d'un projet. D'un point de vue logique, un projet est défini comme un ensemble de documents (vues, tables, graphiques, cartes, scripts) liés dynamiquement les uns aux autres. La notion de lien dynamique implique que toute manipulation de l'information effectuée à l'intérieur d'un document (modification, suppression, ajout, sélection, zoom, etc.) est automatiquement répercutée par tous les documents qui lui sont liés. Physiquement, chaque projet est stocké sous la forme d'un fichier unique, éditable (format ASCII). Celui-ci contient la définition et les propriétés des différents documents constitutifs (vues, tables, graphiques, cartes, scripts) ainsi que les références aux informations spatiales, graphiques (images) et tabulaires (liaison SQLconnect et requêtes SQL) utilisées. Le projet permet également de mémoriser l'état de l'application d'une session à l'autre.

Les thèmes liés aux tables «Points d'injection», «Points de réapparition» et «Points d'observation» de la base de données «Essais de traçage» ont été élaborés directement sous ArcView à partir des informations géographiques X, Y. Ces thèmes particuliers sont référencés dans ArcView en tant que «Event Themes» et les tables correspondantes comme «Event Tables». Ces tables peuvent être interrogées dynamiquement en sélectionnant graphiquement un objet sur la carte affichée à l'écran (Fig. 3).

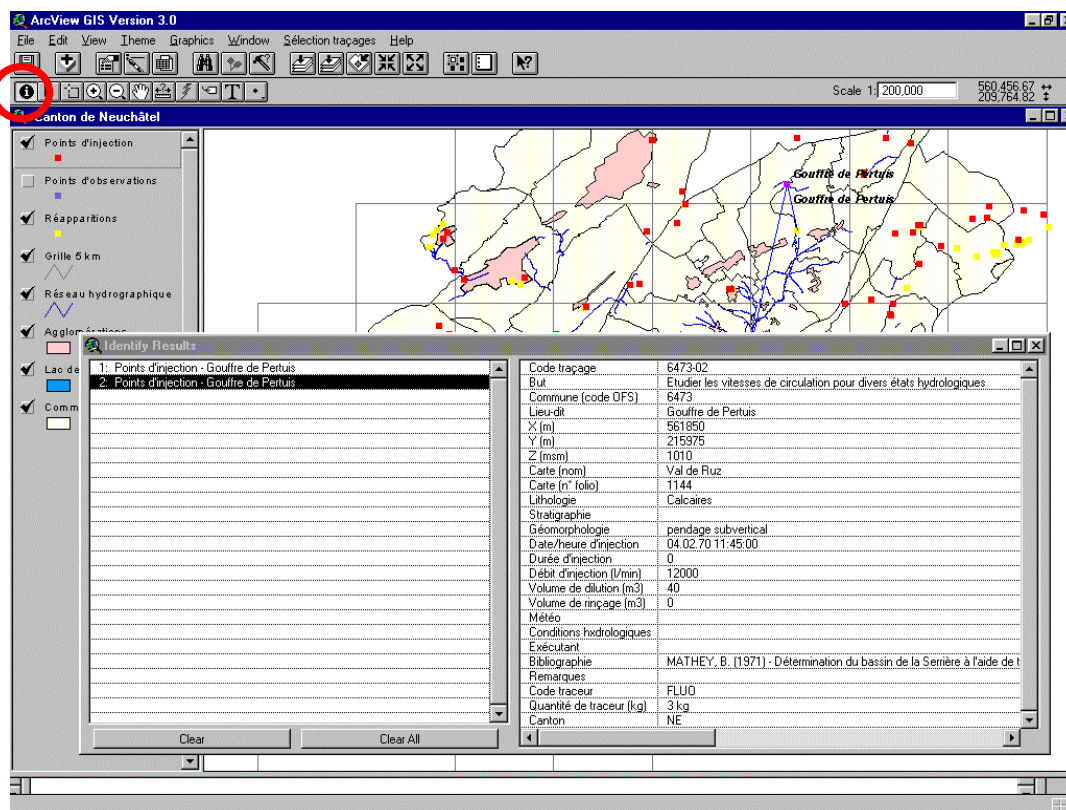


Figure 3 : Interrogation interactive de la table Points d'injection au Gouffre de Pertuis

Les tables sont créées par interrogation de la base de données «TRESAC» au travers de différentes requêtes SQL. L'accès aux données est réalisé via une connexion SQL (SQLConnect) préalablement définie au niveau du gestionnaire ODBC (Open DataBase Connexion) sous Windows. Le nom de la connexion et les requêtes SQL sont stockées dans le projet et exécutées à chaque nouvelle ouverture de l'application. Ce faisant, les modifications apportées à la base de données entre deux sessions (par exemple ajout de nouveaux essais de traçages) sont automatiquement prises en compte au niveau des tables «Points d'injection», «Points d'observation» et «Points de réapparition» ainsi que des thèmes auxquels elles sont liées.

Les résultats des différentes requêtes dont l'utilisateur a besoin peuvent être superposés au MNT (Modèle Numérique de Terrain) ou à la combinaison du MNT et de la lithologie du canton de Neuchâtel (Annexes 2 et 3). Les informations de base relatives à la lithologie et aux points d'eau sont tirées de la carte hydrogéologique numérique du canton de Neuchâtel au 1 : 50'000 (HYDROGENE) basées sur les travaux de Kiraly [1973]. Le traitement de celle-ci s'est déroulée en trois phases consécutives [Bouzelboudjen, 1994] :

1. Reprise manuelle des contours lithologiques et des points d'eau sur calques.
2. Numérisation des contours lithologiques par scanner A0. Numérisation des points d'eau, gouffres, grottes avec la table à digitaliser A0.
3. Traitement final sous ArcInfo (vectorisation, base de données avec topologie et cartes dérivées).

La partie programmation de l'application TracES/View a été réalisée avec Avenue, le langage de programmation orienté-objets associé à ArcView. Le code est organisé sous forme de modules ou scripts. Un script est défini comme le constituant d'un projet qui contient le code Avenue. Cette application est avant tout un outil interactif de consultation de la base de données des essais de traçage du canton de Neuchâtel. Outre les fonctionnalités qui ont été spécifiquement développées, l'utilisateur peut disposer tout à fait normalement des fonctions propres à ArcView, notamment des fonctions d'interrogation, de recherche et d'analyse spatiale.

La consultation peut s'effectuer selon deux modes interactifs complémentaires : «Carte active» (Fig. 4) et menu personnalisé (Fig. 2). Dans les deux cas, l'accès à l'information s'effectue à partir du point d'injection.

Outre le travail de consultation de la base de données Traçages et de liaison avec le SIG, des analyses statistiques peuvent être réalisées sur la totalité des données ou sur le résultat d'une requête spatiale. La figure 5a illustre un exemple décrivant les statistiques sur les traceurs utilisés ainsi que la variabilité de la longueur des traçages réussis et des temps de parcours pour le canton de Neuchâtel (Annexe 3). D'autres statistiques peuvent être calculées comme la quantité d'un traceur spécifique utilisé ou le nombre de traçages réussis effectués par chaque exécutant.

L'application TracES/View comme décrit précédemment est facilement exportable vers d'autres cantons. L'Annexe 4 montre la carte numérique des circulations souterraines en milieu karstique reconnues par essais de traçages en Ajoie (canton du Jura), Bouzelboudjen, Kimmeier et Grétilat [1999]. La Fig. 5b donne quelques statistiques sur ces essais de traçages en Ajoie.

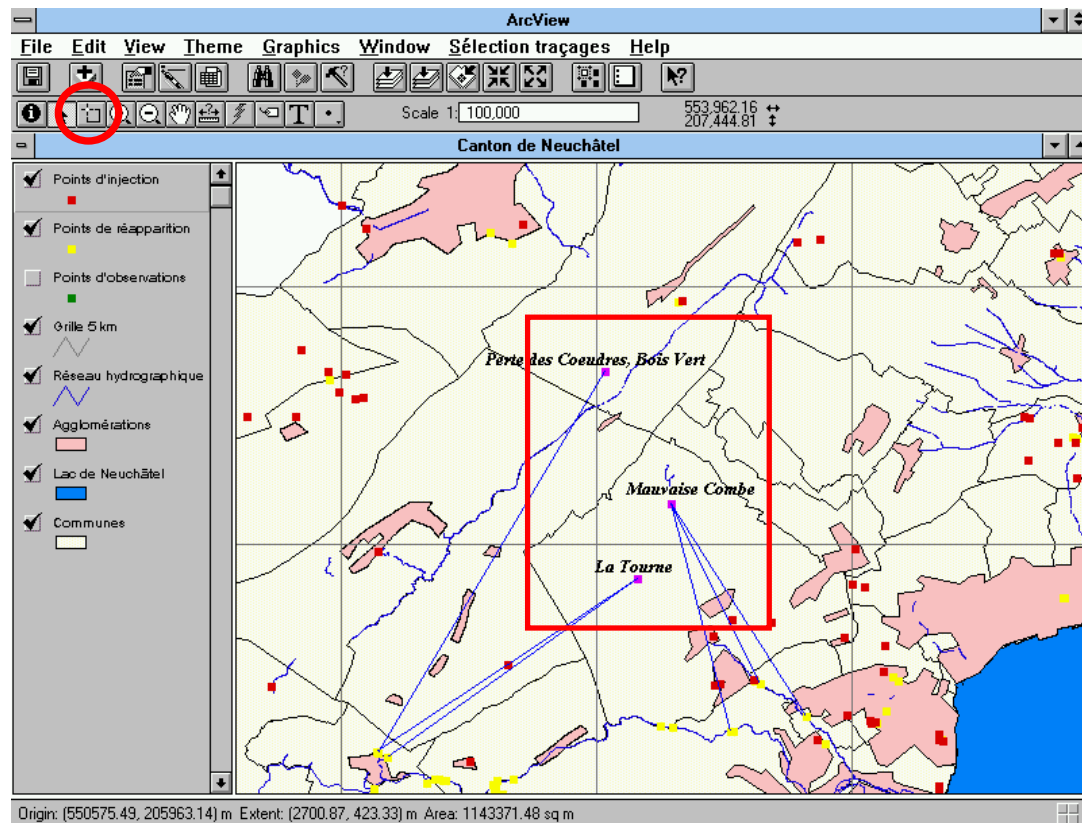


Figure 4 : Consultation en mode «Carte active» :

- 1.- Requête spatiale effectuée à l'aide de l'outil de sélection (cercle rouge) sur une zone contenant des points d'injection (rectangle rouge)
- 2.- Résultats avec (a) sélection des points d'injection liés à des traçages positifs et (b) sélection automatique des points de réapparition liés à des traçages positifs et (c) matérialisation sous forme de ligne des connexions entre les points d'injection et de réapparition).

4. CONCLUSIONS

Les essais de traçage prenant du temps et étant coûteux, l'application TracES/View combinant le Système d'Information Géographique (SIG) ArcView couplé avec la base de données Access permet la consultation, l'analyse et l'optimisation de la planification de nouveaux essais de traçage. Cette application offre à des non-spécialistes en SIG d'accéder facilement aux éléments de la base de données des essais de traçage d'une manière graphique intuitive et interactive à l'écran. Utilisée conjointement avec d'autres cartes thématiques numériques (topographie, surfaces structurales des formations géologiques, extension des aquifères, perméabilités, utilisation du sol, etc.), elle peut fournir un outil puissant d'aide à la décision pour la gestion et la protection des ressources en eau souterraines. L'étape suivante est de mettre l'application TracES/View appliquée aux cantons de Neuchâtel et du Jura à disposition des utilisateurs à travers Internet en utilisant ArcIMS (Arc Internet Map Server).

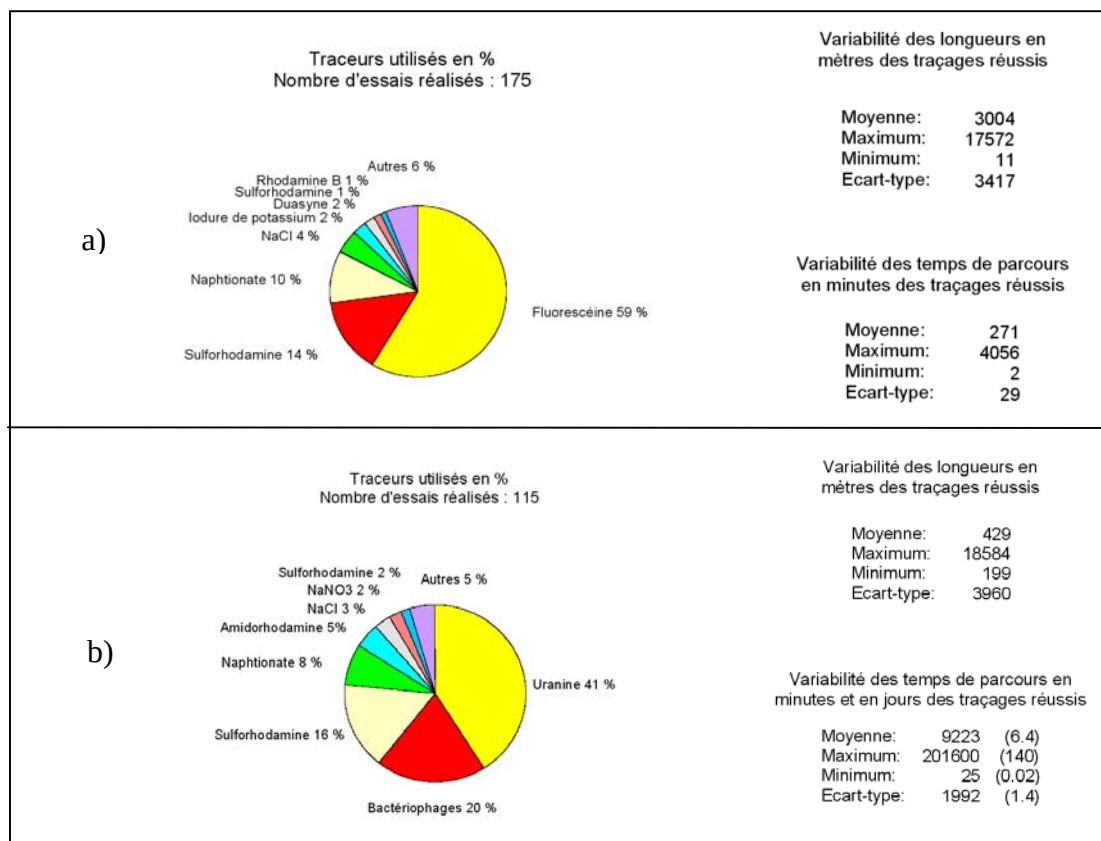


Figure 5 : Sélection des essais de traçage réalisés dans le Canton de Neuchâtel (a) et en Ajoie (b)

5. RÉFÉRENCES

- Aeschlimann-Adatte N., 1994. *Actualisation de l'inventaire des essais de traçage du canton de Neuchâtel pour la période 1990-1993*. 1 dossier + 3 cartes. CHYN, inédit.
- Bouzelboudjen M., 1993. *Cartographie hydrogéologique et systèmes d'écoulement souterrain*. 15 p., 21 fig., 3 tab., 2 ann, 2 photos. Centre d'Hydrogéologie et Service Hydrologique et Géologique National (SHGN), Berne, inédit.
- Bouzelboudjen M., Burri F., Gonseth Y., 1993. *Nature et ressources : Val-de-Ruz, application sous ARC/INFO – ORACLE*. 7 p., 21 fig. CHYN, CAL, CSCF, groupe SIGNE, Neuchâtel, inédit.
- Bouzelboudjen M., 1994. *Nature lithologique des terrains et des manifestations hydrogéologiques de surface. Extrait de la carte hydrogéologique numérique SIG du canton de Neuchâtel 1 : 50'000*. Application SIG sous ArcInfo, Centre d'Hydrogéologie, Groupe SIGNE Université Neuchâtel, octobre 1994, inédit.
- Bouzelboudjen M., Ornstein P., 1995. *Carte numérique des circulations souterraines en milieu karstique reconnues par essais de traçages dans le canton de Neuchâtel*. Application sous ArcInfo-Oracle. Centre d'Hydrogéologie, Groupe SIGNE Université Neuchâtel, novembre 1995. Rencontre SIGNE et Services Cantonaux, CSCF, Musée d'Histoire Naturelle Neuchâtel, inédit.
- Bouzelboudjen M., Burri F., Ornstein P., 1996. *Groundwater circulations recognized by tracing in state of Neuchâtel (Switzerland): Tracing database design*

- elaborated within ArcInfo-Oracle and ArcView. 5 p., 7 fig. Sixteenth Annual ESRI User Conference. Palm-Springs, California, USA, May 20-24, 1996.*
- Bouzelboudjen M., Burri F., Ornstein P., 1997. *Traçages des Eaux Souterraines : application interactive sous Oracle-Access-ArcView (TracES/View) et Base de Données spatiales HYDROGEologiques numériques du canton de NEuchâtel sous Oracle-ArcInfo-ArcView (BD HYDROGENE).* 46 p., 23 fig., 3 tab., 2 ann. Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, inédit.
- Bouzelboudjen M., Király L., Kimmeier F., Zwahlen F. 1997. *Représentation schématique des écoulements souterrains en Suisse. Profils hydrogéologiques issus de modèles mathématiques 3-D à éléments finis.* Planche 8.3 de l'Atlas Hydrologique de la Suisse. Institut de Géographie de l'Université de Berne, Office Fédéral de la Topographie et service Hydrologique et Géologique National, Berne, Suisse.
- Bouzelboudjen M., Kimmeier F., 1998. *GIS Vector And Raster Database, Advanced Geostatistics And 3D Groundwater Flow Modelling In Strongly Heterogeneous Geologic Media : An Integrated Approach.* In : The Eighteenth Annual ESRI User Conference, San Diego, California (USA), 5 p., 18 fig.
- Bouzelboudjen M., Kimmeier F., Grétilat P.-A., 1999. *Carte numérique des circulations souterraines en milieu karstique reconnue par essais de traçages en Ajoie (canton du Jura).* Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, inédit.
- Brasey J., 1990. *Synthèse et inventaire des essais de traçage dans le canton de Neuchâtel.* Diplôme de 3^{ème} cycle, Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, 2 tomes, 1 carte h.t., inédit.
- Brasey J., Aeschlimann-Adatte N., Tollo D., Paratte F., 1995. *Actualisation de l'inventaire des essais de traçage du canton de Neuchâtel (inventaire arrêté en septembre 1993 + 2 cartes 1 : 50'000).* CHYN, inédit.
- Chauve P., Dubreucq F., Frachon J.-C., Gauthier A., Mettetal J.-P., Peguenet J., 1987. *Inventaire des circulations souterraines reconnues par traçages en Franche-Comté.* Ann. Scient. Univ. Besançon, Géologie, Mémoire n° 2.
- ESRI, 1996. *ArcView GIS - version 3.0. The Geographical Information System for Everyone.* Environmental Systems Research Institute, CA, USA.
- ESRI, 1995. *Understanding GIS - The ARC/INFO Method. Version 7 for Unix and OpenVMS.* Environmental Systems Research Institute, CA, USA.
- CLARIS, 1992. *FileMaker Pro User's Guide.* Claris Corporation, Santa Clara, CA, USA.
- Kiraly L., 1973. *Notice explicative de la carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel.* 16 p., 6 fig., 1 tab., 1 carte. Supp. Bull. Soc. Neuchâteloise des Sciences naturelles, tome 96.
- ORACLE, 1994. *Oracle version 7. User's Guide & Reference.* Oracle Corporation, Redwood City, CA, USA.
- Pasquier F., Bouzelboudjen M., Zwahlen F. 1999. *Carte hydrogéologique de la Suisse 1 : 100'000. Feuille 6 Sarine.* Commission Géotechnique Suisse, Zürich, ETHZ et notice explicative 137 p.

Tollo D., Bouzelboudjen M., Ornstein P., 1995. *Constitution d'une banque de données des essais de TRAçage des Eaux Souterraines (TRESOR) du canton de Neuchâtel sous ORacle*. Centre d'Hydrogéologie, Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel, Rapport Interne, inédit.

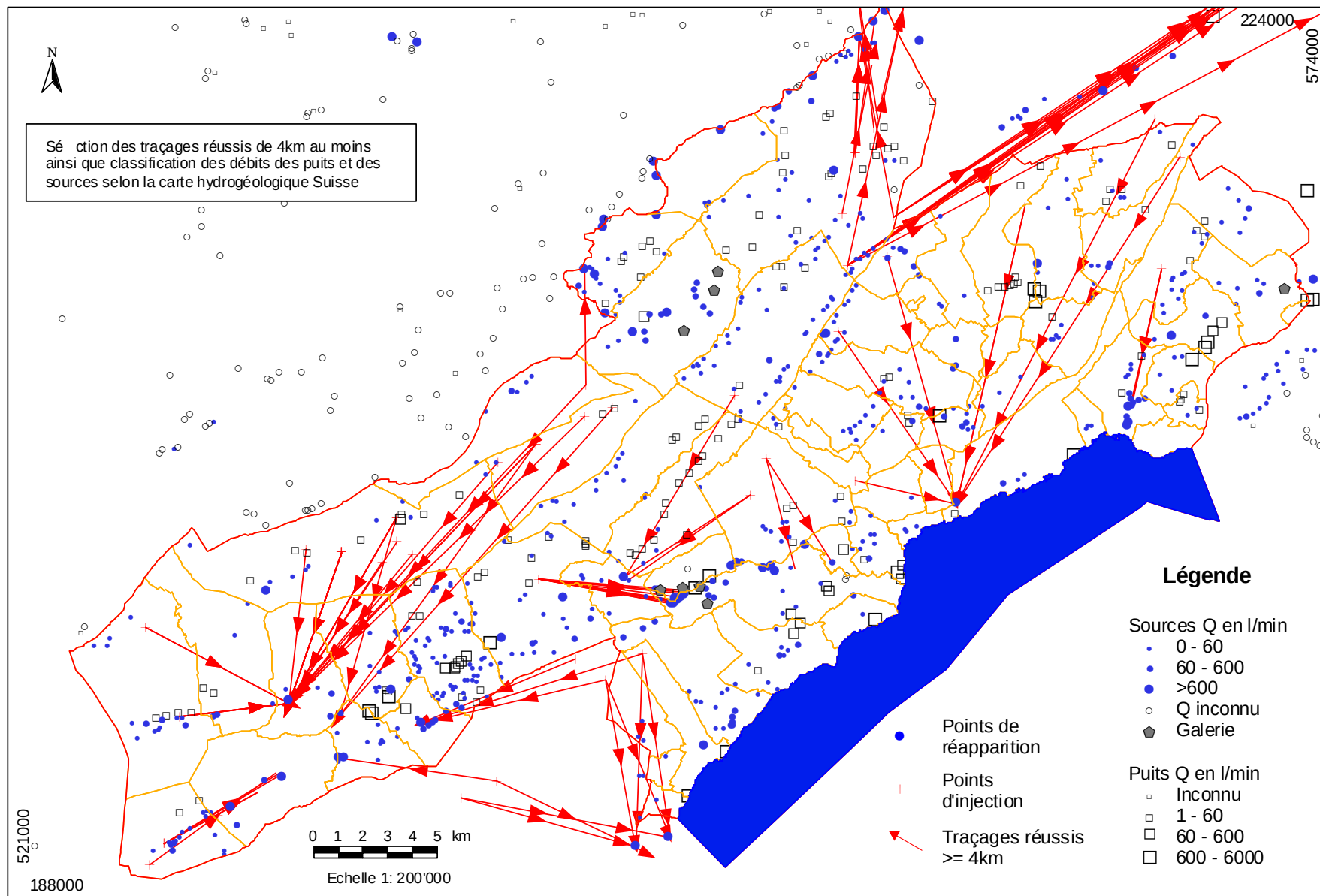
6. REMERCIEMENTS

Nous remercions le Service Informatique et Télématique de l'Université de Neuchâtel qui a mis à la disposition du groupe SIG de l'Université de Neuchâtel (SIGNE) depuis 1992 l'infrastructure et les moyens techniques qui ont permis la réalisation de ce travail. Nos remerciements vont plus particulièrement à MM. F. Burri, Dr Y. Gonseth, J.P. Maradan, R. Choffat, Dr R. Corfu. Nos remerciements vont également au Dr A. Mokeddem directeur du SITEL qui met à notre disposition le serveur SIGNE permettant l'ouverture de l'application et des données vers Intranet et Internet à travers ArcIMS d'ESRI.

Les Annexes 1 à 4 à l'échelle 1 : 50'000 pour le canton de Neuchâtel et 1 : 25'000 pour l'Ajoie (canton du Jura) ont été exposées lors du colloque à Besançon. Les posters au format postscript sont à disposition auprès du premier auteur.

Cartographie des résultats des requêtes spatiales et alphanumériques de la base de données numériques HYDROGENE

Tiré de Bouzelboudjen & al. 1993, 1995, 1996, 1997, Brasey 1990, Kiraly 1973



Annexe 1 : Cartographie des résultats des requêtes spatiales et alphanumériques de la base de données numériques HYDROGENE (canton de Neuchâtel, Suisse).

Tiré de Bouzelboudjen et al., 1993, 1995, 1996, 1997, Brasey, 1990 et Kiraly 1973

3-D Groundwater Flow Modeling in Heterogeneous Geologic Media : Integrated Approach Using Spatial and Temporal Database, Geostatistics and GIS

Francesco Kimmeier

SHORT TABLE OF CONTENTS

I. INTRODUCTION GENERALE

II. GIS DATABASE AS SUPPORT TO GROUNDWATER PROBLEM RESOLUTION

II.1 TRACES/VIEW - TRAÇAGE DES EAUX SOUTERRAINES : APPLICATION SIG EN MILIEU KARSTIQUE JURASSIEN (SUISSE)

II.2 GEOHYDROLOGICAL PARAMETERS IDENTIFICATION AND GROUNDWATER VULNERABILITY TO POLLUTION: A SWISS CASE STUDY

III. GROUNDWATER MODELING AT DIFFERENT SCALE USING FINITE ELEMENTS METHOD AND STOCHASTIC MODELING FOR UNCERTAINTY ESTIMATION

III.1 3-D GROUNDWATER MODELING AT REGIONAL SCALE

III.2 BASE DE DONNEES, SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE, GEO-STATISTIQUE ET MODELISATION 3-D DES EAUX SOUTERRAINES A L'ECHELLE LOCALE DANS LA REGION DE VISP (SUISSE)

III.3 TRAVEL PATH UNCERTAINTY : A CASE STUDY COMBINING STOCHASTIC AND DETERMINISTIC HYDRODYNAMIC MODELS IN THE RHÔNE VALLEY, SWITZERLAND

IV. CONCLUSIONS GENERALES ET TRAVAUX FUTURS

KIMMEIER'S SHORT CURRICULUM VITAE AND LIST OF PUBLICATIONS

Geohydrological parameters identification and groundwater vulnerability to pollution : A Swiss case study

Francesco Kimmeier¹, Mahmoud Bouzelboudjen¹, Pascal Ornstein²,
Isabelle Weber¹, Jean-Daniel Rouiller²

¹ CHYN - Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, Emile-Argand 11, 2007 Neuchâtel, Suisse

² CREALP - Centre de Recherche en Environnement Alpin, Rue de l'Industrie 43, 1991 Sion, Suisse

ABSTRACT

The alluvial aquifer of the Rhône valley in Switzerland, which extends over 110 km and occupies an area of 256 km², is of great economic importance. Its groundwaters are easily accessible and thus exploitable at low cost. However, its location in an often narrow valley with intense human activity (industry, agriculture, communications network) makes it particularly vulnerable from both a qualitative (industrial and/or agricultural pollution) and quantitative point of view (groundwater flow disturbance following civil engineering works). Since 1995, the Swiss canton of Valais has decided to compile datasets from a number of local studies (water supply, hydro-electricity, and geotechnical studies) into a regional, integrated hydrogeological framework. The realization of the study has shown the importance of GIS tool either for the computing and mapping of the first piezometric map between Brig and Léman Lake or the elaboration of vulnerability maps. The geostatistic tool was also intensively used all over the spatial treatment of data. The comparison of groundwaters NO₃⁻ content (1985 and 1995), has shown that globally the nitrates content in the groundwater is low (< 30 mg/l for 90 % of samples). However it must be notice that the evolution of the NO₃⁻ content degrades during time. The study of vulnerability to pollution for the aquifer situated between Sierre and Vétroz as shown significant differences between the four different methods used. As main results DRASTIC and SINTACS integrated methods are concentrated between Moderate and High vulnerability when NLFB and GOD intrinsic methods are concentrated between Very Low and Moderate vulnerability. Intrinsic methods have the tendency to minimize the vulnerability.

Keywords : GIS (Geographical Information System), geostatistics, vulnerability to pollution, time series, piezometric map

1. STUDY PURPOSE

The Rhône valley alluvial aquifer in Switzerland extends over 110 km and occupies a surface of 256 km² and is of great economic importance. Its groundwaters are easily accessible and thus exploitable at low cost. However, its location in an often narrow valley with intense human activity (industry, agriculture, communications network) makes it particularly vulnerable from both a qualitative (industrial and/or agricultural pollution) and quantitative point of view (groundwater flows disturbance

following civil engineering works). Since 1995, the Swiss canton of Valais has decided to compile datasets from a number of local studies (water supply, hydro-electricity, and geotechnical studies) into a regional, integrated hydrogeological framework. The management of contaminated sites in Switzerland, and in the canton of Valais in particular, has now become a major concern in terms of water resource protection. Indeed, new legislation (OEaux 1998) now requires the delineation of the zone of influence of all water catchments of public interest that are vulnerable to pollution.

The aims of this paper is to study the Rhône aquifer at different scale and under multiple aspects that are : 1) the piezometry between Brig and Léman lake, 2) the piezometry between Sierre and Vétroz and for the same region 3) the study of piezometric time series, 4) the study of the groundwater hydrochemistry and the nitrates evolution of groundwaters and finally 5) the study of vulnerability to pollution using four methods. This study is carried out with GIS and geostatistic tools.

2. HYDROGEOLOGICAL DATABASE

The creation of a spatial (Arc/Info®, ArcView® ; ESRI, 1996, 1997) and tabular database (Access® ; Microsoft, 1997) represented the first stage of work. This database integrates relevant hydrogeologic data for the study and is subdivided into two complementary parts ; on one hand, a spatial database incorporating various coverages (a set of thematically associated data considered as a unit, e.g. soils, streams, roads, or land use, [ESRI, 1996]). On the other hand a descriptive database including data relating to the structure (boreholes), to the hydrodynamic characteristics (permeability, transmissivity, storage coefficient), to the piezometry (punctual and continuous measurements) and the hydrochemistry of the aquifer system. Before the implementation of this database, validation procedures adapted for each type of data were defined and applied in a systematic way.

In order to make its management easier, a simple structure (tabular files) was adopted for the descriptive database. In its current state, the spatial database covers 11 areas (Annex 1). The descriptive database includes 779 boreholes among of which 283 have associated permeability measurements, more of 15'000 piezometric and physico-chemical measurements (only discrete data : geographic features containing boundaries : point, line or area boundaries, [ESRI, 1996]), 91 automatic measurement stations of groundwater level as well as about 1'000 chemical analyses [Ornstein, 1996]. The Valais canton hydrogeologic database allowed local studies of groundwater simulations to be carried out. The methodology of this kind of study is well described in Bouzelboudjen and Kimmeier [1998]. The description is from the data validation until the elaboration of 3D hydrodynamic models.

3. THE POROUS AQUIFER OF THE VALAIS CANTON IN THE CONTEXT OF POROUS SWISS AQUIFERS

Our study area is located in the Rhône valley, which contains an important alluvial aquifer (110 km of length on an average of 1.5 km of width ; 256 km²) at the Swiss scale (Fig. 1). The vulnerability study is focused on the Sierre-Vétroz area. Four hydrographs (automatic measurements of the water table depth) from the area are represented on figure 2. On a national scale it is necessary to notice that despite the abundance of geological and hydrological (e.g. river discharge records extends back

more than a century), the piezometric information concerning unconsolidated aquifers (main element in the knowledge of the groundwaters dynamics) does not extend back more than 25 years and is inadequately distributed. For consolidated

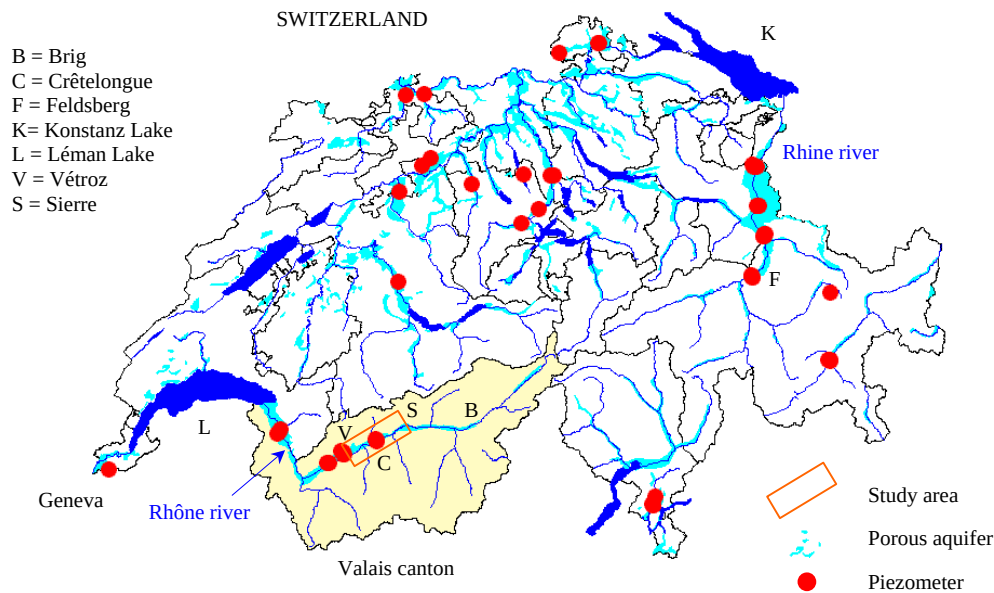


Figure 1 : a) Porous aquifers and piezometers network of SNHGS (Swiss National Hydrological and Geological Survey), b) Study area between Sierre and Vétroz in the Valais canton (Switzerland).

rocks (fissured and karstic), the situation is even less adequate, since the piezometric information remain fragmentary. The first data were collected in 1975, which is relatively recent for the groundwater monitoring.

Important information can be obtained by studying the recession part of hydrographs. The study of this part of the graph allows information concerning

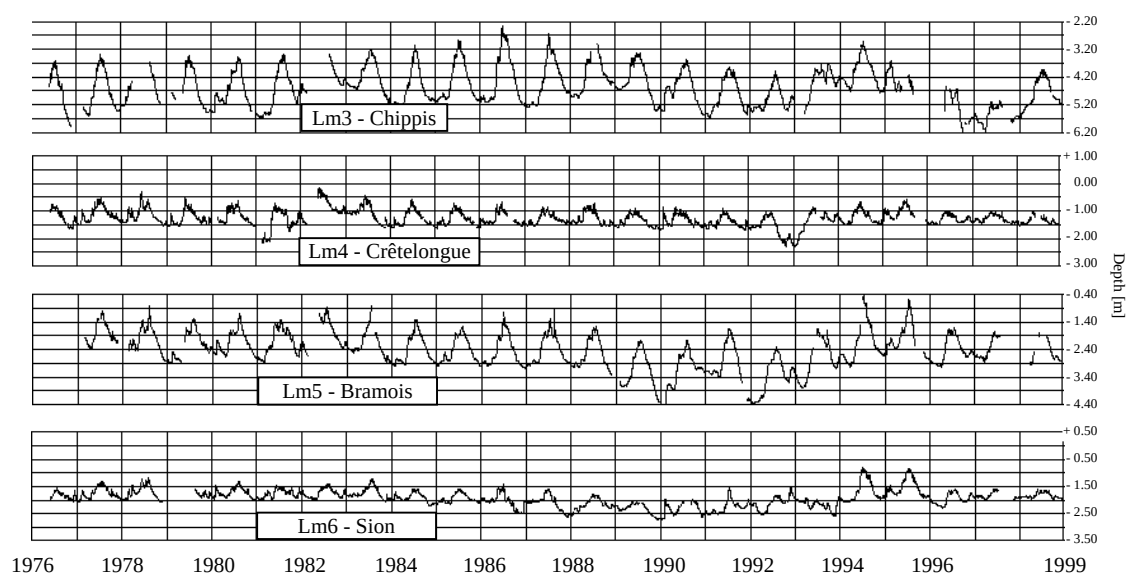


Figure 2 : Hydrographs (daily average) Lm3 (Chippis), Lm4 (Crêtelongue), Lm5 (Bramois), and Lm6 (Sion) of measurement stations (Fig. 4) installed since 1976 by the Cantonal Service of Environmental Protection (Valais canton, Switzerland).

drought resistance or more usually under our latitudes the resistance at a deficit of precipitation. We estimated the half recession time for the Crêtelongue's hydrograph (Fig. 2 and 4 - Lm4) that corresponds to 0.4 month [Bouzelboudjen, Kimmeier & al., 1998]. By comparing this value with that obtained with Feldsberg's hydrograph from a site in the Rhine aquifer upstream to Konstanz Lake (2.2 months) one notices that the Rhône aquifer has a relatively weak resistance in comparison to the Rhine. The Rhône aquifer is situated close to the surface (some meters) while the alluvial Rhine aquifer is relatively deeper (approximately 15 meters). In the vulnerability approach the variable "half recession time" is indirectly taken in account by means of the conductivity of the saturated and non saturated zone as the depth of the water table.

3.1 Hydraulic potential field reconstruction by kriging

The hydraulic potential field is necessary to calculate the depth of the aquifer water table. This is a very important parameter for the evaluation of aquifer vulnerability. Consequently the variable hydraulic potential (H) was regionalized by kriging (Fig. 3) using the 1'160 data points from the high water event of 1997. To reconstruct the H field we used a probabilistic approach developed by Matheron [1970] and applied to the water sciences by Delhomme [1979]. The hydraulic potential variogram presents non-stationary spatial behavior characterized by a parabolic increase. It does not stabilize at great distance reflecting the presence of a drift. Structural recognition is indirect and is made automatically in two steps [Geostatistics, 1998]. The first step consists of determining the degree of drift by the least-squares method. The second step consists in adjusting the models of generalized covariance by iterative regression and selection of the optimal model. The hydraulic potentials were regionalized on a grid of 100x100 m using the *Isatis* method of standard kriging. The moving neighborhood method of kriging allows an interpolation to take into account the local variations of the hydraulic potential. Consequently we obtained the first (1997) piezometric numerical map (Fig. 3) with an associated map of kriging estimation error. This map shows that the direction of flow is quite parallel to the valley and is directed from East (Brig) to West (Léman Lake). The map also shows the close relation between the aquifer and the river. As expected, the gradient of the

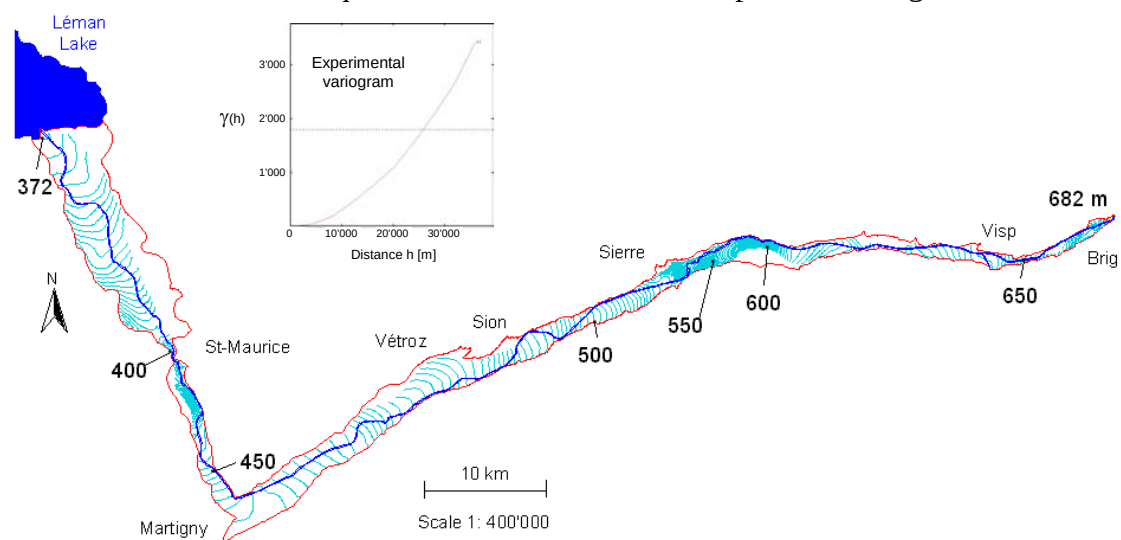


Figure 3 : Kriging contour map of hydraulic potentials H (high water July 1997, 1'160 values) in the aquifer of the Rhône valley from Brig to Léman Lake. The numbers indicate isovalues of estimated H in meters. The variogram of hydraulic potentials is also depicted (inset).

piezometric surface increase before the narrowing in the valley as it is the case at St-Maurice or Sierre.

4. HYDROGEOLOGY OF SIERRE-VÉTROZ AREA

4.1 Aquifer system structure

The topography and the geomorphology of the Rhône alluvial plain between Sierre and Vétroz are strongly conditioned by the factors such as the Rhône course, the talus cones as well as the deposits of the rockfall of Sierre (Fig. 4). An evaluation of the amount of water resulting from precipitation on the study area surface was made by Ebener & al. [1998]. For period 1978-1991 these authors obtained an annual average temperature of 10.2 °C and an annual average precipitation of 570.5 mm. The evapotranspiration, calculated by means of Turc's formula, gives a value about 430 mm/year. Therefore, the potential effective precipitation (EP) value is 140 mm/year.

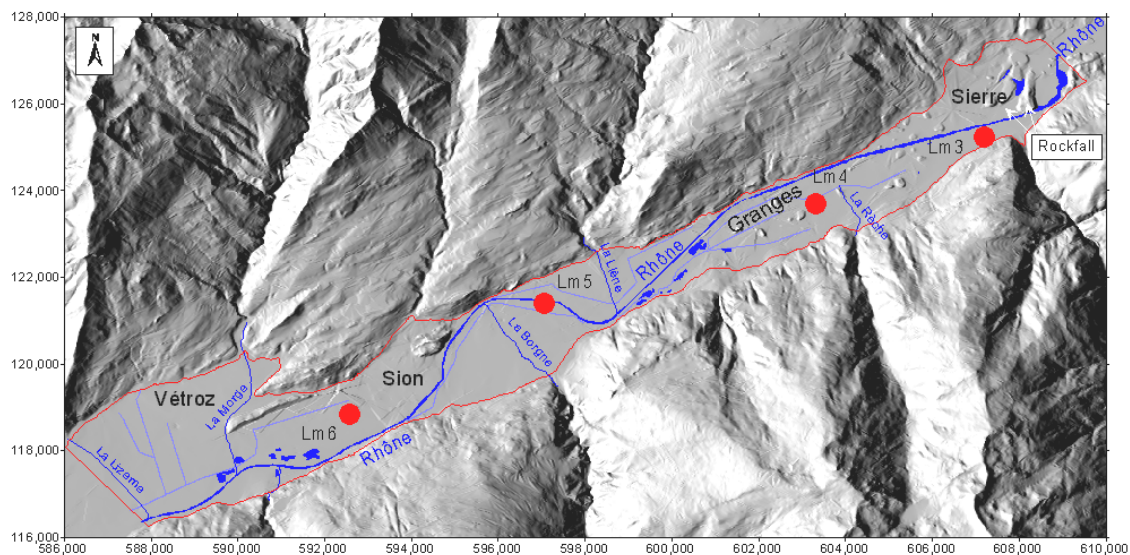


Figure 4 : Digital Elevation Model (DEM : grid 25x25m, © *Federal Office of Topography*), study area boundary in the region of Sierre-Vétroz and location of hydrographs Lm3 to Lm6 (Fig. 2).

The aquifer structure was defined based on 460 borehole logs. The alluvial deposits represent a continuous horizon over almost all the surface of the plain to depth from 20 to 25 meters below ground surface. The permeability of these deposits varies between 10^{-2} and 10^{-3} m/s. It can present locally strong variations with the depth. The main aquifer consists of alluviums of the Rhône. Near valleysides, coarse deposits connected to the talus cones of lateral tributaries can intercalate themselves in alluvium and constitute potentially aquiferous levels.

The sediments above the aquifer mainly consist of Rhône flood deposits to which can be added locally lacustrine and/or anthropogenic deposits. These deposits, which are no thicker than some meters, divide up mainly along the Rhône (current and former beds), along valleyside-slopes and at base of the hills of the Sierre rockfall. The unit has low to moderate permeability and varies from 10^{-5} to 10^{-6} m/s for horizons mainly silty compared to 10^{-4} to 10^{-5} m/s for horizons mainly sandy.

The available borehole logs do not specify the lower limit of the aquifer. Some boreholes reveal intercalations of lacustrine and swamp deposits with very low permeability ($<10^{-6}$ m/s) in fluvial alluviums of the Rhône. These deposits are situated at variable depths (from 15 to 25 meters) and correspond frequently to intermittent levels. Globally, the alluvial aquifer around Sierre-Vétroz can be compared to a highly heterogeneous single layer [Aviolat & Rey, 1995 ; Ornstein, 1996 ; Ebener, 1998 ; Schürch, 2000].

4.2 Results of piezometric campaigns

Piezometric measurements were taken twice (350 control points) every year, in July (high water) and in February (low water). In our study we used the measurements made in July 1997. The interpretation of piezometric maps shows that the aquifer general flows is parallel to the axis of the Rhône valley with an orientation NE-SW and an average gradient about 2 ‰. A more detailed analysis reveals a higher overall gradient in the upstream half study area that is 2 to 5 ‰ (downstream region : 1 to 2 ‰) with notably a marked effect on the alluvial aquifer flows around the hills of Sierre rockfall (gradient from 4 to 5 ‰). These maps also show the influence of local

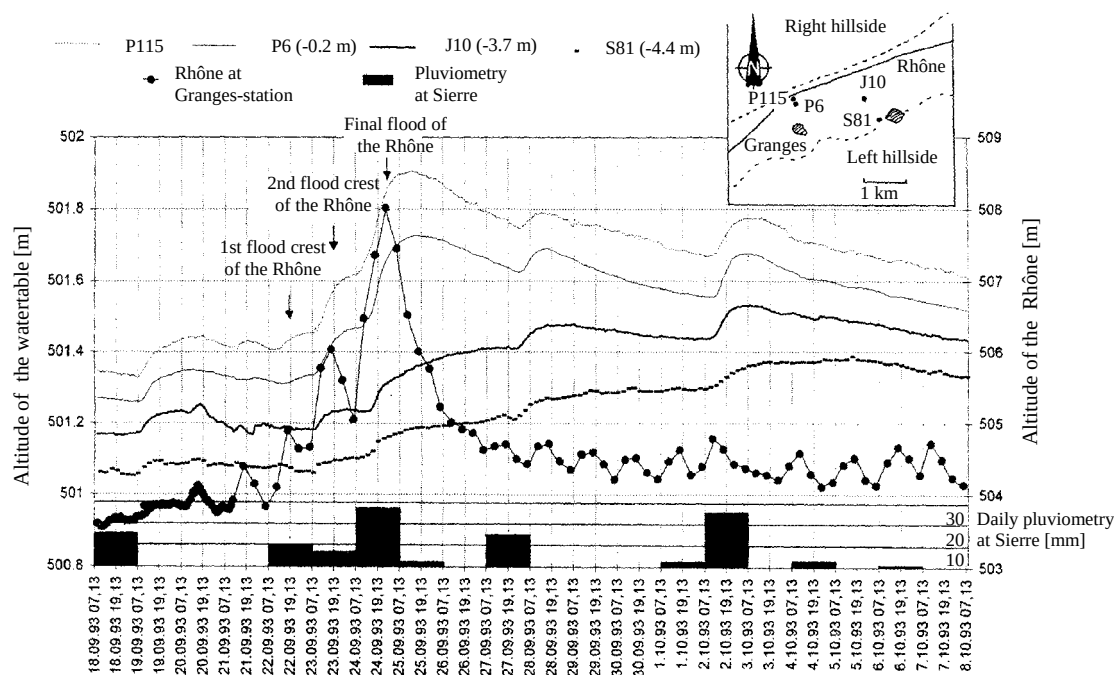


Figure 5 : Effects on the unconfined aquifer of the Rhône flood on the 24-25 septembre 1993 and of the pluviometry between the 18th of septembre and the 8th of octobre 1993 [Aviolat & Rey, 1995].

factors such as the Rhône, the canals or the valleysides on the general direction of the aquifer flow. The exchanges Rhône-aquifer are conditioned by the relative position of the Rhône with regard to the top of the alluvial aquifer. Overall, around Sierre-Vétroz, the Rhône main infiltrates into the alluvial aquifer. The locally draining effect of the main canals on the alluvial aquifer is clearly visible at high water. Recharge to the aquifer from canals can occur at specific points at low water. The influence of valleysides is very reduced.

The study of the Rhône exceptional flood at the end of September 1993 (Fig. 5) demonstrated its direct influence on groundwaters. The magnitude of the water table

reactions decreases when the distance to the river increases. Furthermore, the measurements and the physico-chemical analyses indicate that the infiltration of the river create essentially in left shore an effect of dilution of waters of the alluvial aquifer. The influence of the precipitation on the evolution of the water table level has only a very limited duration, except during precipitations separated by a short time. In case of intense rainfall, the reaction of the water table level marks by a fast ascent. The flood crest of the aquifer, of very short duration, is led of the pluviometric event because of the infiltration delay through the non-saturated zone [Aviolat & Rey, 1995].

4.3 Piezometry time series analysis

A study of piezometry time series (daily measurements) of four measurement stations located between Sierre and Sion (Fig. 2 and 4) provided an understanding on the behavior of the alluvial aquifer during period 1976-1999.

The results obtained show that during the period 1992-1994 there was a continuous rise in the low water level (from 30 to 120 cm). Low water 1995 generally appears at its highest level over the twenty years in the sector Sierre-Sion. The period spring - summer 1995 was marked at the level of the Rhône plain by frequent floods resulting in a marked rise in the maximum groundwater level in aquifer at high water. However this tendency is not as uniform compared to the low water. While in Crêtelongue's region, they join the average of these last twenty years, high water 1994 and 1995 are the highest recorded since 1976 in the region of Sion. In contrast, this analysis highlights the particularly deficient character of the hydrological years 1988 to 1993. This tendency to the drought is not unique to central Valais canton as shown in recent studies carried out at the Swiss and European scale [Bouzelboudjen, Kimmeier & al., 1998 ; Gennai & al., 1993 ; Marsh, 1994].

The temporal analysis of the piezometry (1976-1999) show for the years 1994-1995 important variations of the water table near the Rhône river (positive differences of height from 50 to 150 cm). Nevertheless, these piezometric variations globally remain in the limits of the inter-annual fluctuations (± 20 cm) when the measurement point is located far away the Rhône (see inset Fig. 5).

4.4 Hydrochemistry of groundwater

A principal components statistical analysis (PCA) using 245 observations of high water level (11 standardize variables) was carried out (Fig. 6). The study of the results of this campaign of chemical analyses provided indications of the hydrochemical characteristics of groundwaters of the Rhône valley between Sierre and Vétroz, as well as of local influences on the chemical content of the water. It notably highlights the respective influence of the Rhône and the valleesides. The weakly mineralized feature of alluvial aquifer waters along the Rhône very probably denote an effect of dilution due to the infiltrations of the river at high water level (group 3 in Fig. 6D). Furthermore, the existence of strongly mineralized zones (group 1 : SO_4^{--} , Ca^{++} , Mg^{++} , Kc (Electrical conductivity), DTO (Total hardness) ; group 2 : NO_3^- , K^+ , Na^+ , Cl^-) at bases of the north and south valleesides provides evidence of the existence of side contributions with strong mineral load mainly acquired. A comparison of groundwaters NO_3^- content was established for the years 1985 and 1995 to study its evolution (Fig. 7 and 8). Globally, and with the exception of some atypical points, the nitrates content in the groundwater is low (< 30 mg/l for 90 % of samples), in a region

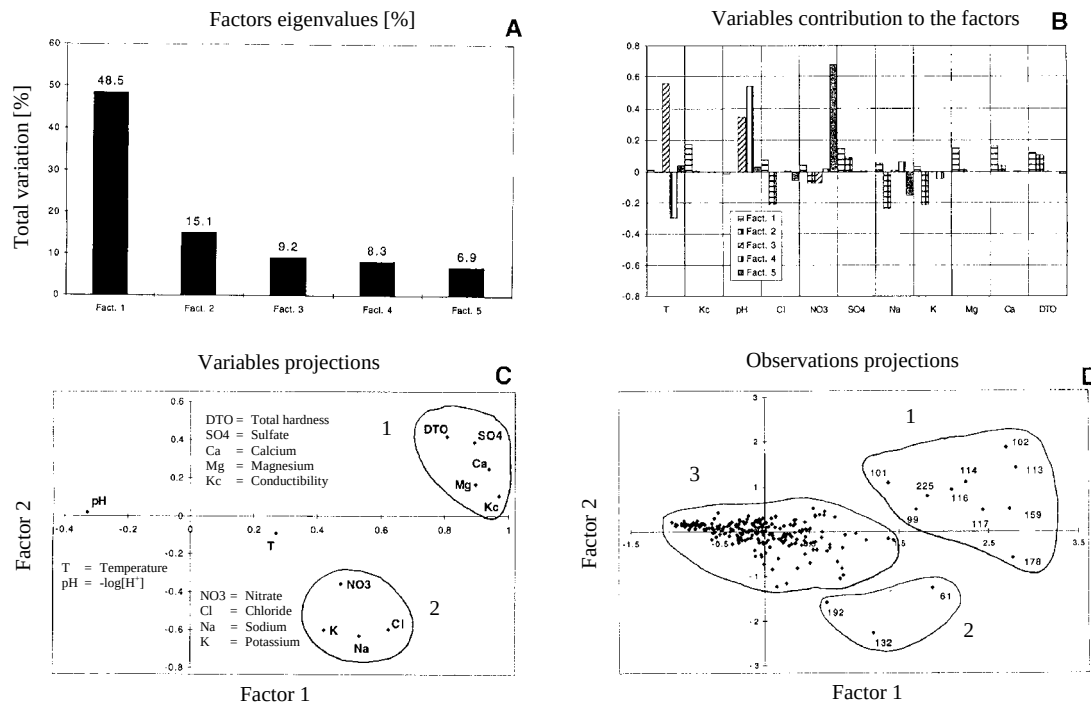


Figure 6 : Principal components statistical analysis (PCA) made on 245 observations in situation of high water 1995 (11 standardized variables).

where the agricultural is significant. It is however necessary to notice that the evolution of the NO_3^- content degrades during time. For example the number of points where the content is $> 50 \text{ mg/l}$ has doubled in the space of ten years, passing from 3 % to 6 %.

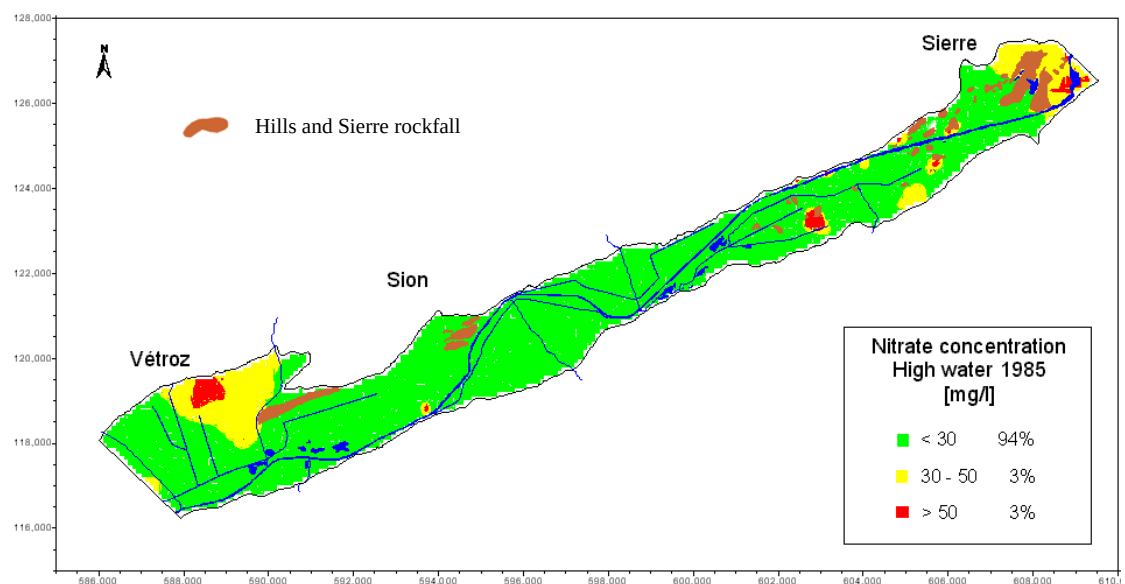


Figure 7 : Nitrate concentration mapping of the Rhône valley aquifer between Sierre and Vétroz. Sampling campaign during high water 1985 (245 values). Data regionalization by linear Kriging (Surfer 7 - grid 100x100m).

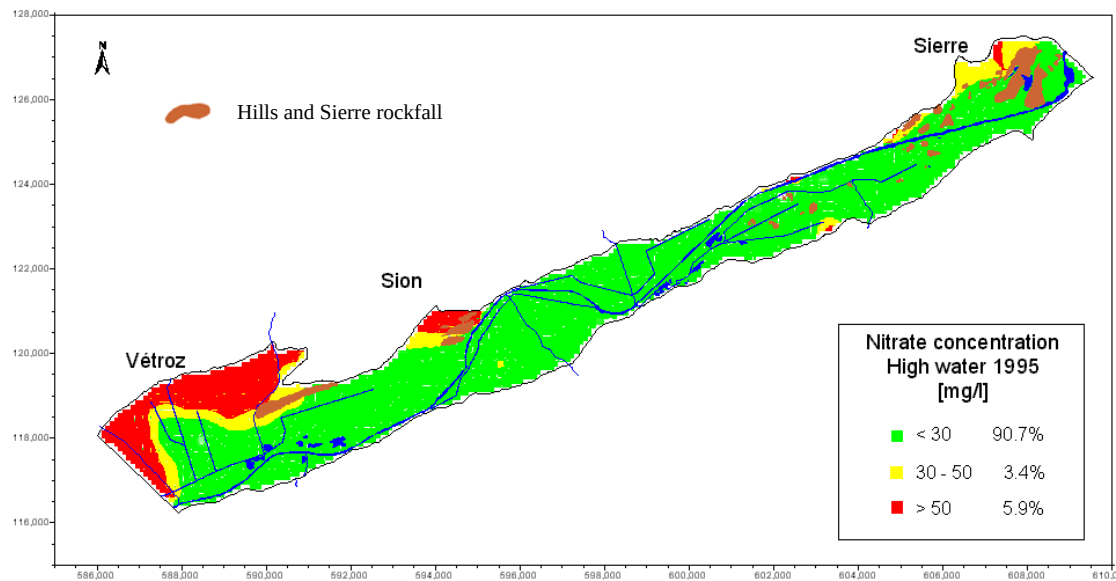


Figure 8 : Nitrate concentration mapping of the Rhône valley aquifer between Sierre and Vétroz. Sampling campaign during high water 1995 (245 values). Data regionalization by linear Kriging (*Surfer 7* - grid 100x100m).

5. VULNERABILITY TO POLLUTION OF THE SIERRE-VÉTROZ ZONE

One of the most recent definitions of vulnerability defines it "as an intrinsic property of a groundwater system that depends on the sensitivity of that system to human and/or natural impacts" [Vrba and Zaporozec, 1994]. The authors admit several types of vulnerability exist. The term of "intrinsic (or natural) vulnerability" is characterized by hydrogeologic factors : the characteristics of an aquifer as well as the overlying soil and geological materials. Apart from the intrinsic properties defined above "integrated vulnerability" includes the potential impacts of specific land uses, that is the sites of risk. "specific vulnerability" defines the vulnerability of an aquifer to the pollution according to specific characteristics of a particular type of pollutant.

5.1 Methods

The techniques can be grouped into three basic groups : hydrogeological setting methods, parametric methods, and analogical relation and numerical model methods. In this study we concentrated on four parametric system methods that may be divided into : (a) matrix systems (MS ; NLFB), (b) rating systems (RS ; GOD), and (c) point count system models (PCSM ; DRASTIC and SINTACS).

NLFB is a parameter method of "matrix system type" that assesses vulnerability by two variables [Hartlé, 1989] : depth of groundwater (D) and overall lithology of aquifer or aquitard (O). The final index is obtained from the formula :

$$I_v = D + O$$

GOD is a rating system method that assesses the vulnerability using three variables [Foster, 1987] : groundwater occurrence (G), overall lithology of aquifer or aquitard (O) and depth to groundwater table (D). The final index is obtained from the formula :

$$I_v = G \cdot O \cdot D$$

DRASTIC is a parameter weighting and rating method that assesses the vulnerability according to seven parameters [Aller and al., 1987]: depth of groundwater (D), net recharge (R), aquifer media (A), soil media (S), topography (T), impact of the vadose zone media (I) and the hydraulic conductivity of the aquifer (C). The vulnerability index is obtained from the following equation :

$$I_v = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W$$

where : I_v = Pollution potential, R = rating and W = weight

SINTACS is a parameter weighting and rating method that assesses the vulnerability according to seven parameters [Civita, 2000]: depth of groundwater (S = Soggiacenza), net recharge (I = infiltrazione), impact of the vadose zone media (N = effetto di autoepurazione del non-saturo), soil media (T = tipologia della copertura), aquifer media (A = caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero), hydraulic conductivity of the aquifer (C = conductibilità dell'acquifero) and, topography slope (S = l'acclività della superficie topografica). The vulnerability index is obtained from the following equation :

$$I_v = \sum_{j=1}^7 R_j W_j$$

where : I_v = Pollution potential, R = rating and W = weight

5.2 Results and comparison

In order to compare the maps of vulnerability to pollution resulting from the four methods, five identical vulnerability classes have been chosen : Very Low, Low, Moderate, High and Very High. Furthermore, the surface occupied by each class has been computed and transformed in percentage. These figures are consigned in Table 1

VULNERABILITY	% area (NLFB)	% area (GOD)	% area (DRASTIC)	% area (SINTACS)
Very High	4.0	6.1	9.0	2.1
High	5.2	27.3	44.4	21.1
Moderate	29.1	29.4	36.0	69.5
Low	12.1	11.3	9.7	7.3
Very Low	49.6	26.0	0.9	0.1
	100.0	100.0	100.0	100.0

Table 1: Percentage of surface according to the degree of vulnerability by NLFB, GOD, DRASTIC and SINTACS methods.

The following comments can be made :

- The vulnerability for NLFB is concentrated between Very Low and Moderate (90%) with 50% for Very Low and 30% for Moderate (Fig. 9).
- GOD method has more or less homogenous classes between Very Low and High and is comparable to NLFB method. Both are intrinsic methods. Nevertheless, the area occupied by the class High vulnerability is 5 times higher than for NLFB

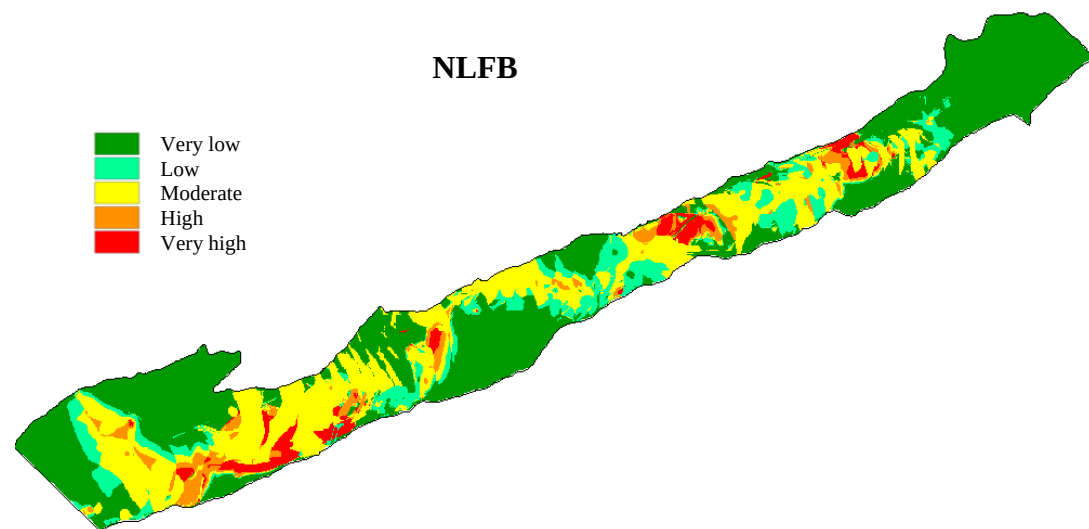


Figure 9 : Map of intrinsic vulnerability according to NLFB method. Zone Sierre-Vétroz. Grid: 25 x 25 m.

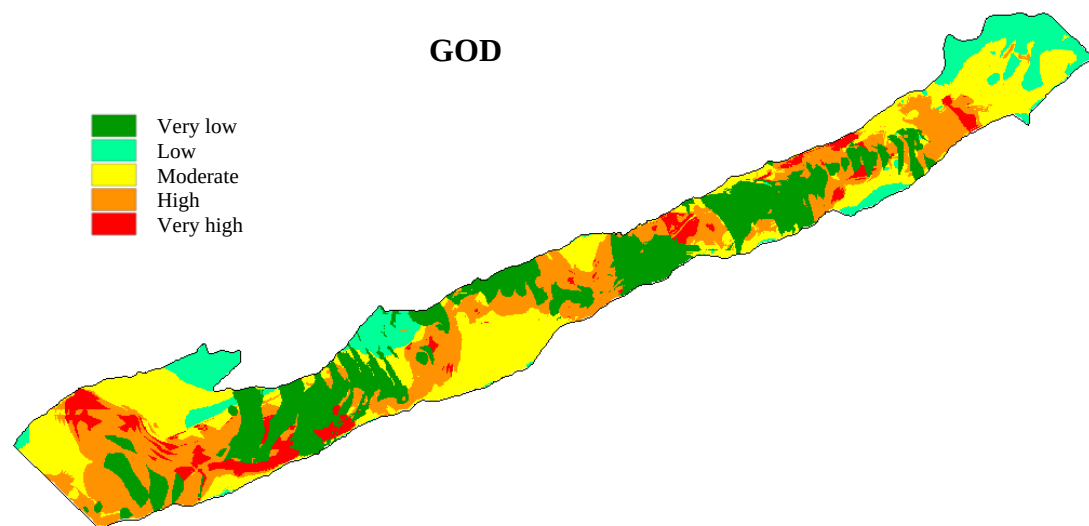


Figure 10 : Map of intrinsic vulnerability according to GOD method. Zone Sierre-Vétroz. Grid : 25 x 25 m.

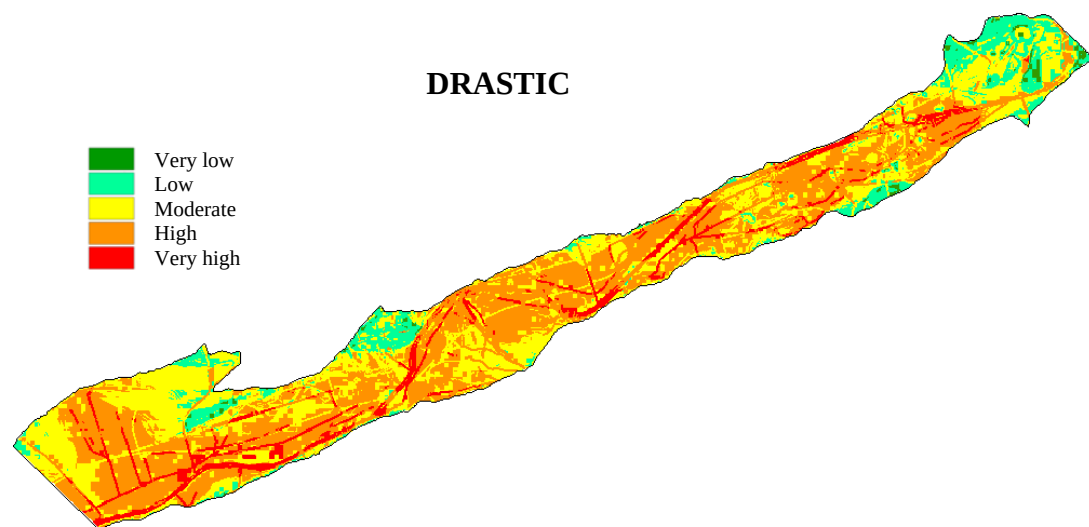


Figure 11 : Map of integrated vulnerability according to DRASTIC method. Zone Sierre-Vétroz. Grid : 25 x 25 m.

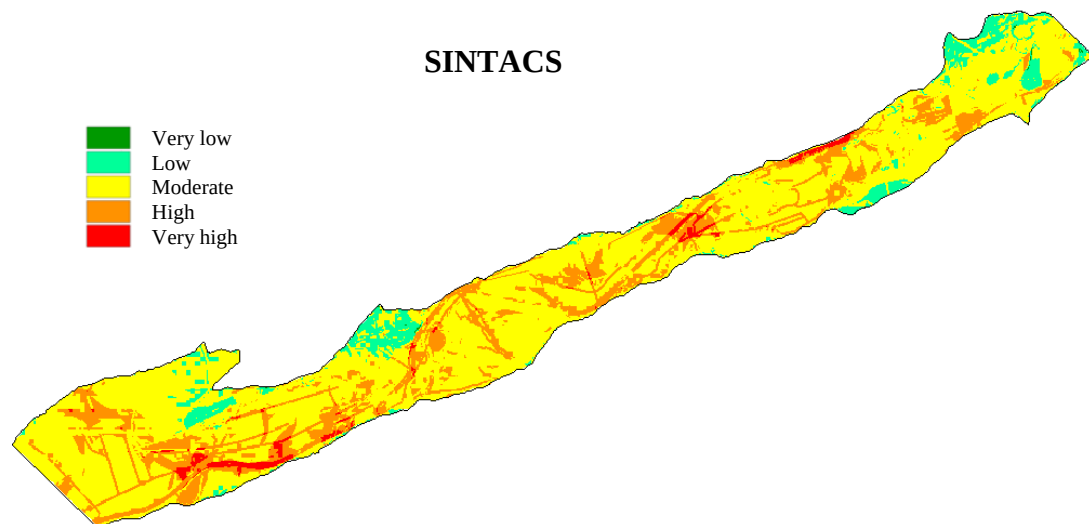


Figure 12 : Map of integrated vulnerability according to SINTACS method. Zone Sierre-Vétroz. Grid : 25 x 25 m.

method. This explains by the fact that GOD accounts the type of aquifer (unconfined or confined) and gives a high weight to unconfined aquifer (Fig. 10).

- DRASTIC method shows a shifted vulnerability towards Moderate and High (80%) by contrast with NLFB and GOD (Fig. 11). This explains by the fact that this method accounts the land use. It is easy to recognize on the vulnerability map the hydrographic network (Very High) and the areas where agriculture is important (High).
- The same remarks can be made for SINTACS (Fig. 12) method than for DRASTIC method. 90% of the vulnerability is concentrated between Moderate and High with 70% for the Moderate class. These 70% of Moderate vulnerability can be compared with the 50% of Very Low for NLFB method.
- DRASTIC and SINTACS integrated methods are concentrated between Moderate and High vulnerability when NLFB and GOD intrinsic methods are concentrated between Very Low and Moderate. Intrinsic methods have the tendency to minimize the vulnerability.
- It can be noticed that the Very High class is weakly represented for each method.

A comparison of the intrinsic (NLFB, GOD) and integrated (DRASTIC, SINTACS) methods show that the integrated methods result in groundwater pollution vulnerability maps with values which are higher than those produced by the intrinsic methods. This is explained as a result of the following : 1) integrated methods account for land use, therefore in this region of intense economic and agricultural activities and with a dense hydrographic network (rivers and canals) that will have as a consequence to increase the vulnerability values and 2) the fact to use raster land use data on a grid of 100x100 m while the precision of the DEM is of 25 m will have as a consequence to overestimate the areas of high vulnerability.

6. CONCLUSIONS

The realization of this study has shown the importance of GIS tool either for the computing and mapping of the first piezometric map between Brig and Léman Lake

or the elaboration of vulnerability maps. The geostatistic tool was also intensively used all over the spatial treatment of data.

The study of the Rhône exceptional flood at the end of September 1993 demonstrated its direct influence on groundwaters. Furthermore, the measurements and the physico-chemical analyses indicate that the infiltration of the river create essentially in left shore an effect of dilution of waters of the alluvial aquifer.

The comparison of groundwaters NO_3^- content, established for the years 1985 and 1995 to study its evolution, has shown that globally, and with the exception of some atypical points, the nitrates content in the groundwater is low ($< 30 \text{ mg/l}$ for 90 % of samples), in a region where the agricultural is significant. The pollution by percolation through the non-saturated zone remains weak probably due to the fact that precipitations in this region are very low (about 570 mm/y). It is however necessary to notice that the evolution of the NO_3^- content degrades during time. The number of points where the content is $> 50 \text{ mg/l}$ has doubled in the space of ten years, passing from 3 % to 6 %.

The study of vulnerability to pollution for the aquifer situated between Sierre and Vétroz as shown significant differences between the four different methods used. As main results DRASTIC and SINTACS integrated methods are concentrated between Moderate and High vulnerability when NLFB and GOD intrinsic methods are concentrated between Very Low and Moderate. Intrinsic methods have the tendency to minimize the vulnerability.

Finally, for future works we plan to account the hydrodynamic of the aquifer in the study of vulnerability to pollution. This will be done in incorporating as a new factor other variables as Darcy's velocity or dispersivity. These variables will be provided by the results of either hydrodynamic or transport numerical models.

Acknowledgments : This study was funded by the Swiss National Foundation for Scientific Research (research project N° 21-39357.93 and 20-47064.96)

7. REFERENCES

- Aller L., Bennett T., Lehr J.H., Petty R.J. & Hackett G. 1987. *DRASTIC : A standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*. EPA, Ada, Oklahoma, 622 p.
- Aviolat P. & Rey J.-M. 1995. *Hydrogéologie de la plaine alluviale du Rhône entre Sierre ouest et Granges (VS, Suisse)*. Bull. d'Hydrogéol. de Neuchâtel N° 14 : p. 243-244, Editions Peter Lang, Berne.
- Bouzelboudjen M., Kimmeier F., Rossier Y., Eisenlohr L., Király L., Zwahlen F. 1998. *Impact des changements climatiques sur le comportement des systèmes aquifères*. Projet Fonds National de la recherche Scientifique Suisse (PNR31, Berne), 136 p., 46 fig., 24 tabl. V/dlf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Suisse.
- Bouzelboudjen M., Kimmeier F., 1998. *GIS vector and raster database, advanced geostatistics and 3-D groundwater flow modelling in strongly heterogeneous geologic media : an integrated approach*. In : The Eighteenth annual ESRI user conference, San Diego, California (USA), 5 p., 18 fig.
- Civita M, De Maio M., 2000. *Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico. SINTACS R5 a new parametric system for the assessment and automatic mapping of ground water vulnerability to contamination*. QTPA, Q.d.t.d.p.a., vol. 72, Pitagora Editrice, Bologna, 219 p.
- Delhomme J.P, 1979. *Spatial Variability and Uncertainty in Grounwater Flow Parameters : A geostatistical Approach*. Water Resources Research 15 (2), p. 269-280.
- Ebener S., Bouzelboudjen M., Wildi W., 1998. *Eléments hydrogéologiques dans l'étude de l'influence de deux décharges sur le système aquifère de la plaine du Rhône (Valais central, Suisse)*. Archs Sci. Genève Vol. 51, Fasc. 2, pp. 153-170.
- ESRI, 1997. *Understanding GIS. The Arc/Info Method*. Version 7 for Unix and Open VMS. Environmental Systems Research Institute, California, USA. Wiley & Sons, New York.
- ESRI, 1996. *ArcView GIS, The Geographic Information System for Everyone*. Environmental Systems Research Institute, California, USA.
- Foster S.S.D, 1987. *Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy*. Atti Int. Conf. Vulnerab. of soil and Groundw. to Pollutants, RIVM Proc. and Inf. 38. pp. 69-86.
- Gennai A., Margat J., Collin J.-J., 1993. *Cartographie de la résistance à la sécheresse des systèmes aquifères à nappe libre*. Rapport inédit BRGM, Orléans, 13 fig., 5 tabl., 5 ann.
- Geovariances, 1998. *Isatis 3, The Geostatistical key*. User's Guide, Avon, France.
- Golden software, 1999. *User's guide. Surfer For windows, version 7*. Golden software, Inc.

- Haertlè T., 1983. *Method of working and employment of EDP during the preparation of groundwater vulnerability maps*. Groundwat. in Wat. REs. Planning, IAHS 142. pp. 1073-1085.
- Marsh T.-J., Monkhouse R.A., Arnell N.W., Lees M.L. & Reynard, N.S., 1994. *The 1988-92 Drought*. Institute of Hydrology, British Geological Survey, 78 p.
- Matheron G., 1970. *La théorie des variables régionalisées et ses applications*. Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fascicule 5, 211 p.
- Microsoft, 1997. *User's Guide. Microsoft Access. Relational Database System*. Microsoft Corporation.
- Ornstein P., 1996. *Méthodologie d'étude d'un système aquifère dans une vallée alluviale en milieu alpin : exemple de la vallée du Rhône, Valais central*. Swiss National Foundation for Scientific Research (research project N° 21-39357.93 and 20-47064.96, unpublished).
- Schürch M. 2000. *Tranchée couverte de Champsec (Valais central, Suisse) : étude hydrogéologique et modélisation mathématique 2-D par éléments finis*. Bull. d'Hydrogéol. de Neuchâtel N° 18 : p. 63-76, Editions Peter Lang, Berne.
- Vrba J. & Zaporozec, A. 1994. *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*. Int. Assoc. Hydrogeol. 16, 131 p.
- Weber I., 1998. *Comparaison de cinq méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution : application à la région Sierre-Vétroz (Valais, Suisse)*. Bull. d'Hydrogéol. de Neuchâtel N° 18 : p. 273-274, Editions Peter Lang, Berne.

Corresponding author : Francesco Kimmeier, Institut de Géologie, Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, 11 rue Emile-Argand, 2007 Neuchâtel.
Tél : +4132/718.26.30 - Fax : +4132/718.26.03
E-mail : francesco.kimmeier@unine.ch

Annex 1: Summary of the coverages implemented in the geographical database.

Coverages	Kind of spatial object	Data format	Data source / owner	Scale	Acquisition type
Hydrographic network	lines (arcs)	Vector	Swiss national map / SNSF project N°21.39357	1 : 25'000	Digitalization by scanner
Lakes, glaciers, wet zones	zones (polygons)	Vector	Swiss national map / SNSF project N°21.39357	1 : 25'000	Digitalization by scanner
Communication ways	lines (arcs)	Vector	Swiss national map / SNSF project N°21.39357	1 : 25'000	Digitalization by scanner
Agglomerations	zones (polygons)	Vector	Swiss national map / SNSF project N°21.39357	1 : 25'000	Digitalization by scanner
Water catchment for potable water supply (sources and wells)	points	Vector	Cantonal Service of Environmental Protection (Sion)	1 : 25'000	AUTOCAD export file
Provisory and definitive protection Zones	zones (polygons)	Vector	Cantonal Service of Environmental Protection (Sion)	1 : 25'000	AUTOCAD export file
Boundary catchments (from Hydrological Atlas of Switzerland)	zones (polygons)	Vector	SNHGS Swiss National Hydrological and Geological Survey	1 : 500'000	Export file Arc/Info
Old river reach of the Rhône	lines (arcs)	Vector	Cantonal Archives of the Valais state / SNSF project N°21-39357	1 : 50'000	Digitalization by scanner
Old wet zones	zones (polygons)	Vector	Valais state - Cantonal Office of cadastral mensuration	1 : 5'000 1 : 10'000	Digitalization by scanner
Land use map grid: 25x25 m (24 modes of utilisation)	zones (polygons)	Raster	Federal Office of Statistics Database GEOSTAT		Export file Arc/Info
Digital Elevation Model (DEM) (partial)		Raster	Federal Polytechnical School of Lausanne (EPFL) / Federal Office of Topography	1 : 25'000	IDRISI image file

SNSF = Swiss National Science Foundation,

3-D Groundwater Flow Modeling in Heterogeneous Geologic Media : Integrated Approach Using Spatial and Temporal Database, Geostatistics and GIS

Francesco Kimmeier

SHORT TABLE OF CONTENTS

I. INTRODUCTION GENERALE

II. GIS DATABASE AS SUPPORT TO GROUNDWATER PROBLEM RESOLUTION

- II.1 TRACES/VIEW - TRAÇAGE DES EAUX SOUTERRAINES : APPLICATION SIG EN MILIEU KARSTIQUE JURASSIEN (SUISSE)
- II.2 GEOHYDROLOGICAL PARAMETERS IDENTIFICATION AND GROUNDWATER VULNERABILITY TO POLLUTION: A SWISS CASE STUDY

III. GROUNDWATER MODELING AT DIFFERENT SCALE USING FINITE ELEMENTS METHOD AND STOCHASTIC MODELING FOR UNCERTAINTY ESTIMATION

III.1 3-D GROUNDWATER MODELING AT REGIONAL SCALE

- III.2 BASE DE DONNEES, SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE, GEO-STATISTIQUE ET MODELISATION 3-D DES EAUX SOUTERRAINES A L'ECHELLE LOCALE DANS LA REGION DE VISP (SUISSE)
- III.3 TRAVEL PATH UNCERTAINTY : A CASE STUDY COMBINING STOCHASTIC AND DETERMINISTIC HYDRODYNAMIC MODELS IN THE RHÔNE VALLEY, SWITZERLAND

IV. CONCLUSIONS GENERALES ET TRAVAUX FUTURS

KIMMEIER'S SHORT CURRICULUM VITAE AND LIST OF PUBLICATIONS

3-D groundwater modeling at regional scale

Francesco Kimmeier¹, Mahmoud Bouzelboudjen¹,
László Király¹

¹ CHYN - Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, Emile-Argand 11, 2007 Neuchâtel, Suisse

ABSTRACT

Large hydrogeological basins are constituted of several superimposed aquifers, separated by geological formations of relatively low permeabilities. The delimitation of the different flow systems is far more difficult to realize for a heterogeneous system. Flux vectors provide valuable indications about groundwater flow paths and hydraulic exchanges between the different geological formations. Hydraulic relationships between two superimposed aquifers can vary locally: an aquifer can «feed» the underlying one at some point and conversely elsewhere. These relationships, which constitute in fact the flow field, will be determined by the structure of the basin as defined by the spatial distribution of the rock permeabilities, and by the boundary conditions, as defined by the locations of the recharge and discharge areas. The aim of this study is to show schematically the deep groundwater flow patterns between the massives of the Aar and the Black Forest. The hydrogeological profiles illustrate three-dimensional flow fields inside a large volume of terrain and represent but one of the numerous solutions of the mathematical modelling realized. Computations have been performed for a steady state flow regime, which means that the boundary conditions do not vary with time.

On the basis of modelling results, it was possible to illustrate schematically the deep flow systems of the most important aquifers between the Aar massives and the Black Forest (Malm, Muschelkalk and upper Cristallin). An approximate but plausible representation of the groundwater circulation in deep aquifers was obtained thanks to the model. We are able to distinguish between the hydraulic relationships of two superimposed aquifers in various regions. The three-dimensional representation shows the outcrop zones of the different geological formations as well as the situation of recharge areas, which are characterised by high potentials, and discharge zones, which are characterised by low potentials in valleys represented by the hydrographic network.

Modelling results are then compared to available measurements in an attempt to validate the results. It is interesting to notice that it was possible, to a certain extent, to verify the modelling results by deep drillings. Most particularly, measurements of the hydraulic potentials at various depths in these boreholes have revealed upwellings close to the regional discharge areas.

Keywords : Hydrogeology, groundwater modeling, 3-D finite elements, Waste repository, Validation, Switzerland

1. INTRODUCTION

Groundwater flow patterns in the subsurface of the Swiss Plateau are illustrated schematically (Annex 1-6). The main difficulty in representing graphically such patterns lies in the fact that groundwater flows in a three-dimensional space. In order to facilitate the reader's understanding, the main directions of flow are represented in vertical profiles and on maps (plane view) showing the lateral extension of some of the most important aquifers.

The term validation have been applied by various researchers to indicate how well a model approximates reality. This term is used to describe the ability of a mathematical model to describe a physical system (e.g., the appropriateness of Darcy's law to describe groundwater flow in a porous or fractured media) and the ability of a conceptual model to reproduce the observed conditions ("reality").

Validation of hydrogeologic conceptual models is difficult. This is due to the large number of degrees of freedom in the model (e.g., permeability distribution in space and applied boundary conditions) and the sparsity of available information with which to compare the simulated results. As a result, several models can be formulated which adequately explain the available data. In addition, it is difficult to rule out the possibility that a single measurement may only be representative of very local hydrogeologic conditions which are impossible to incorporate in large scale models. Given these difficulties, the validation part will describe the results of attempts to validate the conceptual models of ground-water flow in northern Switzerland.

2. THE SYSTEM OF GROUNDWATER FLOW

Water can be found in pores and fissures down to a depth of several thousands of metres below sea level: this water is called groundwater. Groundwater (Fig. 1) flows from recharge areas, which are generally situated in elevated areas, towards discharge zones, which mainly correspond to the hydrographic system of lakes, streams and valleys. The average direction of groundwater flow is represented schematically by flowlines or flow fields. This direction as well as the velocity of groundwater flow is expressed in the simplest case by Darcy's law (cf. «Definitions»).

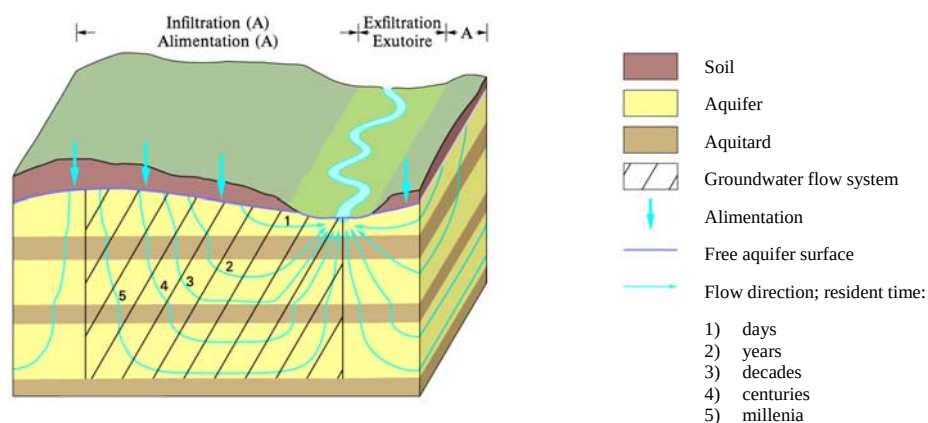


Figure 1 : Recharge and discharge areas from Skinner & al. [1991]

DEFINITIONS

- **Equipotentials** are lines (two-dimensional case) or surfaces (three-dimensional case) linking points with same hydraulic potential.
- Defined at any point "A" of the aquifer, **hydraulic potential** is the sum of the altitude of this point above a reference level and of the water height corresponding to the groundwater pressure at this same point. The hydraulic potential is not equal to the groundwater pressure at point "A".
- **Hydraulic gradient** is a vector that is perpendicular to the equipotentials at any points of the aquifer.
- **Flux vector** is the product of the hydraulic gradient by the permeability or the hydraulic conductivity of the aquifer (Darcy's law).

According to theoretical studies by Tóth [1963, 1995], flowlines represent the local, intermediate or regional flow systems that exist between recharge and discharge areas (see Fig. 2, which shows different flow systems within a theoretical, homogeneous hydrogeological basin). One can understand intuitively that flow systems represent an ideal framework to study the thermal, chemical and isotopic properties of groundwater. Even an approximate knowledge of these properties can provide valuable information (even if it is qualitative) about the possible transport of

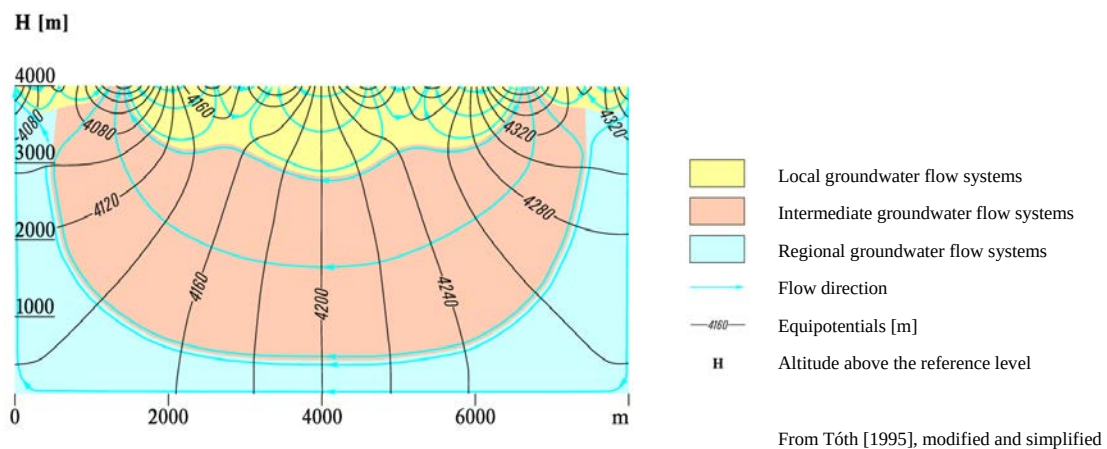
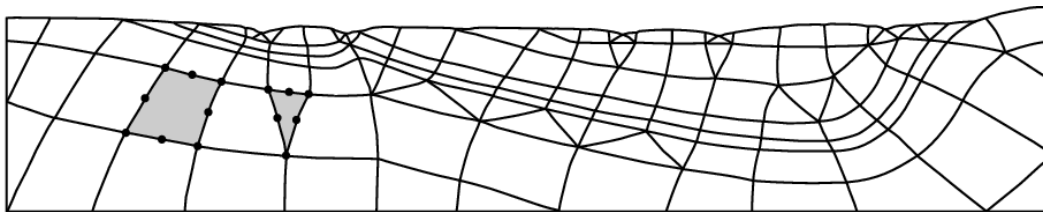


Figure 2 : Sketch plan of the groundwater flow systems

dissolved substances in groundwater at various depths (e.g. as a result of rock-water interactions). Figure 2 shows that the location of sources of dissolved substances with respect to local, intermediate or regional flow systems is an essential component to understand the distribution of dissolved substances within the aquifer. Moreover, it is important to notice that the hierarchic structure of flow systems results from the hierarchic structure of the hydrographic network, or, more precisely, of the discharge zones.

Direct measurements of the directions of groundwater flow at any point of the earth's crust are largely impossible. This means that flow fields need to be inferred in most cases by indirect methods, such as mathematical modelling.

Principle of "finite elements" mathematical model:



The flow region is subdivided into "finite elements" with a relatively simple geometry (see sketch-plan), each element being defined by the position of a number of nodes (points on the edges). In assigning at each element a permeability and a storage coefficient and by integrating the differential equation on each element one obtains as much linear equation that there are nodes in the model (generally between 1'000 and 200'000). By solving the equation system [Király, 1985] one computes for each node either the hydraulic potential (where the flux is imposed) or the in or out flux (where the potential is imposed). Potential or flux imposed values are called "boundary conditions". Without imposing boundary conditions it is impossible to simulate the groundwater flow.

3. GROUNDWATER FLOW IN LARGE HETEROGENEOUS BASINS

Large hydrogeological basins are constituted of several superimposed aquifers, separated by geological formations of relatively low permeabilities. The delimitation of the different flow systems is far more difficult to realize for a heterogeneous system than for a homogeneous case as represented in figure 2; however, flux vectors provide valuable indications about groundwater flow paths and hydraulic exchanges between the different geological formations. Hydraulic relationships between two superimposed aquifers can vary locally: an aquifer can «feed» the underlying one at some point and conversely elsewhere. These relationships, which constitute in fact the flow field, will be determined by the structure of the basin as defined by the spatial distribution of the rock permeabilities [Király, 1970], and by the boundary conditions, as defined by the locations of the recharge and discharge areas.

Theoretical two-dimensional cases allow for an easier understanding of flow systems and their usefulness in the case of hydrogeological studies [Bouzelboudjen, 1993], but it would be even more important to obtain a wider knowledge about three-dimensional flow patterns in real aquifers and find out how to reconstruct and represent them in real systems.

4. GROUNDWATER FLOW BETWEEN THE AAR AND THE BLACK FOREST MASSIFS

The hydrogeological profiles presented here illustrate in a schematic way groundwater flow in the subsurface of the Swiss Plateau, between the massifs of the Aar and the Black Forest [Bouzelboudjen & al., 1997]. Such profiles illustrate three-dimensional flow fields inside a large volume of terrain and represent but one of the numerous solutions (cf. Legend - Annex 2) of the mathematical modelling realized in an earlier study [Kimmeier & al., 1985].

The representation of flow fields is quite easy for theoretical two-dimensional cases, because flow vectors do not have a component perpendicular to the plane of representation. This is not the case for real systems of large dimensions, because it is practically impossible to find a plane of representation that would not be oblique to the vectors of flux, at some point or other. Furthermore, aquifers whose thicknesses are small relative to their lateral extent, for example a few metres compared to several hundred kilometres, are particularly difficult to represent either as block diagrams or as vertical profiles. We have therefore decided to present the results by projecting the vectors of flux onto straight vertical profiles, or onto maps corresponding to the lateral extension of some particularly important aquifers. This requires more attention from the reader, because a component of flow perpendicular to the plane of representation is associated to each vector. Transferring the real system to a hydrogeological model requires several simplifications of the geometry of the principal geological formations and the hydrogeological boundary conditions chosen to set the limits of the model.

The regional model used as the base for the hydrogeological profiles presented here is limited by the Aar Massif in the south and the Black Forest in the north; the Constance Lake represents the eastern boundary and the Aare river is used as the western limit. The lateral boundaries chosen for the model correspond to the limits of the regional flow systems which can reach considerable depths (the Rhine, Rhône and Aare valleys). The initial goal of this model was to study deep flow systems within the crystalline basement of the northern part of Switzerland [Kimmeier & al., 1985, Nagra, 1988, Thury & al., 1994, Voborny & al., 1992]. The upper boundary of the model represents the surface of the unconfined water table. It has been estimated by means of hydrogeological and topographical maps (three-dimensional representation). Hydrogeological conditions at the boundaries are based upon observed values of hydraulic potentials or flow rates (infiltration, exfiltration), or upon estimations. Such conditions represent in each case the hypotheses that have been introduced into the model. Subsequently, the coherence of these data will have to be verified by an analysis of the modelling results. The schematic block diagram (cf. Annex 2) shows the simplified geological data and the three-dimensional reconstruction of the geometry of the formations as they were modelled.

Computations have been performed for a steady state flow regime, which means that the boundary conditions do not vary with time. The program FEM301 and FEN's code family [Király, 1985, 1998] has been used to compute the field of hydraulic potentials and flow rates in the modelled area. Modelling results are then compared to available measurements [see point 6]. It is interesting to notice that it was possible, to a certain extent, to verify the modelling results by deep drillings. Most particularly, measurements of the hydraulic potentials at various depths in these boreholes have revealed upwellings close to the regional discharge areas [Hufschmied & al., 1989]. On the basis of modelling results, it was possible to illustrate schematically the deep flow systems of the most important aquifers between the Aar Massif and the Black Forest. An approximate but plausible representation of the groundwater circulation in deep aquifers was obtained thanks to the model. For this particular case [Bouzelboudjen & al., 1997] we used the computer code FEN [Király, 1997] derived from FEM301. We are able to distinguish between the hydraulic relationships of two superimposed aquifers in various regions (cf. profiles - Annex 4), as demonstrated for theoretical cases (cf. Fig. 1 and 2).

The three-dimensional representation shows the outcrop zones of the different geological formations as well as the situation of recharge areas, which are

characterised by high potentials, and discharge zones, which are characterised by low potentials in valleys represented by the hydrographic network.

Profile 3, which is approximately perpendicular to the other profiles, shows the local groundwater flow systems. Such systems constitute the main discharge zones in the bottoms of valleys and provide the predominant vertical fluxes in those regions.

5. GROUNDWATER FLOW SYSTEMS IN THE CRYSTALLINE BASEMENT, THE MUSCHELKALK AND THE MALM AQUIFERS

Both as an illustration and example of groundwater circulation, three major Swiss aquifers are described: the crystalline basement, the Muschelkalk and the Malm. Flow conditions in the crystalline basement (Annex 6) and Malm (Annex 5) aquifers are illustrated by means of two maps.

The Malm aquifer play an important role within the deep groundwater circulation of the basin. Recharge areas are located at South (outcrop area on the tridimensional representation) and groundwaters flow towards regional discharge areas located at North (Constance region on Annex 5 and Aar region on profile 2).

The recharge and discharge zones of the Muschelkalk aquifer correspond to outcrop zones, which are the Alps in the south and the tabular Jura in the north, according to the three-dimensional representation. Because it is impossible to illustrate the results as profiles at this scale, we confine ourselves to making the following comment: In the Alps, groundwater from the Muschelkalk flows into the high valleys of the Aare, the Reuss and the Rhine rivers, as well as into the region of Vättis. In the north, groundwater discharges into the Rhine valley between Basel and Bad Säckingen, then into the Wutach valley. Between both areas, the upper part of the Muschelkalk aquifer is drained by downcutting valleys, such as the Sisslen, the Aare and the Rhine valleys.

Recharge areas of the upper part of the altered Cristallin are located in the Aar and Black Forest massifs (see tridimensional representation). As the formations that overlay the upper part of the Cristallin are very few permeable, the alimentation of this geological serie can not occur outside of these two mentioned regions. Therefore, discharge occurs in surface at low points where Cristallin outcrops that is in the valleys (profile 1 - Annex 4). In the Alps, discharge is possible mainly in the upper course of the Aar, Reuss, Rhine, Linth rivers as well as in the "fenêtre de Vättis". In the Black Forest, discharge occurs in the Wiese, Dreisam and Rhine valley between Säckingen and Tiengen. Profile 2 (Annex 4) show that the waters coming from South flow under the Jura and flow into the Rhine valley. This discharge area constitutes a limit separating the regional groundwater flow systems coming from South and North. In North-West part, groundwater of the Cristallin leave the modelised zone (Neunberg am Rhein/Ilfurth sector). Under the molassic basin, flow patterns in the Cristallin are quite parallel until the main Jura overlapping. As one approach the South-North watershed, vertical fluxes in the non altered part of the Cristallin become important (profile 2 north of Olten). In the region near of the Rhine valley discharge the upper part of the altered Cristallin drains the other parts of the Cristallin weakly altered (profile 2, region of Rheinfelden). Profile 2 puts in evidence the role of the Rhine valley as regional discharge area.

6. MODEL VALIDATION

In order to validate the regional model 6 NAGRA boreholes, Water wells and Oil/Gas borings data at the North of Switzerland were used (see Fig 3) [Andrews & al., 1996].

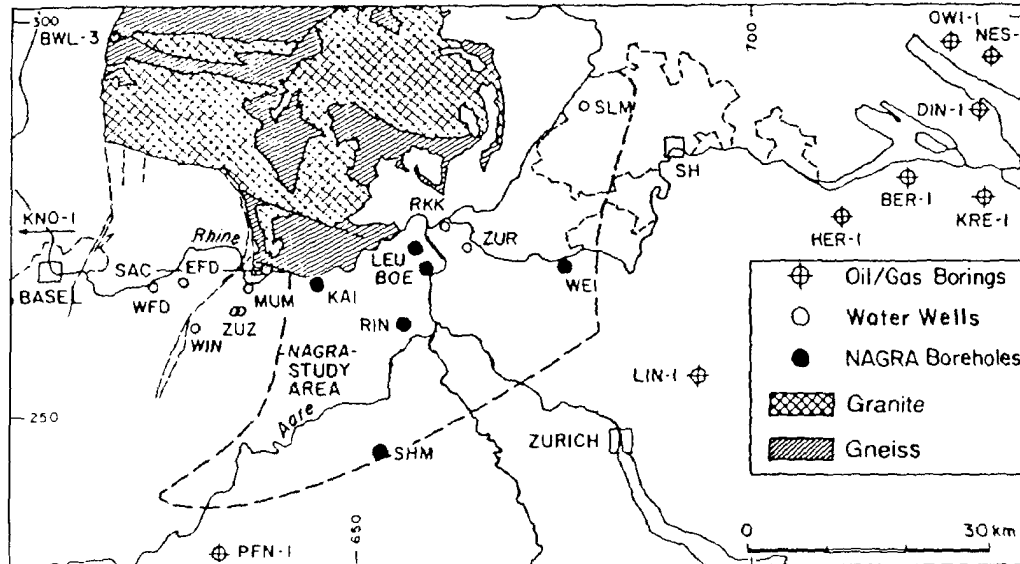


Figure 3: NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle) study area and deep exploratory borings

The hydrogeologic conceptual model should be validated to the extent feasible prior to using the results from such a model for predictions of repository performance. This validation may take several forms. At a scale of kilometers or tens of kilometers, the model should be able to reproduce the general ground-water flow directions and overall volumetric flow rates within and between the various transmissive hydrogeologic units. At a scale of meters or tens of meters one would like the model to predict the travel path(s) and velocities of dissolved radionuclides which may escape the engineered containment facility. Validation of the travel path(s) and velocities is virtually impossible without extensive in-situ testing and in fact, there will always be some residual uncertainty in defining the precise flow path. However, validation of the general flow regime is possible using the following observations:

- potentiometric data volumetric
- discharge rates
- infiltration rates
- bulk geochemistry
- isotopic (stable and radioactive) geochemistry
- temperature

While each of these observations has an associated uncertainty, combining them should yield a consistent 'picture' of the ground-water flow system. A brief summary of the status of the efforts to validate the regional groundwater flow model in northern Switzerland is described below.

Potentiometric Data

The observed potentiometric data of the deep aquifers in the study region is presented in Kimmeier & al. [1985]. Numerous additional data exist for the shallow

alluvial aquifers, but as the heads in these aquifers essentially mimic the surface topography they are not considered here. Of the 80 wells in the study area, 14 are completed in the crystalline. In some cases, the wells are open over several formations, hence a mixed head is measured. In other cases, numerous tests have been performed in a single formation within an individual well. This is particularly true of the testing performed by NAGRA in the crystalline at Böttstein, Weiach, Schafisheim, Kaisten and Leuggern.

Measured heads are subject to many uncertainties. The potential error associated with heads measured by short term pressure tests is discussed by Grisak and Pickens [1985]. Additional errors exist in the data from the oil industry (generally drill stem tests) and from thermal and mineral water wells where the exact test conditions are often not known or well construction, test procedures, or borehole pressure history effects may impact the measured head. For these reasons the reported heads should only be considered accurate to within plus or minus 10 m, with this error being up to several tens of meters for many of the wells in the study region.

Comparison of observed and simulated heads in the crystalline for three regional model runs is presented in Table 1. Run E06V01 and E11V01 differ principally by the

Table 1: Comparison of Observed and Simulated Heads within the Crystalline

Well	Code	Observed Head	Simulated Head [m]		
			E06V01+	E11V01	E19V02
Wintersingen	WIN	<385	389	397	481
Weierfeld	WFD	<281	311	363	430
Engerfeld	EFD	<380	311	363	430
Säckingen a	SAC	292	317	316	324
Säckingen b	SAC	289	317	316	324
Kaisten	KAI	*- 310			
		- 482			
		- 798			
		- 999			
Zurzach Z1	ZUR	>344	395	398	453
Böttstein	BOE	- 394			
		- 399			
		- 456			
		- 621			
		- 791			
		- 1326			
		- 1498			
Zuzgen I	ZUZ	<412	360	355	402
Zuzgen II	ZUZ	<406	360	355	402
Weiach	WEI	>415	433	455	480
Badenweiler 3	BWL	>415	417	388	414
Schafisheim	SHM	365	464	526	535
Leuggern	LEU	362	351	330	418

*-310: Indicated the depth (m)

+ see text

permeability of the uppermost aquifers in the Alps. Run E19V02 utilized prescribed infiltration rates as opposed to a prescribed head boundary condition. With the exception of Schafisheim the agreement between observed and simulated heads is

generally quite favorable. It has been suggested [Kimmeier & al., 1985] that the low head measured in the crystalline at Schafisheim is due to a short circuit through the confining sedimentary strata.

Volumetric Discharge Rates

The volumetric discharge rates calculated along all modeled rivers are compared to observed base level stream flows at five gauging stations (Table 2). We assume that the lowest observed stream flow is totally supplied by groundwater discharge as opposed to surface runoff. In both run E06V01 and EllV01 the water table surface is prescribed. Therefore decreasing the permeability of the uppermost aquifer in the Alps (run EllV01) decreases the recharge and discharge. Run E11V02 differs from EllV01 in that the prescribed heads in the Alpine recharge areas are decreased by 500 m, causing a reduction in recharge and discharge. Run E19V02 utilizes prescribed infiltration rates which have been adjusted to better approximate the observed discharges [Kimmeier & al., 1985]. It is interesting to note that, while applying infiltration rates improves the fit between observed and simulated stream discharges (Table 2), the fit worsens between the observed and simulated heads in the area of interest (Table 1). This reinforces the decoupled nature of the shallow and deep ground-water flow regimes.

The ability to directly compare observed and simulated groundwater discharges as a means of model validation must be treated with caution. First, the observed base flow may be controlled by the alluvial aquifers not the deeper sedimentary or crystalline aquifers. Second, the simulated discharge is almost totally a function of the permeability and gradients in the outcropping aquifers, not the relatively small fluxes in the deeper confined aquifers. Finally, the degree of averaging incorporated in the model implies that small drainage systems which do contribute to the observed discharges are not explicitly modeled. In summary, it is difficult to place a great deal of confidence in the comparison of observed and simulated discharge rates as a validation tool. It does indicate if the model is order of magnitude correct but nothing more precise. It should be noted that detailed water balance assessments over small areas also aid little due to the averaging required in the models.

Table 2: Comparison of Observed and Simulated Stream Discharge

Stream Gauging Station	Observed Base Flow (m ³ /sec)	% of Catchment Within Model Boundaries	Base Flow Within Model Boundaries (m ³ /sec)	Simulated Discharge (m ³ /sec)			
				*E06V01	E11V01	E11V02	E19V02
Basel	202.	54.	109.	9670.	791.	679.	104.
Rekingen	120.	47.	56.	2230.	263.	116.	38.
Baden	26.	100.	26.	2960.	154.	89.	18.
Mellingen	29.	100.	29.	3780.	220.	130.	18.
Brugg	93.	37.	34.	661.	102.	91.	26.

* See text

Infiltration Rates/Water Table Surface

The boundary condition on the upper surface of a ground-water flow model may be either a prescribed infiltration rate or a specified head. If the infiltration rate is assigned, the simulated water table may be compared to the observed water table to ensure some degree of compatibility. If the water table surface is specified, the calculated infiltration rates may be compared to observed recharge rates to again check the validity of a particular simulation. Because in both cases the results are strongly controlled by the permeability of the uppermost element, any differences between observed and simulated near-surface heads or infiltration rates is just as likely due to permeability uncertainty as it is to the prescribed boundary condition.

Only a qualitative significance can be placed on the comparison of observed and simulated near-surface hydrogeology. First, there are no direct observations of infiltration rates in Switzerland. Even if there were, they would only represent very local conditions which would be impossible to extrapolate given the variable geology, topography, meteorology and vegetation. Secondly, there are no direct observation of heads in the recharge areas. We may assume these heads mimic the surface topography, but to what extent is difficult to define (especially in the Alps).

In summary, great care must be utilized in attempting to validate a large scale hydrogeologic model by the use of near-surface observations. Even if a good "match"

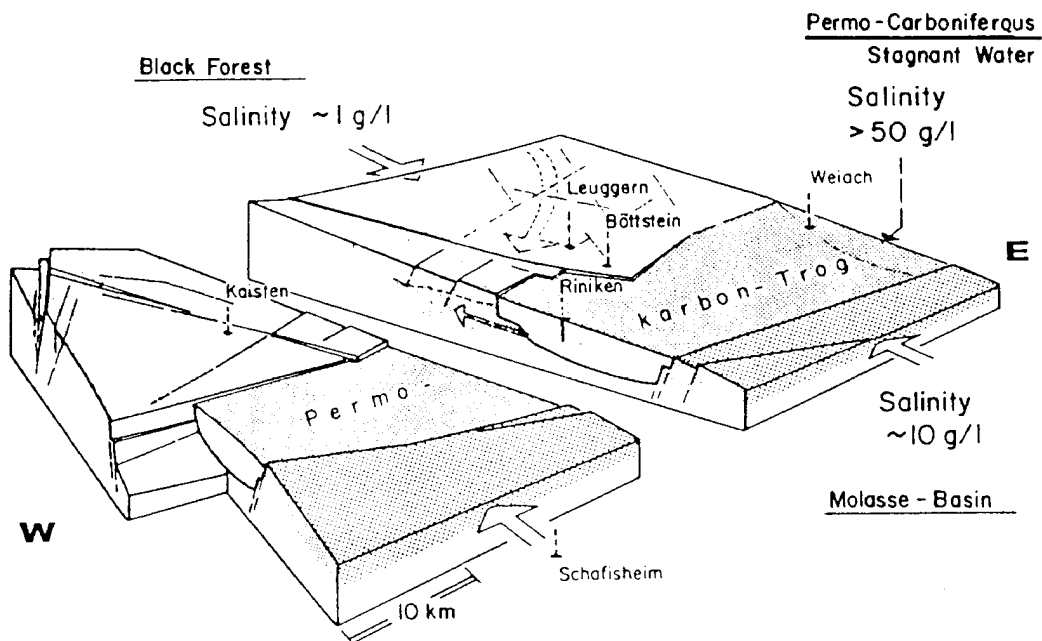


Figure 4: Flow Regimes in the Crystalline Based on Salinity

is obtained, this implies very little with regards to the deep groundwater flow regime which is of greatest interest. The approach taken in [Kimmeier & al., 1985] has been to vary the upper boundary conditions to evaluate their impact on the deep flow system of interest.

Bulk Geochemistry

The spatial variability of the dissolved constituents in groundwater can be used to provide qualitative statements concerning the general groundwater flow directions. The following conclusions have been made by Schmassmann and others [1984]:

1. If one assumes the salinities observed in the crystalline at Schafisheim (about 8 g/l) are representative of crystalline groundwaters south of the Permo-Carboniferous trough, then the low salinities (1 to 2 g/l) observed at Kaisten, Böttstein (upper 500 m) and Leuggern imply recharge from the north (Figure 4).
2. Gypsum saturation variations within groundwaters of the Upper Muschelkalk indicate a generally south to north component of flow in the region between the Lägern and the Rhine.

These observations have been used to insure that the general flow regime simulated by the model agrees with the geochemistry (compare Annex 5 and Fig. 4). However, as observed geochemical differences can often be the result of local hydrogeologic conditions (for example mixing of different formation waters) some care must be utilized in interpreted regional flow regimes from only geochemical evidence.

Isotopic Geochemistry

Pearson [1985] has concluded from his evaluation of the isotopic data from Böttstein that:

1. the residence time of the Muschelkalk groundwater is 17'000 years ($\pm$ 6'000 years) based on corrected C-14 and
2. the residence times of C-14 in the Buntsandstein/Upper crystalline groundwater range between 6'000 and 12'000 years.

Great care must be utilized in the interpretation of "residence times" generated from isotopic measurements due to the effects of possible geochemical reactions, matrix diffusion, or channeling on measured groundwater "ages". In addition, given the wide variability in the permeability and flow porosity along a likely travel path from the recharge area to the measurement point, it is impossible to utilize groundwater "ages" to unambiguously validate the results of a hydrodynamic model. Given these precautions, the above ages are at least consistent with the results of the regional and local hydrogeologic models [Kimmeier & al., 1985].

Temperature Distribution

The groundwater temperature may also provide some indication of the flow regime. A severe limitation with temperature (as is also the case with reactive tracers), however, is the non-conservative nature of its transport. The measured temperature at any point, whether a spring or a well, is strongly controlled by the thermal properties of the rock mass. Except in extremely rapidly flowing groundwater systems, the observed temperature is more a function of the conductive transfer of heat through the rock than the convective flow of heat with the water.

Anomalous temperatures do exist in the study region. In particular, the thermal springs at Baden (in the Muschelkalk) have a temperature of about 47 °C. This

indicates the discharging water at Baden must come from great depths. The probable source of this water is from the south where the Muschelkalk is much deeper (and hence warmer). This south to north flow in the Muschelkalk has been reproduced in the regional model [Kimmeier & al., 1985].

Some conclusions for groundwater model validation

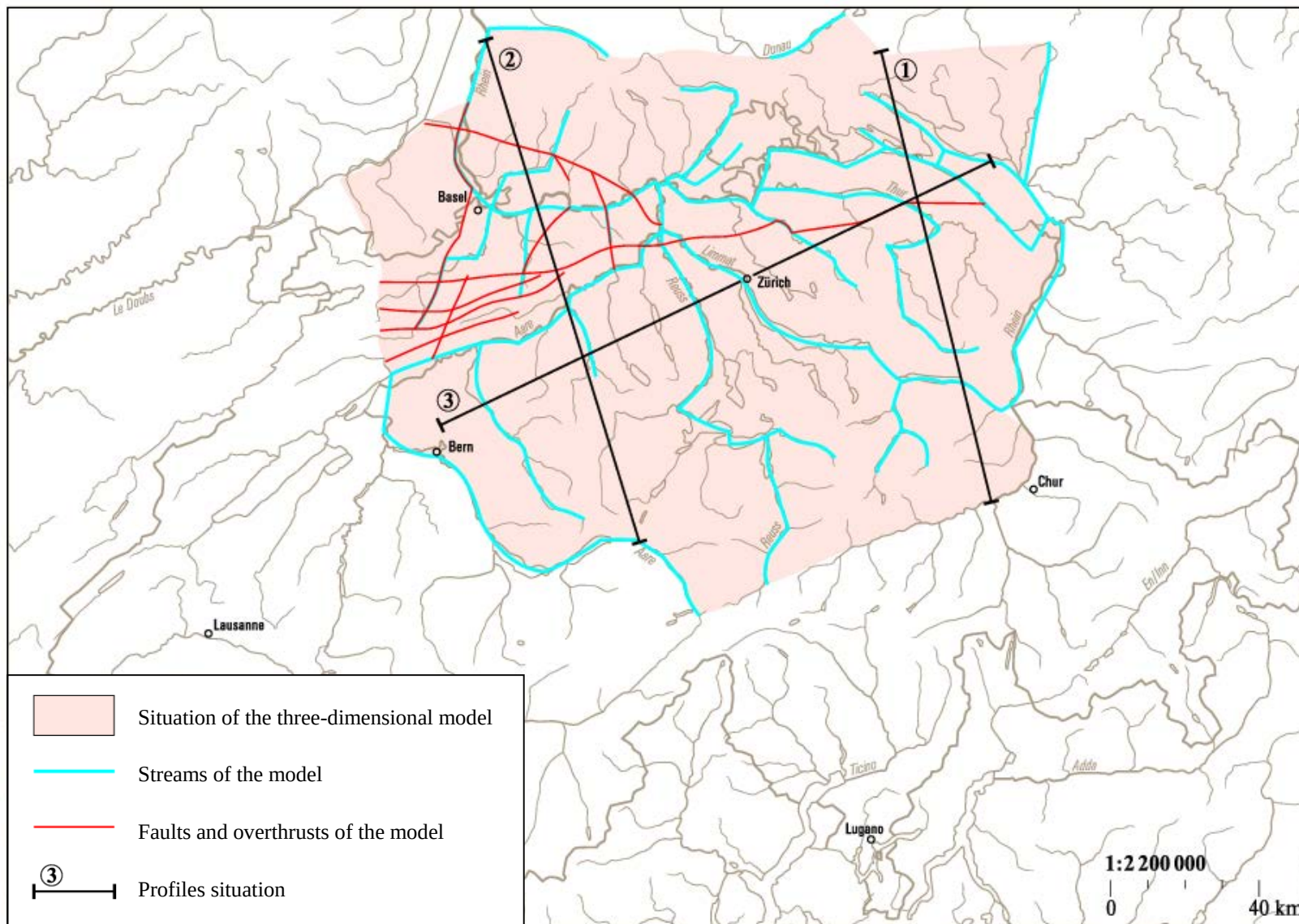
While the initial effort to validate the regional hydrogeologic model is encouraging, the work is not complete. As additional data are being collected and interpreted (esp. hydrochemical, isotopic, thermal, and hydrogeologic) this study must be treated as preliminary.

At the present stage in the characterization of the groundwater flow regime, sensitivity analysis is an important component in safety analysis. The impact of uncertain parameters on the ability to validate the conceptual model and on the predicted ground-water flow paths and flow rates must be considered. These sensitivity analyses are reported on in Kimmeier & al. [1985].

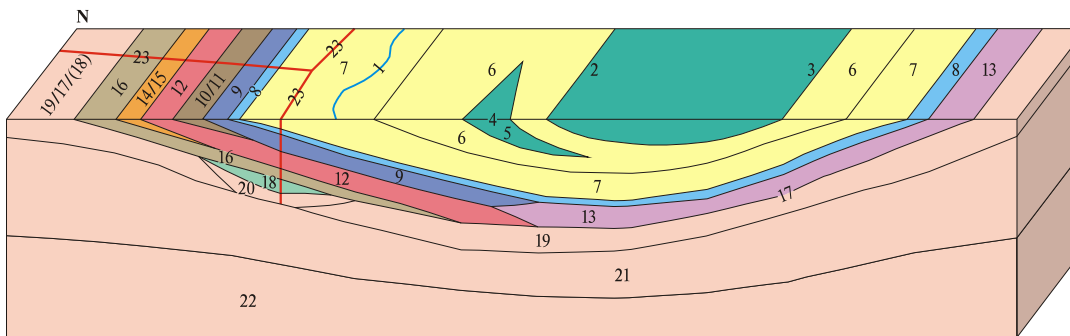
7. REFERENCES

- Andrews R.-W., Kimmeier F., Perrochet P., Király L., 1986. *Validation of hydrogeologic models to describe groundwater flow in the Crystalline basement of Northern Switzerland*. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 50, 1985, p.107-114. Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. Scientific Basis for Nuclear Waste Management IX, Editor Lars O. Werme.
- Bouzelboudjen, M. 1993. *Cartographie hydrogéologique et systèmes d'écoulement souterrain*. Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel – Service hydrologique et géologique national. Rapport inédit, Berne.
- Bouzelboudjen M., Király L., Kimmeier F., Zwahlen F. 1997. *Représentation schématique des écoulements souterrains en Suisse. Profils hydrogéologiques issus de modèles mathématiques 3-D à éléments finis*. Planche 8.3 de l'Atlas Hydrologique de la Suisse. Institut de Géographie de l'Université de Berne, Office Fédéral de la Topographie et service Hydrologique et Géologique National, Berne, Suisse.
- Grisak, G., Pickens, J.F., 1985. *Hydrogeological Testing of Crystalline Rocks during the NAGRA Deep Drilling Program*. NTB 85-08, NAGRA, Baden, Switzerland.
- Hufschmied, P., Frieg, B. 1989. *Observation of hydraulic heads in the Nagra boreholes in Northern Switzerland*. Nagra Bulletin, Special Edition 39-49, Baden.
- Király, L. 1970. *L'influence de l'hétérogénéité et de l'anisotropie de la perméabilité sur les systèmes d'écoulement*. In: Bulletin der Vereinigung schweizerischer Petroleumgeologen und -ingenieure, 37/91:50–57, Zürich.
- Király, L. 1985. *FEM301 – A three-dimensional model for groundwater flow simulation*. Nagra Technischer Bericht NTB 84-49, Baden.
- Király L., 1998. *FEN's code family (Finite Element Neuchâtel) - Three Dimensional Model for Groundwater Flow and Transport Simulation Codes (VAX-VMS, UNIX & Windows Systems)*. Hydrogeological Centre of Neuchâtel. Unpublished.

- Kimmeier, F. & al. 1985. *Simulation par modèle mathématique des écoulements souterrains entre les Alpes et la Forêt Noire; Partie A: Modèle régional, Partie B: Modèle local (Nord de la Suisse)*. Nagra Technischer Bericht NTB 84-50, Baden.
- Nagra 1988. *Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988. Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz*. Nagra Technischer Bericht NTB 88-25, Baden.
- Pearson, F. J. Jr., 1985. *Sondierbohrung Böttstein-Results of Hydrochemical Investigations: Analysis and Interpretation*, NTB 85-05, NAGRA, Baden, Switzerland.
- Skinner, B.J., Porter, S.C. 1991. *The dynamic earth: an introduction to physical geology*. Second edition, New York.
- Schmassmann, H., Balderer, W., Kanz, W., Pekdeger, A., 1984. *Beschaffenheit der Tiefengrundwasser in der Zentralen Nordschweiz und den Angrenzenden Gebieten*, NTB 84-21, NAGRA, Baden, Switzerland.
- Thury, M. & al., 1994. *Geology and Hydrogeology of the Crystalline Basement of Northern Switzerland*. Synthesis of Regional Investigations 1981–1993 within the Nagra Radioactive Waste Disposal Program. Nagra Technischer Bericht NTB 93-01, Baden.
- Tóth, J. 1963. *A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins*. Jour. of Geoph. Research, Vol 68, N° 16, pp 4795-4812.
- Tóth, J. 1995. *Hydraulic continuity in large sedimentary basins*. In: Hydrogeology Journal Volume 3, Nr. 4/1995:4–16, Hannover.
- Voborny, O. & al., 1992. *Analysis of regional groundwater flow in crystalline rocks of Northern Switzerland: Results of a numerical model using an equivalent porous medium*. Nagra Interner Bericht, Baden.



Annex 1: Situation of the study area [Bouzelboudjen & al, 1997]



Im Modell verwendete Serien
Regroupement des séries utilisées dans le modèle

Quartäre Talfüllungen
Remplissage quaternaire des vallées

—	Fliessgewässer Cours d'eau	—	—
—	Mit Fliessgewässern hydraulisch verbundene quartäre Aquifere	1	T 10^{-1} – 10^{-4}
—	Aquifères quaternaires liés aux cours d'eau		

Sedimente des Helvetikums s. l.
Sédiments de l'Helvétique s. l.

■	Kalkaquifere des Helvetikums Aquifères calcaires de l'Helvétique	2	K 10^{-6}
■	Sandsteinaquifere des Helvetikums Aquifères gréseux de l'Helvétique	3	K 10^{-6}
■	Kalkaquifere der Randkette Aquifères calcaires de la Chaîne bordière	4	T 10^{-3}
■		5	K 10^{-6}

Mittelländische Molasse, subalpine Molasse
(einschliesslich tertiärer Flysche)
Molasse du Plateau, Molasse subalpine (Flyschs tertiaires inclus)

■	Flysch und Molasse (Tertiär)	6	K 10^{-7}
■	Ensemble flyschs et molasse (Tertiaire)	7	K 10^{-8}

Tafel- und Faltenjura, Mesozoikum unter dem Molassebecken,
Bedeckung der kristallinen Externmassive
Jura tabulaire et plissé, Mésozoïque sous le Bassin molassique,
couverture des massifs cristallins externes

■	Kalkaquifere der Kreide und des oberen Malm	8	K 10^{-5}
■	Aquifères calcaires du Crétacé et du Malm supérieur		
■	Mergelformationen des Malm Formations marneuses du Malm	9	K 10^{-9}
■	Hauptrogenstein Hauptrogenstein	10	T $50 \cdot 10^{-6}$
■	Aquifere des oberen Doggers Aquifères du Dogger supérieur	11	K 10^{-6}
■	Geringdurchlässige Formationen des Doggers, des Lias und des Keupers Formations peu perméables du Dogger, du Lias et du Keuper	12	K 10^{-10}
■	Gesamtheit der Mergelformationen des Malm und der geringdurch- lässigen Formationen des Doggers, des Lias und des Keupers Regroupement des formations marneuses du Malm et des formations peu perméables du Dogger, du Lias et du Keuper	13	K 10^{-10}
■	Kalkaquifere des oberen Muschelkalkes Aquifères calcaires du Muschelkalk supérieur	14	T $40 \cdot 10^{-6}$
■		15	K 10^{-6}
■	Geringdurchlässige Formationen des mittleren und unteren Muschelkalkes Formations peu perméables du Muschelkalk moyen et inférieur	16	K 10^{-10}
■	Buntsandstein und verwittertes Kristallin Buntsandstein et Cristallin altéré	17	T 10^{-5}

Permo-Karbon-Trog unter dem Jura
Fossé permo-carbonifère sous le Jura

■	Permo-Karbon Permo-Carbonifère	18	K 10^{-10}
---	-----------------------------------	----	--------------

Kristallines Grundgebirge
Socle cristallin

■	Verwittertes Kristallin Cristallin altéré	19	K 10^{-7}
■	Verwittertes Kristallin unter dem Permo-Karbon Cristallin altéré sous le Permo- Carbonifère	20	K 10^{-7}
■	Unverwittertes Kristallin Cristallin non altéré	21	K 10^{-11}
■		22	K 10^{-11}

Simulationen der Störungen
Simulations des discontinuités

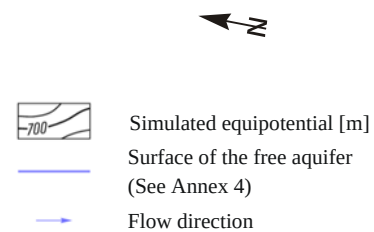
■	Kristallin-Sediment-Kontakt seitlich des Rheingrabens (erscheint nur in der drei- dimensionalen Darstellung 1:800 000) Contact entre cristallin et sédimentaire en bordure du Fossé rhénan (n'apparaît que dans la représentation 1:800 000)	—	K 10^{-7}
■	Verwerfungen und Überschiebungen Failles et chevauchements	23	T $5 \cdot 10^{-6}$

Nr. N°	Numerierung der Durchlässigkeits- und Transmissivitätsklassen Numérotation des classes de perméabilité et de transmissivité
K	Durchlässigkeitsbeiwert K [m/s] Valeur de la perméabilité K [m/s]
T	Transmissivitätswert T [m ² /s] Valeur de la transmissivité T [m ² /s]

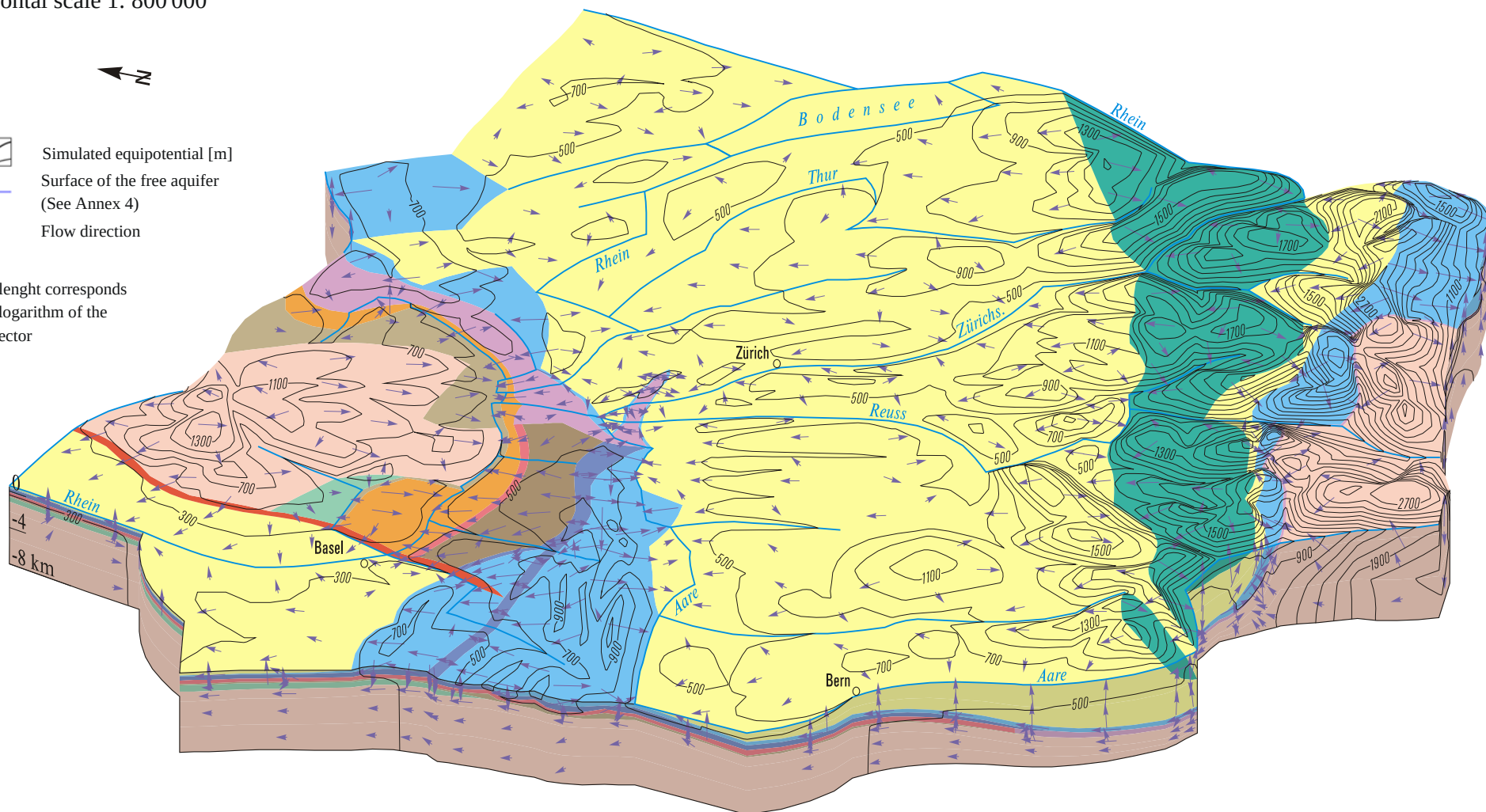
Die Durchlässigkeitsbeiwerte (dreidimensionale Elemente) und die Transmissivitätswerte (zweidimensionale Elemente) geben Grössenordnungen an, die sich aus der Berechnungsvariante für diese Tafel ergeben haben. Die Transmissivität entspricht dem Produkt aus dem Durchlässigkeitsbeiwert nach Darcy und der Aquifermächtigkeit. Die im Netz des mathematischen Modells verwendeten zweidimensionalen Elemente sind zwischen die dreidimensionalen Elemente eingefügt.

Les valeurs de perméabilité (éléments tridimensionnels) et de transmissivité (éléments bidimensionnels) représentent des ordres de grandeur pour la variante de calcul retenue pour cette planche. La transmissivité correspond au produit du coefficient de perméabilité (de Darcy) par la puissance (ou épaisseur) de l'aquifère. Les éléments bidimensionnels utilisés dans le réseau du modèle mathématique sont pris en «sandwich» entre les éléments tridimensionnels.

Horizontal scale 1: 800'000

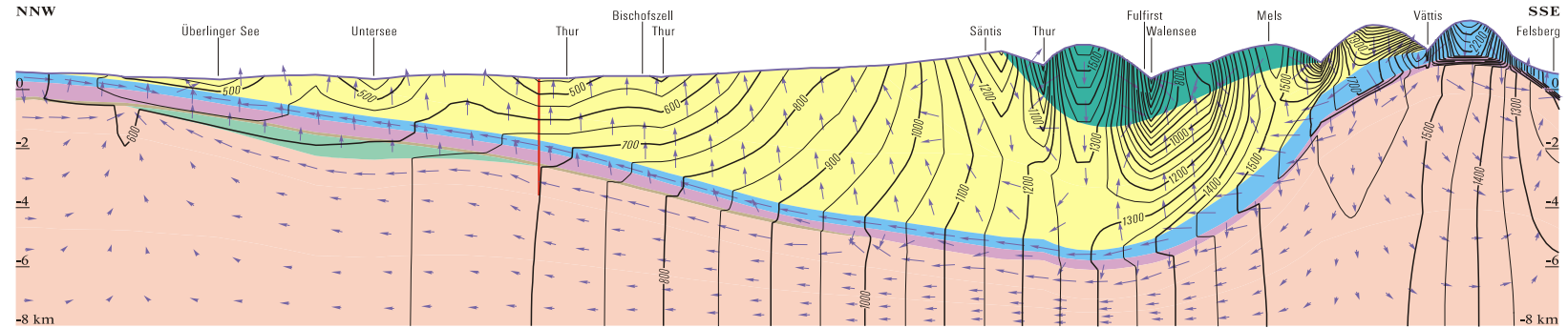


Arrow lenght corresponds
To the logarithm of the
Flux vector

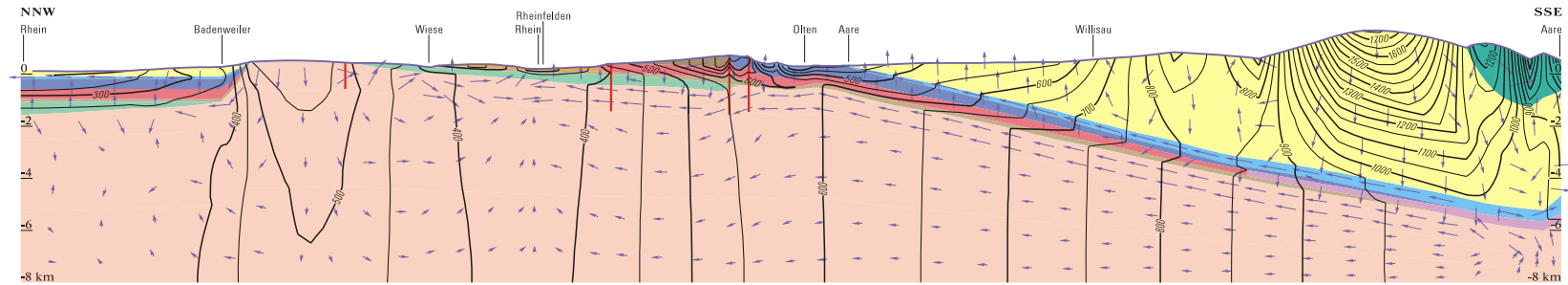


Annex 3 : Three-dimensional representation of the simulated grounwater flow [Bouzelboudjen & al, 1997].

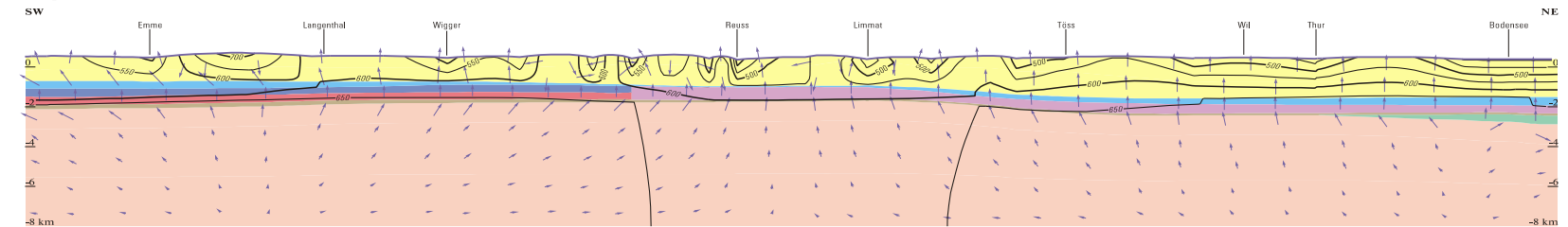
**Profil 1
Coupe 1
NNW**



**Profil 2
Coupe 2
NNW**



**Profil 3
Coupe 3
SW**



Massstab der Profile 1:500 000, dreifach überhöht / Echelle des coupes 1:500 000, exagération verticale trois fois

Annex 4 : Three-dimensional representation of the simulated grounwater flow (see legend on Annex 3) [Bouzelboudjen & al, 1997].

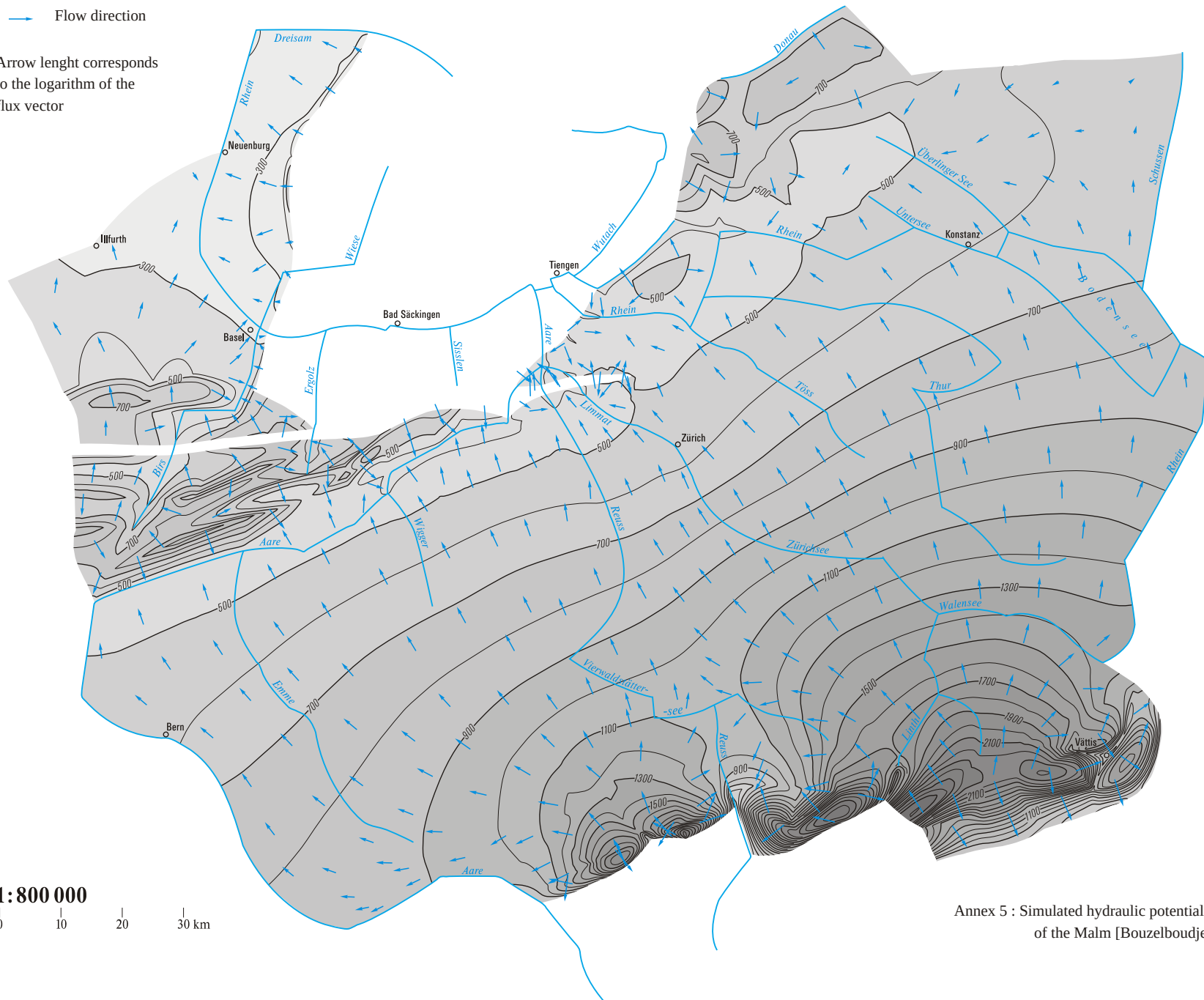
Simulated equipotentials

Flow direction

Arrow lenght corresponds
to the logarithm of the
flux vector

1:800 000

0 10 20 30 km



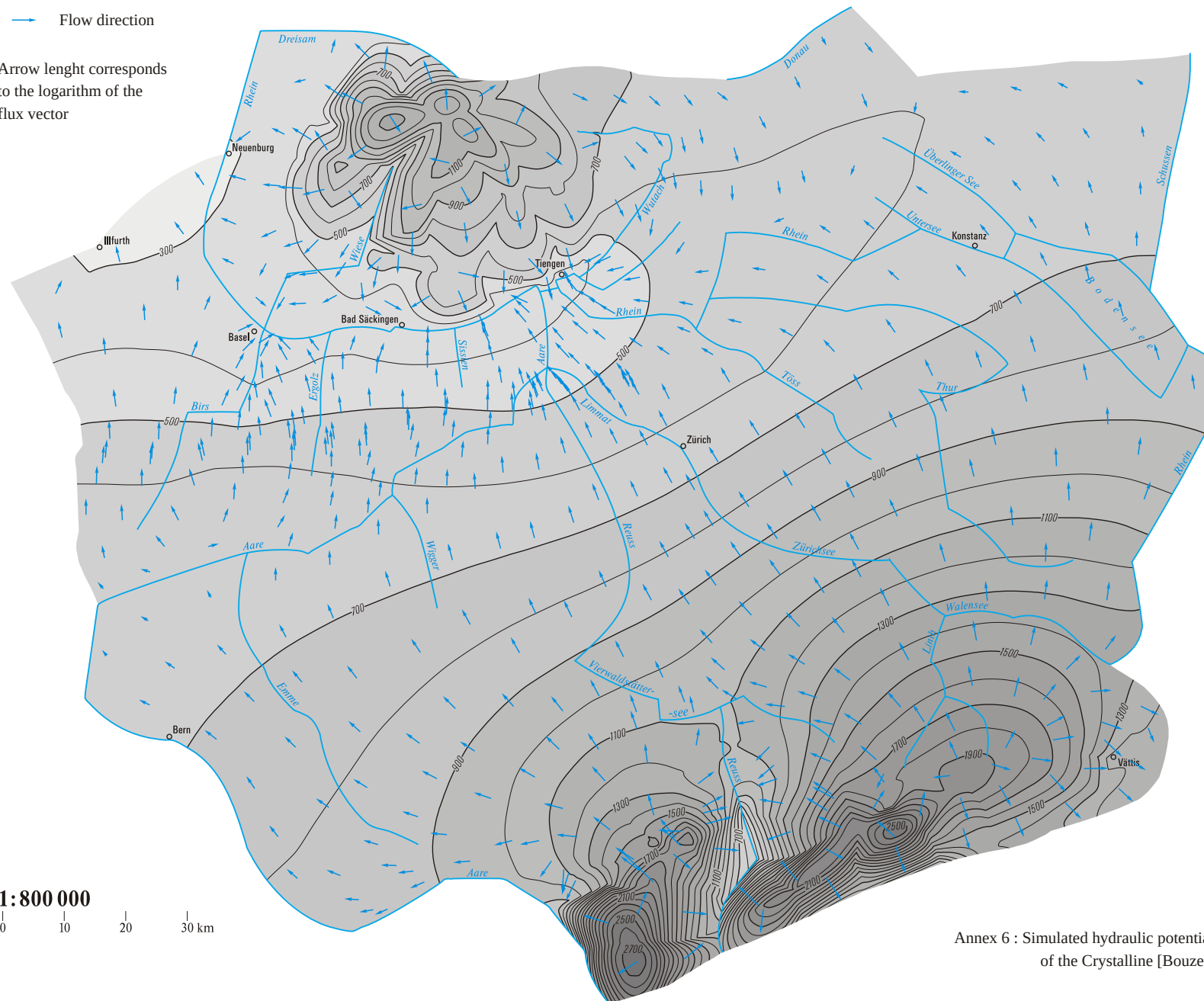
Annex 5 : Simulated hydraulic potentials at the upper limit
of the Malm [Bouzelboudjen & al., 1997]

 Simulated equipotentials
 Flow direction

Arrow lenght corresponds
 to the logarithm of the
 flux vector

1:800 000

0 10 20 30 km



Annex 6 : Simulated hydraulic potentials at the upper limit of the Crystalline [Bouzelboudjen & al., 1997]

3-D Groundwater Flow Modeling in Heterogeneous Geologic Media : Integrated Approach Using Spatial and Temporal Database, Geostatistics and GIS

Francesco Kimmeier

SHORT TABLE OF CONTENTS

I. INTRODUCTION GENERALE

II. GIS DATABASE AS SUPPORT TO GROUNDWATER PROBLEM RESOLUTION

II.1 TRACES/VIEW - TRAÇAGE DES EAUX SOUTERRAINES : APPLICATION SIG EN MILIEU KARSTIQUE JURASSIEN (SUISSE)

II.2 GEOHYDROLOGICAL PARAMETERS IDENTIFICATION AND GROUNDWATER VULNERABILITY TO POLLUTION: A SWISS CASE STUDY

III. GROUNDWATER MODELING AT DIFFERENT SCALE USING FINITE ELEMENTS METHOD AND STOCHASTIC MODELING FOR UNCERTAINTY ESTIMATION

III.1 3-D GROUNDWATER MODELING AT REGIONAL SCALE

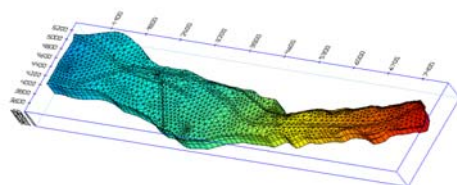
III.2 BASE DE DONNEES, SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE, GEO-STATISTIQUE ET MODELISATION 3-D DES EAUX SOUTERRAINES A L'ECHELLE LOCALE DANS LA REGION DE VISP (SUISSE)

III.3 TRAVEL PATH UNCERTAINTY : A CASE STUDY COMBINING STOCHASTIC AND DETERMINISTIC HYDRODYNAMIC MODELS IN THE RHÔNE VALLEY, SWITZERLAND

IV. CONCLUSIONS GENERALES ET TRAVAUX FUTURS

KIMMEIER'S SHORT CURRICULUM VITAE AND LIST OF PUBLICATIONS

**Base de données, Systèmes d'Information Géographique,
géostatistique et modélisation 3-D des eaux souterraines à l'échelle
locale : Approche intégrée appliquée à la région de Visp (Suisse)**



RÉSUMÉ

Le but de cette partie est de décrire la méthodologie de la construction d'un modèle hydrodynamique 3-D performant, décrivant la géométrie des aquifères et aquitards, leurs lithologies, leurs caractéristiques hydrodynamiques (perméabilité, porosité et coefficient d'emménagement) aussi bien que les paramètres hydrochimiques afin, d'obtenir un instrument pour la gestion et la protection des eaux souterraines. Ce modèle a été utilisé comme instrument prévisionnel dans le cadre de l'étude d'impact de travaux de génie civil futurs sur les eaux souterraines et pourrait être utilisé, à l'avenir, par le canton du Valais, pour d'autres projets comme l'étude de l'impact sur les eaux souterraines de la pollution de la décharge de Gamsen. Les données proviennent de 144 forages, 386 piézomètres et 23 points d'observation des eaux de surface. La procédure, depuis l'acquisition des données jusqu'à l'élaboration d'un modèle hydrodynamique 3-D fonctionnel, se décompose en 3 étapes principales : i) la réalisation de la base de données spatiales raster et vecteur, ii) le traitement des données par statistique et géostatistique, iii) la réalisation d'un modèle hydrodynamique 2-D puis 3-D. ArcInfo et ArcView ont été utilisés comme Système d'Information Géographique et MS Access comme système de gestion de base de données sur station de travail et ordinateur individuel. Actuellement, ArcInfo, ArcView et MS Access permettent de conserver et de gérer les données de base ainsi que les différents plans d'information 2-D sous forme de cartes et de profils. L'extraction automatique de sections verticales pour des systèmes multicouches permet une vérification aisée de la géométrie 3-D du modèle hydrogéologique (algorithmes présents dans les modules Tin et Grid d'ArcInfo). Le traitement par géostatistique des données spatiales de base a été réalisé à l'aide de plusieurs techniques (krigeage et simulations conditionnelles). Les modèles mathématiques hydrogéologiques développés sont basés sur la méthode des éléments finis. Les logiciels FEN's code family et Feflow ont été utilisés. Le modèle hydrodynamique 3-D a été construit comme un instrument pour le gestionnaire. Nous le montrons à travers deux applications (3^{ème} correction du Rhône phase II et influence potentielle de la décharge de Gamsen). L'intérêt de ce travail est évident dans une région où les eaux souterraines en relation avec le Rhône sont facilement accessibles et, par conséquent, exploitables à faibles coûts. De plus, leur situation dans une vallée en général étroite avec une forte activité anthropique (industrie, agriculture, routes et autoroute) font qu'elles sont spécialement vulnérables, tant du point de vue de la qualité (pollution industrielle et/ou agricole), que de la quantité (perturbations locales ou régionales

dues à des ouvrages souterrains ; palplanches, barrages, etc.).

Mots-clefs : Hydrogéologie, base de données, Systèmes d'Information Géographique, géostatistique, modélisation des écoulements et du transport des eaux souterraines, éléments finis 3-D, Valais, Suisse

1. OBJECTIF

Le but de cette partie est de décrire la méthodologie intégrée de la construction d'un modèle hydrodynamique 3-D performant, décrivant la géométrie des aquifères et aquitards, leurs lithologies, leurs caractéristiques hydrodynamiques (perméabilité, porosité et coefficient d'emménagement) aussi bien que les paramètres hydrochimiques.

La démarche, destinée principalement aux hydrogéologues praticiens non initiés aux techniques les plus récentes du traitement numérique des données spatiales, adopte volontairement un style descriptif. Toutefois, la description des étapes a été réalisée de la manière la plus complète possible, dans le but de reproduire le plus rapidement des scénarios de simulations. Ces simulations utiliseront la base de données spatiales de Visp, qui sera gérée par le Centre de Recherche en Environnement Alpin (CREALP, Sion, Suisse). En effet, nous mettons à leur disposition un instrument de gestion des eaux souterraines. Il consiste en un modèle 3-D à éléments finis permettant :

- *de visualiser et de gérer les données hydrogéologiques spatiales et temporelles (bases de données sous ArcInfo et ArcView),*
- *de réaliser de nouveaux scénarios de prévision dans le cadre de la gestion des ressources en eaux de la région (impacts de nouvelles perturbations sur les eaux souterraines de travaux de génie civil – par exemple correction du Rhône – pollutions accidentelles liées au transport de matières polluantes ou à la décharge de déchets industriels de la Lonza dans la région de Gamsen).*

La procédure, depuis l'acquisition des données spatiales jusqu'à l'élaboration d'un modèle hydrodynamique 3-D fonctionnel, est représentée sur l'organigramme de la figure 1. Il montre l'approche intégrée qui se décompose en 3 principales étapes qui sont :

1. la réalisation de la base de données raster (données sur grille régulière ; Modèle Numérique de Terrain (MNT), images, etc.) et mode vecteur (données sous forme de points, lignes et polygones) depuis l'acquisition des données au moyen de scanners, tables à numériser, traitement de texte et tableur jusqu'à l'obtention de plans d'information 2-D (hydrographie, lithologie, piézométrie, etc.) - la validation des données constituant une étape intermédiaire importante,
2. le traitement des données par statistique et géostatistique en utilisant différentes techniques (krigeage standard et simulations conditionnelles),
3. la réalisation de modèles hydrodynamiques 2-D et 3-D en utilisant la méthode des éléments finis et le logiciel Feflow [Diersch, 1999] et/ou FEN's code family [Király, 1985, 1998].

Cette méthodologie est dite intégrée, car les techniques SIG, statistique et géostatistique sont utilisées tout au long du processus de modélisation. Ce modèle a

été utilisé comme un instrument de gestion prévisionnel dans le cadre de travaux futurs de génie civil et pourrait être utilisé, à l'avenir, par le canton du Valais, pour d'autres projets comme l'étude de l'impact sur les eaux souterraines de la pollution de la décharge de Gamsen. Les données proviennent de 144 forages, 386 piézomètres et 23 points d'observation des eaux de surface.

Cette partie s'attache d'avantage à la description de la démarche d'obtention de l'instrument 3-D, plutôt qu'à une description technique de la modélisation numérique des eaux souterraines. Nous renvoyons le lecteur, pour cet aspect particulier, à la description de la méthode des éléments finis décrite par Király en 1985 dans «FEM 301 – A Three Dimensional Model for Groundwater Flow Simulation» ou au manuel de Feflow [Diersch, 1999].

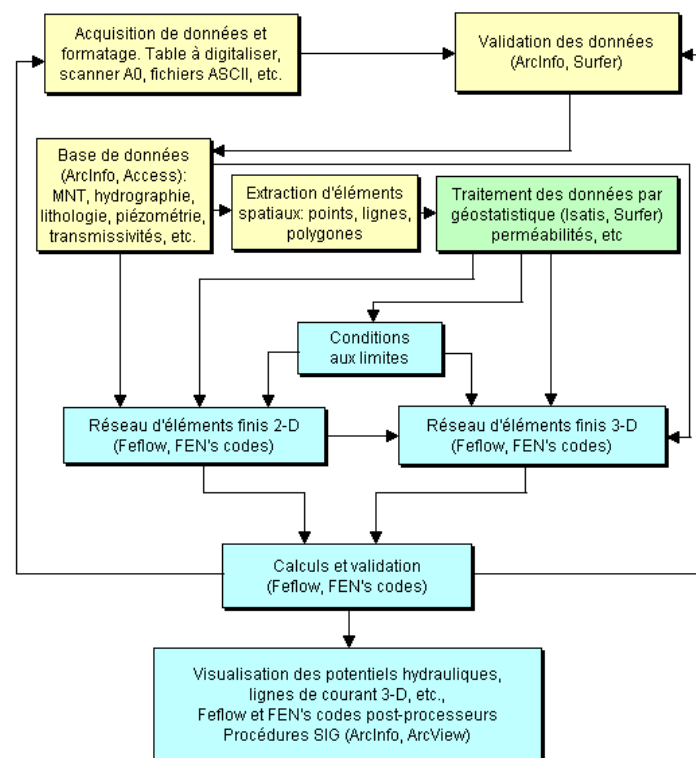


Figure 1 : Liens entre les bases de données spatiales en mode raster et vecteur, les SIG, l'étude géostatistique des données et les modèles hydrodynamiques tridimensionnels

2. BASE DE DONNÉES SPATIALES HYDROGÉOLOGIQUE EN MODE RASTER ET VECTEUR

2.1 Système d'information géographique ou système d'information géospatiale

Un système d'information géographique se définit à l'heure actuelle de manière générale comme un environnement informatisé de traitement d'informations spatiales numériques et multivariées [Burrough, 1998 ; Tomlin, 1993 ; Collet, 1992 ; Caloz & Collet, 1997 ; Golay, 1992 ; Jaquet, 1996]. Le système d'information géographique ou système d'information géospatiale se réfère donc autant aux concepts de l'analyse spatiale qu'aux outils informatiques, à savoir les équipements et les logiciels. Le Système d'Information Géographique prend en compte les dimensions des variables qui peuvent être d'ordre thématique, spatial et/ou temporel. L'aspect temporel

constitue un domaine de recherche en plein développement dans les SIG [Bédard et al., 1996 ; Claramunt & Thériault, 1995].

Les Systèmes d'Information Géographique offrent les fonctions d'acquisition de données sous forme numériques, de validation, de gestion, de traitement et d'analyse spatiale, thématique et multithématique de données géoréférencées [Burrough, 1998, Maidment 1996, Barazzuoli & al, 1999]. Ils permettent aussi la représentation de ces données sous forme de cartes, tableaux et images. Enfin, ils offrent la possibilité de couplage avec les logiciels de simulation. La simulation dynamique des processus, dans les sciences de l'environnement dont la composante spatiale est prépondérante, se base de plus en plus sur les SIG [Maxwell & Costanza, 1998 ; Pouliot, 1999 ; Maidment, 1996]. Le couplage des SIG et des modèles dans les sciences de l'environnement est aussi en plein essor marqué par les nombreuses conférences consacrées à ce sujet [Kovar & Nachtnebel 1993, 1996]. De nombreuses applications liées à la problématique de la notion de couplage des SIG et de la modélisation des ressources en eau ont été abordées ces dernières années [Van Deursen, 1995 ; De Smedt F., 1997 ; Batelaan & al., 1996 ; Bel Hadj Kacem, 1998 ; Wesseling & al., 1996, Bouzelboudjen & Kimmeier, 1998].

2.2 Données de base

La base de données hydrogéologique utilisée pour l'élaboration du modèle 3-D dans la région de Visp [Fröhlich, 1997 ; Kimmeier, 1997, 1999], développée sous MS Access depuis 1993 dans le cadre du projet Fonds national (N° 21-39357.93 et 2047-064.96), s'intègre dans un concept global de banque de données cantonale mise sur pied par le canton du Valais. Cette banque de données a été alimentée en partie par des modèles 3-D précédents [Bouzelboudjen & Király, 1988 ; Király & Bouzelboudjen, 1988a ; Bouzelboudjen, 1991 ; Geister & Burger, 1988] et l'est actuellement par divers organismes cantonaux comme le Service des routes et des cours d'eau (SRCE) et le Centre de recherche en environnement alpin (CREALP).

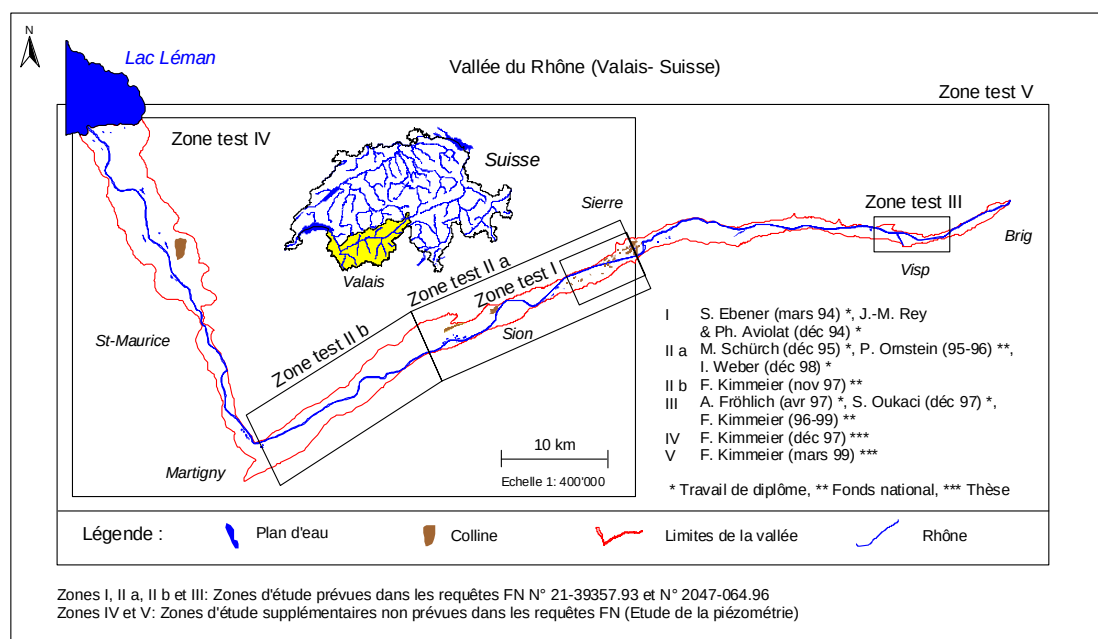


Figure 2 : Situation géographique des différentes études traitées dans la requête Fonds national (N° 21-39357.93 et N° 2047-064.96). Requêteur principal : J.-D Rouiller; co-requêteurs : Dr M. Bouzelboudjen, Prof. L. Király, F. Veuthey.

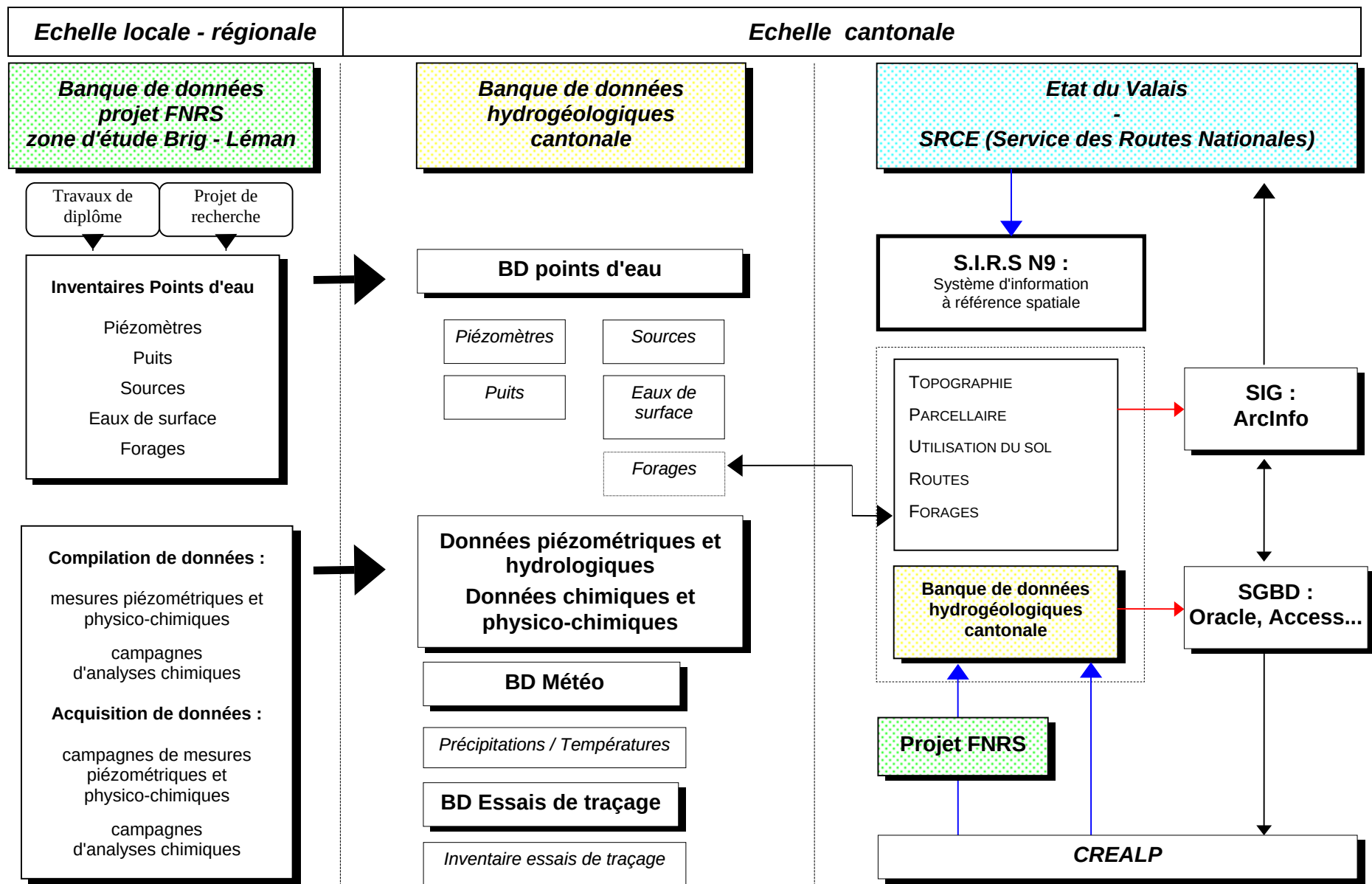


Figure 3 : Concept global de la banque de données hydrogéologiques du canton du Valais (d'après P. Ornstein, rapport FN nov. 1996)

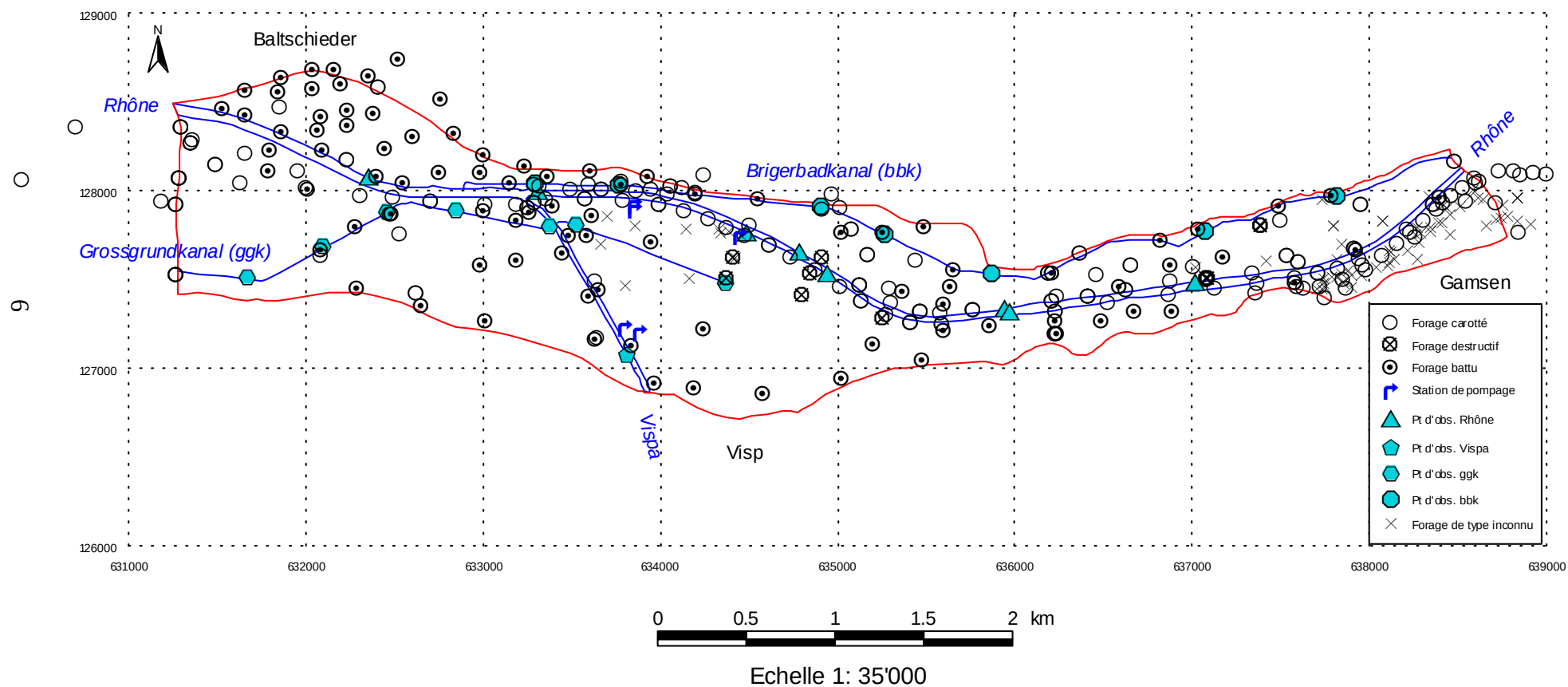


Figure 4 : Type d'ouvrage des 144 forages, 386 piézomètres, 5 stations de pompage et 23 points d'observation des eaux de surface dans la région de Visp.
(Base de données : A. Fröhlich, 1997 ; Kimmeier, 1997, 1999).

La figure 2 montre la localisation des différentes études entreprises dans le cadre du projet Fonds national et plus particulièrement dans la zone de Visp, où se situe le modèle 3-D décrit dans cette démarche. L'annexe 1 liste les titres des différents travaux entrepris dans ce cadre, entre 1993 et 2001. La figure 3, quant à elle, illustre le concept global de cette banque de données, avec les différents intervenants.

Pour générer la géométrie du modèle 3-D, ainsi que pour effectuer des calculs et les valider dans le but d'obtenir des vitesses de filtration (et par suite des débits) et des valeurs de potentiels hydrauliques, il est nécessaire de connaître les points suivants : (voir dans ce volume «3-D groundwater modeling at national scale, Kimmeier & al., 2001e») :

- les différentes surfaces structurales ainsi que les épaisseurs des différentes formations que l'on veut modéliser,
- les valeurs de potentiels hydrauliques mesurées dans les piézomètres,
- les valeurs de perméabilités et de coefficients d'emménagement mesurées dans les forages,
- les valeurs de débits mesurées dans les canaux, et
- les paramètres physico-chimiques majeurs.

La figure 4 montre l'emplacement des points d'observation des eaux souterraines et des eaux de surface. Elles sont effectuées dans :

- 144 forages soit carottés, soit destructifs ou battus,
- 386 piézomètres isolés ou parfois regroupés à plusieurs par forage,
- 5 stations de pompage sur le site de la Lonza (industrie agro-chimique), et
- 23 points d'observation des eaux de surface sur le Rhône et les canaux du Grossgrund et du Brigerbad.

La figure 5 montre les statistiques descriptives et un histogramme des profondeurs atteintes par les forages. Seules 133 profondeurs sont connues. On constate que 45 forages atteignent 40 m de profondeur. Cette valeur constitue la profondeur moyenne

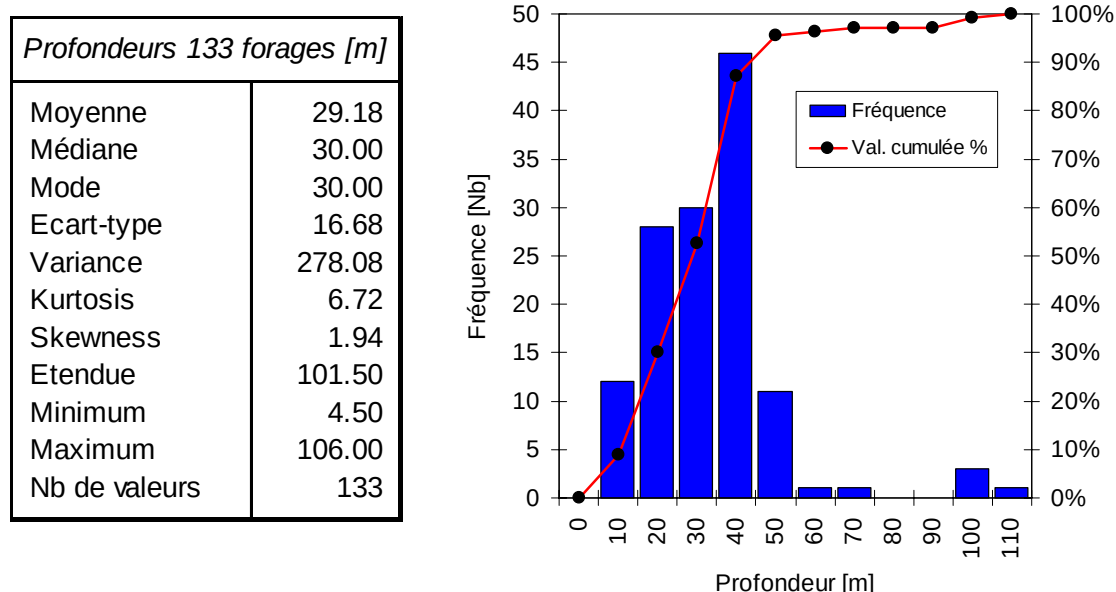


Figure 5 : Statistiques descriptives, histogramme et courbe de fréquence des profondeurs atteintes par les forages (133 valeurs connues sur 144 forages)

de la base de l'aquifère inférieur. Il est par conséquent intéressant de noter que bien que le nombre de forages par km² soit important dans cette région ils ne permettent pas tous de décrire complètement la géométrie du système aquifère. La plupart de ces forages a été effectué dans le cadre de la construction de l'autoroute A9 et non pas à des fins hydrogéologiques uniquement. Ces forages sont majoritairement alignés le long du Rhône et le long d'une variante de tracé de la future autoroute. C'est pourquoi pour compléter l'information 3-D nécessaire à la construction du modèle hydrogéologique sept forages d'environ 40 m de profondeur ont été réalisés en 1988 dans le cadre du mandat réalisé par Bouzelboudjen & Király [1988]. Cinq autres forages ont été réalisés en 1998 dans le cadre du Fonds national afin de compléter la base de données hydrogéologiques (paramètres structuraux et mesures de perméabilité par flowmètre tous les mètres [Geotest, 1998, Kimmeier, 1999 a]). Les nouveaux forages FR 5, 6, 8 et 11 sont localisés sur la figure 4.

2.2.1 Surfaces structurales

L'ensemble des forages carottés a permis de définir un schéma conceptuel de la succession des formations dans le sous-sol de la région de Visp. Le complexe aquifère de cette région se compose (Fig. 6) de dépôts quaternaires d'origine glaciaire, lacustre ou fluvial. Les dépôts graveleux du Rhône forment le principal aquifère de la région. La distribution des différentes formations lithologiques retenues pour le modèle 3-D sont du sommet vers le bas : les limons de surface (Ls) avec une épaisseur moyenne de 10 m (absents par endroits), les graviers supérieurs (Gs) d'une épaisseur moyenne de 16 m (10 à 19 m), les limons intermédiaires (Li) qui ne sont jamais épais de plus de 20 m et qui sont absents par endroits, notamment en amont de la région étudiée où le

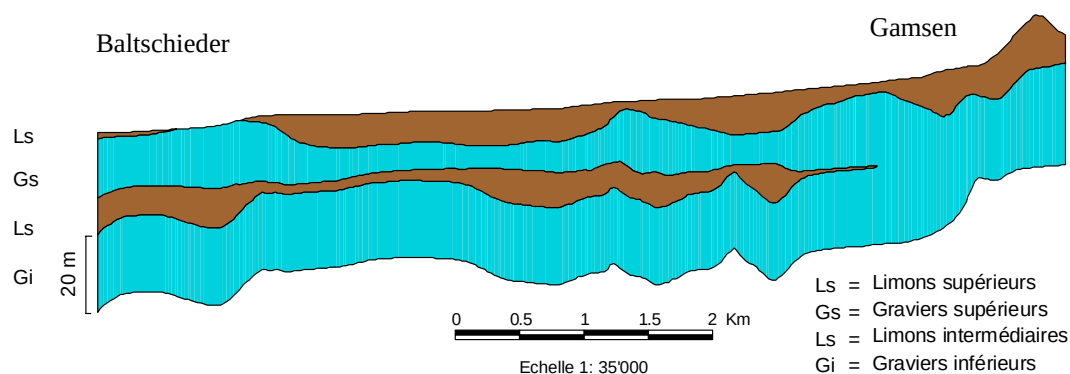


Figure 6 : Section 6 (cf. Fig 38) amont aval avec lithologie du complexe aquifère entre Gamsen et Baltschieder

complexe aquifère composé d'un bi-couche se transforme en un mono-couche, et finalement une couche de graviers inférieurs (Gi) dont l'épaisseur n'est connue qu'à quelques endroits. Dans le modèle 3-D construit en 1988 une couche d'une épaisseur moyenne de 20 m a été introduite [Bouzelboudjen & Király, 1988 ; Bouzelboudjen, 1991].

Les données structurales de base (mode vecteur points et raster) se composent donc : 1) de la surface topographique définie soit par le MNT (Modèle Numérique de Terrain de l'Office fédéral de la topographie), soit par les points cotés des différents piézomètres de la zone d'étude, 2) du mur des limons de surface, 3) du mur des graviers supérieurs, 4) du mur des limons intermédiaires et 5) du mur des graviers

inférieurs. Les cartes en isopaches pour chacune des formations sont également stockées. Sur la figure 35 sont consignés les plans d'information qui ont été utilisés pour la construction de la géométrie du modèle hydrodynamique 3-D. Ces plans d'information proviennent de la compilation des documents de J.-M Wicht [Clavien, 1987], M. Bouzelboudjen [1988, 1990], M. Geister [1988].

2.2.2 Mesures de piézométrie du complexe alluvionnaire

En principe les valeurs de piézométrie sont mesurées 2 fois par année, soit pendant les basses et hautes-eaux. C'est le CREALP qui se charge de la réalisation des tournées depuis 1999. Dans le modèle développé à Visp les basses-eaux 1992 et les hautes-eaux 1997 ont été retenues comme conditions aux limites du modèle hydrodynamique et comme valeurs de contrôle des calculs. La figure 7 montre

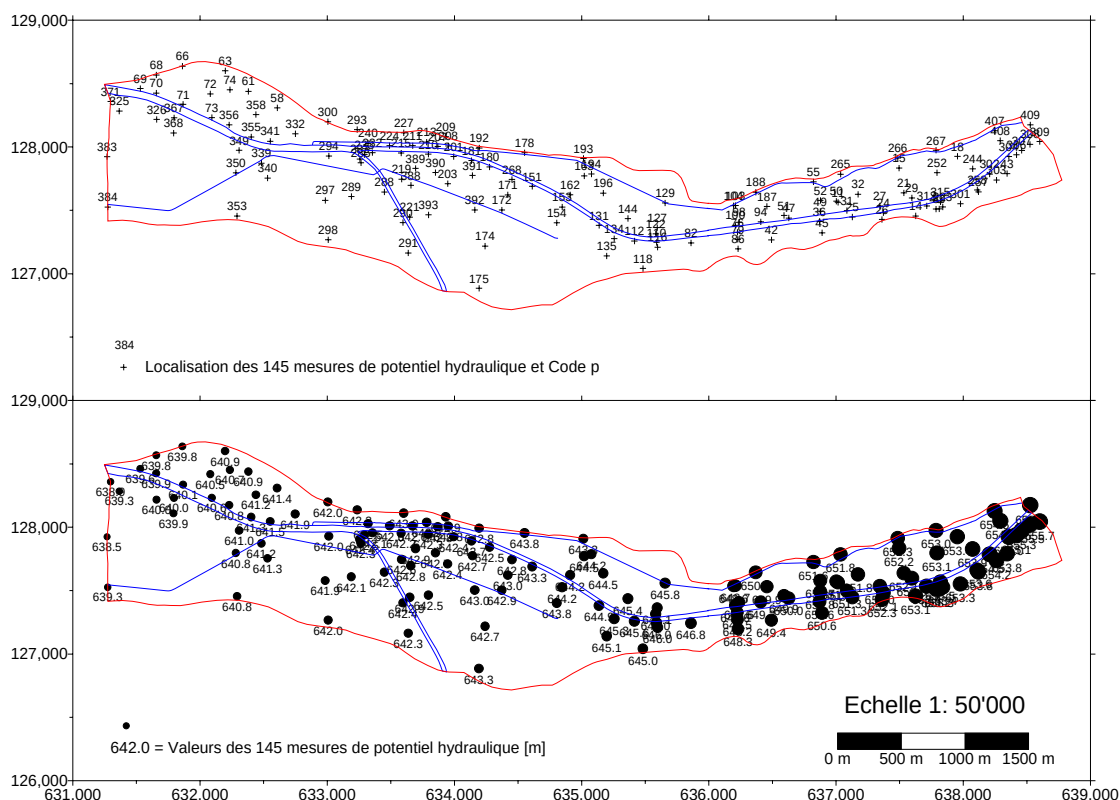


Figure 7 : Carte de la répartition et carte à symboles proportionnels des mesures de potentiel hydraulique (juillet 1997) des graviers supérieurs

respectivement la position des mesures de potentiel hydraulique des hautes-eaux 1997 et une représentation graphique de leurs valeurs sous forme d'une carte à symboles proportionnels. L'annexe 2 consigne les 145 valeurs de piézométrie et la figure 8 montre les statistiques descriptives de cette variable ainsi que son histogramme. Le gradient hydraulique dans cette région est relativement faible. La perte de charge sur une longueur d'environ 7.5 km est de 17.2 m ce qui donne un gradient de 2‰. Comme la perméabilité moyenne dans les graviers supérieurs est de 1.82×10^{-3} m/s, la vitesse moyenne de l'eau souterraine est de 3.6×10^{-6} m/s ou 3.1 m/j.

Les potentiels hydrauliques mesurés dans la formation graveleuse inférieure représentent moins de 10% des valeurs des graviers supérieurs. La carte piézométrique des graviers supérieurs de J.-M. Wicht [Clavien, 1987] montre la

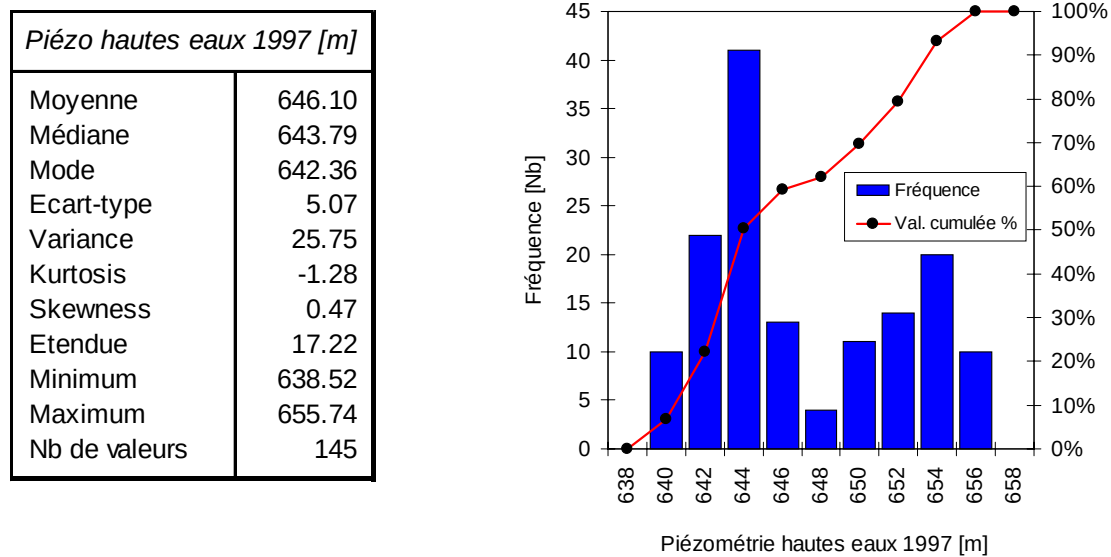


Figure 8 : Statistiques descriptives, histogramme et courbe de fréquence des 145 valeurs de potentiels hydrauliques mesurés lors de la campagne des hautes-eaux 1997 dans les graviers supérieurs

position et les valeurs des quelques mesures de potentiels hydrauliques dans les graviers inférieurs. Ces mesures montrent que la nappe des graviers inférieurs est en général mise en charge par les limons intermédiaires. En juillet 1988, pour le besoin du modèle 3-D [Bouzelboudjen & Király, 1988 ; Bouzelboudjen, 1991], Bianchetti a suivi les 7 forages aux limites amont et aval du modèle [Clavien, 1988]. Les résultats de cette campagne de terrain (mesures différenciées en profondeur de potentiels hydrauliques et de perméabilités) montrent que, si la mise en charge de l'aquifère inférieur est peu perceptible (à Lalden), ce n'est pas le cas 5 km plus bas en aval (à Baltschieder), où la mise en charge dépasse le mètre. On observe donc une drainance du bas vers le haut.

Les potentiels hydrauliques mesurés dans les limons supérieurs et intermédiaires sont très peu nombreux et les valeurs ne sont pas très fiables à cause des difficultés de la mise en œuvre des techniques de mesure [Clavien, 1988 ; Geotest, 1992].

1.1.1 Mesures de débits dans les canaux

Les débits mesurés dans les canaux de Brigerbad et de Grossgrund donnent des valeurs qui permettent de vérifier les résultats des calculs du modèle hydrodynamique. La fonction première de ces canaux étant de drainer les eaux souterraines de la plaine, on estime donc que l'eau présente dans ces canaux provient de la nappe phréatique. La figure 55 montre la position des points de mesure des débits sur les canaux de Grossgrund et de Brigerbad lors de la campagne des hautes-eaux 1997. Elle montre, aussi, pour chaque station, la valeur des débits mesurés ainsi que leurs valeurs corrigées en soustrayant les apports des émissaires naturels ou artificiels (industrie). La participation de chaque tronçon est également consignée. On remarque que certains tronçons peuvent être infiltrants alors que d'autres sont exfiltrants.

Les mesures de débits dans les canaux ont été réalisées en 1988, 1997 et 1999 [Clavien, 1988 ; Bouzelboudjen & Király, 1988 ; Ornstein, 1997, 1999 ; Teyssiere & Candolfi, 1999]. Les valeurs de 1997 ont été utilisées pour la vérification des résultats

du modèle 3-D. Elles ont été mesurées en même temps que la campagne de piézométrie des hautes-eaux de cette année et correspondent donc aux conditions aux limites imposées au modèle.

2.2.4 Valeurs de perméabilité

Le tableau 1 résume les valeurs de perméabilité ainsi que les statistiques descriptives pour chaque variable.

Méthode de mesure	Nombre de valeur	Moyenne $\times 10^{-4}$ [m/s]	Minimum $\times 10^{-4}$ [m/s]	Maximum $\times 10^{-4}$ [m/s]	Écart-type $\times 10^{-4}$ [m/s]
K-NICONP	95	19.10	0.120	93.20	18.80
K-NICONI	38	18.30	0.452	138.00	30.80
K-POMPC	19	23.30	2.680	98.00	26.90
K-POMPL	4	55.40	1.000	210.00	103.00
K-FLOWM	769	12.66	0.010	207.00	18.88

K-NICONP : Perméabilités mesurées par essais de pompage à niveau constant

K-NICONI : Perméabilités mesurées par essais d'injection à niveau constant

K-POMPC : Perméabilités mesurées par essais de pompage de courte durée (quelques heures)

K-POMPL : Perméabilités mesurées par essais de pompage de longue durée (2-3 jours)

K-FLOWM : Perméabilités mesurées par essais au flowmètre

Tableau 1 : Résumé des données de perméabilités à disposition dans les graviers supérieurs (état 1998) et sur l'ensemble du complexe alluvionnaire (méthode K-FLOWM)

Les valeurs de perméabilité des graviers supérieurs sont relativement «abondantes» en comparaison avec les mesures dans les graviers inférieurs. Elles sont mesurées à l'aide de plusieurs méthodes (Tab. 1). Seules les valeurs de perméabilités mesurées

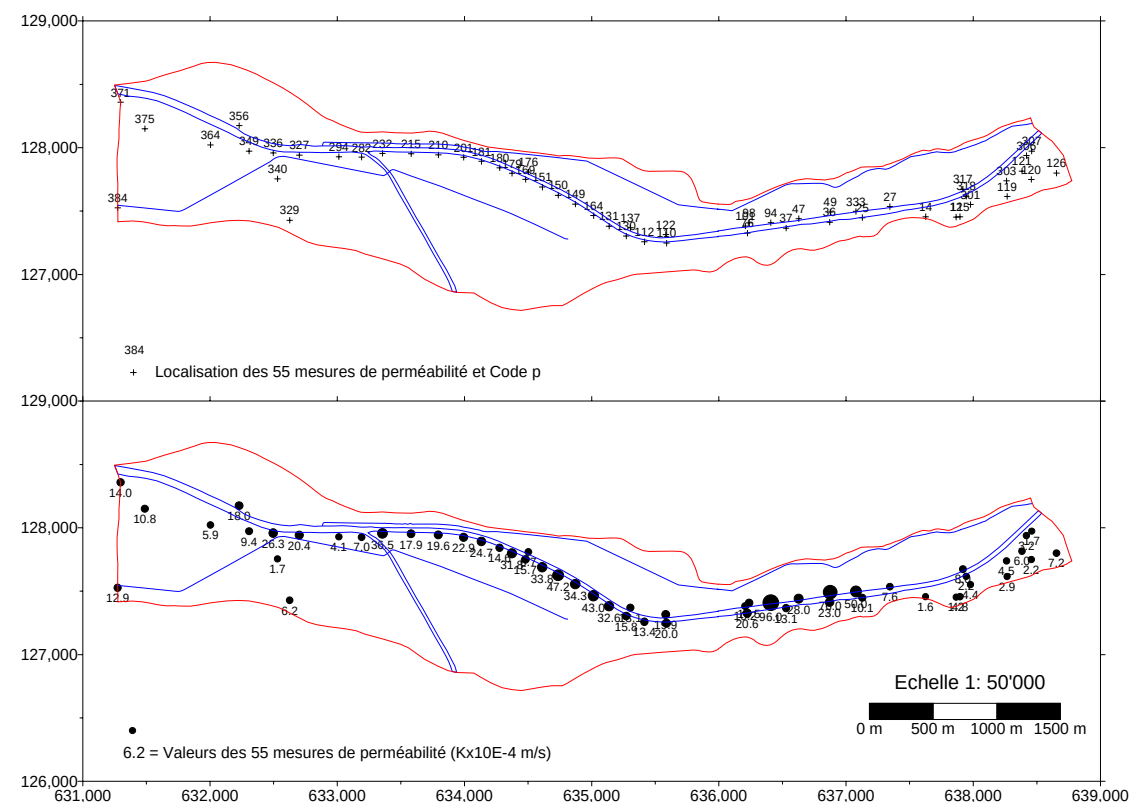


Figure 9 : Carte de la répartition et carte à symbole proportionnel des mesures de perméabilité moyenne des graviers supérieurs

par essais de pompage à niveau constant ont été retenues pour la modélisation 3-D, car elles sont plus nombreuses. Parfois, plusieurs mesures existent dans le même forage pour les graviers supérieurs à des niveaux différents. Une seule valeur moyenne a été retenue par forage, ce qui donne en définitive 55 valeurs sur toute la région de Visp. Les valeurs provenant de plusieurs méthodes n'ont pas été mixées. La figure 9 montre respectivement la position des mesures de perméabilité obtenues par essais de pompage à niveau constant, et une représentation graphique de leurs valeurs sous forme d'une carte à symboles proportionnels. L'annexe 3 consigne les 55 valeurs de perméabilité et la figure 10 montre les statistiques descriptives de cette variable ainsi que son histogramme. On peut remarquer que 58% des valeurs sont comprises entre 2.5 et 5×10^{-3} m/s, et que 98% sont comprises entre 0.25 et 5×10^{-3} m/s.

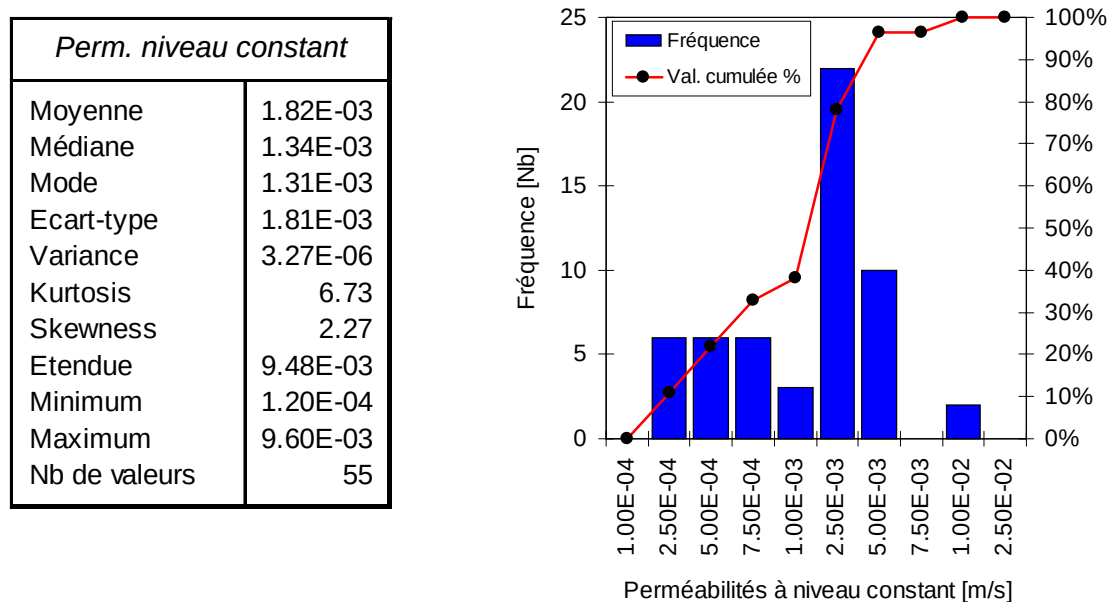


Figure 10 : Statistiques descriptives, histogramme et courbe de fréquence des 55 valeurs de perméabilité moyenne mesurées par essais de pompage à niveau constant

Les valeurs de perméabilité mesurées dans les limons supérieurs à l'aide d'essais de pompage sont rares et ne figurent pas dans le tableau ci-dessus. Cependant, 25 essais par infiltration ont été réalisés (Schmid, 1999 ; Teyssiere & Candolfi 1999 ; Ornstein & al., 1999). Les résultats donnent des valeurs de perméabilité comprises entre 6.9×10^{-4} et 3×10^{-7} m/s. Les valeurs de perméabilité mesurées dans les graviers inférieurs sont également peu nombreuses, elles sont du même ordre de grandeur que les valeurs des graviers supérieurs. Les valeurs de perméabilités des limons intermédiaires sont peu nombreuses. Néanmoins pour les besoins du modèle 3-D développé par Bouzelboudjen en 1988 [Bouzelboudjen & Király, 1988], la perméabilité des limons intermédiaires a été mesurée dans les 7 forages spécialement exécutés aux limites amont et aval de ce modèle. Ces forages ont été suivis par G. Bianchetti [Clavien, 1988]. Les valeurs moyennes sont comprises entre 2.3 et 6.5×10^{-4} m/s.

Pour palier au manque de valeurs dans les aquitards et les graviers inférieurs les 769 valeurs de perméabilité mesurées par flowmètre tous les mètres dans 30 forages de 4 pouces ont été traitées. La figure 11 montre la position des forages où ces mesures ont été effectuées et la figure 12 montre les statistiques descriptives de cette variable ainsi que son histogramme. On constate que 47% des valeurs sont comprises

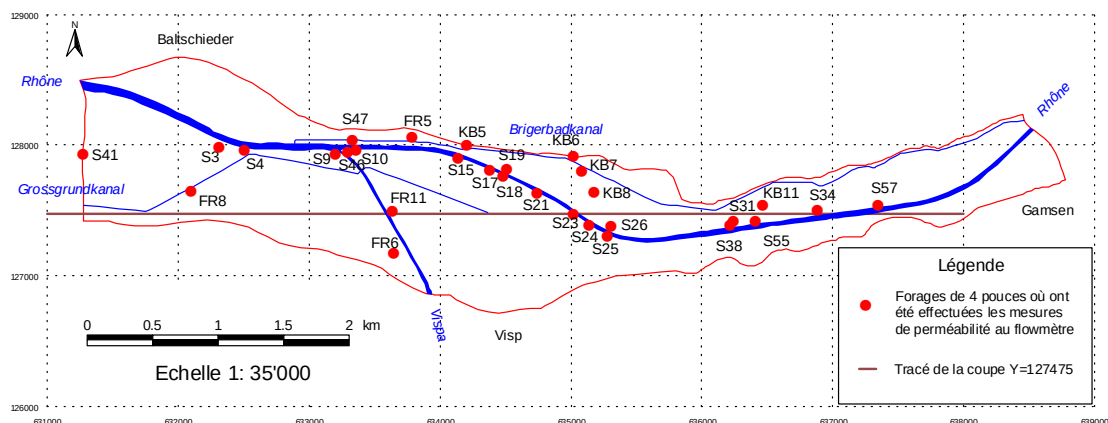


Figure 11 : Localisation des forages où des mesures verticales de perméabilité ont été effectuées tous les mètres avec la méthode au flowmètre et tracé de la coupe où des valeurs de perméabilités ont été extraites de la grille 3-D de l'estimation du champ des perméabilités. Les forages FR 5, 6, 8 et 11 ont été effectués dans le cadre du FN N° 2047-064.96 en 1998

entre 1 et 5×10^{-3} m/s. Les valeurs de perméabilité mesurées au flowmètre sont consignées dans l'annexe 4. Ces valeurs n'ont pas été utilisées dans la description de la méthodologie car sa mise en œuvre est relativement complexe et laborieuse. Par contre, une régionalisation 3-D par géostatistique de cette variable a été effectuée. Les résultats de ce travail sont présentés dans ce volume «Travel path uncertainty : a Swiss case study combining stochastic and deterministic hydrodynamic models in the Rhône valley, Switzerland» [Kimmeier & al., 2001d].

Perm.au flowmètre [m/s]	
Moyenne	1.26E-03
Médiane	5.57E-04
Mode	1.00E-04
Ecart-type	1.89E-03
Variance	3.56E-06
Kurtosis	27.95
Skewness	4.10
Etendue	2.07E-02
Minimum	1.42E-07
Maximum	2.07E-02
Nb de valeurs	769

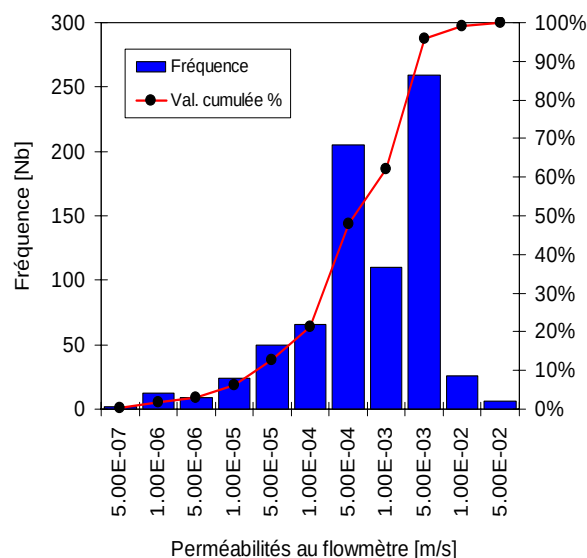


Figure 12 : Statistiques descriptives, histogramme et courbe de fréquence des 769 valeurs de perméabilité mesurées par flowmètre dans 30 forages de 4 pouces

2.2.5 Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques majeurs tels la température (T°), la conductibilité électrique à 20°C (K_{20}), les sulfates (SO_4^{--}), les chlorures (Cl^-), la duresse totale (Dt) et la teneur en oxygène dissous (O_2), sont intégrés dans la base de

données hydrogéologiques de Visp. Ces valeurs ne sont pas directement utilisées lors de la modélisation des écoulements souterrains, mais sont un atout précieux lors de la validation des résultats d'un modèle mathématique comme cela a été vu pour le modèle régional développé entre la Forêt Noire et le massif de l'Aar (voir dans ce volume «3-D Groundwater modeling at national scale» [Kimmeier & al., 2001e]).

A Visp, les caractéristiques physico-chimiques naturelles de l'eau de la nappe phréatique ont été fortement modifiées par la pollution d'origine minérale et organique issue de la décharge de la Lonza SA, à Gamsen et mise en évidence depuis 1978. Deux campagnes d'échantillonnage chimique ont été organisées en mars et août 1987 par Bianchetti [Clavien, 1988] dans le cadre du modèle 3-D de Bouzelboudjen & Király [1988], afin d'établir une cartographie du chimisme de la nappe. Environ 96 échantillons ont été analysés dans l'aquifère supérieur (Ann. 5). Les figures 14 à 19 présentent la répartition spatiale des 6 paramètres physico-chimiques suivants pour la campagne hautes-eaux 1987 : température [T°], conductibilité électrique à 20 °C $\mu\text{S}/\text{cm}$, sulfates [mg/l], chlorures [mg/l], dureté totale [°F], oxygène dissout [mg/l].

Statistiques Descriptives	T° [C°]	K ₂₀ [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	Dt [°F]	O ₂ [mg/l]
Moyenne	10.33	481.49	65.70	19.27	24.58	2.04
Médiane	10.15	425.00	42.00	6.35	21.70	1.60
Mode	9.40	300.00	10.00	2.30	14.80	1.70
Écart-type	2.46	274.67	60.72	35.97	14.86	1.89
Variance	6.07	75445.07	3686.43	1293.71	220.75	3.58
Kurtosis	-0.08	0.72	1.49	18.05	0.68	15.36
Skewness	0.30	0.98	1.54	3.84	0.99	3.32
Étendue	12.00	1350.00	236.80	240.90	68.20	13.20
Minimum	4.50	70.00	6.20	0.10	1.30	0.20
Maximum	16.50	1420.00	243.00	241.00	69.50	13.40
Nb de valeurs	86	94	86	88	87	86

Tableau 2 : Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques mesurés dans les graviers supérieurs en août 1987 [Bianchetti in Clavien, 1988]

Le tableau 2 liste les statistiques descriptives de ces paramètres qui correspondent à la campagne des hautes-eaux 1987.

La figure 13 montre la localisation des 96 valeurs mesurées lors de la campagne

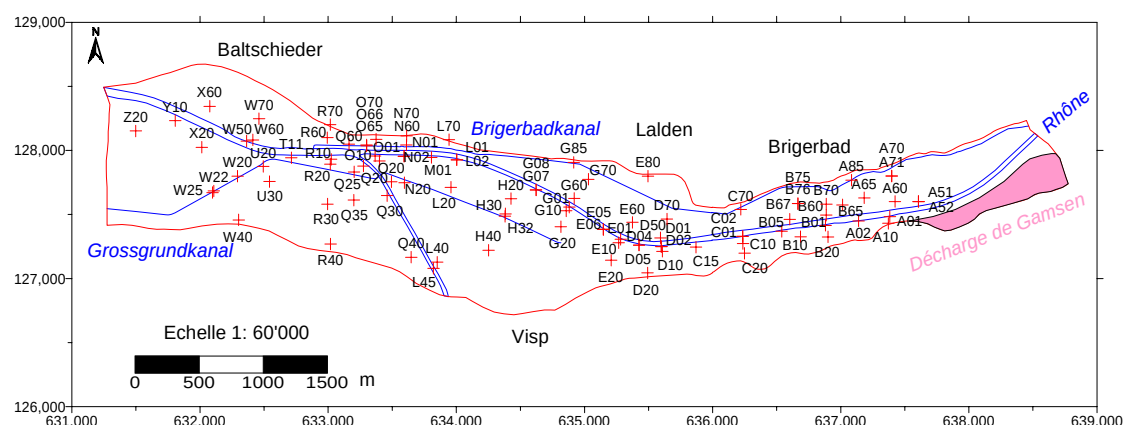


Figure 13 : Localisation des piézomètres où ont été effectuées les mesures de paramètres physico-chimiques dans les eaux souterraines au niveau des graviers supérieurs (août 1987)

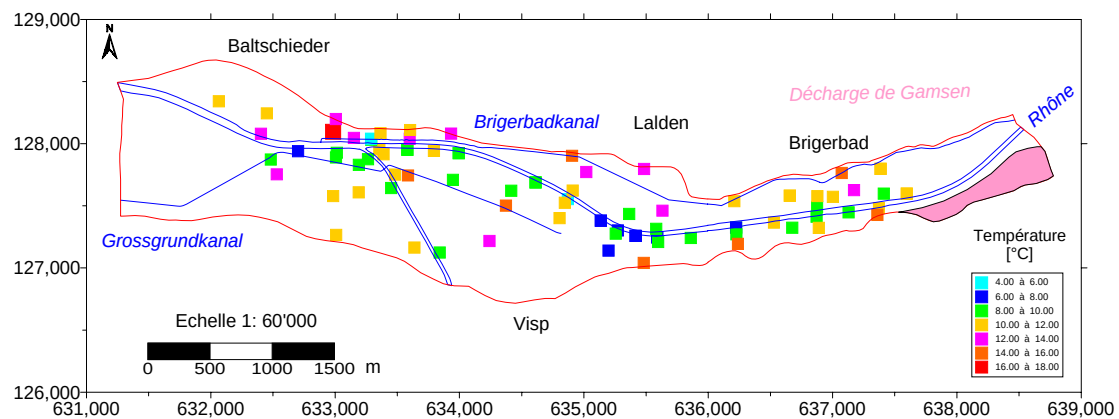


Figure 14 : Carte en points des mesures de température en degré Celsius [°C] des eaux souterraines (août 1987) au niveau des graviers supérieurs

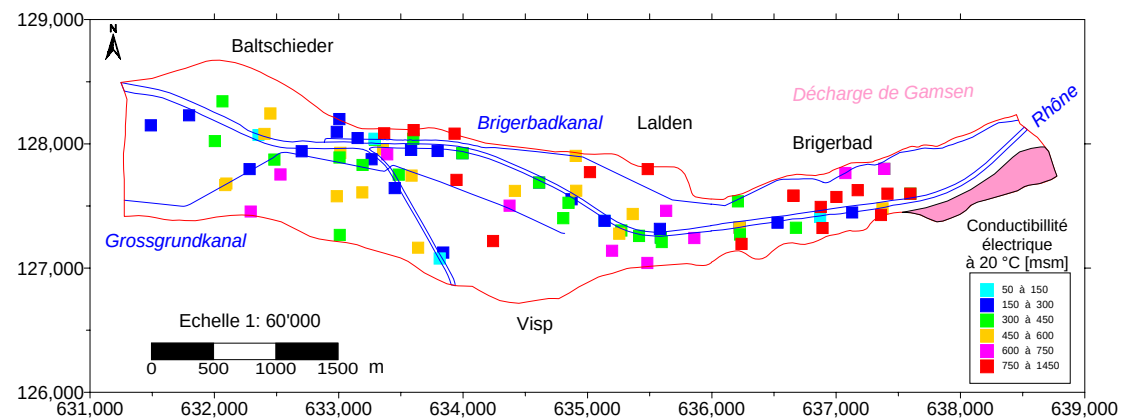


Figure 15 : Carte en points des mesures de conductibilité électrique à 20 °C en [msm/cm] des eaux souterraines (août 1987) au niveau des graviers supérieurs

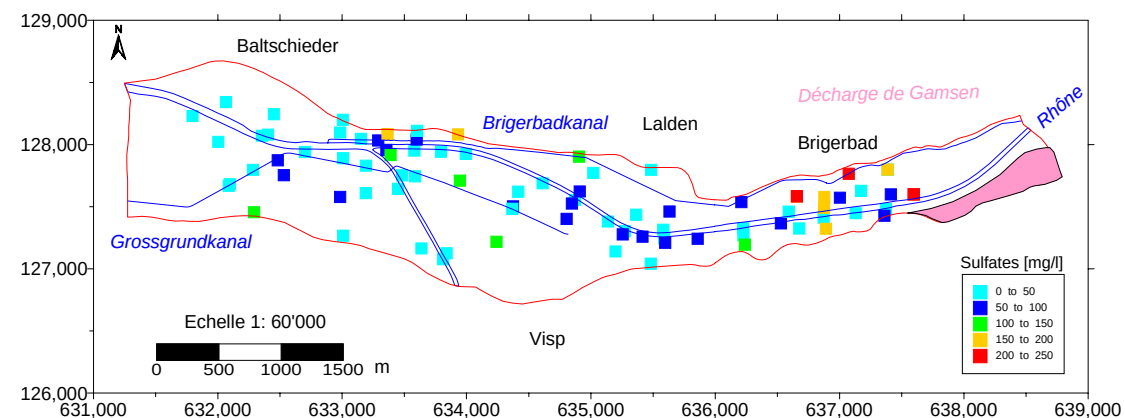


Figure 16 : Carte en points des mesures de sulfates en mg/l des eaux souterraines (août 1987) au niveau des graviers supérieurs

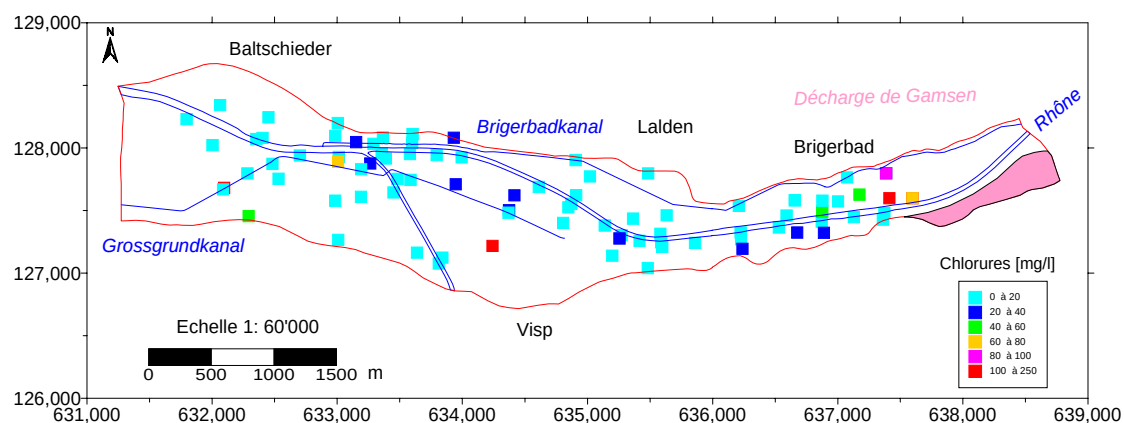


Figure 17 : Carte en points des mesures de chlorures en mg/l des eaux souterraines (août 1987) au niveau des graviers supérieurs

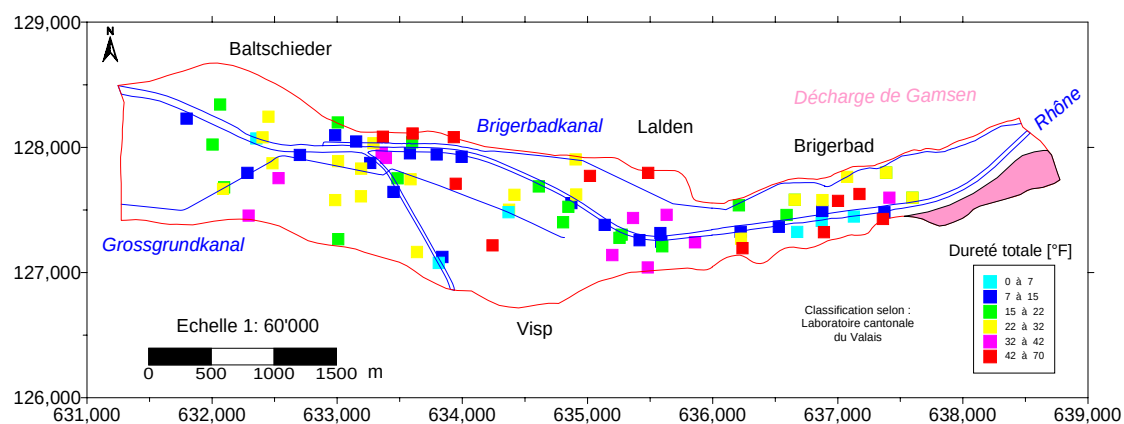


Figure 18 : Carte en points des mesures de dureté totale (Dt) en degrés français (°F) des eaux souterraines (août 1987) au niveau des graviers supérieurs

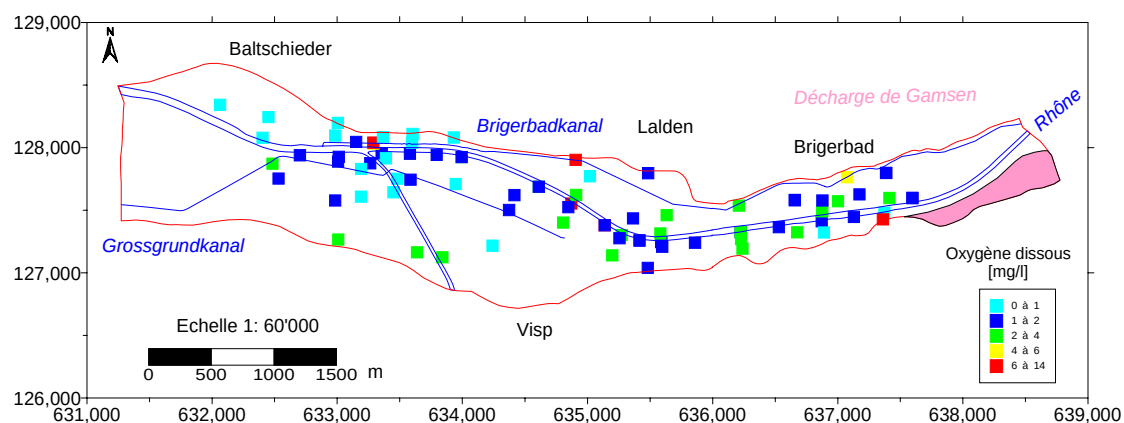


Figure 19 : Carte en points des mesures d'oxygène dissous (O2) en mg/l des eaux souterraines (août 1987) au niveau des graviers supérieurs

d'août 1987. Les figures 14 à 19 mettent en évidence les points importants suivants décrits par Bianchetti [Clavien 1988] :

1. infiltration des canaux dans la nappe (température Fig. 14, et conductibilité électrique Fig. 15) :
 - a) Brigerbadkanal : à l'Ouest de Lalden
 - le canal draine 60 l/s entre le point A85 et le petit pont situé 150 m à l'amont de C70 (tronçon de 870 m) ;
 - 60 l/s s'infiltrent dans la nappe sur le tronçon compris entre le petit pont situé à environ 140 m à l'aval de E72 et le point G85 (longueur 240 mètres).
 - b) Grossgrundkanal : entre H32 et N15
 - canal alimentant la nappe à raison de 80 l/s entre les points H32 et N15 (tronçon de 880 m) ;
 - canal drainant la nappe entre les points U15 et Y40 (200 l/s tronçon de 900 m).

Ces observations ont été confirmées par les jaugeages au moulinet effectués en juin 1988 (calculs des débits pour le calage du modèle 3-D [Bouzelboudjen & Király, 1988]).

2. progression de la nappe polluée par la décharge de Gamsen, jusqu'à l'ouest de Brigerbad, partiellement masquée en hautes-eaux, grâce aux infiltrations massives du Rhône qui diluent les polluants (carte des conductibilités électriques, sulfates Fig. 16, chlorures Fig. 17) ;
3. mise en évidence de la pollution de la nappe par les activités anthropogènes en ville de Visp (conductibilités électriques, chlorures) ;
4. infiltrations du Rhône entre Brigerbad et Baltschieder, qui provoquent une dilution des éléments chimiques (sulfates, chlorures, conductibilités électriques), une baisse de la température, de la dureté totale (Fig. 18) et une oxygénation de la nappe (Fig. 19). Ces infiltrations sont particulièrement importantes en période de hautes-eaux, notamment sur le tronçon Brigerbad - secteur Ouest de la Lonza. L'effet des pompages de la Lonza est très visible sur la carte de l'oxygène dissout : le Rhône qui s'infiltré massivement dans la nappe, provoque une oxygénation importante (Fig. 19) et une baisse de la minéralisation (Fig. 15).
5. anomalie thermique des versants. En observant la carte de température (Fig. 14), on s'aperçoit que la température de la nappe phréatique à proximité des versants dépasse en moyenne 12 °C, et localement 14 voire 16 °C (piézomètre L70). On peut admettre, dès lors, que la vallée du Rhône est caractérisée par une anomalie thermique régionale, confirmée d'ailleurs par la présence d'une source thermique (Brigerbad). Ce phénomène est confirmé par le gradient thermique anormalement élevé rencontré dans le forage profond [Geister, Burger, 1988].

2.2.5.1 Mesures temporelles de quelques paramètres physico-chimiques

Des mesures en continu des paramètres physico-chimiques de la nappe ont été effectuées à l'aide d'acquisiteurs automatiques (MADD). Ils ont été installés le long

d'une variante du futur tracé de l'autoroute N9 dans des puits spécialement aménagés (8 appareils). Ces MADD sont équipés d'une sonde à trois paramètres (pression, température et conductibilité électrique). Les paramètres pH, T° et K₂₀ sont mesurés également manuellement deux fois par an en même temps que la campagne de piézométrie et permettent de contrôler et de valider les données en continu.

Les données issues des enregistrements en continu (MADD) ont permis de mettre en évidence une très bonne liaison hydraulique entre la nappe phréatique et le Rhône, surtout en période de hautes-eaux. Les transmissions par pression sont rapides à proximité du fleuve, au maximum de quelques heures. Le Rhône montre de fortes variations journalières de niveau (>50 cm), qui se répercutent sur la nappe mais de manière amortie [Bianchetti in Clavien, 1988].

2.2.5.2 Sonde multi-paramètres : mesures verticales de quelques paramètres physico-chimiques

Les mesures verticales de quelques paramètres physico-chimiques comme la conductibilité électrique, la température, l'oxygène dissout, le pH, le potentiel Redox, la turbidité ont été intégrées dans la base de données. Ces valeurs ont été obtenues à l'aide d'une sonde multi-paramètres en octobre 1996 [Fröhlich, 1997] dans 9 piézomètres de 4 pouces (Fig. 20), et en décembre 1997, dans 23 piézomètres [Oukaci, 1997]. Ces mesures permettent d'appréhender les variations verticales de ces paramètres et de

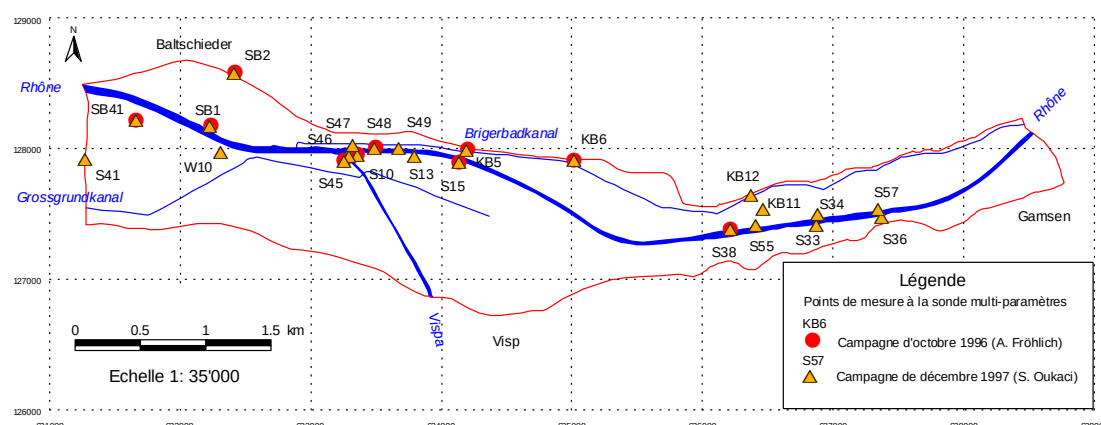


Figure 20 : Localisation des forages où ont été effectués les mesures verticales de paramètres physico-chimiques au cours des campagnes d'octobre 1996 et de décembre 1997

cartographier ainsi les zones d'infiltration et d'exfiltration, les relations du réseau hydrographique et des versants avec la nappe. Les distributions verticales de la conductibilité électrique, du pH et de la température pour le forage S38 sont comparées avec la distribution de la perméabilité et le log lithologique simplifié (Fig. 21).

Les mesures sans pompage montrent s'il existe un écoulement provoqué par la différence de pression entre deux ou plusieurs horizons aquifères. Souvent, lorsqu'on est en présence d'une circulation verticale, on n'observe pas de gradient de la température. Lorsqu'on rencontre un terrain perméable, le gradient thermique reste faible. Pendant le pompage, on peut observer les arrivées d'eau par une hausse ou une baisse des paramètres mesurés.

Seule une description succincte des résultats du piézomètre S38 (Fig. 21) est

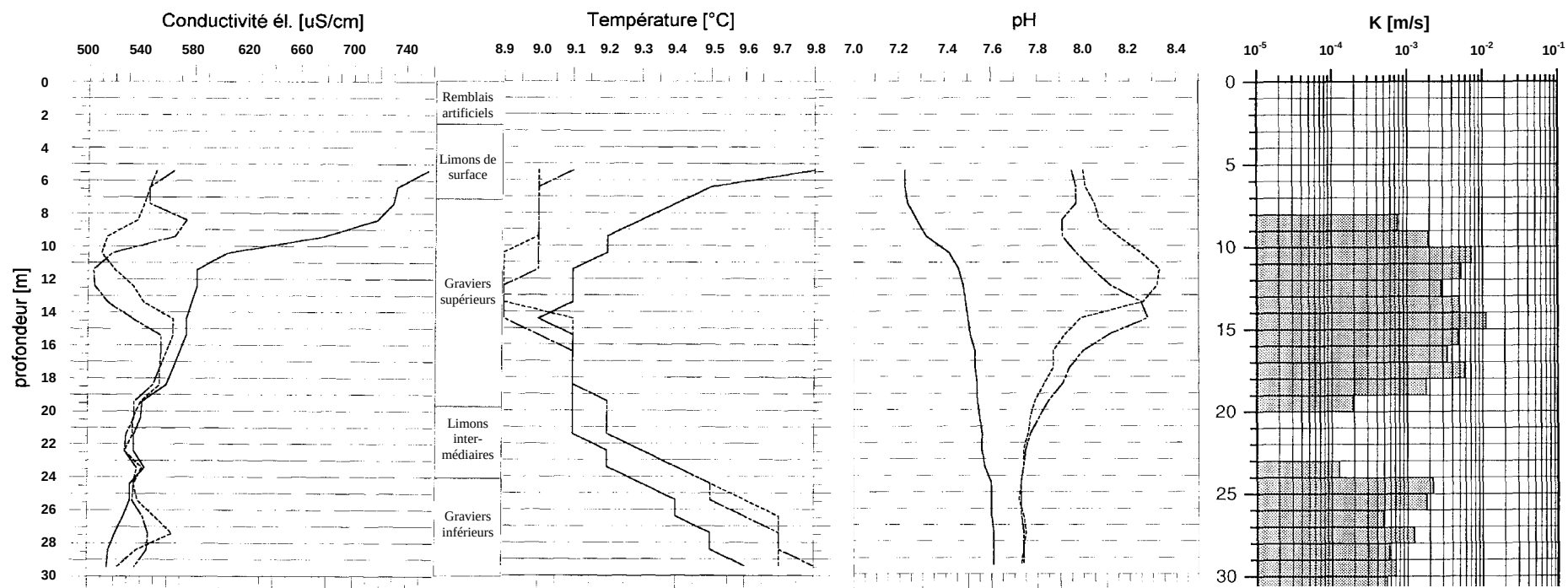


Figure 21 : Mesures de conductibilité électrique, de température et du pH dans le forage S38 (Eyholz) avant, pendant et après pompage (5 minutes) [Fröhlich, 1997] et mesures de perméabilité en m/s au flowmètre tous les mètres [Geotest, 1997]

présentée pour la campagne de 1996 [Fröhlich, 1997, Geotest, 1997 pour le log des perméabilités par essai au flowmètre].

Le piézomètre C65 dans le forage S38 est crépiné entre 6.5 et 20 m, puis entre 23.5 et 48 m de profondeur, respectivement dans les graviers supérieurs et inférieurs.

Au niveau des conductibilités électriques, les mesures pendant et après pompage montrent des valeurs inférieures d'environ 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre 8 et 15 m de profondeur. En comparant les valeurs obtenues avant et après pompage, on remarque un décalage de 1.5 m de l'anomalie vers le bas. Le même phénomène s'observe pour les températures et le pH.

Au delà de 15 mètres de profondeur, la conductibilité électrique reste assez stable (540 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Par contre, les températures augmentent régulièrement à partir de 23 m. Le pH se stabilise (pendant et après pompage) autour de 7.7.

A travers cette illustration de la répartition verticale des paramètres physique de la nappe, on constate que les graviers supérieurs et les graviers inférieurs sont nettement différenciés. On remarque sur la figure 21, la grande variabilité de la conductibilité électrique en fonction de la profondeur. En effet, ce paramètre varie de 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 6 m de profondeur contre 520 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 29 m. La même variabilité s'observe pour les autres paramètres. Une étude sur la répartition verticale (15 prélèvements le long de 24.5 mètres) de quelques paramètres physico-chimiques de l'aquifère alluvial de la plaine du Rhône dans la région de Pramont (Valais) a été effectuée [Ebener & al., 1998]. Les résultats obtenus (pour ce seul forage) montrent globalement trois tendances principales :

1. diminution des valeurs avec la profondeur pour le pH, la température, le potassium et les nitrates,
2. augmentation des valeurs avec la profondeur de la conductibilité électrique, du TSD, de l'ammonium, du magnésium, du calcium et des sulfates,
3. apparition de valeurs singulières en surface et en profondeur de sodium, de fluor et de chlorures.

Ces résultats, peu nombreux car coûteux, montrent que la connaissance verticale des paramètres physico-chimiques est importante dans la re-construction des systèmes d'écoulements souterrains.

2.2.5.3 Pollution des eaux souterraines par la décharge de Gamsen

La qualité de l'eau de la nappe est gravement affectée par la pollution de la décharge entre Gamsen et Lalden. Mme Geister a établi pendant plusieurs années (1979 à 1986) des cartes de zonation chimique pour la région comprise entre la décharge de Gamsen et l'usine de la Lonza [Geister & Burger, 1986]. Ces cartes concernent : l'aniline, le phénol, le pH, le TOC (Total Organic Carbon), l'ammonium, et les chlorures.

Grossièrement, dans cette zone, presque toutes les valeurs maximales admises sont largement dépassées. Les fourchettes consignées dans le tableau 3 ont été mesurées en période de basses-eaux 1987.

Éléments	Valeur max. [mg/l]	Valeur min. [mg/l]	Val. limite admise [mg/l]
Aniline	57.3	<0.01	0.01
Phénol	36.2	0.03	
Ammonium	713.0	1.60	0.5
Chlorures	525.0	2.20	200
Total Organic Carbon	767.0	1.50	
pH	12.5	7.70	9.2

Tableau 3 : Valeurs extrêmes de quelques paramètres de la qualité des eaux souterraines dans la région de Gamsen [Bianchetti in Clavien, 1988 ; Geister & Burger, 1986]

Ces valeurs sont inférieures en période de hautes-eaux, à cause de l'effet du Rhône qui s'infiltre massivement en diluant les éléments chimiques ; mais cette baisse n'est pas importante, car en cette période, le niveau piézométrique s'élève jusqu'à la partie inférieure de la décharge en entraînant les polluants.

A l'aval de Lalden, ces teneurs diminuent nettement, mais des foyers de pollution subsistent, notamment dans la zone de l'usine Lonza (aniline, chlorures, ammonium) et en ville de Visp (chlorures, ammonium).

2.3 Base de données spatiales en modes vecteur et raster environnementales et hydrogéologiques dans la région de Visp

Pour générer la base de données spatiales hydrogéologiques, ArcInfo et ArcView ont été utilisés comme Systèmes d'Information Géographique et MS Access comme système de gestion de base de données sur station de travail et ordinateur individuel. Actuellement, ArcInfo, ArcView et MS Access permettent de conserver, de traiter et de présenter les différents plans d'informations 2-D sous forme de tableaux et de

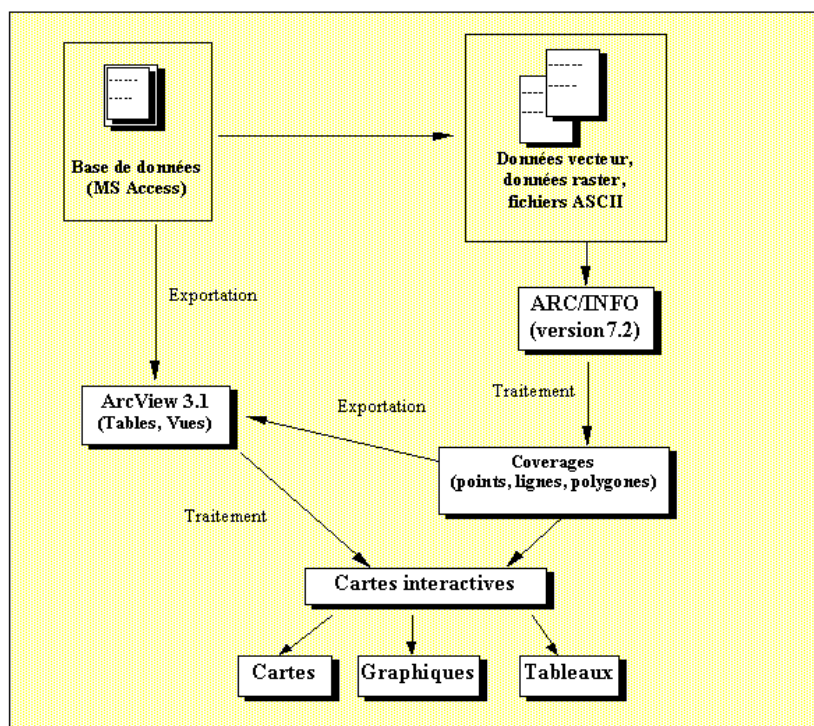


Figure 22 : Structure schématique de l'application Système d'Information Géographique

cartes (Fig. 24), et de profils (Fig. 39). La figure 22 montre schématiquement le processus de création de la base de données spatiales en modes raster et vecteur. Les données stockées sous MS Access (paramètres structuraux, hydrodynamiques et physico-chimiques) peuvent être directement accessibles par le SIG ArcView. Ce dernier peut également accéder à des données exportées de MS Access sous format Excel ou ASCII. Les données en modes raster ou vecteur, saisies par table à numériser ou scanner A3 ou A0, subissent un traitement dans ArcInfo permettant de les convertir en plans d'information 2-D appelés «coverages». Ces derniers sont exportés dans ArcView (SIG «end-user») afin de créer des applications simples et sorties graphiques. C'est ainsi que seul ArcInfo est capable de créer la topologie des entités points, lignes et polygones. La topologie est la description détaillée des relations entre les entités. Par exemple, un polygone sera défini par les arcs qui le composent et chaque arc sera défini par le premier et le dernier nœud qui le composent. De plus, pour chaque arc sera défini le polygone qui se trouve à sa gauche et celui qui se trouve à sa droite. C'est grâce à la topologie que des requêtes spatiales peuvent être effectuées ainsi que différents traitement sur les entités («clipping» extrait d'un plan d'information par exemple).

L'application TracES/View (voir dans ce volume «TracES/View - Traçage des Eaux Souterraines : Application SIG en milieu karstique jurassien (Suisse)» [Bouzelboudjen & al., 2001]) créée avec ArcView-MS Access permet de gérer les essais de traçages du canton de Neuchâtel. Cette application interactive est destinée à des non-initiés dans le domaine des SIG afin d'effectuer des requêtes spatiales et de présenter les résultats sous forme de tableaux, de graphiques et de cartes (Fig. 22). La figure 23 montre d'une manière simplifiée l'architecture d'un projet ArcView. Toutes les entités au sein de ce SIG sont liées dynamiquement : les tables numériques, les vues contenant les différents plans d'information, les graphiques (camemberts,

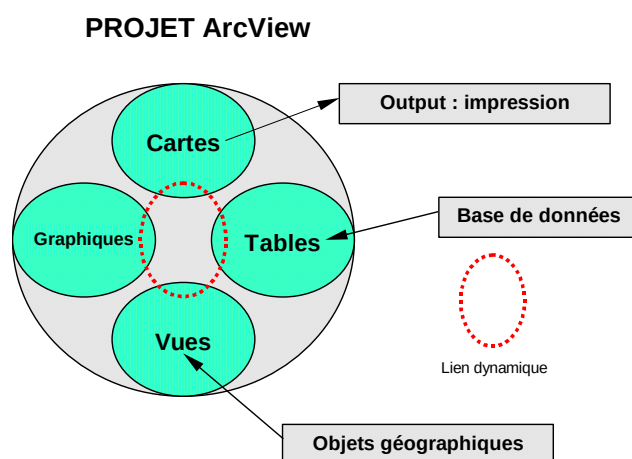
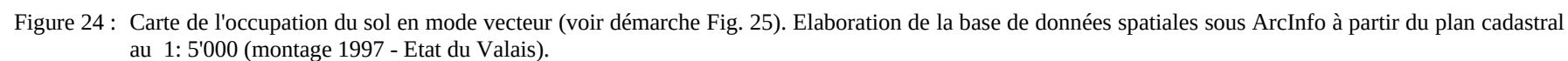


Figure 23 : Structure logique d'un projet ArcView (ESRI, 1996)

histogrammes, etc.) et les cartes prêtes pour l'impression. Par conséquent, toute requête sur l'une de ces entités ou toute modification se reflétera automatiquement sur les autres.

Le projet SIG Visp contient les données hydrogéologiques de base (paramètres structuraux, hydrodynamiques et hydrochimiques), également tous les plans



d'informations 2-D préparés sous ArcInfo comme l'occupation du territoire présenté en figure 24. Ce projet contient également toutes les sorties graphiques post-calculs de Feflow et permet de les présenter d'une façon professionnelle (Fig. 38, 39, 42 à 44, 46, 48 et 49, 57 et 65). La figure 24 montre l'exemple d'un plan d'information issu de la base de données spatiales constituée dans la région de Visp ; il s'agit de l'occupation du territoire en 43 modes dans la zone où le modèle 3-D a été construit, soit entre Gamsen et Baltschieder. La figure 25 montre sous forme graphique la démarche pour l'obtention de ce plan d'information en mode vecteur. La légende montre les différentes utilisations du sol avec la surface occupée par chacune d'elle en pour-cents obtenue automatiquement lors de la génération de la topologie des polygones constituant la carte. Le «coverage» occupation du sol a été élaboré à partir du plan cadastrale au 1 : 5'000. Cette démarche standard peut-être appliquée à tout plan d'information constitués de polygones (infiltrations, perméabilités, porosités, etc.). L'occupation du territoire est un plan d'information important qui a été utilisé dans le cadre de la génération de la carte des infiltrations et exfiltrations (Fig. 58) au 1 : 5'000 entre Baltschieder et Gamsen pour la phase II de la 3^{ème} correction du Rhône [Kimmeier & al., 2000]. Pour des travaux futurs concernant l'étude de la vulnérabilité des aquifères ou pour la constitution de cartes de risques il constituera, une pièce maîtresse grâce au degré élevé de précision.

Des fonctionnalités existent dans les SIG ArcInfo et ArcView pour le traitement des données continues régulièrement et irrégulièrement distribuées comme la

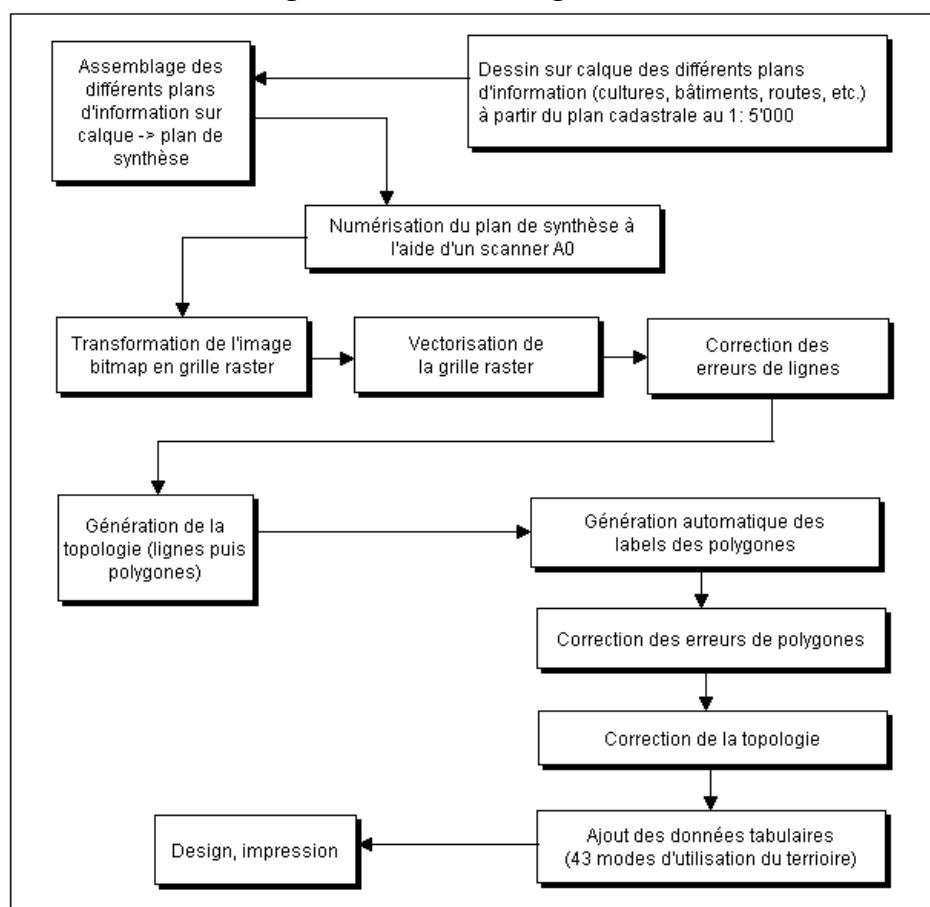


Figure 25: Démarche de l'élaboration de la base de données spatiales à partir du plan cadastrale au 1: 5'000 pour la carte de l'occupation du territoire entre Gamsen et Baltschieder.

pluviométrie, la topographie, les perméabilités, etc. Ces fonctions d'interpolation permettent de réaliser des cartes sous formes raster ou vecteur en isolignes comme le montre la figure 27. Elle met en évidence la problématique du choix du meilleur interpolateur des données, en fonction des mesures et de leur répartition.

Nous reportons le lecteur aux différents chapitres de ce volume pour les diverses applications des techniques SIG qui sont largement utilisées. Ces SIG sont devenus plus que des outils incontournables. Ils sont une façon d'appréhender des projets complexes aux données spatiales très hétérogènes avec la rigueur nécessaire. Ils ne remplacent pas le recours aux papiers millimétrés et calques si chers aux hydrogéologues, mais permettent de conserver les données brutes et interprétées sous forme électronique moderne.

3. APPROCHE GÉOSTATISTIQUE - LA MODÉLISATION ENVIRONNEMENTALE OU RE-CONSTRUCTION DES CHAMPS DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES

Afin de construire un modèle hydrodynamique cohérent, certaines variables comme la lithologie et la perméabilité connues seulement localement, doivent être régionalisées avant d'être introduites dans le modèle. Dans cette partie nous ne décrirons pas en détail les méthodes d'interpolation statistiques et géostatistiques. Le lecteur qui désire approfondir ses connaissances en la matière est prié de se reporter aux travaux des auteurs suivants : Chauvet, Chilès, Delhomme, Davis, Isaaks, Kitanidis, et Matheron (voir références). Néanmoins, les méthodes géostatistiques (krigeage ordinaire et simulations conditionnelles) appliquées aux données hydrogéologiques dans la région de Visp (perméabilité, transmissivité et potentiels hydrauliques) sont décrites dans l'article «Travel path uncertainty : a case study combining stochastic and deterministic hydrodynamic models in the Rhône valley, Switzerland » dans ce volume.

La présentation des données sous une forme cartographique permet de donner rapidement une idée de la variation d'un paramètre dans l'espace. Cependant, comme le note le Guide des Pratiques Hydrométéorologiques de l'O.M.M. in Delhomme [1976], «si l'on ne dispose que d'une information peu abondante, la carte présentera, dans une certaine mesure, une interprétation subjective des données et on risque d'ignorer partiellement ou totalement les différents degrés de subjectivité qui se rapportent aux diverses parties de la carte, ce qui produira des résultats dont la précision apparente dépassera de beaucoup la précision réelle». Cette difficulté à quantifier la précision se retrouve lorsqu'on doit estimer, à partir des données, les valeurs moyennes prises par un paramètre, sur chacune des mailles d'un modèle mathématique discrétisé.

La plupart des méthodes utilisées couramment pour répondre aux besoins de la cartographie et de l'estimation de moyennes spatiales ne permettent pas d'accéder à la moindre indication sur l'incertitude du résultat : seules le permettent les méthodes prenant en compte la variabilité des phénomènes étudiés.

3.1 Méthodes usuelles d'interpolation

Quand les données sont abondantes, la plupart des techniques d'interpolation donnent des résultats similaires ; mais quand les données sont dispersées, les hypothèses faites sur les variations sous-jacentes, ainsi que le choix des méthodes et

de leurs paramètres, peuvent être critiques à déterminer si on veut éviter des résultats erronés [Burrough, 1998]. L'inverse de la distance ou une simple triangulation donnera d'aussi bons résultats qu'une méthode plus sophistiquée comme le krigeage. A l'inverse, il est illusoire de vouloir estimer raisonnablement le champ d'une variable à l'aide de données groupées («clustérisées») et dont la variabilité est grande. En d'autres termes si la variabilité locale est plus grande que la variabilité régionale, il n'est pas possible d'estimer notre variable sans commettre de grosses erreurs d'estimation. Ces méthodes sont intéressantes dans une première approche lorsqu'on veut par exemple se faire une idée de la répartition d'une variable ou encore pour valider rapidement un jeu de données. Une méthode rapide comme l'inverse de la distance va faire ressortir immédiatement les données extrêmes qui pourront être alors examinées par l'hydrogéologue qui les rejettera ou au contraire les gardera après validation. Par contre ces méthodes ne donnent aucun renseignement sur l'erreur d'estimation elles sont bien décrites par des auteurs comme Delhomme [1976], Davis [1986], Isaaks & al. [1989], Burrough [1998].

3.2 Méthode optimale d'interpolation - La géostatistique

Les débuts de la géostatistique sont d'inspiration exclusivement minière. C'est pour pallier les insuffisances des statistiques «classiques» constatées dans l'étude des gisements très disséminés, que sont élaborées, au début des années 50, des méthodes d'estimation nouvelles. Le néologisme «krigeage», en hommage à D.G. Krige et ses travaux sur les minerais d'or d'Afrique du Sud, reste pour rappeler cette rencontre entre une technique mathématique de régression et les problèmes très concrets d'exploitation des mines d'or [Chauvet, 1992]. Une des richesses de la Géostatistique est de ne pas être tributaire d'un champ d'application particulier.

La géostatistique permet de mettre en évidence les caractéristiques des variables étudiées (perméabilités, transmissivités, etc.) et les décrit mathématiquement, afin de mettre en œuvre un estimateur (krigeage) qui les prenne en compte. Le travail d'interrogation des données, puis de modélisation de leurs propriétés structurales, constitue, sous le nom d'Analyse Variographique, la phase initiale incontournable de toute étude concrète de géostatistique.

La géostatistique permet également une évaluation de la «qualité» des estimations et par conséquent, des cartes obtenues. La qualité d'un estimateur est une notion abstraite qui procède d'un choix arbitraire. Il faut donc convenir, a priori, d'un critère de qualité. Un critère possible est, par exemple, l'écart-type d'estimation. Schématiquement, une valeur estimée est d'autant plus fiable que son écart-type d'estimation est faible [Chauvet, 1992]. Cet écart-type dépend de la structure propre à la variable étudiée, mais aussi de la configuration de l'échantillonnage. Ce critère est particulièrement simple d'utilisation, et constitue d'ailleurs la pierre angulaire de la géostatistique. On peut aussi l'utiliser pour aller plus loin et s'interroger, par exemple, sur la stratégie des campagnes de reconnaissance, sur l'implantation optimale d'un complément d'information, ou encore sur l'impact d'une incertitude de localisation des sondes. On peut aborder des problèmes notablement plus complexes : définir par exemple des probabilités de hauts-fonds ou des intervalles de confiance sur la carte des bathymétries, ou s'interroger sur la longueur d'un câble sous-marin qui reposerait sur le fond entre deux points désignés, ou encore, s'interroger sur l'influence de la variabilité spatiale de la transmissivité sur la dispersion de polluants dans les eaux souterraines (voir «Travel path uncertainty : a case study combining stochastic and

deterministic hydrodynamic models in the Rhône valley, Switzerland» dans ce volume). Dans un autre ordre d'idées, on peut vouloir relier les paramètres issus de l'Analyse Variographique à des phénomènes géologiques, et donc envisager une analyse interprétative des données. On peut aussi s'aider de l'Analyse Variographique pour comparer des méthodes d'échantillonnage [Chauvet, 1992].

Le but de tout traitement géostatistique de données spatiales, dans le but de modélisation hydrodynamique des eaux souterraines, est d'estimer les variables K , T ,

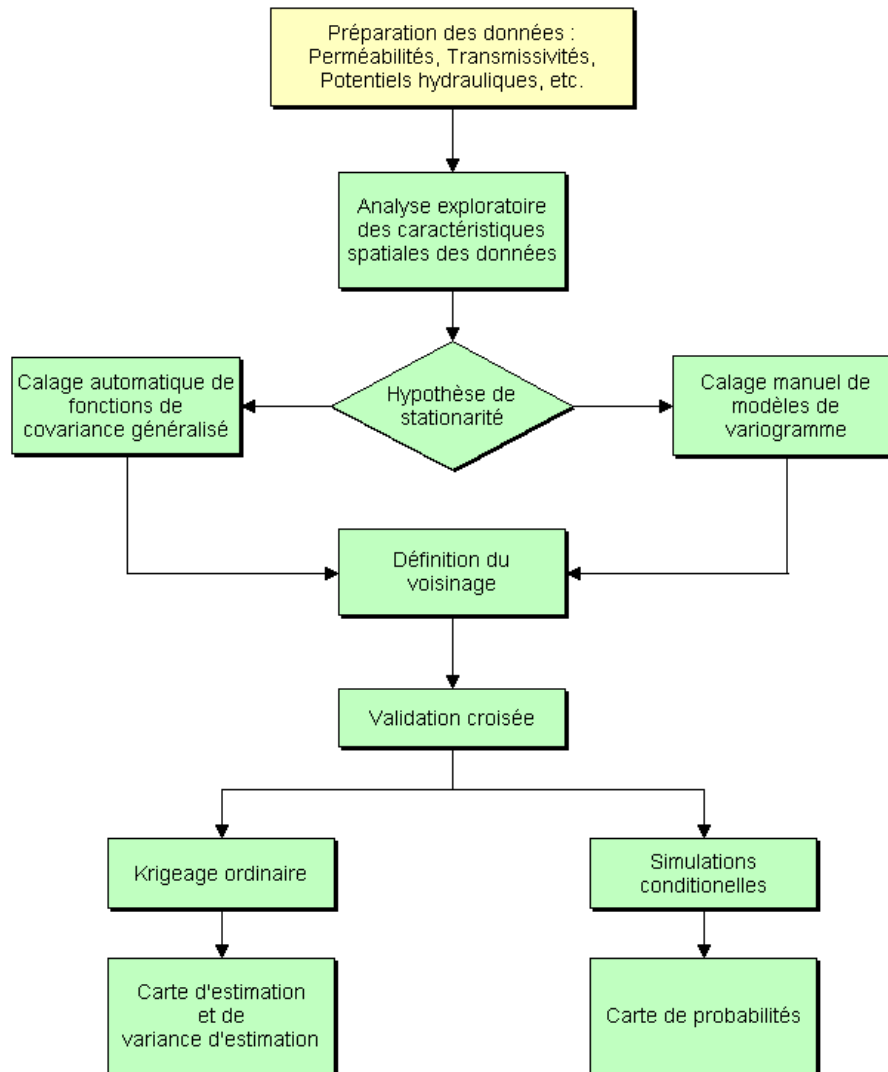


Figure 26 : Procédure de traitement spatial des données hydrogéologiques avec une approche géostatistique dans le but de modélisation hydrodynamique

S , m_e en tous points de l'espace à modéliser. En effet, les modèles hydrodynamiques ont besoin pour fonctionner de champs continus. La figure 26 montre un organigramme simplifié des différentes étapes conduisant à l'obtention de ces champs.

3.3 Re-construction des champs des variables K, T et H

Nous avons vu l'importance pour l'hydrogéologue d'obtenir des champs continus pour les variables qui seront utilisées par le modèle hydrodynamique. Si dans le cadre du modèle régional de la Cédra [Kimmeier & al., 1985], les mesures de H et de K étaient trop peu nombreuses pour effectuer une régionalisation des données, ce n'est pas le cas pour l'instrument 3-D développé dans le cadre du Fonds national. La régionalisation des mesures de K, T et H est décrite ci-dessous.

3.3.1 Re-construction du champ des perméabilités 2D

Les valeurs de perméabilité obtenues par essai de pompage à niveau constant ont été retenues pour la re-construction du champ des perméabilités 2-D, car elles sont les plus nombreuses (Tab. 1). C'est délibérément que les valeurs obtenues avec des

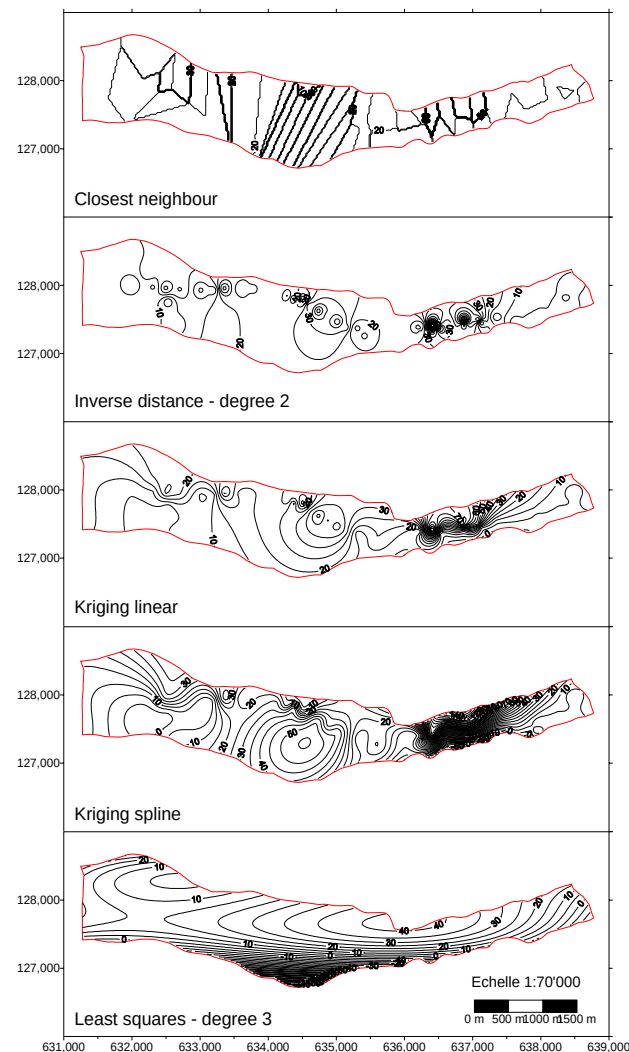


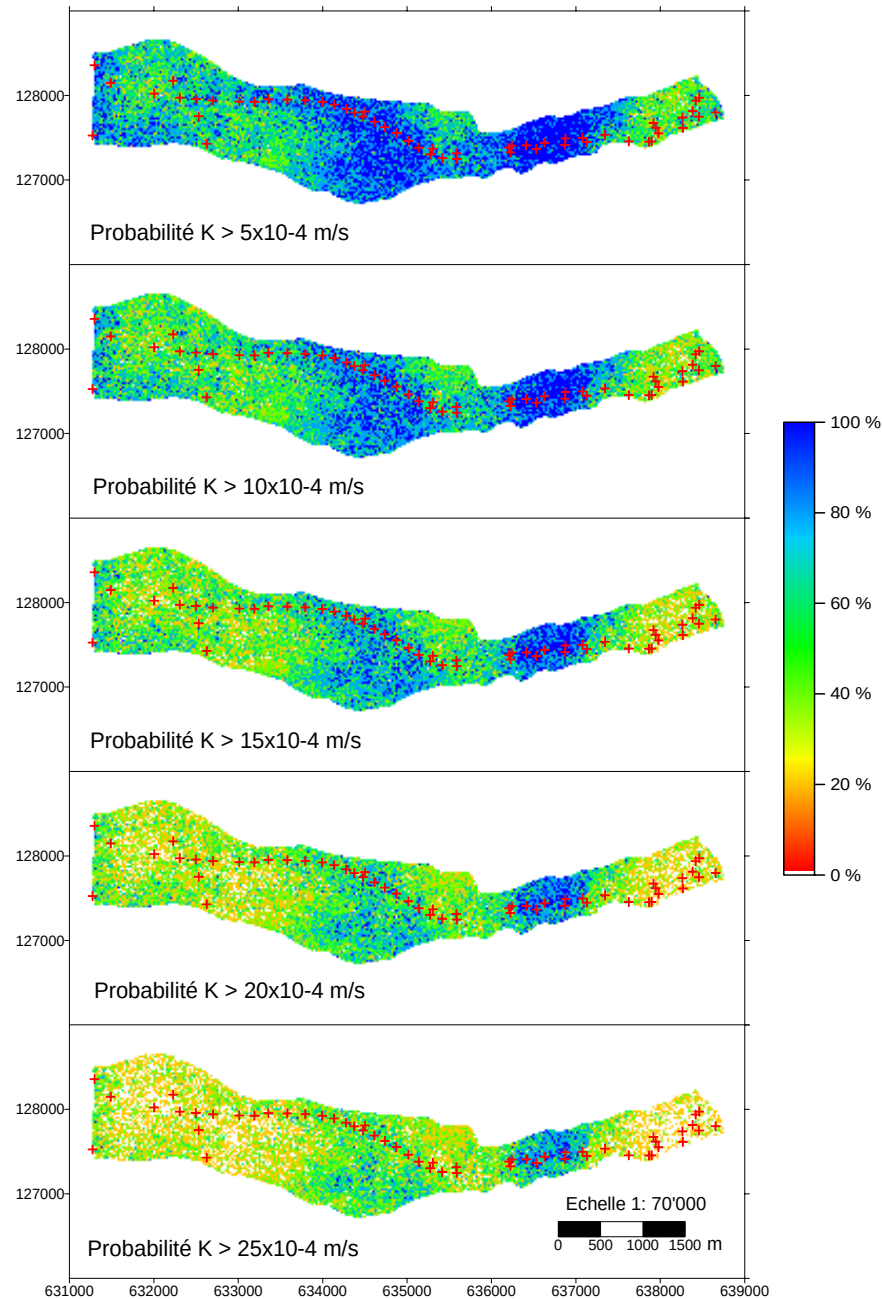
Figure 27 : Comparaison de différents interpolateurs appliqués aux mesures de perméabilités des graviers supérieurs ($K \times 10^{-4}$ m/s)

méthodes différentes n'ont pas été mélangées. La figure 9 montre la répartition des valeurs de K dans la zone de Visp dans le périmètre du modèle hydrodynamique ainsi qu'une représentation des valeurs par symbole proportionnel. Les 55 valeurs moyennes de K ont été traitées par géostatistique (cf. Ann. 3). On remarque que les mesures sont surtout concentrées le long du Rhône alors que d'autres régions ne présentent aucune mesure. Les valeurs de K ont été estimées sur une grille régulière de 25 x 25 mètres en utilisant 5 interpolateurs différents. Du fait de la mauvaise répartition des mesures, les résultats sont très différents (Fig. 27). Ces méthodes d'interpolation ne donnent aucune indication sur l'erreur d'estimation et par conséquent, il est difficile de déterminer qu'elle est la meilleure. C'est pourquoi nous avons préféré utiliser la théorie des variables régionalisées pour estimer les champs de toutes nos variables et par conséquent les valeurs de K ont été transformées en $\text{Log}_{10} K$ de la même manière que pour la transmissivité. Dans ce chapitre, le traitement du $\text{Log}_{10} K$ n'est pas montré car similaire à celui du

$\text{Log}_{10} T$ décrit dans «Travel path uncertainty: a Swiss case study combining stochastic and deterministic hydrodynamic models in the Rhône valley, Switzerland» [Kimmeier & al., 2001d] dans ce volume. Cependant, nous montrons en figure 28

cinq cartes de probabilité pour cinq seuils de valeurs de perméabilité. Ces cartes résultent du traitement géostatistique par simulations conditionnelles en utilisant la méthode des bandes tournantes (1000 bandes).

Figure 28 : Carte de probabilités des perméabilités des graviers supérieurs (grille 25mx25m)



3.3.2 Re-construction du champ des perméabilités 3D

L'approche décrite ci-dessus suppose une schématisation préalable de la zone à étudier et la construction d'un modèle tenant compte de cette schématisation (subdivision du terrain 3-D selon sa lithologie). Cette démarche introduit forcément une part de subjectivité, car le schéma simplifie toujours la réalité. Il pourrait être intéressant de s'affranchir de ce schéma et par conséquent, de ne considérer la succession des différents terrains rencontrés lors d'un forage qu'en terme de

conductivité hydraulique. Cette démarche particulière est rendue possible dans notre région grâce à la présence de 30 forages répartis d'une manière plus ou moins homogène sur la zone d'étude (Fig. 11) et dans lesquels des mesures de K ont été effectuées tous les mètres avec la méthode du flowmètre. Nous obtenons ainsi 769 valeurs (cf. Ann. 4) réparties verticalement. Les K ont été transformées en log K. Un variogramme omnidirectionnel a été calculé et un modèle sphérique a été calé sur ce variogramme expérimental. La figure 8 de l'article «Travel path uncertainty : a Swiss case study combining stochastic and deterministic hydrodynamic models in the Rhône valley, Switzerland» [Kimmeier & al., 2001d] montre le résultat de ce traitement sous forme d'un écorché d'un bloc diagramme 3-D (grille de 25 x 25 x 1 m) avec la position de toutes les mesures. La figure 9 de ce même article montre un extrait 2-D de la répartition des K, selon la coupe dont le tracé se trouve sur la figure 11. Il est intéressant de remarquer que notre schéma lithologique (Fig. 6) constitué par la succession de 4 couches est reproduit par cette estimation 3-D. Dans le futur, il serait intéressant de traiter ces données en considérant des variogrammes directionnels tenant compte des phénomènes d'anisotropie 3-D.

3.3.3 Re-construction du champ des potentiels et effet d'échelle sur la précision de l'estimation. Résultats des approches multi-échelles (6.5 km² à 252 km²)

Depuis de nombreuses années dans le canton du Valais des mesures régulières de potentiel hydraulique sont effectuées deux fois par année au cours des basses-eaux (BE) et des hautes-eaux (HE) dans plus de 1200 piézomètres situés dans la vallée du Rhône depuis Brig jusqu'au lac Léman (Fig. 2). Les valeurs de potentiel hydraulique de la campagne HE 97 ont été traitées à différentes échelles pour reconstituer la piézométrie d'une manière continue. Les zones étudiées sont les suivantes :

- de Baltschieder à Gamsen, 145 valeurs (environ 8 km de long et 6.5 km²),
- de Sierre au Lac Léman, 632 valeurs (environ 70 km et 206 km²),
- de Brig au Lac Léman, 1160 valeurs (environ 100 km et 252 km²).

Seules les valeurs du réseau de surveillance concernant les eaux souterraines ont été retenues ; par conséquent, toutes les valeurs concernant les eaux de surface (Rhône et canaux) ont été écartées du traitement. Comme la piézométrie est un phénomène typiquement non-stationnaire, nous avons estimé le champ des potentiels à différentes échelles en utilisant les fonctions de covariances généralisées. Les résultats de ces trois approches (Fig. 29, 30 et 31) montrent que plus la zone étudiée est grande, plus l'erreur d'estimation est grande. Dans la zone de Visp (6.5 km²), l'erreur moyenne d'estimation de krigeage se situe autour de 0.20 m, alors que pour l'estimation des potentiels couvrant toute la vallée, la moyenne de l'erreur se situe au environ de 1.10 m. Par conséquent, une estimation à grande échelle ne pourra pas être utilisée dans le cadre de travaux locaux de modélisation ; seule une estimation plus fine sera valide. De plus, même à grande échelle, une carte krigée ne recrée pas les relations complexes entre la nappe aquifère et le réseau hydrographique. Il est vain de penser que l'on peut complètement automatiser le traitement de cette variable. L'intervention de l'hydrogéologue est nécessaire dans les zones sensibles afin de ne pas introduire dans le modèle hydrodynamique des données erronées qui seront lourdes de conséquences dans le calcul des débits d'exfiltration ou d'infiltration dans le réseau hydrographique de la zone à étudier. Des techniques sophistiquées sont de plus en

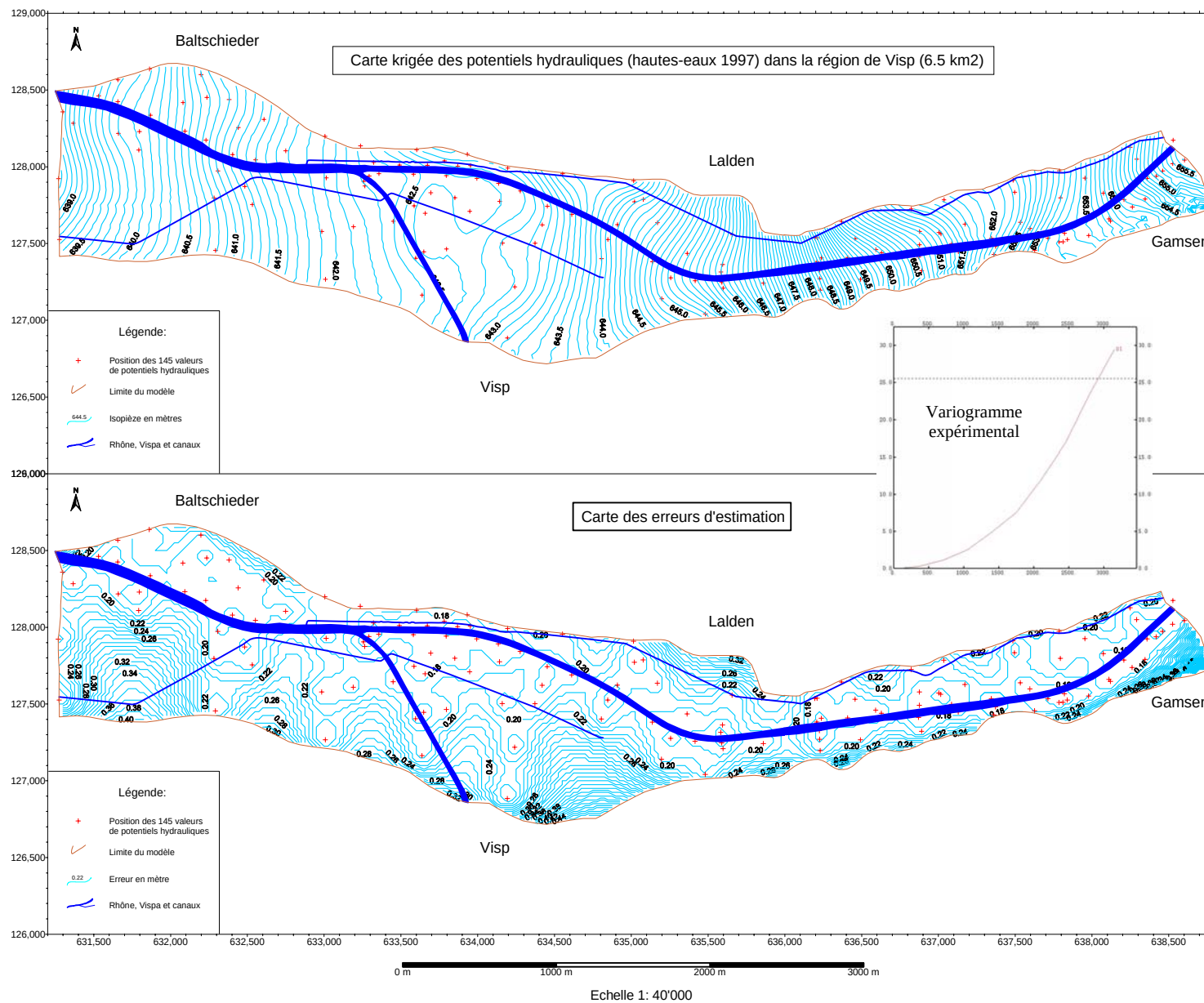


Figure 29 : Carte des potentiels hydrauliques estimés par la méthode des covariances généralisées et carte des erreurs d'estimation. Mesures effectuées dans l'aquifère des graviers supérieurs de la plaine du Rhône entre Gamsen et Baltschieder (juillet 1997).

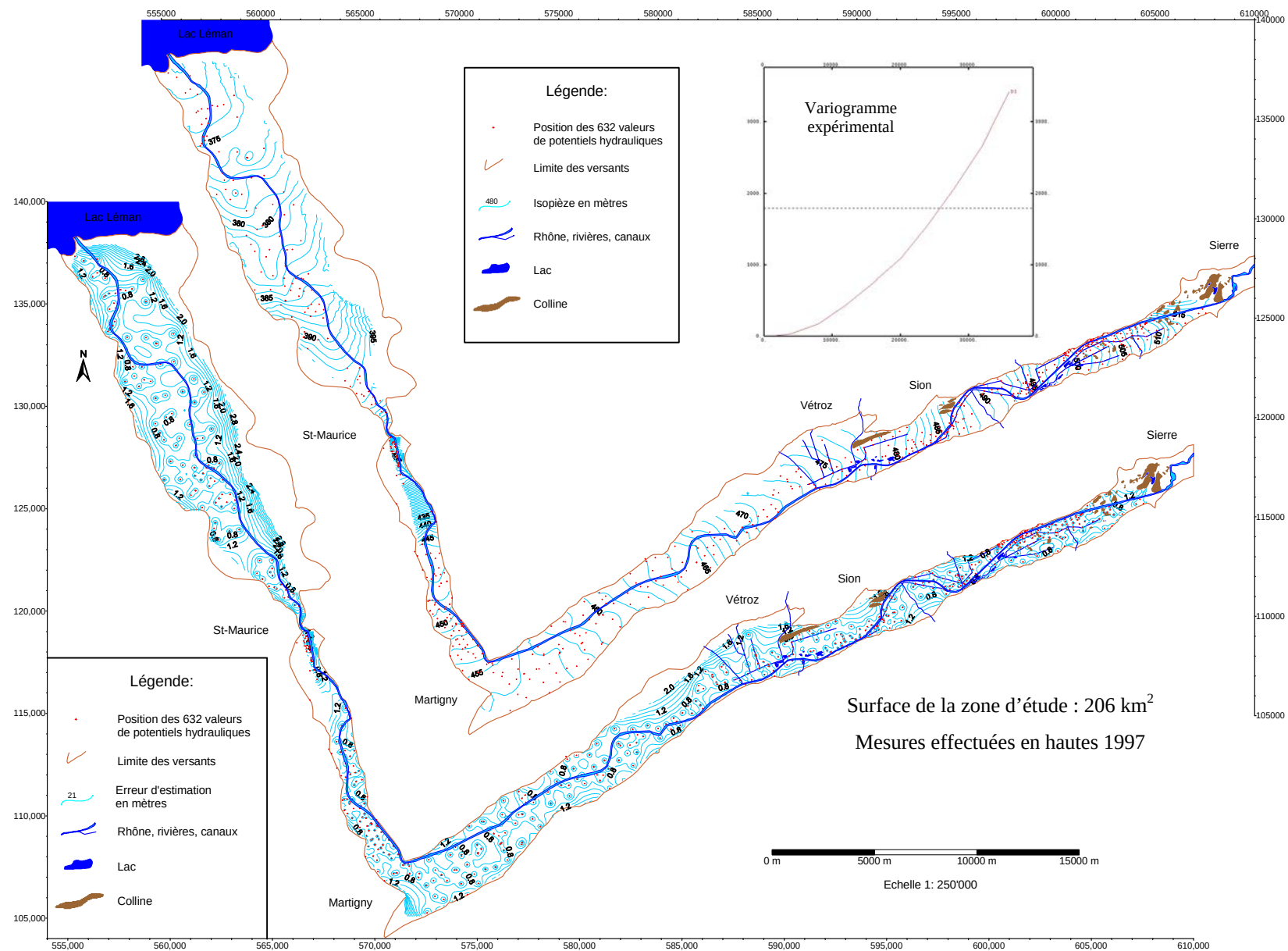


Figure 30 : Carte des potentiels hydrauliques estimés par la méthode des covariances généralisées et carte des erreurs d'estimation. Mesures effectuées dans l'aquifère des graviers supérieurs de la plaine du Rhône entre Sierre et le lac Léman (juillet 1997)

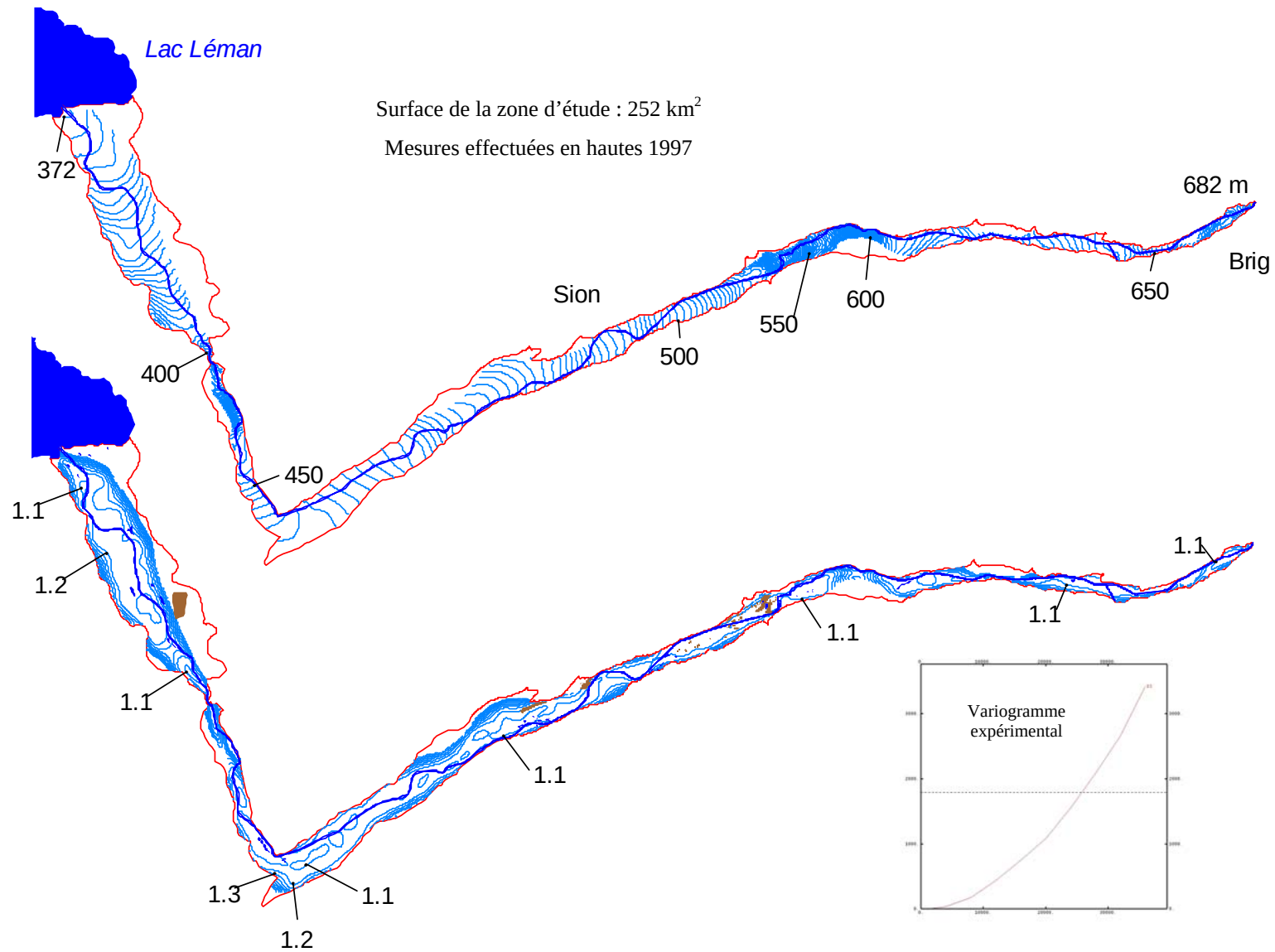


Figure 31 : Carte des potentiels hydrauliques estimés par la méthode des covariances généralisées et carte des erreurs d'estimation. Mesures effectuées dans l'aquifère des graviers supérieurs de la plaine du Rhône entre Brig et le lac Léman (juillet 1997).

plus mises en œuvre pour essayer de prendre en compte les conditions aux limites hydrauliques dans la régionalisation de la piézométrie [Roth, 1995 ; Matheron & al, 1997]. Plusieurs auteurs proposent des approches géostatistiques de type co-krigeage, basées sur des modèles stochastiques qui mettent en relation les corrélations spatiales entre T (transmissivités) et H (potentiel hydraulique) [Mizell, 1980 ; Dagan, 1985 ; Gelhar, 1993 ; Dong, 1990 ; Roth, 1997] et prenant plus ou moins en compte les lois physiques.

4. MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS

Les variables structurales ainsi qu'hydrodynamiques, ayant subi un traitement géostatistique, sont intégrées dans le processus de modélisation des écoulements souterrains proprement dit. La figure 32 illustre et résume la démarche de modélisation. On constate qu'après la création de la base de données hydrogéologiques et le traitement de ces données par géostatistique, on obtient des

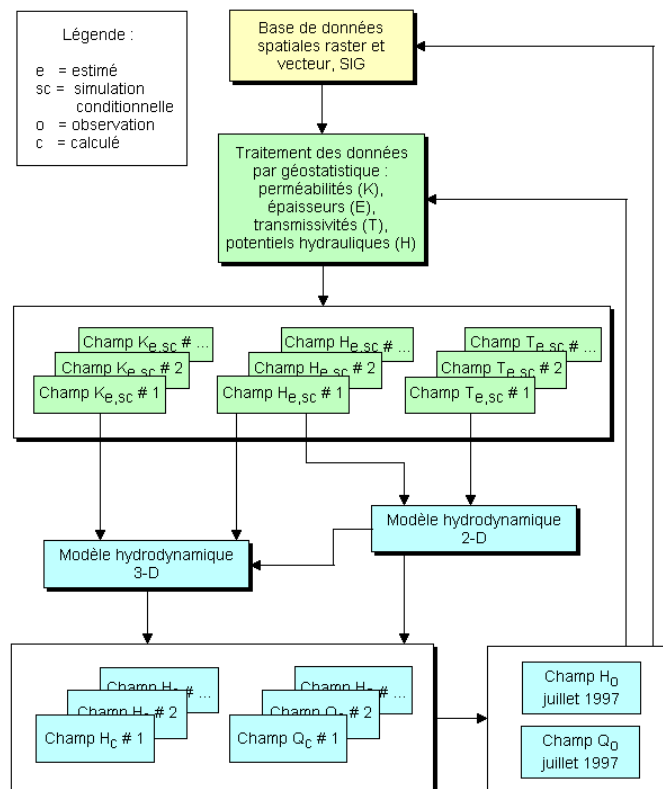


Figure 32: Démarche pour la simulation numérique des écoulements souterrains bidimensionnels et tridimensionnels

champs continus des variables (perméabilités, épaisseurs, potentiels hydrauliques, etc.). Les champs obtenus sont de deux sortes : estimés par krigeage standard ou simulés par simulations conditionnelles. Les variables structurales (topographie, niveaux structuraux, cartes en isopaches) permettent de construire la géométrie de la maille 2-D puis 3-D, alors que les variables hydrogéologiques permettent de définir les conditions aux limites ainsi que les propriétés hydrodynamiques de chaque élément (perméabilité, porosité, coefficient d'emmagasinement). Enfin, les calculs

effectués donnent des champs de débits et de potentiels hydrauliques calculés, qui seront comparés aux mesures de terrain afin de valider les hypothèses simplificatrices que l'on introduit dans le processus de modélisation. En résumé, la démarche d'obtention de la géométrie à l'aide du logiciel Feflow [Diersch, 1999] ou du FEN's code family [Király, 1998] jusqu'à l'obtention de résultats se décompose en 11 étapes successives qui sont :

1. définition du modèle conceptuel,
2. définition de la «supermaille» 2-D plan de surface,
3. génération du maillage 2-D plan de surface,
4. génération du maillage 3-D à partir du maillage 2-D,
5. vérification du maillage 3-D,
6. imposition des conditions aux limites,
7. imposition des propriétés intrinsèques au milieu modélisé,
8. définition des points de contrôle des débits et des potentiels hydrauliques,
9. calcul à tous les nœuds de la maille 3-D des débits et des potentiels hydrauliques,
10. présentation des résultats sous forme d'équipotentiels sur blocs diagrammes, profils et plans à différentes profondeurs, ainsi que des vecteurs vitesse de filtration et de lignes de courant avec isochrones et,
11. validation des résultats par comparaison aux points de contrôle des valeurs calculées de potentiels hydrauliques et de débits avec les valeurs mesurées sur le terrain.

Ces 11 étapes sont décrites succinctement ci-dessous.

4.1 Définition du modèle conceptuel

La définition du modèle conceptuel est la première étape que le modélisateur doit entreprendre avant de créer la géométrie. Toutes les complexités du terrain ne peuvent pas être prises en compte, et l'hydrogéologue devra faire un effort de réflexion pour regrouper des séries lithologiques semblables en des unités équivalentes, ou pour englober des petites lentilles dans des unités plus grandes. Dans la région de Visp, le modèle conceptuel a été élaboré par Bouzelboudjen en 1987 pour réaliser le premier modèle 3-D de la région, dans le cadre de la construction de l'autoroute N9. Il a identifié un complexe aquifère composé de deux aquifères séparés par deux aquitards, dont la représentation graphique se trouve sur la figure 6. Nous avons vu au préalable qu'on pourrait s'affranchir de ce modèle conceptuel, en utilisant directement un champ de perméabilité régionalisé en 3-D à l'aide de la géostatistique. Cependant comme généralement des données de perméabilité ne sont pas disponibles en grand nombre, l'étape du modèle conceptuel reste la plupart du temps incontournable, comme ce fut le cas pour le modèle de la Cédra (voir l'annexe 2 de «3-D groundwater modeling at national scale» dans ce volume.

4.2 Définition de la supermaille 2-D plan de surface

L'étape suivante consiste à générer des super-éléments 2-D plan de surface au sein de la zone d'étude afin de tenir compte des zones d'infiltration et d'exfiltration. Dans ces zones, les gradients hydrauliques sont plus élevés que dans les autres zones ; par conséquent, le maillage devra être plus fin pour que le modèle puisse recréer ces gradients. La figure 33 montre les 89 super-éléments ayant servis à la génération

automatique des éléments finis triangulaires. Les super-éléments respectant le réseau hydrographique constitué par le Rhône et les canaux de Grossgrund et de Brigerbad ont été générés automatiquement à l'aide de «buffers» dans ArcView. Les «buffers»

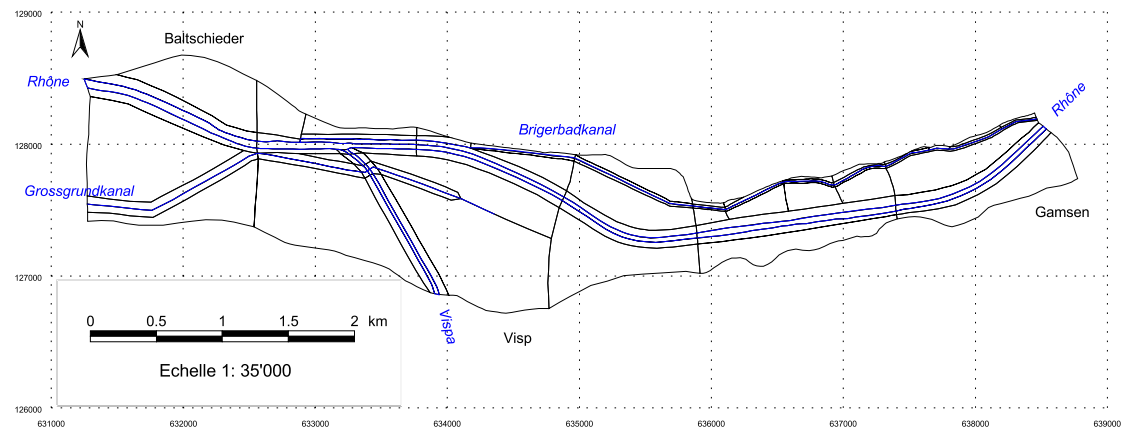


Figure 33 : Super-éléments (89) ayant servi à la génération automatique des éléments finis triangulaires générés dans ArcView puis importés dans Feflow.

sont des polygones créés automatiquement à une distance prédéfinie par l'utilisateur. Les autres polygones ont été ajoutés à l'aide d'ArcView. Les polygones ainsi constitués ont été traités par ArcInfo pour la création de la topologie, puis importés dans Feflow afin d'élaborer le réseau 2-D à éléments finis.

4.3 Maillage 2-D plan de surface

Après importation de la super-maille dans Feflow, le réseau 2-D de surface a été généré automatiquement à l'aide d'un algorithme nommé T-mesh développé par L. Tacher [1999]. Puis, dans les zones d'exutoire et d'infiltration potentielles, la maille a été «raffinée», c'est-à-dire que les éléments se trouvant dans ces zones ont été subdivisés en éléments plus petits (Fig. 34). Cette opération s'effectue interactivement jusqu'à l'obtention du degré d'affinage désiré. Cette maille est constituée de 6'485 éléments triangulaires linéaires et de 3'393 nœuds. Il est à remarquer que Feflow autorise également la génération de maille à éléments rectangulaires linéaires ou quadratiques (un nœud se situant au milieu de chaque arête). Il est important de remarquer que l'étape de création de super-éléments doit se faire d'une manière minutieuse afin d'éviter la génération d'éléments à angles trop obtus. En effet, ce genre d'éléments est la source d'imprécision dans les calculs. Il faut cependant noter que Feflow autorise le déplacement spatial des nœuds, ce qui permet de corriger les triangles trop obtus. Finalement le réseau 2-D de surface a été importé dans ArcView à des fins de traitement spatial et de présentation (voir «conditions aux limites imposées»).

4.4 Maillage 3-D

L'étape suivante consiste à générer le réseau 3-D en définissant le nombre de couches à ajouter parallèlement au réseau d'éléments 2-D de surface, puis d'y incorporer les différentes surfaces structurales (Fig. 35) sous forme de fichiers ASCII. Feflow attribue à chaque nœud de la maille une cote z en utilisant le krigeage ordinaire, la méthode d'interpolation Akima (linéaire ou cubique) ou la méthode

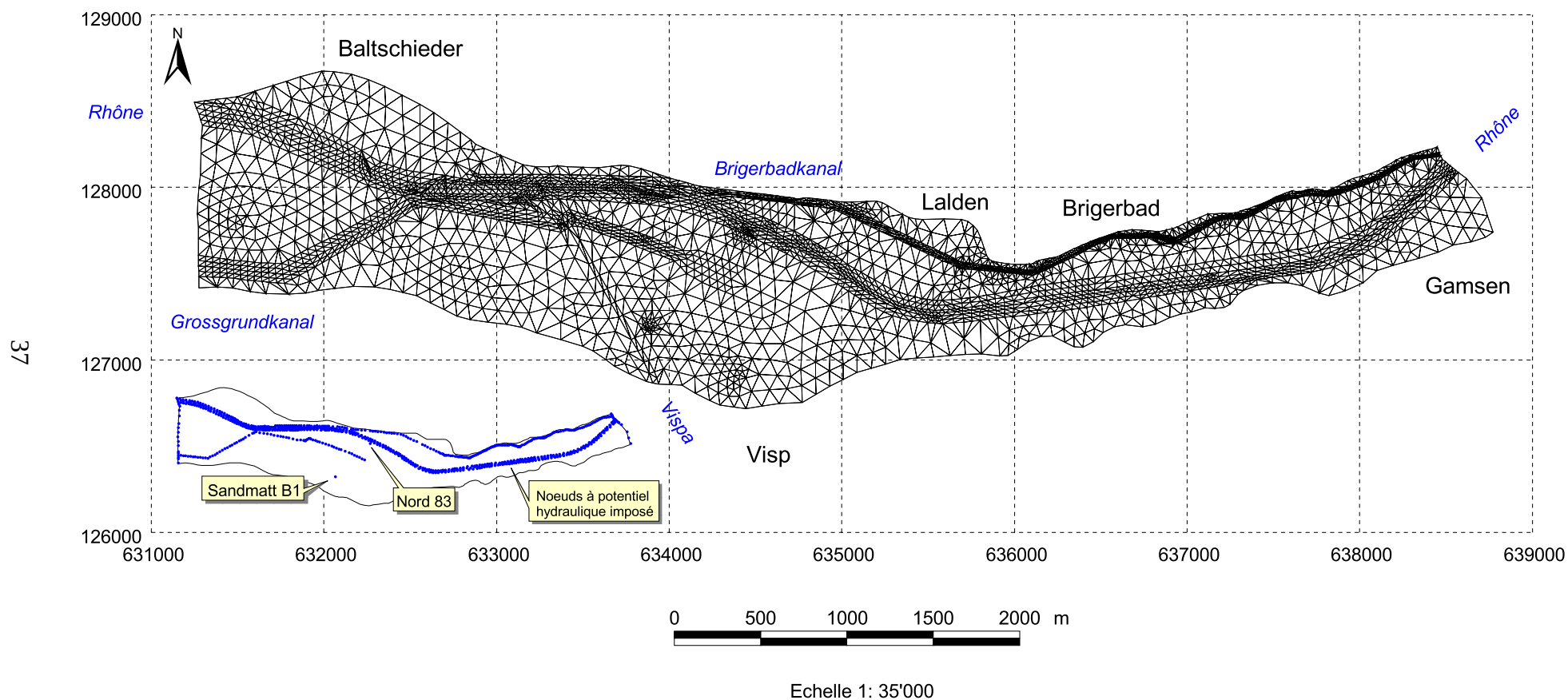


Figure 34 : Réseau 2-D de surface affiné du modèle 3-D : résultats de la combinaison de la base de données GIS et du générateur de mailles Tmesh de Feflow et positions des noeuds à potentiel imposé le long du Rhône, du Grossgrundkanal du Brigerbadkanal, des puits de la Lonza et des limites amont et aval. Les valeurs imposées sont déduites de la carte piézométrique des basses eaux 1992 [Kimmeier, 2000].

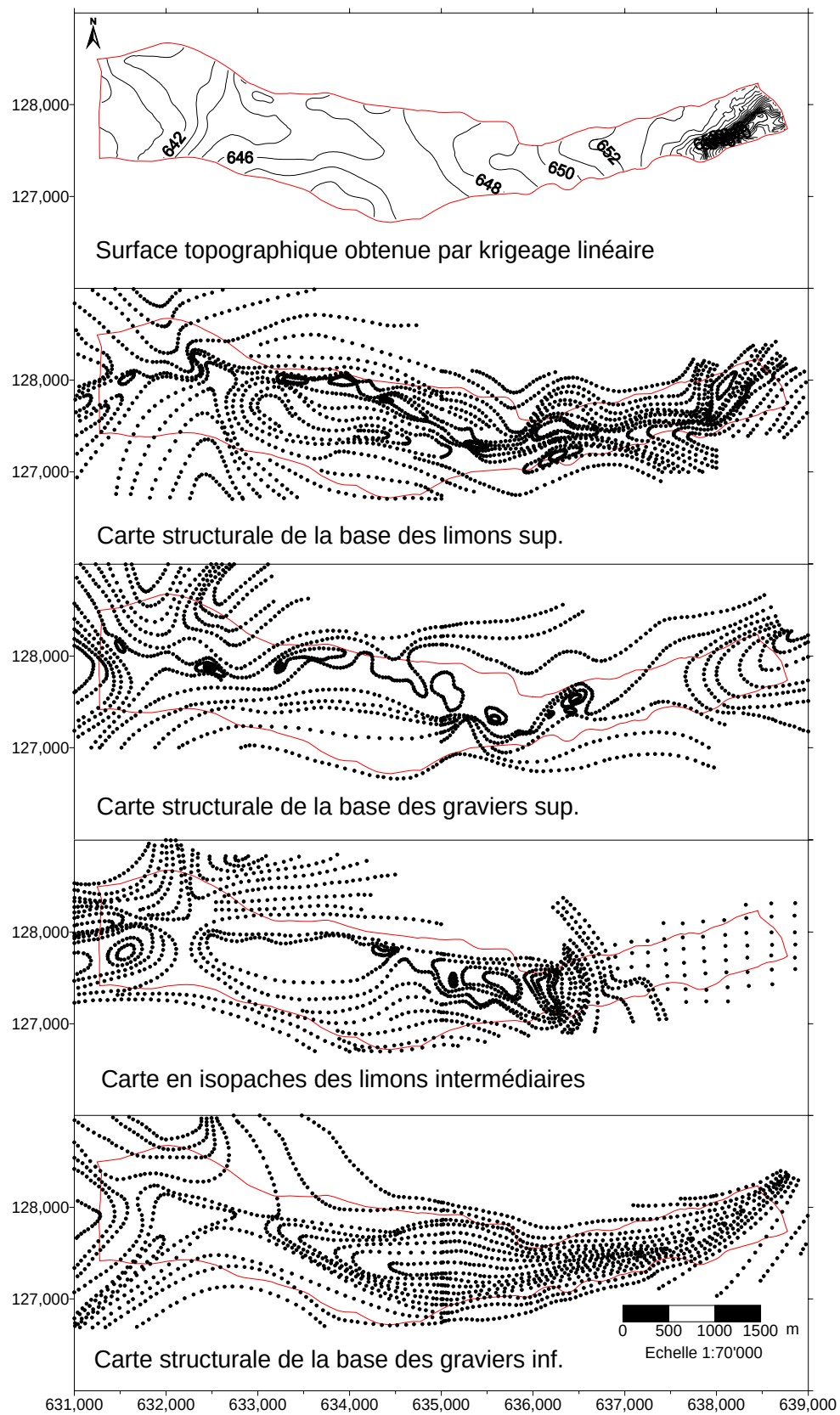


Figure 35 : Plans d'information utilisés pour la construction de la géométrie 3-D du complexe alluvionnaire dans la région de Visp.

inverse de la distance. Si les cartes structurales ont été élaborées par régionalisation, en les important dans Feflow, les valeurs subissent une double interpolation pouvant générer des erreurs. Pour éviter cette double interpolation, la maille 2-D peut être importée dans le logiciel Isatis [1997], afin d'estimer les valeurs, non pas sur une grille régulière, mais sur une grille irrégulière dont les nœuds correspondent à notre réseau 2-D. Les valeurs ainsi obtenues peuvent être injectées dans Feflow en utilisant la méthode inverse de la distance, ce qui évitera la double interpolation. Dans notre cas, les surfaces structurales sont sous forme de points et de lignes et n'ont pas subi de traitement géostatistique. La figure 35 montre ces cartes structurales. On peut y observer un grand nombre de points qui ne sont pas tous issus des données des forages mais ajoutés à la main par l'hydrogéologue afin de «forcer» l'interpolation de Feflow. Pour la surface topographique cette méthode n'a pas été utilisée car elle constitue un plan plus régulier que les autres surfaces structurales. Cette surface a été régionalisée à partir des points cotés où se situent les forages et piézomètres puis injectée dans Feflow. Comme la zone non-saturée est, en moyenne, à 3 mètres de profondeur, et que la surface topographique est constituée, «en gros», par un plan régulier, cela ne prête pas à conséquence. La figure 45 montre le résultat final de la création de cette maille 3-D. Elle est constituée de 25'940 éléments prismatiques linéaires à base triangulaire et de 16'965 nœuds.

Lorsque deux surfaces s'interpénètrent, Feflow propose de corriger automatiquement les cotes des nœuds, afin de laisser une distance minimale entre les deux couches choisies par l'utilisateur. Cette fonctionnalité est très utile dans le cas de formations géologiques qui disparaissent naturellement de part leur genèse, et permet d'éviter des erreurs grossières de géométrie. En effet, il n'est pas possible de modéliser, avec Feflow, des couches qui se pincent, comme c'est le cas pour les limons intermédiaires. Avec ce logiciel, pour simuler une couche lithologique qui disparaît, on a recourt à une astuce. La couche qui se pince est prolongée jusqu'aux limites latérales du modèle en réduisant son épaisseur à quelques dizaines de cm (dépend du choix de l'utilisateur en fonction de la géométrie et de la précision liée au problème à résoudre). C'est le cas des limons intermédiaires qui se pincent dans la partie amont du modèle, mettant en contact direct les deux aquifères. Les «limons», dans cette partie, sont représentés par une couche de 50 cm qui a, en fait, les mêmes propriétés hydrodynamiques que les graviers. La fonctionnalité vue plus haut est donc intéressante, car elle a permis de corriger automatiquement les cotes des nœuds où les surfaces se recoupaient, laissant ainsi un minimum de 50 cm entre les deux couches. Cette valeur et cette astuce ont été reprises de l'étude de l'impact sur les eaux souterraines de la construction de l'autoroute A9 à Visp par modèle hydrodynamique [Bouzelboudjen & Király, 1988]. Par ailleurs, d'autres routines de pré-processing accompagnant la suite des FEN's code family [Király, 1998] autorisent le pincement des couches [Kimmeier & al., 1985 ; Király, 1985 ; Király, 1988 et Bouzelboudjen & Kimmeier, 1997]. Une autre fonctionnalité très intéressante des FEN's code family est de permettre, par exemple, la double numérotation pour simuler des couches et limites imperméables de manière très flexible, sans ajouts de nouveaux éléments. Cette technique a été utilisée notamment pour simuler le rideau de palplanches des fouilles de l'autoroute A9 à Visp (Fig. 36) [Bouzelboudjen & Király, 1988 ; Bouzelboudjen, 1990, 1991]. Une autre fonctionnalité est de permettre, soit l'introduction d'éléments unidimensionnels dans un milieu bidimensionnel pour simuler des fractures (Fig. 37), comme cela a été réalisé par Kimmeier & al. dans le cadre du projet Hydrocoin en 1986, soit l'introduction d'éléments unidimensionnels et de plan bidimensionnels dans un milieu tridimensionnel, afin de simuler un réseau karstique ou de failles [Király, 1979 ; Kimmeier & al., 1985].

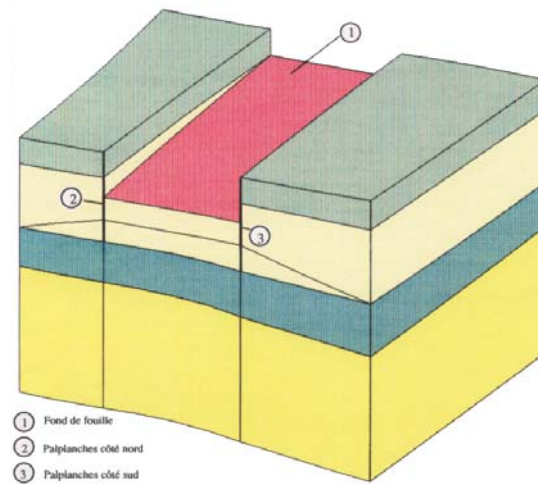


Figure 36 : Bloc diagramme illustrant l'astuce de la double numérotation pour simuler des palplanches avec la méthode FEN [Bouzelboudjen & Király; 1988, 1990].

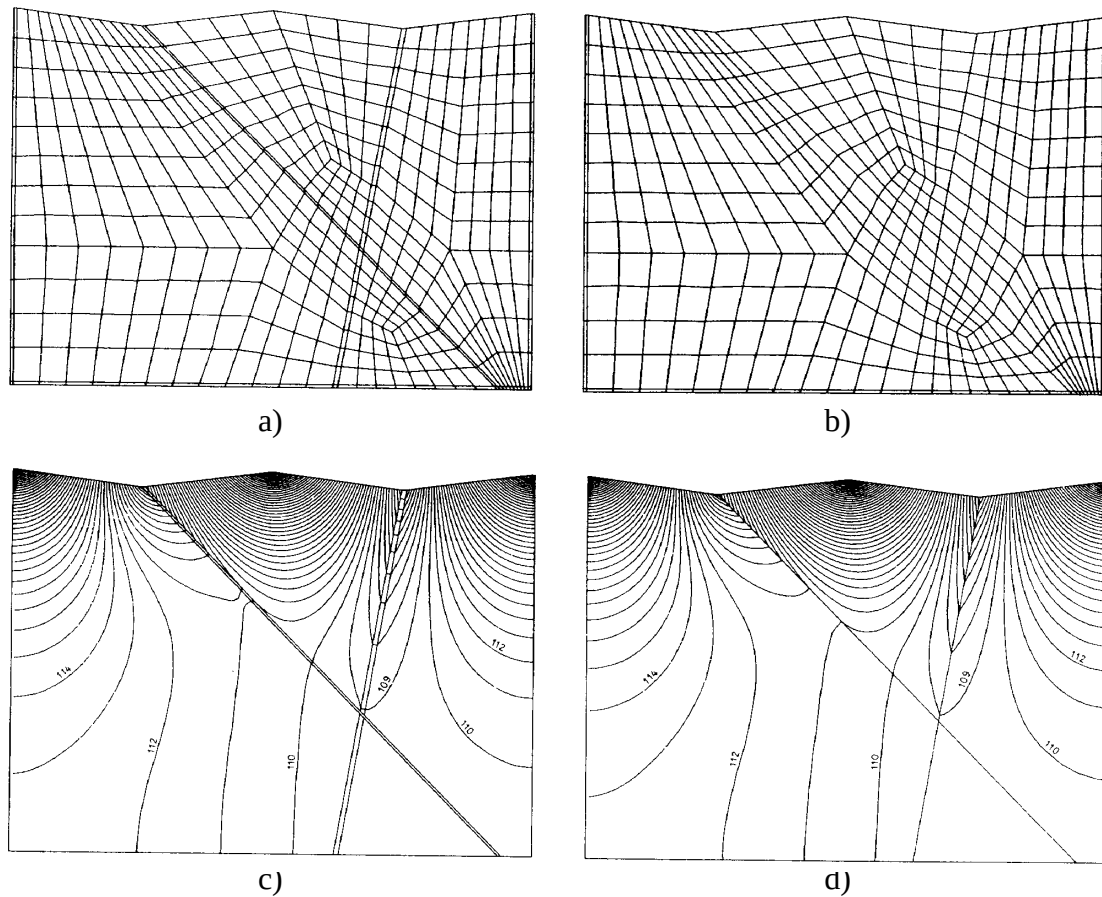


Figure 37 : Mailles 2-D [a) et b)] et résultats [c) et d)] du projet Hydrocoin [Kimmeier & al., 1986] cas 2 (mailles fines). Comparaison entre milieu avec fractures 2-D et milieu avec fracture 1-D. Les résultats obtenus avec FEM301 [Király, 1985] sont représentés sous forme d'équipotentiels [m].

4.5 Vérification du maillage 3-D

La maille 3-D étant prête, il s'agit maintenant de procéder à une vérification minutieuse afin de valider la géométrie souhaitée. Pour effectuer cette opération, Feflow intègre certaines fonctionnalités d'ArcInfo permettant de générer des profils verticaux. Ces profils pouvant être exportés, soit au format DXF (Data Exchange Format : format de fichier d'AutoCAD), soit au format Shapefile (format de fichier d'ArcView), puis importés directement dans ArcInfo ou ArcView. La figure 38 montre le tracé des 11 coupes longitudinales et des 22 coupes transversales ayant servi à vérifier la géométrie 3-D. La figure 39 montre les 22 coupes en travers et la figure 48 montre le profil en long numéro 6. Il est à noter qu'à partir de la coupe numéro 26, ainsi que sur la coupe numéro 6, le pincement des limons intermédiaires a été réalisé par « manipulation » de la base de données spatiales à l'aide d'ArcView.

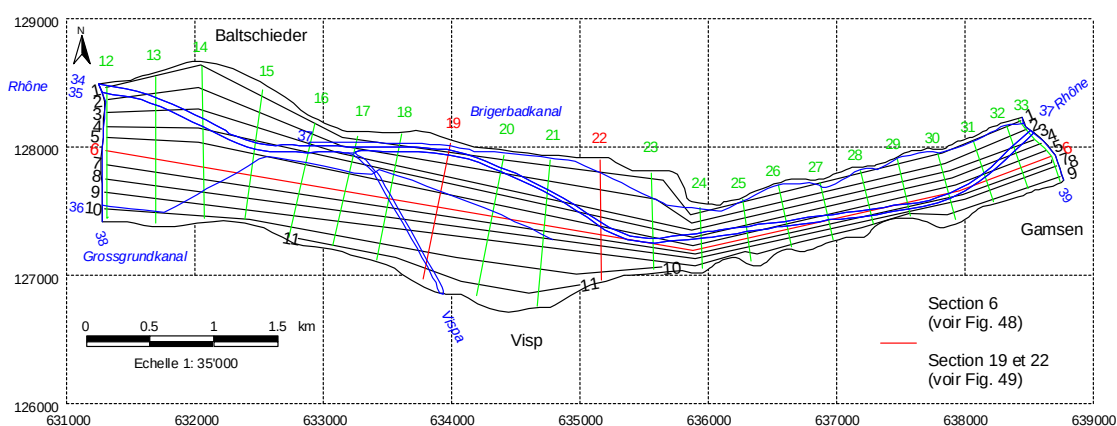


Figure 38 : Position des sections représentées sur la Fig. 40 permettant de vérifier la géométrie du modèle 3-D et de visualiser les équipotentielles (cf Fig. 48 et 49)

La vérification de la géométrie 3-D entre Baltschieder et Lalden a été réalisée avec ArcInfo et les modules Tin et Grid, en exportant les surfaces structurales qui composent les quatre couches du modèle 3-D, et en utilisant une AML* pour générer les profils [Bouzelboudjen, 1996]. Cette approche a aussi été appliquée pour la modélisation de 12 horizons pédologiques [Mendonça & al., 2000].

* AML signifie ARC Macro Language. Il s'agit d'un langage algorithmique de haut niveau permettant de générer des applications par l'utilisateur [ESRI, 1996b].

4.6 Conditions aux limites imposées

Pour réaliser des calculs, il est nécessaire d'imposer des conditions aux limites. Ces conditions sont de deux types : Conditions de potentiel et conditions de flux. En général, les débits entrants ou sortants du système, autres que les infiltrations efficaces, sont mal ou pas connus. Au contraire, les potentiels hydrauliques sont relativement mieux connus de par la position des sources ou par les mesures de potentiels hydrauliques réalisées dans les piézomètres permettant de dessiner des cartes piézométriques. C'est ainsi qu'en général, on impose des valeurs de potentiels comme conditions aux limites. La figure 34 montre les nœuds auxquels une valeur de potentiel a été assignée. Il s'agit des nœuds se trouvant le long des canaux du Brigerbad et du Grossgrund, de la rive droite et gauche du Rhône, de la limite amont et aval, ainsi que des puits de Sandmatt B1 et Nord 83. En régime permanent, les

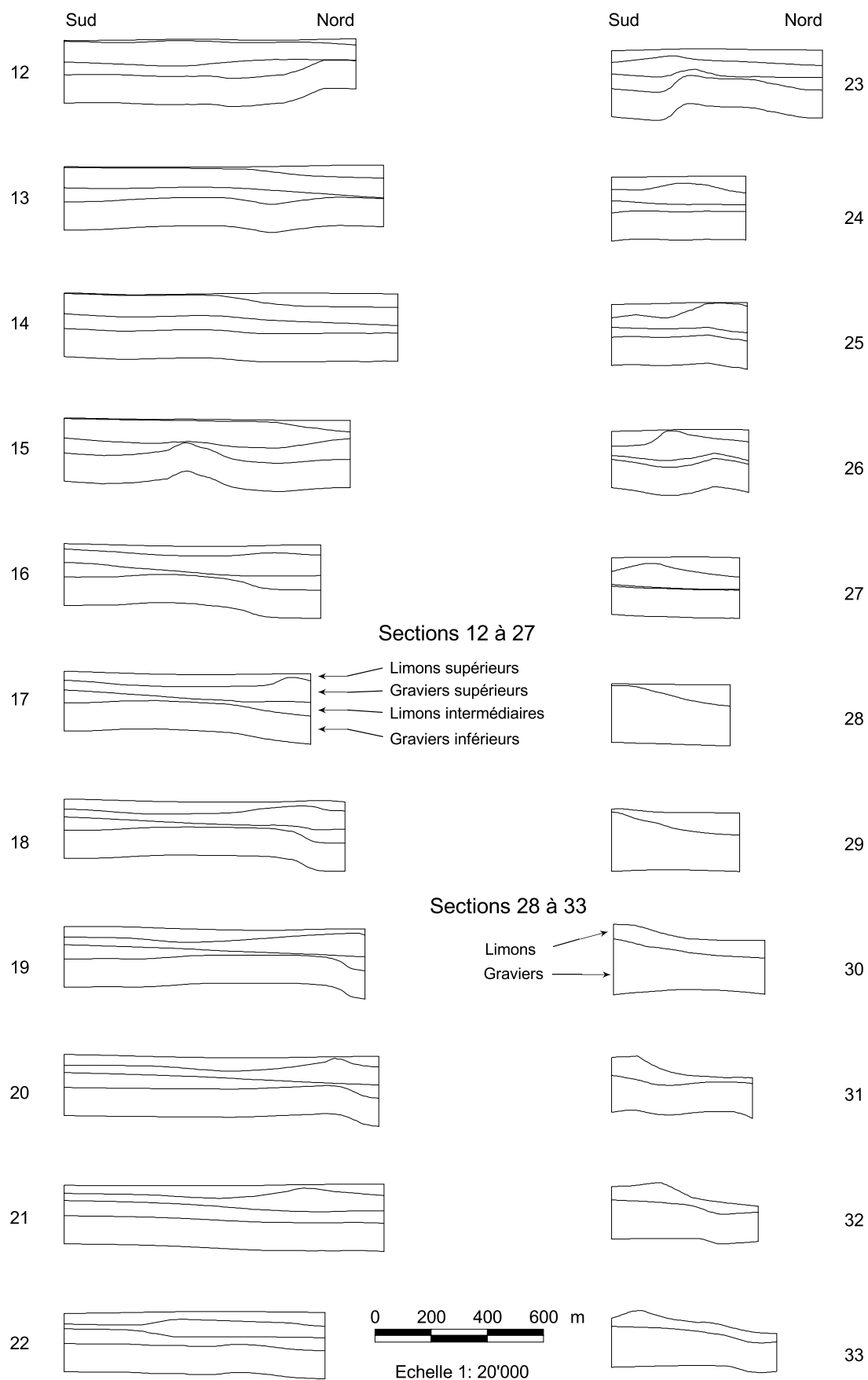


Figure 39 : Sections nord-sud 12 à 33 du modèle 3-D (voir Fig. 38)

conditions aux limites imposées ne varient pas, alors qu'en régime transitoire, elles varient avec le temps ; on n'impose plus une valeur unique aux nœuds, mais une fonction variant en fonction du temps. Les enregistrements en continu du niveau de la nappe sont donc des données importantes pour les calculs en régime transitoire. Dans le cas du modèle 3-D de Visp (Fig. 45 à 52), les calculs ont été effectués en régime permanent, avec calcul de la nappe libre. D'autres modèles 2-D coupe ont été effectués en régime transitoire et variablement saturé (Fig. 57 à 62) dans le cadre de la 2^{ème} phase de la 3^{ème} correction du Rhône. Un autre modèle 3-D d'écoulement et de transport, simulant l'impact potentiel de la décharge de Gamsen, a nécessité la définition de conditions aux limites spécifiques précisées plus loin (Fig. 63 à 65).

Les potentiels imposés correspondent, soit à la carte automatique générée par géostatistique des hautes-eaux 1997 (voir la figure 5 dans «Travel path uncertainty : a Swiss case study combining stochastic and deterministic hydrodynamic models in the Rhône valley, Switzerland» [Kimmeier & al., 2001d] dans ce volume), soit à la carte manuelle des basses-eaux 1992 (Fig. 40). La carte des basses-eaux 1992 a été réalisée dans le cadre de l'expertise de la 3^{ème} correction du Rhône, en essayant de recréer, le plus fidèlement possible, la relation nappe rivière et nappe canaux. La carte piézométrique des hautes-eaux 1997 ne recrée pas aussi fidèlement la relation nappe rivière, car les données aux abords du réseau hydrographique ne sont pas assez abondantes. Pour contourner ce problème, il aurait fallu ajouter artificiellement des valeurs, déduites des mesures, proches du réseau hydrographique, pour forcer le logiciel d'interpolation à tenir compte de ces relations. L'avantage d'une telle démarche, est la génération automatique des isovaleurs, en évitant à l'hydrogéologue de les dessiner, puis de les numériser. Cette opération, qui peut être longue et fastidieuse, est souvent entachée d'erreurs qu'il faut corriger.

Les potentiels imposés sur le réseau hydrographique le sont au sommet du modèle. Par contre, les potentiels imposés aux puits, le sont verticalement à tous les nœuds, jusqu'à la base des graviers supérieurs, car seul cet aquifère est exploité. De même les potentiels imposés aux limites amont et aval, le sont verticalement, alors qu'en réalité, ils varient avec la profondeur, comme cela a été mis en évidence par Bouzelboudjen [Bouzelboudjen & Király, 1988] dans le cadre des travaux de la N9. En effet, les limites amont et aval du modèle de 1988, premier modèle 3-D de la région, coïncidaient avec sept forages dont les mesures de potentiels hydrauliques ont été effectuées à l'avancement des travaux, donnant ainsi une image 2-D verticale de la représentation des potentiels. Par manque d'information pour les hautes-eaux 1997 et basses-eaux 1992, les potentiels n'ont donc pas été imposés d'une manière variable avec la profondeur, admettant ainsi un flux à travers les limites amont et aval proche du maximum, car les vecteurs flux sont perpendiculaires à cette surface équipotentielle.

Les conditions aux limites étant imposées, il s'agit de les vérifier. Les figures 41a à 41d montrent les conditions aux limites imposées le long de la rive gauche et droite du Rhône ainsi, que le long des canaux de Brigerbad et de Grossgrund. Ces valeurs sont issues du traitement géostatistique du potentiel hydraulique de la campagne des hautes-eaux 1997. Chaque rupture de pente doit être confrontée à la carte piézométrique réalisée et interprétée par l'hydrogéologue afin de dépister d'éventuelles erreurs.

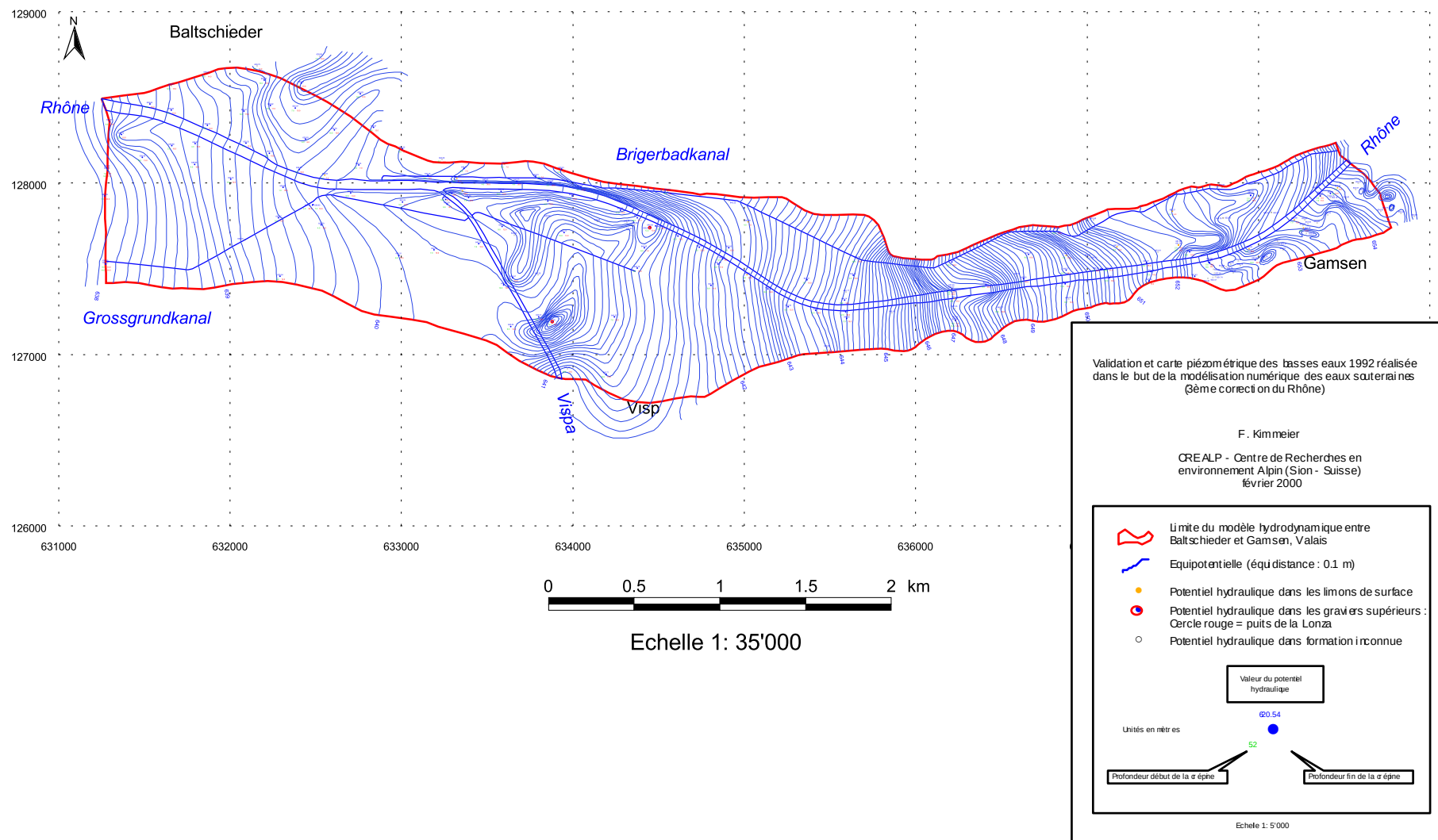


Figure 40 : Validation et carte piézométrique des basses eaux 1992 réalisée dans le but de la modélisation numérique des eaux souterraines (3ème correction du Rhône) [Kimmeier, 2000]. Carte originale au 1: 5'000.

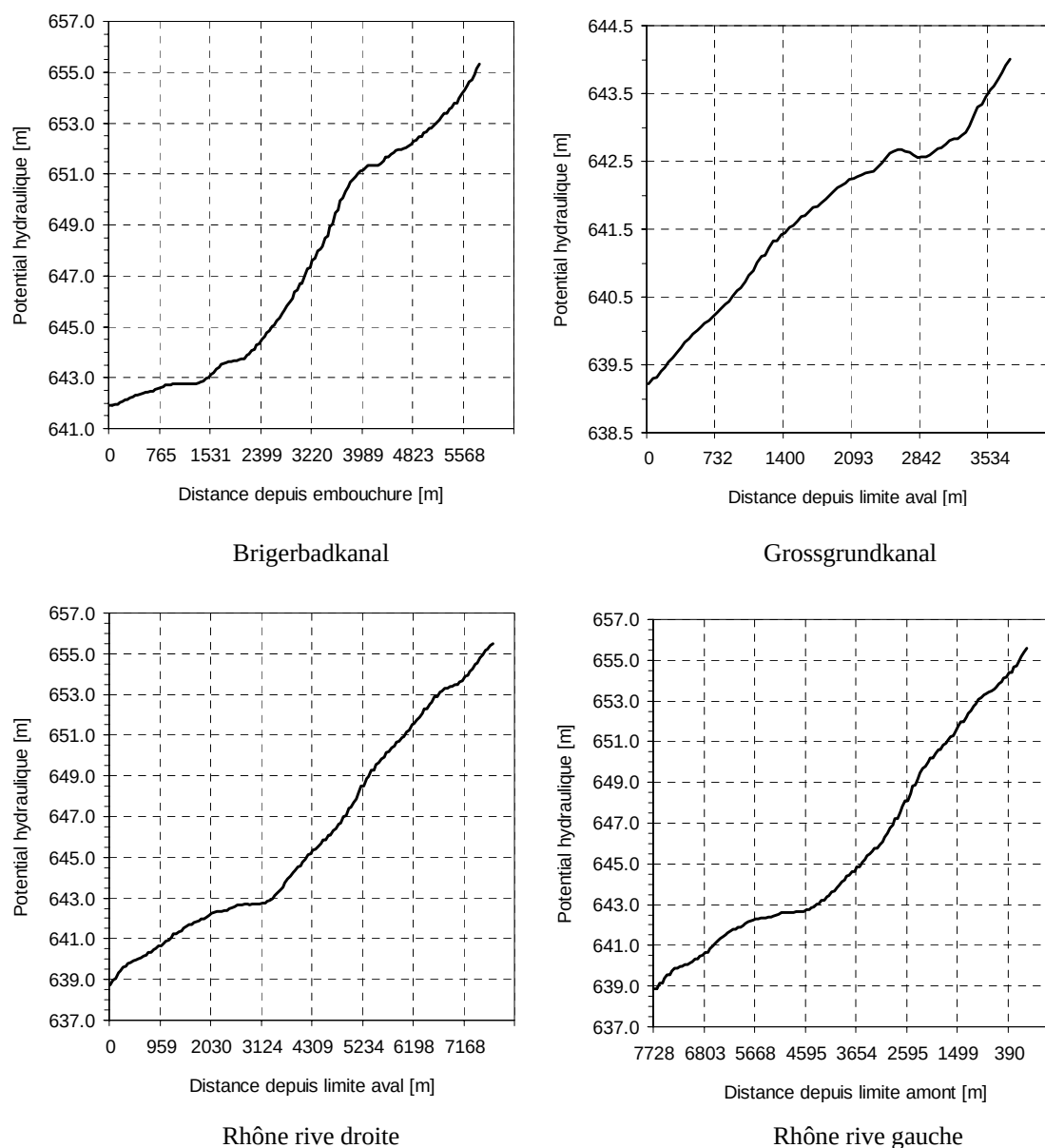


Figure 41a-d: Potentiels hydrauliques imposés aux limites correspondant aux hautes-eaux 1997. Valeurs estimées tirées de la carte krigée obtenue par covariance généralisée

4.7 Imposition des propriétés intrinsèques au milieu modélisé

Pour calculer des variantes, il ne manque à la géométrie 3-D que la définition à chaque élément 3-D, des propriétés intrinsèques du milieu modélisé, à savoir la perméabilité (transmissivité en 2-D) et le coefficient d'emmagasinement. Pour le modèle développé à Visp, plusieurs champs de perméabilité ont été utilisés pour tester diverses hypothèses. Des champs homogènes isotropes, des champs homogènes anisotropes, ainsi que des champs hétérogènes pour les limons de surface et les graviers supérieurs ont été introduits. Les champs hétérogènes ont été obtenus par géostatistique. L'annexe 6 résume les valeurs de perméabilité testées dans le cadre de l'expertise de la 3^{ème} correction du Rhône phase II [Kimmeier & al., 2000].

En général, le coefficient d'emmagasinement est déduit des essais de pompage. Il est rarement disponible. Cette variable n'est utilisée que pour les calculs en régime

transitoire, et, généralement, des hypothèses doivent être émises quant à sa valeur, en fonction de la lithologie.

4.8 Définition des points de contrôle des débits et des potentiels hydrauliques

La géométrie étant prête à être utilisée pour effectuer diverses variantes de calcul, elle pourrait l'être telle quelle, mais dans un souci de validation des résultats, il est préférable de préparer un certain nombre de points de contrôle, afin de comparer les

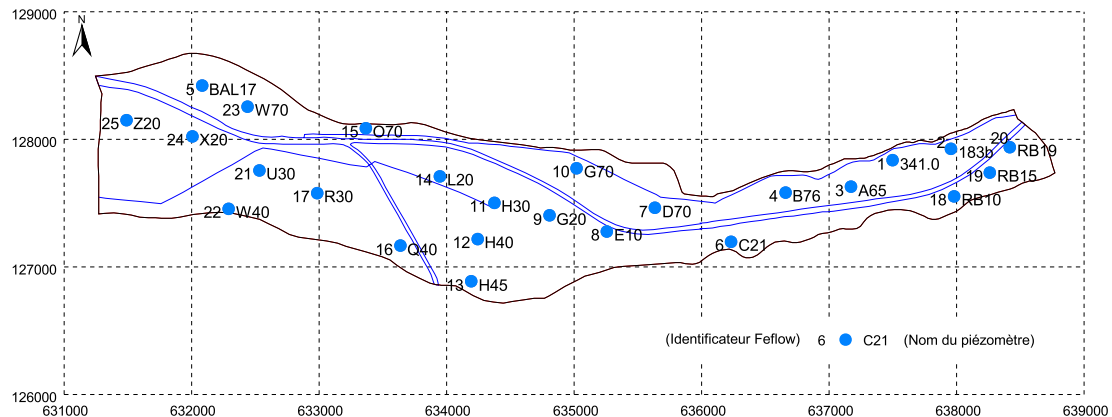


Figure 42 : Position des points de contrôle pour la comparaison des potentiels hydrauliques mesurés et calculés

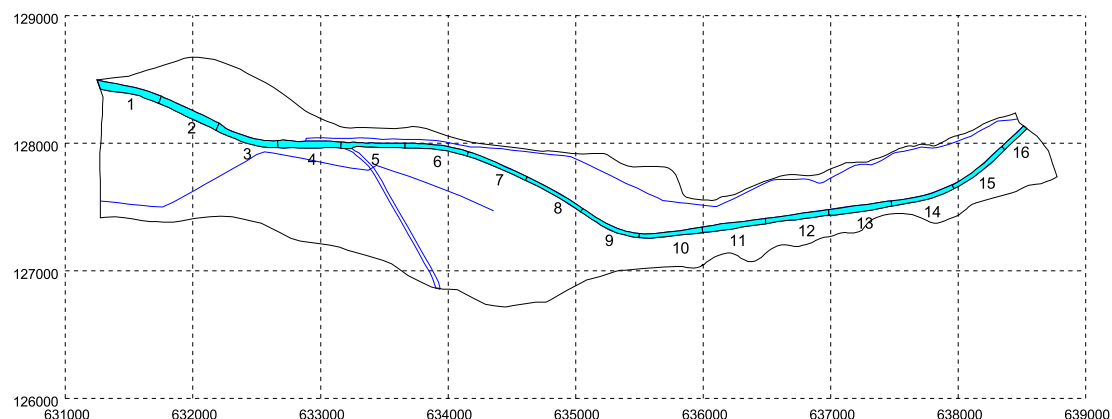


Figure 43 : Position des groupes de noeuds où les débits nodaux ont été sommés par intervalle de 500 mètres sauf le groupe 16 (intervalle de 236 mètres)

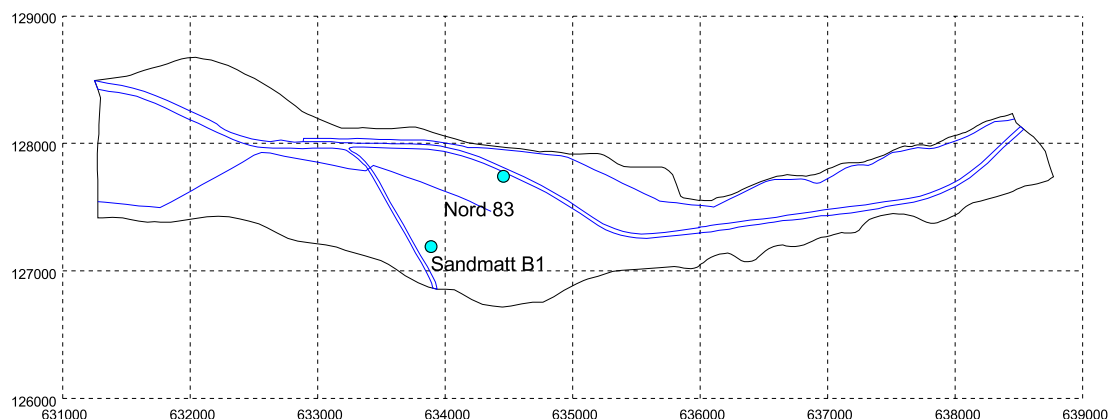


Figure 44 : Position des groupes de noeuds où les débits nodaux ont été sommés à l'emplacement des puits de la Lonza dans les graviers supérieurs

résultats du modèle avec les mesures effectuées sur le terrain. La figure 42 montre la localisation des points où les potentiels hydrauliques calculés sont comparés avec les potentiels mesurés dans les piézomètres. La figure 53 montre la position des points de mesure des débits, dans les canaux de Brigerbad et de Grossgrund, où les débits calculés par le modèle ont été comparés aux débits mesurés. La figure 43 montre les 16 segments le long du Rhône où les débits calculés par le modèle ont été comparés entre différentes variantes. La figure 44 montre la position des puits de pompage de la Lonza en activité lors des hautes-eaux 1997.

4.9 Variantes de calcul pour tester différentes hypothèses

La géométrie du modèle étant prête, différentes variantes de calcul peuvent être testées en changeant les valeurs des paramètres hydrodynamiques (alimentations distribuées, potentiels hydrauliques, perméabilités, etc). Les modèles FEN's code family [Király, 1985, 1998], utilisés pour la première partie de l'expertise de la 3^{ème} correction du Rhône [Bouzelboudjen & Király, 1998], calculent pour tous les nœuds de la maille 3-D, des débits et/ou des potentiels hydrauliques qui peuvent ensuite être confrontés aux mesures de terrain.

Pour simuler les écoulements souterrains dans un milieu hétérogène, l'utilisation d'un modèle mathématique à éléments finis est particulièrement bien adaptée. Les écoulements permanents et transitoires de densité constante en zone saturée sont décrits par l'équation générale suivante :

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \text{div} \left(-\overline{\overline{K}} \cdot \vec{\text{grad}} h \right) + q = 0 \quad (1)$$

où

- S_s = le coefficient d'emménagement spécifique [m^{-1}]
- h = potentiel hydraulique [m],
- t = temps [s],
- $\overline{\overline{K}}$ = tenseur des perméabilités [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
- q = terme de source (alimentation ou prélèvement) [$\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$].

Afin de résoudre l'équation générale (1) et calculer la distribution des potentiels, la région d'écoulement est subdivisée en éléments tridimensionnels. Ces éléments sont reliés entre eux par des points discrets appelés «nœuds». La distribution des potentiels est «approximée» sur chaque élément par un polynôme de deuxième degré. En remplaçant la fonction inconnue h par l'approximation polynomiale dans l'équation (1), cette dernière, multipliée par une fonction de pondération, peut être intégrée sur chaque élément (méthode de Galerkin). Le résultat est un système d'équations linéaires (il y aura autant d'équations linéaires qu'il y a de nœuds dans le modèle) que l'on résout par la méthode d'élimination de Gauss, pour obtenir les potentiels à chaque nœud du modèle.

Afin de résoudre le système d'équations linéaires, il faut imposer à chaque nœud, soit le potentiel (limites à potentiels imposés où l'on calculera les flux), soit le terme de source (limites à flux imposés où l'on calculera les potentiels). A la fin des calculs, on aura, pour chaque nœud, à la fois le potentiel et le terme de source.

Les données nécessaires pour la simulation découlent de la méthode présentée ci-dessus :

- géométrie des éléments (coordonnées des nœuds),
- perméabilité pour chaque élément,
- coefficient d'emménagement spécifique pour chaque élément,
- limites à potentiels imposés,
- limites à flux imposés (si possible : limites à flux nul).

Dans le cas de la 2^{ème} phase de l'expertise de la 3^{ème} correction du Rhône, une dizaine de variantes a été testée. L'annexe 6 résume les champs de perméabilité utilisés. Les calculs ont été réalisés en régime permanent et en nappe libre, c'est-à-dire que Feflow calcule la position de la nappe libre, au travers des éléments 3-D. Ces derniers sont donc parfois partiellement dénoyés.

Dans le cadre du Fonds national et des mandats pour la 3^{ème} correction du Rhône, les logiciels FEN's code family [Király, 1985, 1998] et Feflow [Diersch, 1999] ont été utilisés pour modéliser les écoulements souterrains et les processus de transport. Ces modèles ont permis de calculer les systèmes d'écoulement 2-D et 3-D, les champs des vitesses, les trajectoires et les temps de parcours [Bouzelboudjen & Király, 1998 ; Bouzelboudjen & Kimmeier, 1998 ; Kimmeier & al, 2000 ; Kimmeier & al., 2001d].

Remarque : les traitements mathématiques de la surface de la nappe libre en régimes permanent et transitoire en 2-D et 3-D de la zone non saturée, ainsi que du transport, sont décrits en détail, dans le manuel d'utilisation de Feflow [Diersch, 1999]. Nous ne développerons pas ici cette partie technique.

En général, il est judicieux d'intégrer les complexités dans le modèle, au fur et à mesure, et non pas en bloc, afin de tester la sensibilité du modèle. A Visp, les 5 étapes réalisées sont résumées ci-dessous :

1. test de la cohérence du maillage, en effectuant un calcul en milieu homogène et en imposant des potentiels hydrauliques seulement aux limites aval et amont,
2. test des conditions aux limites imposées (également en milieu homogène) en imposant les potentiels hydrauliques aux limites aval et amont du modèle, le long du Rhône et le long des canaux de Brigerbad et de Grossgrund (permet de dépister des systèmes d'écoulement artificiels dus à des erreurs d'imposition de potentiels),
3. introduction de l'anisotropie des perméabilités entre les différentes couches (Ls, Gs, Li et Gi), les différentes couches restant isotropes,
4. introduction de l'hétérogénéité ainsi que de l'anisotropie au sein des limons de surface et des graviers supérieurs et,
5. introduction de l'hétérogénéité à l'intérieur des limons de surface et des graviers supérieurs.

Les étapes ci-dessus ont été réalisées pour les basses-eaux 1992 et pour les hautes-eaux 1997.

4.10 Analyse et présentation des résultats

Une fois les calculs réalisés, il faut les analyser et les présenter au gestionnaire sous forme d'équipotentiels sur blocs diagrammes, de profils et plans à différentes

profondeurs, de vecteurs vitesse de filtration et de lignes de courant avec isochrones. La figure 45 montre un bloc diagramme du modèle 3-D avec une exagération verticale de 10. On y voit le maillage, ainsi que les équipotentiels dont les valeurs sont représentées par différentes couleurs (voir légende). Il est à remarquer que Feflow est étroitement connecté à quelques procédures basiques d'ArcInfo ; le «Map manager» (gestionnaire de cartes) qui permet uniquement de visualiser des points, des lignes et des polygones.

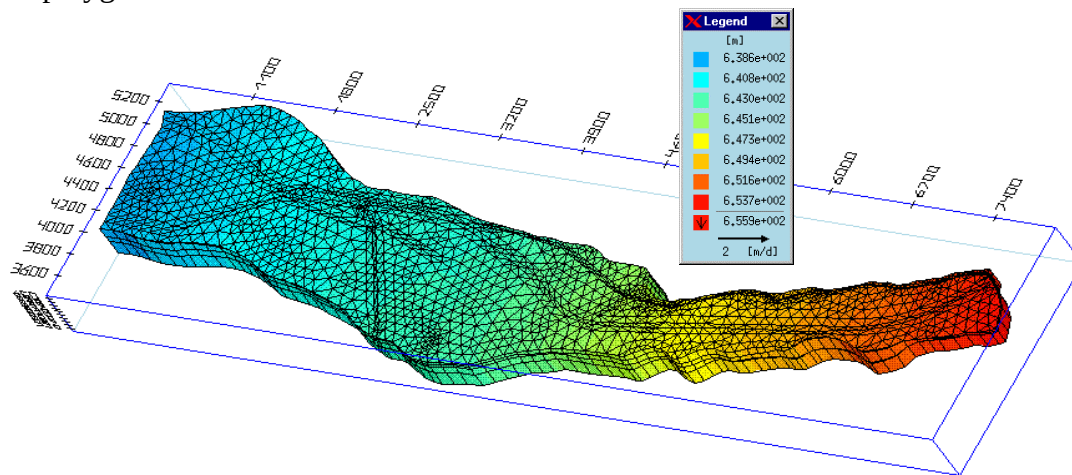


Figure 45 : Bloc diagramme 3D montrant le maillage et les potentiels simulés sous forme de plage de couleurs (variante: Visp3d07b).

La figure 46 montre une projection des équipotentiels 3-D, ainsi que des vecteurs flux sur la base des graviers supérieurs. Elle montre clairement les zones où le Rhône et les canaux ont un rôle de drainage, ainsi que les zones où elles jouent plutôt un rôle d'injection. Les vecteurs flux permettent d'estimer la relative quantité d'eau qui est drainée ou injectée.

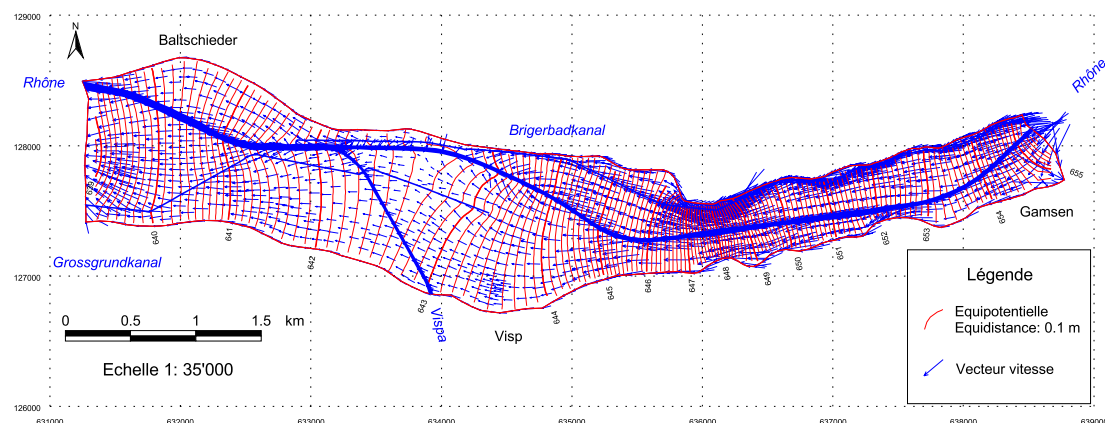


Figure 46 : Projection 2-D, à la base des graviers supérieurs, des équipotentiels et vecteurs vitesse simulés de la variante 3-D Visp3D04.

On pourrait de même représenter des blocs diagrammes sous forme d'écorchés. Feflow ne se prête pas bien à ce genre d'opération. Par contre, FEN's code family permet de remarquables représentations 3-D des résultats sous forme de blocs diagrammes et blocs diagrammes sériés (voir Fig. 47a, b et c), comme ce fut le cas pour la 1^{ère} partie de l'expertise de la 3^{ème} correction du Rhône [Bouzelboudjen & Király, 1998]. Dans cette étude, des interfaces ont été créées afin d'exporter les

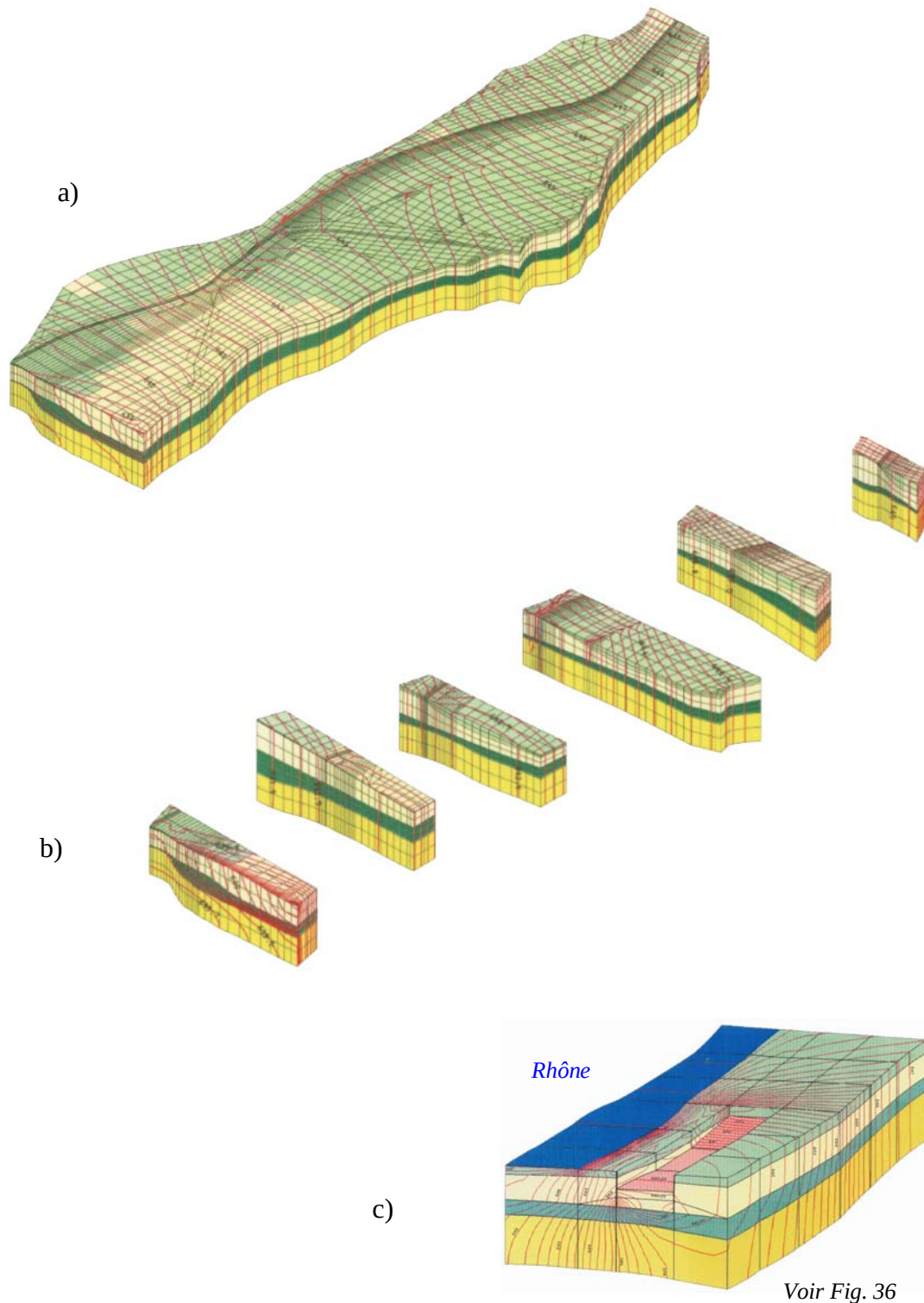


Figure 47a, b, c : Blocs diagrammes générés avec FEN's code family issus de l'expertise de la 3ème correction du Rhône – phase I [Bouzelboudjen & Király, 1998]. Le bloc diagramme c) illustre un résultat utilisant l'astuce de la double numérotation pour simuler des palplanches et montre la combinaison d'éléments, 2D et 3-D quadratiques à base triangulaire ou rectangulaire [Bouzelboudjen & Király, 1988, 1990].

fichiers FEN vers ArcInfo et ArcView [FEN-ARC, Király, 1998]. Une autre interface a été créée entre les logiciels Feflow et FEN's code family (FEN-FEFLOW & FEFLOW-FEN, [Király, 1998]) pour la réalisation du modèle du bassin Pannonien dans le cadre de la thèse de J. Viskok, soutenue à l'Université de Genève [Viskok, 2000].

La figure 48 montre un profil en long (profil 6 voir Fig. 38), alors que la figure 49 montre deux profils en travers, correspondant aux sections 19 et 22. La surface de la nappe libre est représentée par une ligne rouge. Rappelons que le sommet du modèle représente la surface topographique. L'épaisseur des limons saturés peut être estimée sur ces figures et comparée à la figure 53, représentant la carte 2-D des limons saturés. L'influence des puits Sandmatt B1, Nord 83, ainsi que du Rhône et des canaux, est très prononcée. Des petits systèmes locaux sont créés par leur présence, alors que l'écoulement général (régional) se fait d'est en ouest. Les figures 48 et 49 ont été exportées de Feflow puis finalisées dans ArcView. Les longueurs des flèches des vecteurs vitesse de filtration ne sont pas proportionnelles à leur vitesse. La figure 50 montre un bloc diagramme écorché, ainsi qu'un certain nombre de lignes de courant représentées par des tubes rouges, dont la largeur peut être définie par l'utilisateur. Dans la partie amont, par exemple, on peut remarquer la forte influence du Rhône et du canal de Brigerbad. Les lignes de courant sont pratiquement toutes verticales. Cette figure montre la complexité des lignes de courant 3-D simulées. En regardant cette image, il est clair qu'il est dangereux de traiter en 2-D des phénomènes qui se déploient en 3-D. Une ligne de courant peut traverser toutes les couches en direction de la surface et ensuite les retraverser en direction de la base du modèle. La figure 51 montre ce genre de ligne de courant, et la figure 52, sa projection sur un plan vertical. Cette figure montre également des isochrones sous forme de disques perpendiculaires à la ligne de courant. Chaque isochrone représente 50 jours.

4.11 Validation des résultats

La dernière étape de la modélisation consiste à confronter les résultats du modèle, soit les débits et potentiels calculés, avec les mesures de terrain. Le tableau 4 montre la comparaison des potentiels mesurés aux 25 points de contrôle (Fig. 42) et calculés pour une variante. On remarque une bonne concordance entre les valeurs calculées aux points de contrôle et les valeurs mesurées. La moyenne des différences est de 20 cm, alors que le minimum est de 0.01 cm, le maximum de 86 cm et l'écart-type de 23 cm. La figure 54 montre la dispersion des résultats sous forme de «box plots» pour 5 champs de perméabilité simulés par géostatistique. On remarque, par exemple, que la dispersion des potentiels est relativement faible et est en moyenne inférieure à 50 cm. Ce phénomène est normal, car les conditions aux limites imposées le long des limites aval et amont, ainsi que le long du Rhône et des canaux, restent constantes pour toutes les variantes.

Alors qu'il est relativement aisé de caler un modèle avec les potentiels hydrauliques, cela devient un peu plus difficile avec les débits. Le tableau 5 montre la comparaison des débits calculés par le modèle et les débits mesurés sur le terrain (jaugeages au sel par secteur [Ornstein, 1997]). La localisation des stations de mesures se trouve sur la figure 53 qui montre, pour chaque station, le débit mesuré et le débit corrigé, ainsi que la participation de chaque tronçon à la recharge ou décharge de l'aquifère. Les débits aux stations sont corrigés afin de ne prendre en compte que la participation des eaux souterraines. C'est ainsi que tous les débits des émissaires

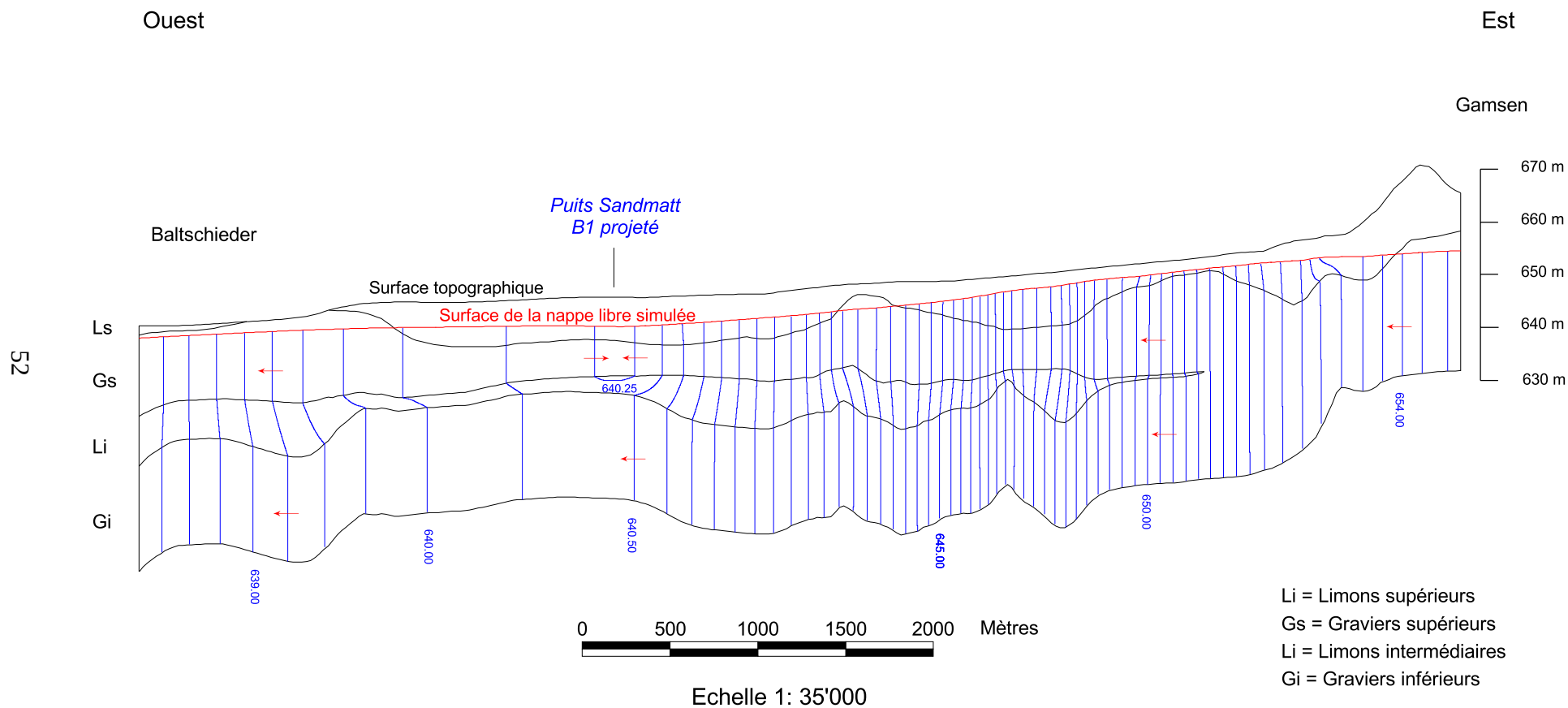


Figure 48 : Equipotentiels en mètres et surface de la nappe libre simulée de la variante 06a le long de la section 6 (Fig. 38). Exagération verticale 1: 30

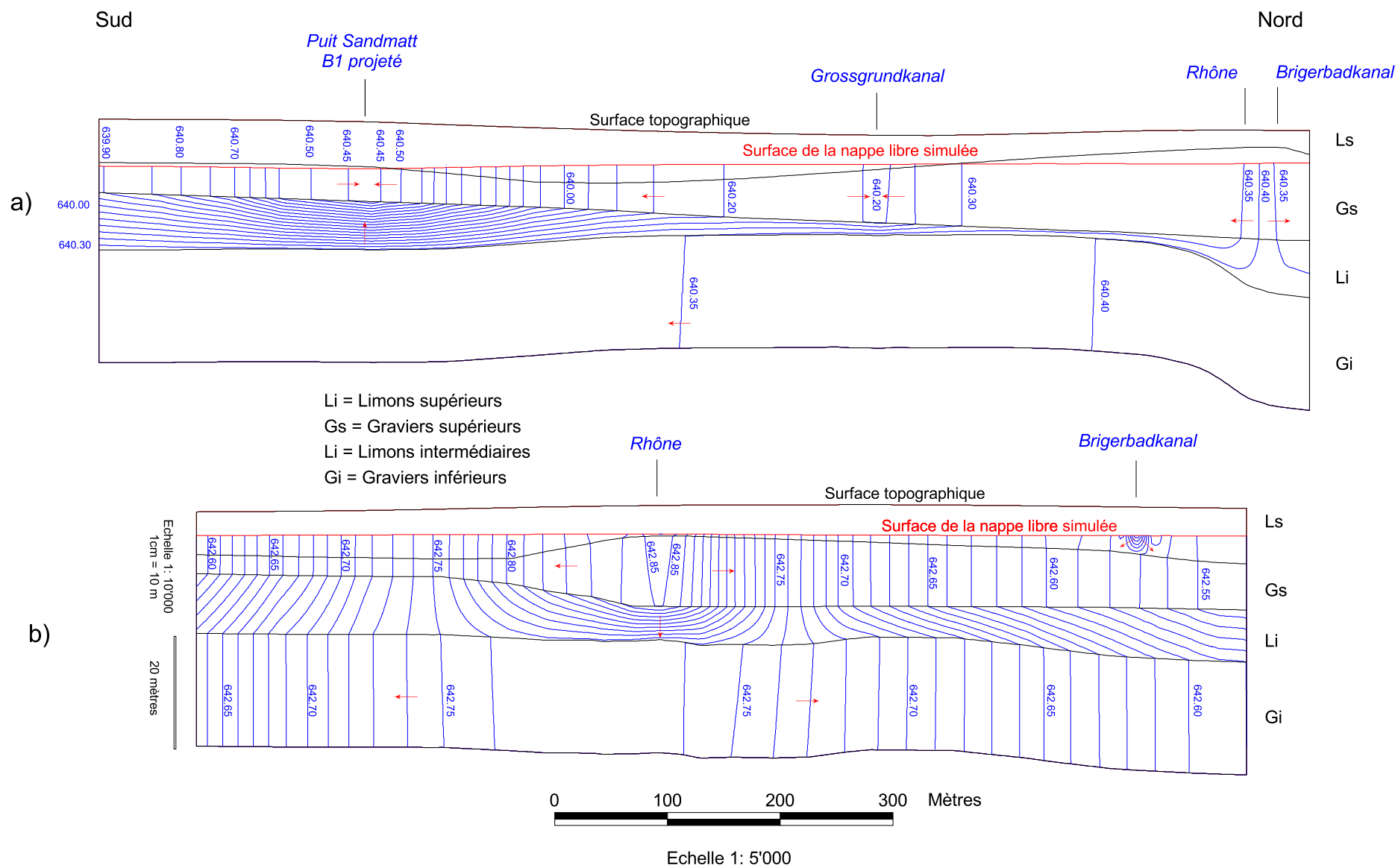


Figure 49 : Equipotentiels en mètres et surface de la nappe libre simulée de la variante 06a (exagération verticale 1: 5) a) Section 19, b) Section 22 (voir Fig. 38)

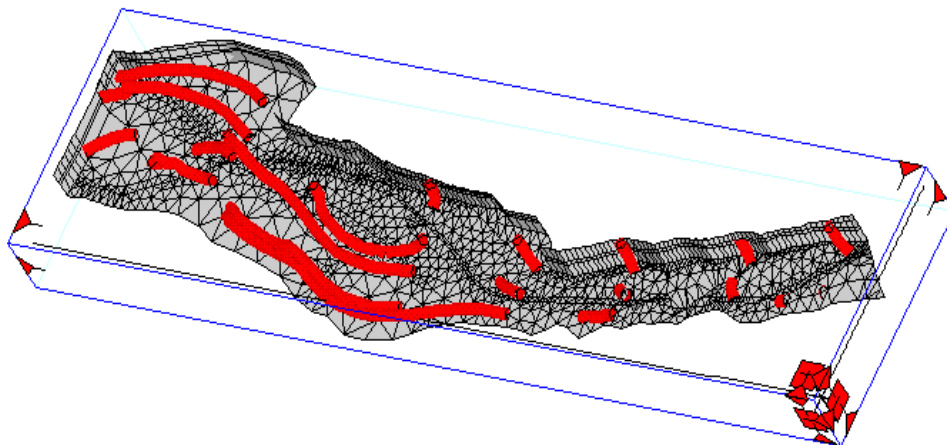


Figure 50 : Bloc diagramme 3-D montrant des lignes de courant simulées

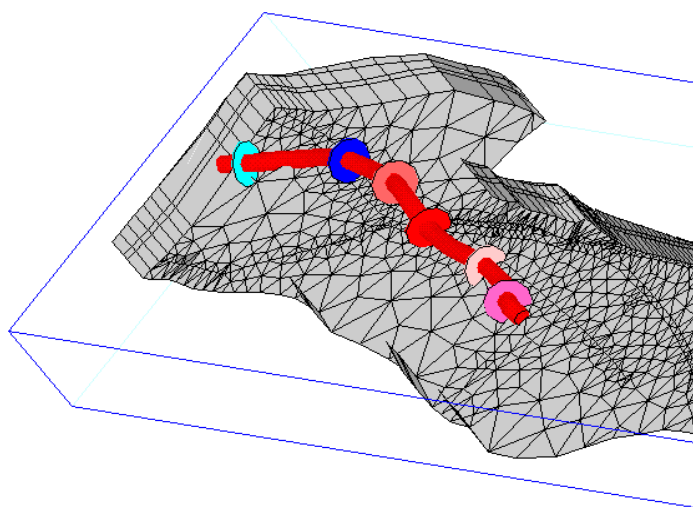


Figure 51 : Bloc diagramme 3-D montrant une ligne de courant simulée avec isochrones (50 jours)

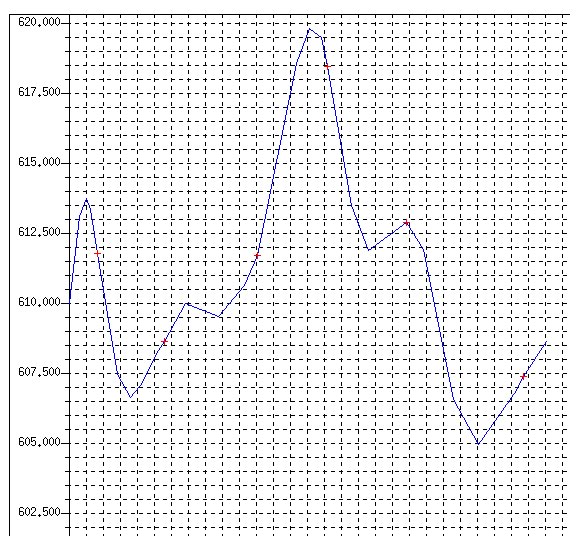


Figure 52 : Ligne de courant simulée de la figure 50 projetée sur un plan vertical

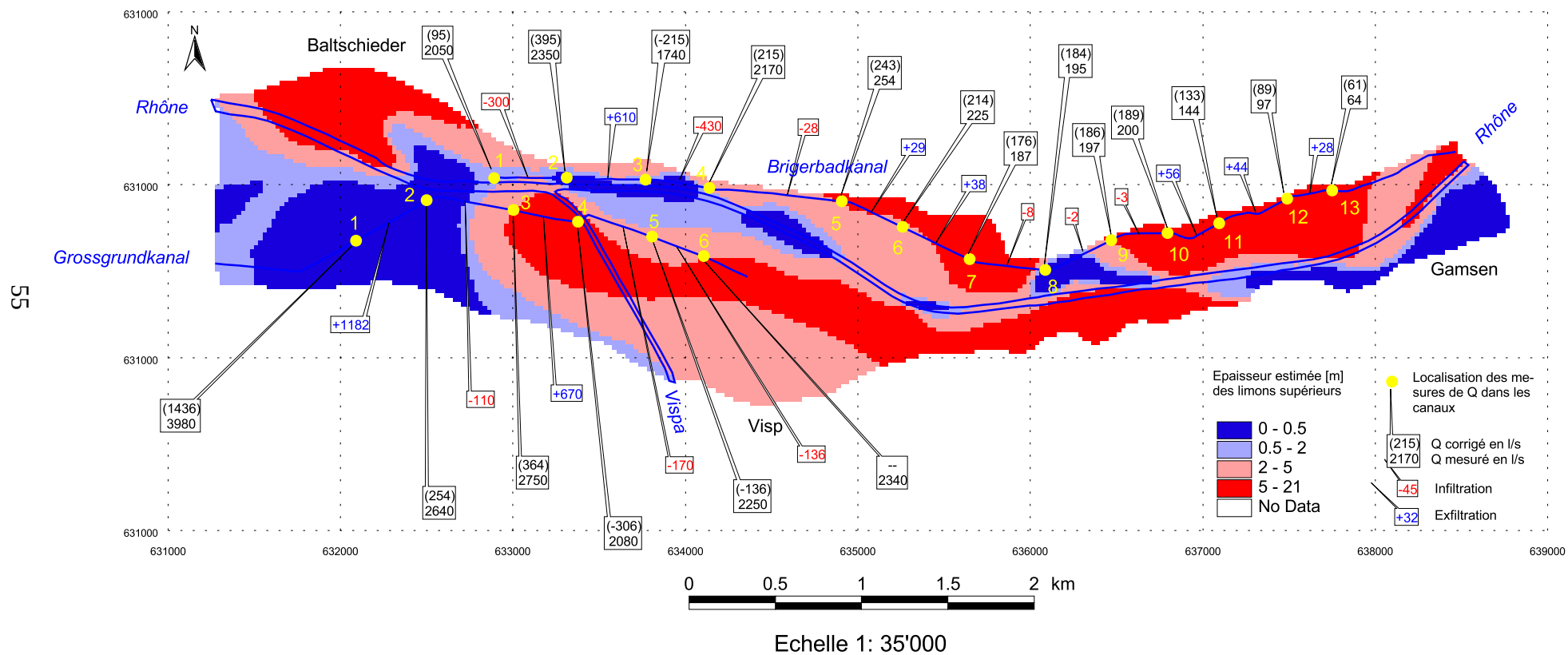


Figure 53 : Carte de l'épaisseur estimée en mètres des limons supérieurs saturés ainsi que position des mesures de débits en l/s dans les canaux (hautes-eaux 1997), débits mesurés, débits corrigés et participation de chaque tronçon à la recharge ou décharge de la nappe.

Id Feflow	X [m]	Y [m]	H mesuré [m]	H calculé [m]	Différence mes.-calc. [m]	Différence mes.-calc. Val abs [m]
1	637172.57	127626.91	651.77	651.54	0.23	0.23
2	636492.16	127266.68	649.44	649.45	-0.01	0.01
3	638345.00	127790.00	653.81	654.67	-0.86	0.86
4	636890.22	127322.62	650.58	650.65	-0.07	0.07
5	636876.82	127578.30	650.68	650.72	-0.04	0.04
6	632080.63	128418.27	640.45	640.43	0.02	0.02
7	636229.89	127196.74	648.31	648.48	-0.17	0.17
8	635481.97	127041.18	644.99	645.78	-0.79	0.79
9	635197.27	127140.30	645.10	644.94	0.16	0.16
10	634805.00	127402.00	643.79	644.04	-0.25	0.25
11	634420.00	127622.00	642.99	643.18	-0.19	0.19
12	634241.00	127218.00	642.68	643.27	-0.59	0.59
13	634192.90	126884.76	643.27	643.34	-0.07	0.07
14	636457.00	127531.00	649.86	649.63	0.23	0.23
15	635170.00	127636.00	644.50	644.73	-0.23	0.23
16	637794.00	127797.00	653.13	653.21	-0.08	0.08
17	632984.34	127578.62	641.92	641.94	-0.02	0.02
18	633007.51	127267.07	641.96	642.02	-0.06	0.06
19	637978.09	127551.95	653.35	653.51	-0.16	0.16
20	632531.39	127754.32	641.27	641.32	-0.05	0.05
21	632440.00	128256.00	641.22	641.10	0.12	0.12
22	631792.00	128109.00	639.92	639.94	-0.02	0.02
23	633851.00	127798.00	642.68	642.65	0.03	0.03
24	633796.00	127464.00	642.98	642.73	0.25	0.25
25	638290.91	128050.18	654.45	654.75	-0.30	0.30

Tableau 4 : Comparaison des potentiels mesurés et calculés pour la variante Visp3d07

Canal	Tronçon	Q mesuré [l/s]	Q calculé [l/s]	Différence [l/s]
Brigerbad	01-02	-300	-5	295
	02-03	610	-21	631
	03-04	-430	-23	407
	04-05	-28	-6	22
	05-06	29	4	25
	06-07	38	2	36
	07-08	-8	2	10
	08-09	-2	-30	28
	09-10	-3	-4	1
	10-11	56	-2	58
	11-12	44	-1	45
	12-13	28	1	27
Grossgrund	02-03	1182	8	1174
	03-04	-110	-2	108
	04-05	670	0	670
	05-06	-170	-1	169
	06-07	-136	2	138

Tableau 5 : Comparaison entre débits mesurés et calculés (variante Visp3d07) le long des canaux de Brigerbad et Grossgrund (voir localisation des tronçons sur Fig. 53)

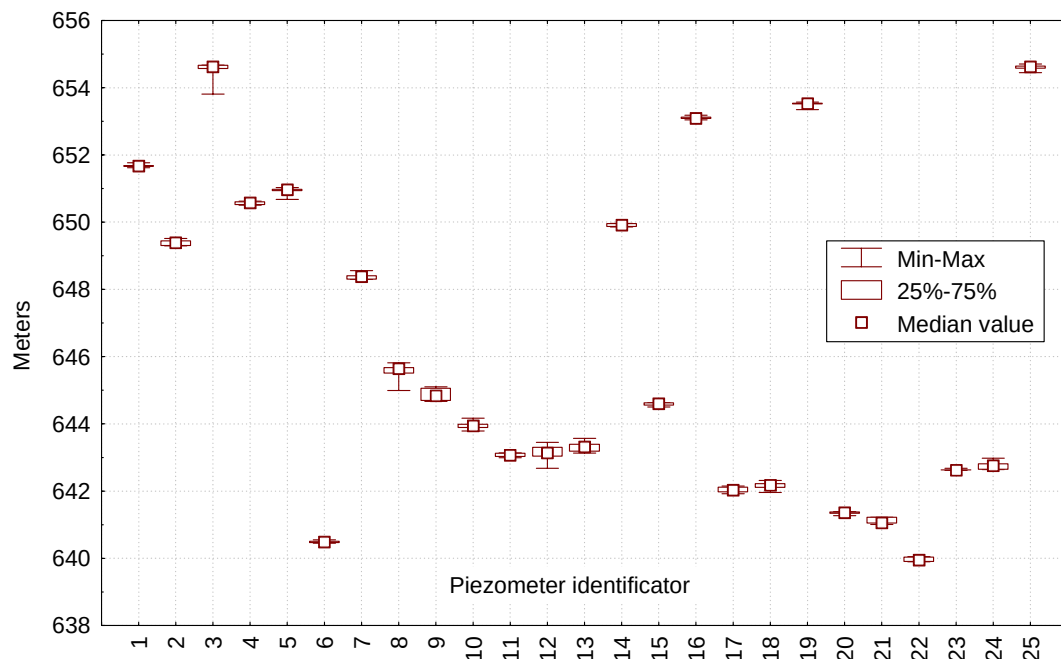


Figure 54 : Résultats sous forme de Box et Whisker Plot pour les potentiels hydrauliques calculés aux 25 points de contrôle (cf fig 43) pour 5 champs de perméabilité simulés par géostatistique.

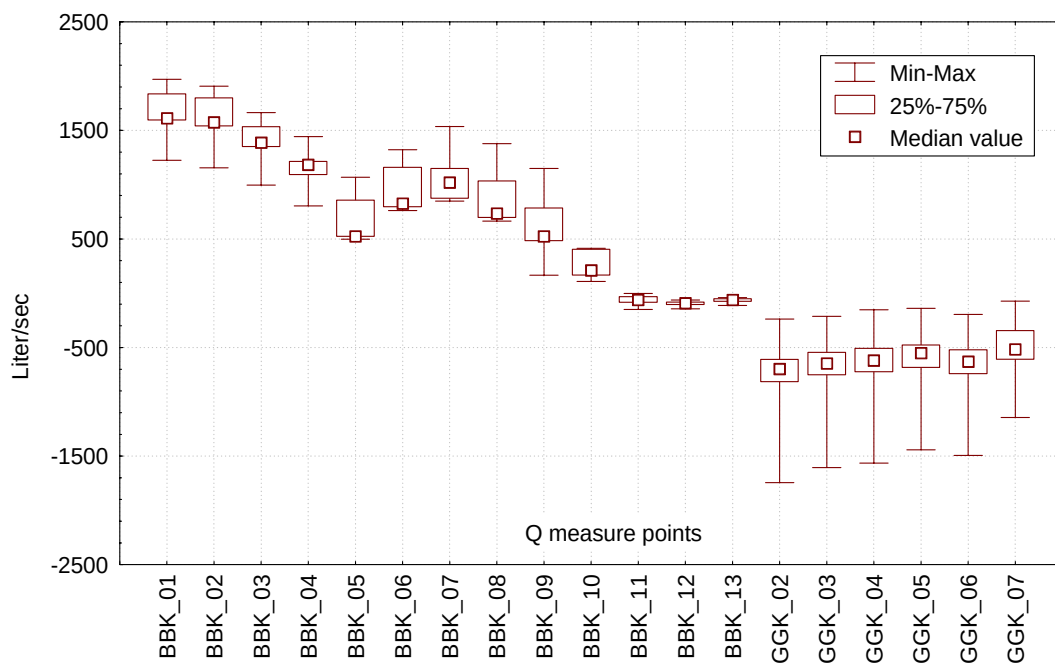


Figure 55 : Résultats sous forme de Box et Whisker Plot pour les débits calculés aux stations de jaugeage situées sur les canaux de Brigerbad et de Grossgrund (cf fig 53) pour 5 champs de perméabilité simulés par géostatistique. Le débit à une station (par ex. BBK_01) est la somme de tous les débits nodaux situés en amont de ce point. (-) = débit sortant du modèle, (+) = débit entrant dans le modèle.

arrivant dans les canaux sont soustraits des débits aux stations. La comparaison des débits calculés et des débits mesurés devrait faire l'objet d'un calage plus minutieux, ce qui n'entre pas dans le cadre de la description de la méthodologie. L'influence sur les débits du champ de perméabilité est primordial. La figure 55 montre la dispersion des résultats sous forme de «box plots» pour 5 champs de perméabilité simulés par géostatistique. On remarque, par exemple, que la dispersion des débits sur le tronçon 2 du canal du Grossgrund est de 1'430 l/s, avec -280 l/s comme minimum et -1'710 l/s comme maximum.

5. APPLICATIONS DU MODELE 3-D DEVELOPPE DANS LA REGION DE VISP

Dans ce chapitre, nous présentons deux applications du modèle 3-D lié à la base de données hydrogéologiques développée au cours du Fonds national. Ces deux applications sont la 3^{ème} correction du Rhône, phase II (étude mandatée par le canton du Valais) et la simulation 3-D d'une pollution fictive liée à la décharge de Gamsen.

5.1 Étude de l'influence de la 3^{ème} correction du Rhône, phase II, sur les écoulements souterrains à Visp

Le modèle 3-D développé à l'échelle 1: 5'000 dans le cadre du Fonds national a été utilisé pour l'expertise de la 3^{ème} correction du Rhône phase II. La réactualisation de ce modèle a été rendue possible grâce à la base de données SIG 1: 5'000 en modes raster et vecteur développée au cours du Fonds national. Cette étude, réalisée dans la région de Baltschieder-Gamsen pour le Service des routes et des cours d'eau, Département des transports, de l'équipement et de l'environnement de l'État du Valais, fait suite à celle effectuée par le Dr M. Bouzelboudjen et le Prof. L. Király [1998] et tient compte de leurs recommandations. Cette première phase a permis d'étudier l'influence de la 3^{ème} correction du Rhône (abaissement de son lit), dans la région de Baltschieder-Lalden, sur les écoulements souterrains, pour la période des hautes-eaux de juillet 1987 [Bouzelboudjen & Király, 1988, 1990, 1991]. De ces recommandations découlent les travaux préparatoires réalisés dans le cadre de cette étude par le CREALP (Centre de Recherches en Environnement Alpin, Sion), à savoir la carte des infiltrations et exfiltrations [Kimmeier, 1999 – Fig. 56], ainsi que la validation et l'élaboration de la carte piézométrique des basses-eaux 1992 [Kimmeier, 2000 – Fig. 40]. Les valeurs de potentiels et de débits mesurées dans les canaux de Brigerbad et de Grossgrund lors des basses-eaux 1999 (prévues initialement pour cette étude) n'ont pas été utilisées, car elles correspondent à une situation de dégel et par conséquent, ne sont pas représentatives de basses-eaux. Le choix s'est porté, en accord avec le CREALP, sur les valeurs des basses-eaux 1992.

Les objectifs de cette étude sont :

- a) la simulation numérique des écoulements souterrains 3-D (tridimensionnels) lors des basses-eaux 1992 et l'évaluation des échanges entre le Rhône et la nappe alluviale,
- b) l'étude de l'effet du «colmatage» du Rhône sur les infiltrations dans la nappe (introduction d'une couche de 1 mètre d'épaisseur et de conductivité hydraulique variant de 10^{-5} à 10^{-7} m/s), et

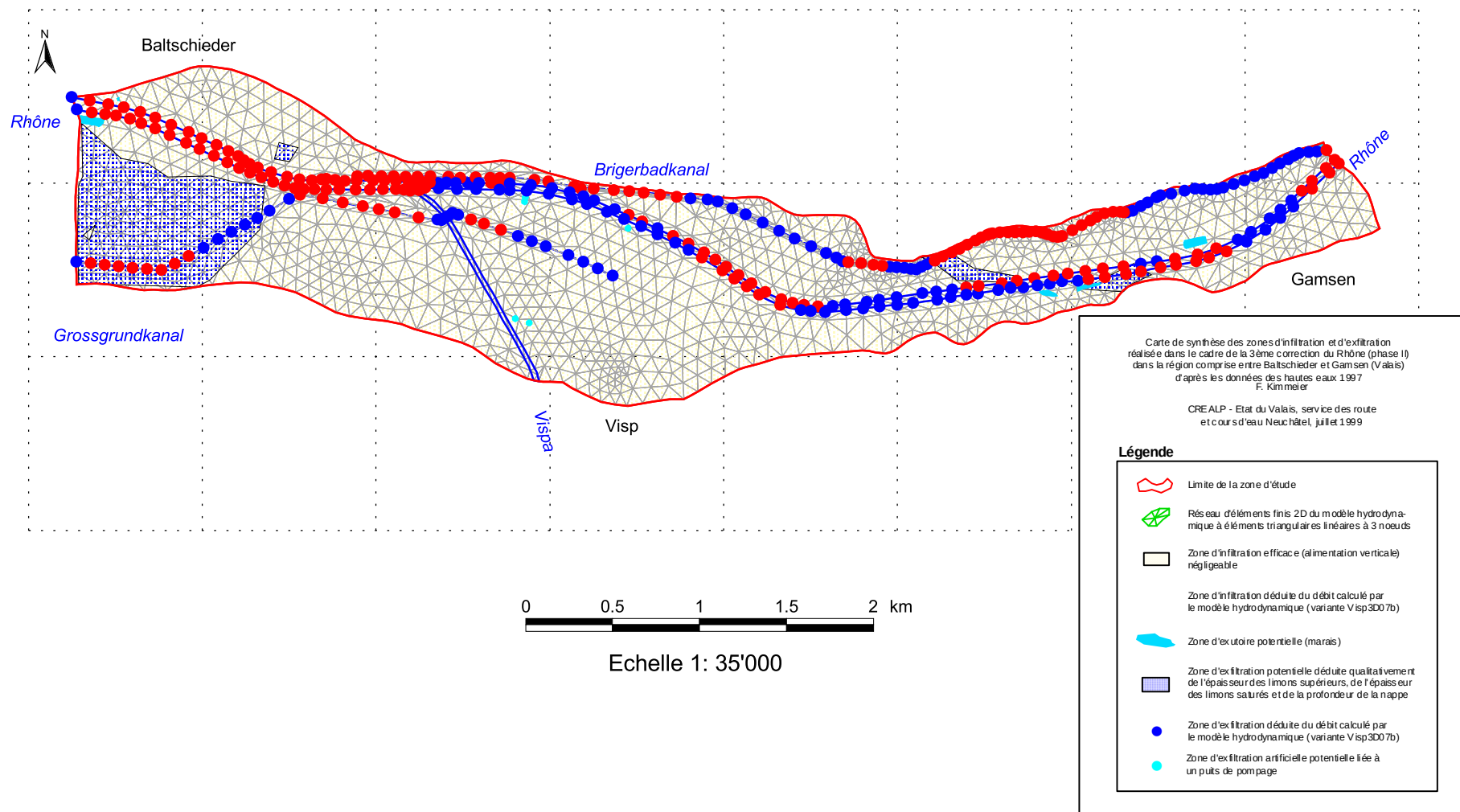


Figure 56 : Carte de synthèse des zones d'infiltration et d'exfiltration réalisée dans le cadre de la 3ème correction du Rhône (phase II) dans la région comprise entre Baltschieder et Gamsen (Valais) d'après les données des hautes 1997. Carte originale au 1: 5'000.

- c) l'étude de l'impact de parois moulées dans les digues du Rhône, lors d'une crue exceptionnelle (lit majeur complètement inondé).

Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide de modèles mathématiques à éléments finis tridimensionnels et bidimensionnels à l'aide du logiciel Feflow [Diersch, 1999].

Toutes les données utilisées dans le cadre de cette étude font partie intégrante de la base de données spatiales élaborée dans le cadre du projet Fonds national (N° 21-39357.93 et N° 2047-064-96) initié par M. J.-D. Rouiller (géologue cantonal du Valais et directeur du CREALP) et par le Dr M. Bouzelboudjen (chargé de cours et chef de projet au CHYN, Université de Neuchâtel).

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) Arc/Info 7.2 Unix [ESRI, 1995] et ArcView 3.1 Windows [ESRI, 1996a] ont été utilisés conjointement au logiciel Feflow comme pré- et post-processeurs. Cette démarche d'intégration et «d'interfaçage» entre les modèles hydrogéologiques et les SIG est décrite dans Bouzelboudjen & Kimmeier [1998].

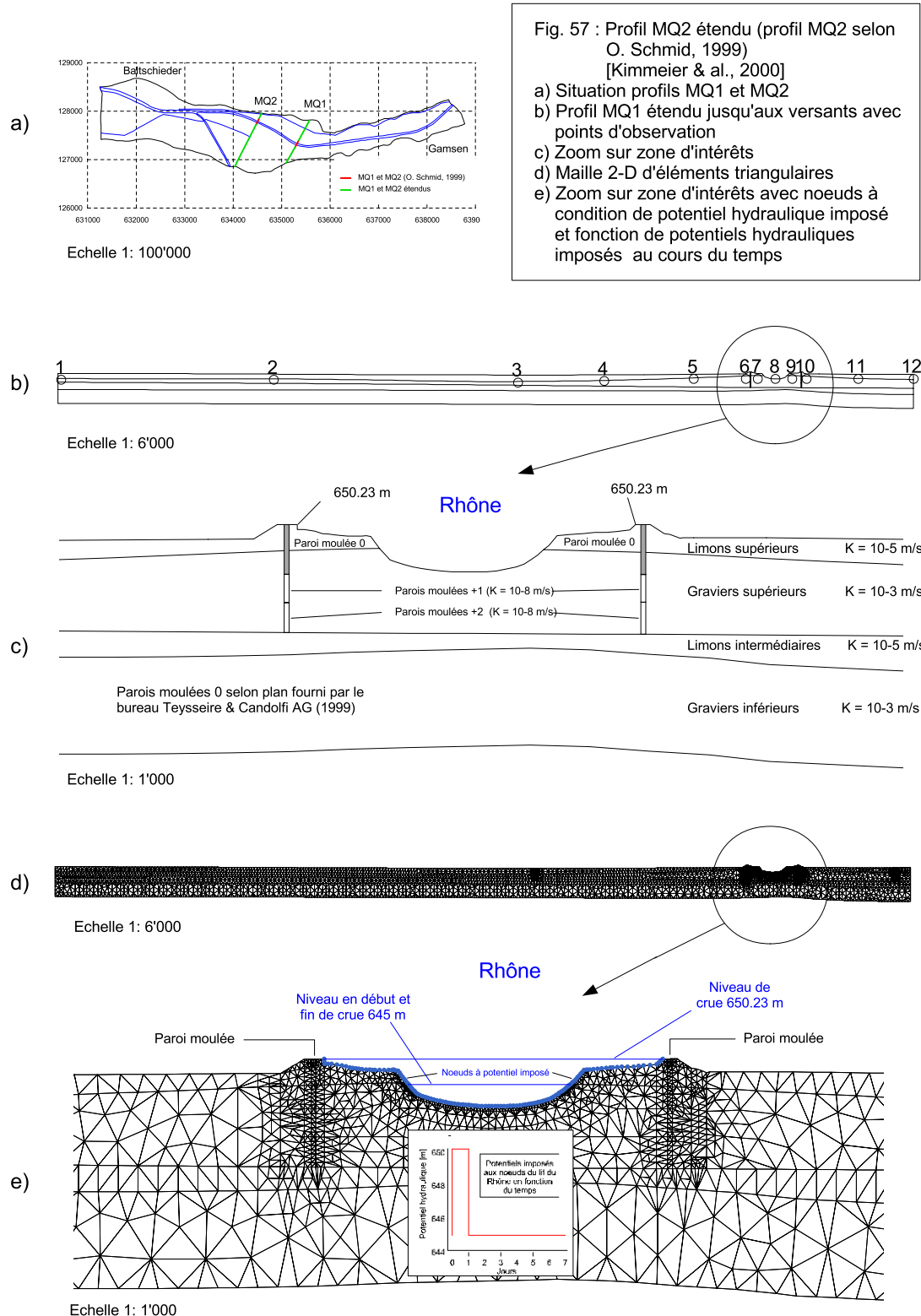
Seule l'étude de l'impact de parois moulées dans les digues du Rhône lors d'une crue exceptionnelle sera décrite ici, la description du modèle 3-D ayant fait l'objet du chapitre précédent.

Pour simuler l'effet de parois moulées dans les digues du Rhône lors d'une crue exceptionnelle, des modèles en deux dimensions (coupes verticales) tirés du modèle 3-D ont été utilisés. L'approche 2-D est suffisante pour mettre en évidence les variations de trajectoire et de vitesse des flux dans les digues du Rhône lors d'une crue soudaine. En effet, les gradients hydrauliques perpendiculaires aux digues, lors d'une crue, sont nettement supérieurs au gradient général de la nappe qui n'excède pas quelques pour mille. Par conséquent, la composante parallèle à la direction générale des écoulements dans la vallée peut être négligée lors de la crue et décrue rapide du Rhône. Les simulations ont été faites en régime transitoire, avec calcul de la nappe libre en milieu variablement saturé.

Pour l'étude de l'impact des parois moulées, les deux coupes MQ1 et MQ2 étendues, fournies par le bureau O. Schmid [1999] dont la lithologie et les paramètres hydrodynamiques (potentiels hydrauliques et conductivités hydrauliques) sont relativement bien connus, ont été modélisées. Ces coupes ont été combinées avec des profils 2-D extraits du modèle 3-D. Elles s'étendent jusqu'aux limites du modèle 3-D qui sont des limites à flux nul. Seule la coupe MQ2 sera présentée ici (Fig. 57a à 57e).

La position et la profondeur respectives des parois moulées, prévues par le bureau Teyssie et Candolfi [1998], ont été modélisées, non seulement jusqu'à la profondeur prévue dans les graviers supérieurs (parois moulées 0), mais également à une profondeur supérieure d'environ un 1/2 pour le profil MQ2 étendu (parois moulées +1). De plus, une dernière variante (parois moulées +2) simule des parois moulées atteignant les limons intermédiaires constituant ainsi, un barrage hydraulique complet (Fig. 57c).

Cette démarche a été utilisée par Bouzelboudjen et Király en 1988 et 1990. L'élaboration complexe de la coupe MQ2 étendue (géométrie et base de données des paramètres hydrauliques saturés et non saturés) a été réalisée à l'aide des SIG Arc/Info et ArcView.



Le réseau 2-D coupe MQ2 étendu comporte 5'606 éléments triangulaires linéaires avec 3'187 noeuds. Le temps de calcul, sur une station Compaq/Unix 500 AU, pour une variante, est de l'ordre de 60 minutes. Les travaux effectués sont les suivants :

génération de la géométrie et constitution de la base de données des paramètres hydrauliques saturés et non saturés à l'échelle 1: 1'000, selon le profil MQ2

- fourni, pour l'étude de l'impact de parois moulées dans les digues du Rhône (étape réalisée à l'aide du SIG Arc/Info),
2. calculs en régime transitoire avec calcul de la nappe libre et en incluant la zone non saturée, des potentiels hydrauliques et des débits maximaux perpendiculaires aux digues sans parois moulées en situation de conductivités hydrauliques homogènes et isotropes (variante 00R) et hétérogènes (variante 01R),
 3. idem mais en intégrant une conductivité hydraulique de 10^{-8} m/s pour les parois moulées (variante 02R, voir Fig. 57c),
 4. idem mais en prolongeant les parois moulées d'environ 1/2 (variante 03R),
 5. idem mais en prolongeant les parois moulées jusqu'aux limons intermédiaires (variante 04R).

Le profil MQ2, étendu jusqu'aux limites du modèle 3-D (Fig. 57a et Fig. 57b), qui correspondent plus ou moins aux limites de la vallée, permet de tester l'impact de parois moulées dans les digues du Rhône. La lithologie simplifiée de ce modèle, ainsi que son maillage, sont représentés sur la figure 57d. Les conditions aux limites imposées à flux nul sont issues du modèle 3-D (limites verticales et limite inférieure). Les potentiels hydrauliques ont été imposés sur les nœuds du lit du Rhône pour simuler une crue et une décrue. Les paramètres imposés aux milieux saturé et non saturé sont consignés dans l'annexe 7. Le modèle de Van Genuchten [1980] a été retenu pour les propriétés hydrodynamiques de la zone non saturée [Morel-Seytoux, 1988]. Une revue détaillée de la modélisation et de la paramétrisation des propriétés hydrauliques des sols est exposée dans le chapitre 2 de la thèse de Trégarot [2000] et dans les travaux de Ababou [1992] et Ababou & al. [1993 et 1996]. De nouvelles expérimentations numériques à l'aide du code Bigflow2000 offrent de nouvelles perspectives pour aborder la simulation des écoulements en zone non-saturée et en zone variablement saturée, pour différents milieux fortement hétérogènes, voire fissurés et karstiques [Trégarot, 2000].

Les résultats du profil MQ2 étendu (2 parois moulées) sont présentés ci-après. Le fond du lit du Rhône se trouve dans les graviers. Il se trouve à environ 1.70 m à l'intérieur des graviers supérieurs. Le Rhône se trouve à environ 200 m du bord droite de la vallée et à environ 1000 m de la limite gauche du modèle 3-D. Deux parois moulées ont été introduites, une dans la digue gauche du Rhône et l'autre dans la digue droite. Cinq variantes ont été testées (00R à 04R).

Pour chacune de ces variantes, on a simulé la même crue et décrue, en imposant aux nœuds situés dans le lit du Rhône, un potentiel de 650.23 m, pendant un jour, puis pendant 6 jours un potentiel de 645 m. Cette crue représente une crue extrême avant débordement par-dessus les digues du Rhône. Comme condition initiale, le modèle a été saturé jusqu'à une cote de 645 m, ce qui correspond à un niveau du Rhône situé à 4.53 m comme profondeur maximale. La crue correspond donc à une montée des eaux de 5.22 m. Le niveau du Rhône a été stabilisé, après la crue, au même niveau qu'au début, soit à 645 m. La zone non saturée avant la crue est en moyenne de 4 m au-dessous du lit majeur du Rhône. Il faut signaler que la fonction des potentiels imposés pour simuler la crue du Rhône est fortement simplifiée (en rouge dans la figure 57e). Classiquement, pour simuler une crue-décru, des fonctions triangulaires ou mieux trapézoïdales plus proche de la réalité sont préférables.

La variante 00R simule un milieu homogène avec $K = 10^{-3}$ m/s. Pour toutes les autres variantes, on a introduit un champ de conductivités hydrauliques homogène avec $K = 10^{-5}$ m/s pour les limons, et $K = 10^{-3}$ m/s pour les graviers, ce qui correspond à des conductivités hydrauliques moyennes pour ces deux couches. Les parois moulées prévues ne sont introduites que dans la variante 02R, avec $K = 10^{-8}$ m/s (paroi moulée 0, Fig. 57c). Dans la variante 03R, les parois moulées sont étendues vers le bas d'environ la moitié de leur profondeur initiale (paroi moulée +1), et dans la variante 04R, elles sont prolongées jusqu'aux limons intermédiaires, afin de créer un barrage hydraulique complet (paroi moulée +2).

Les résultats de ces 5 variantes sont représentés sous forme de graphiques montrant la variation du potentiel hydraulique pendant 7 jours (1 jour de crue et 6 jours de décrue) à 12 points de contrôle situés à une profondeur identique de 640 m (Fig. 58 à 62). Ils sont tous situés dans les graviers supérieurs, sauf le point 12 sur la rive droite. Le tableau 6 montre la valeur du potentiel après 1 jour de crue aux points 1 à 12, ainsi que la comparaison de ces potentiels hydrauliques avec et sans parois moulées. Les débits à travers le fond du lit du Rhône après 1 jour de crue sont également présentés pour toutes les variantes, ainsi que la comparaison de ces débits entre certaines variantes.

En comparant les graphiques des potentiels hydrauliques simulés pour les variantes 01R et 02R (Fig. 58, 59), on constate que l'introduction de parois moulées dans les digues jusqu'à une profondeur d'environ 10 m a un effet relativement faible. Les points 7 et 9 (situés avant les parois moulées) présentent une différence de 1 et 0 cm. Les points 6 et 10 (situés après les parois moulées) présentent une différence de 8 et 5 cm. Les autres points présentent une variation comprise entre 3 et 0 cm. Dans la variante 03R (paroi moulée +1), l'effet est un peu plus marqué, mais reste relativement faible. Les points 7 et 9 (situés avant les parois moulées) présentent une différence de 4 et 2 cm. Les points 6 et 10 (situés après les parois moulées) présentent une différence de -35 et -26 cm. Les autres points présentent une variation comprise entre -16 et -1 cm. Par contre, dans la variante 04R, où les parois moulées ont été étendues jusqu'aux limons intermédiaires, l'effet sur les points 6 et 10 (situés après les parois moulées) est très marqué, les potentiels hydrauliques chutent de -2.56 et -2.39 m. Aux points 7 et 9, situés avant les parois moulées, le potentiel augmente de 25 et 17 cm. Les autres points présentent des variations de -1.35 m à -0.03 m.

En ce qui concerne les débits simulés transitant au travers du lit du Rhône, ils suivent les variations de potentiels hydrauliques. En comparant les débits entrant à la fin de la crue (après 1 jour), on constate que l'introduction des parois moulées (parois moulées 0, variante 02R) a un effet relativement faible, soit une diminution de $-0.9 \text{ m}^3/\text{j}$, représentant une variation de -1.9% en rive gauche et -2.2% en rive droite. L'extension de cette paroi vers le bas (paroi moulée +1, variante 03R) a un effet un peu plus marqué. En rive gauche, on a une diminution de débit de $-2.60 \text{ m}^3/\text{j}$ (-5.6%), alors qu'en rive droite, la diminution est de $-1.9 \text{ m}^3/\text{j}$ (-4.7%). Par contre, l'extension de la paroi moulée jusqu'aux limons intermédiaires (paroi moulée +2, variante 04R) a un effet très marqué sur les débits. En rive gauche, les débits chutent de 46.4 à $23.0 \text{ m}^3/\text{j}$, soit une diminution de $-23.4 \text{ m}^3/\text{j}$ (-50.4%). En rive droite, les débits chutent de 40.4 à $22.6 \text{ m}^3/\text{j}$, soit une diminution de $-17.8 \text{ m}^3/\text{j}$ (-44.1%).

En conclusion, les parois moulées prévues, situées à environ 10 m de profondeur [Schmid, 1999], ont un effet relativement faible sur les potentiels hydrauliques aux points de contrôle 1 à 12, et sur les débits à travers le lit du Rhône. L'eau passe sous

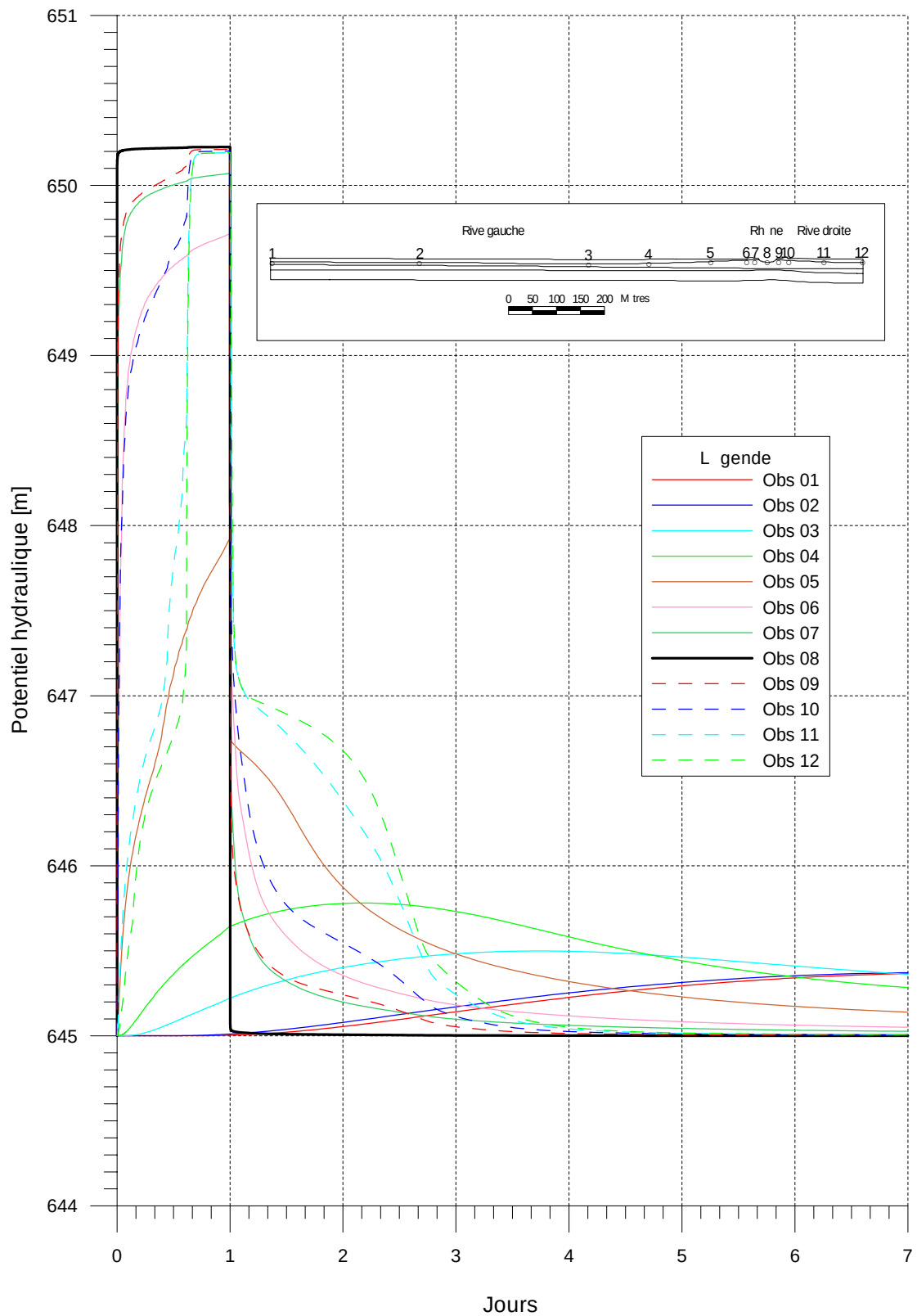


Figure 58 : Potentiels hydrauliques de la variante 00R sur le profil MQ2 étendu. Milieu homogène: $K = 10^{-3}$ [m/s], [Kimmeier & al., 2000].

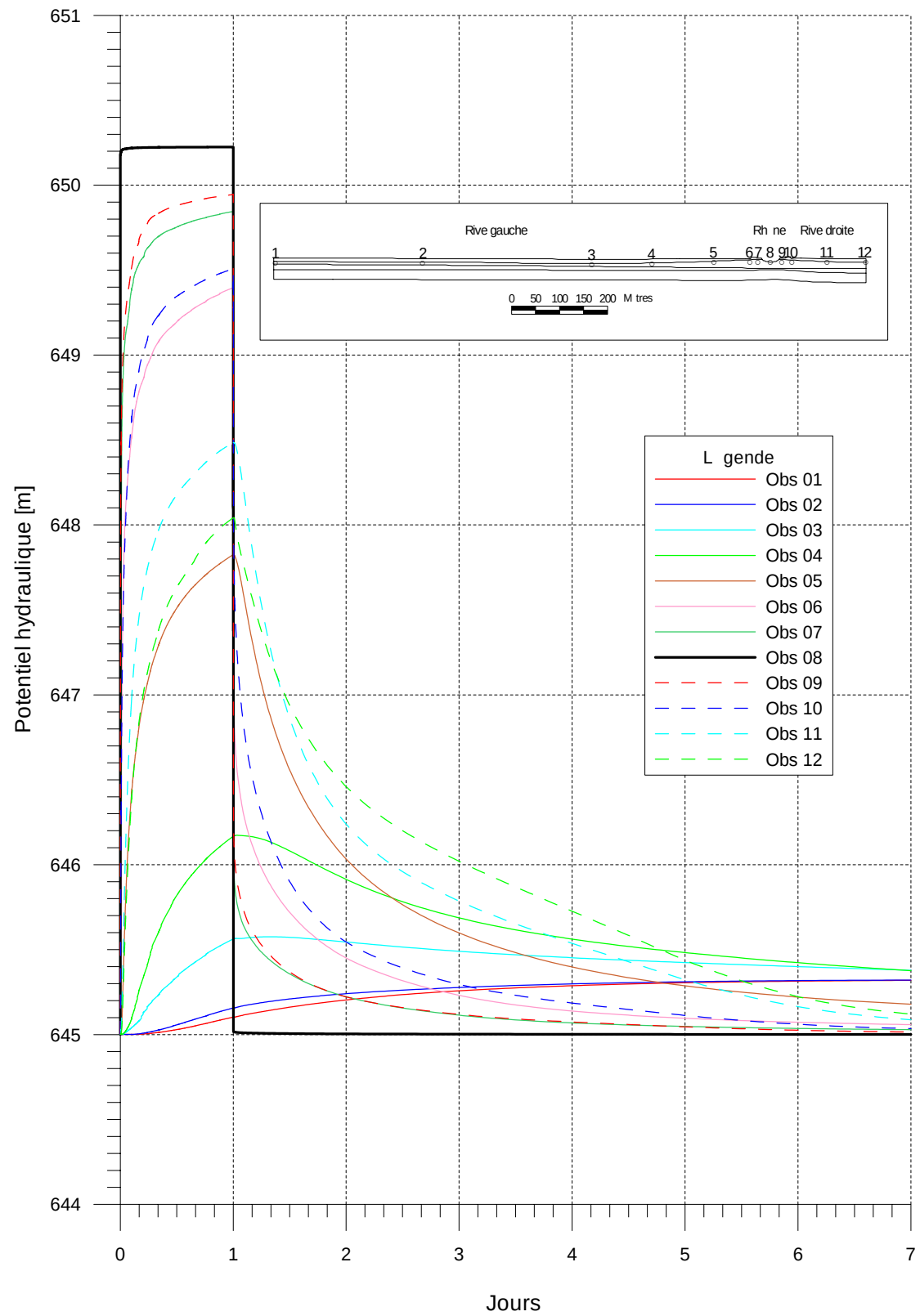


Figure 59 : Potentiels hydrauliques de la variante 01R sur le profil MQ2 étendu. Milieu hétérogène sans paroi moulée : $K_{\text{gravier}} = 10^{-3}$ [m/s], $K_{\text{limons}} = 10^{-5}$ [m/s], [Kimmeier & al., 2000].

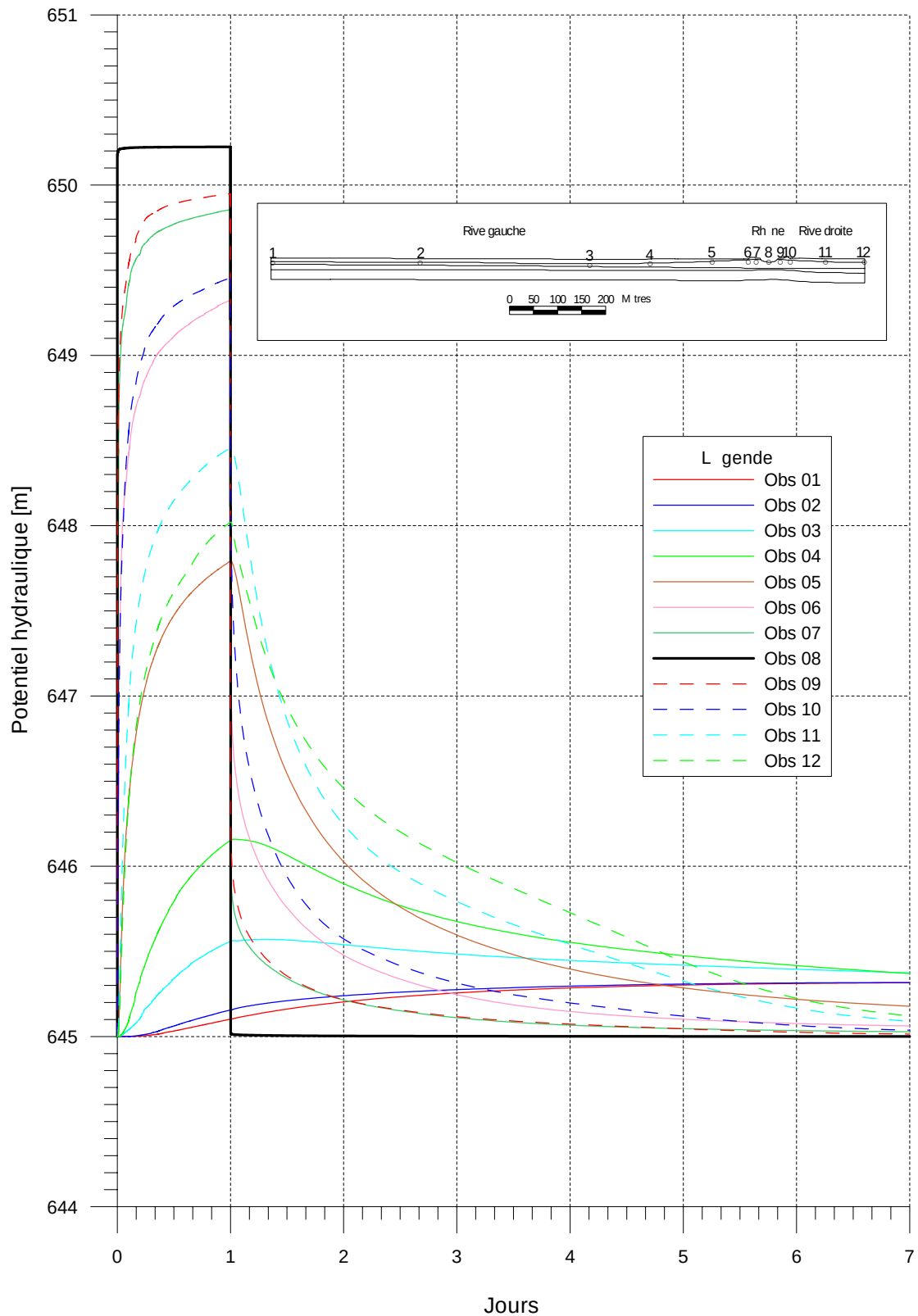


Figure 60 : Potentiels hydrauliques de la variante 02R sur le profil MQ2 étendu. Milieu hétérogène avec parois moulées, [Kimmeier & al., 2000] : $K_{\text{gravier}} = 10^{-3}$ [m/s], $K_{\text{limons}} = 10^{-5}$ [m/s], $K_{\text{paroi moulée}} = 10^{-8}$ [m/s].

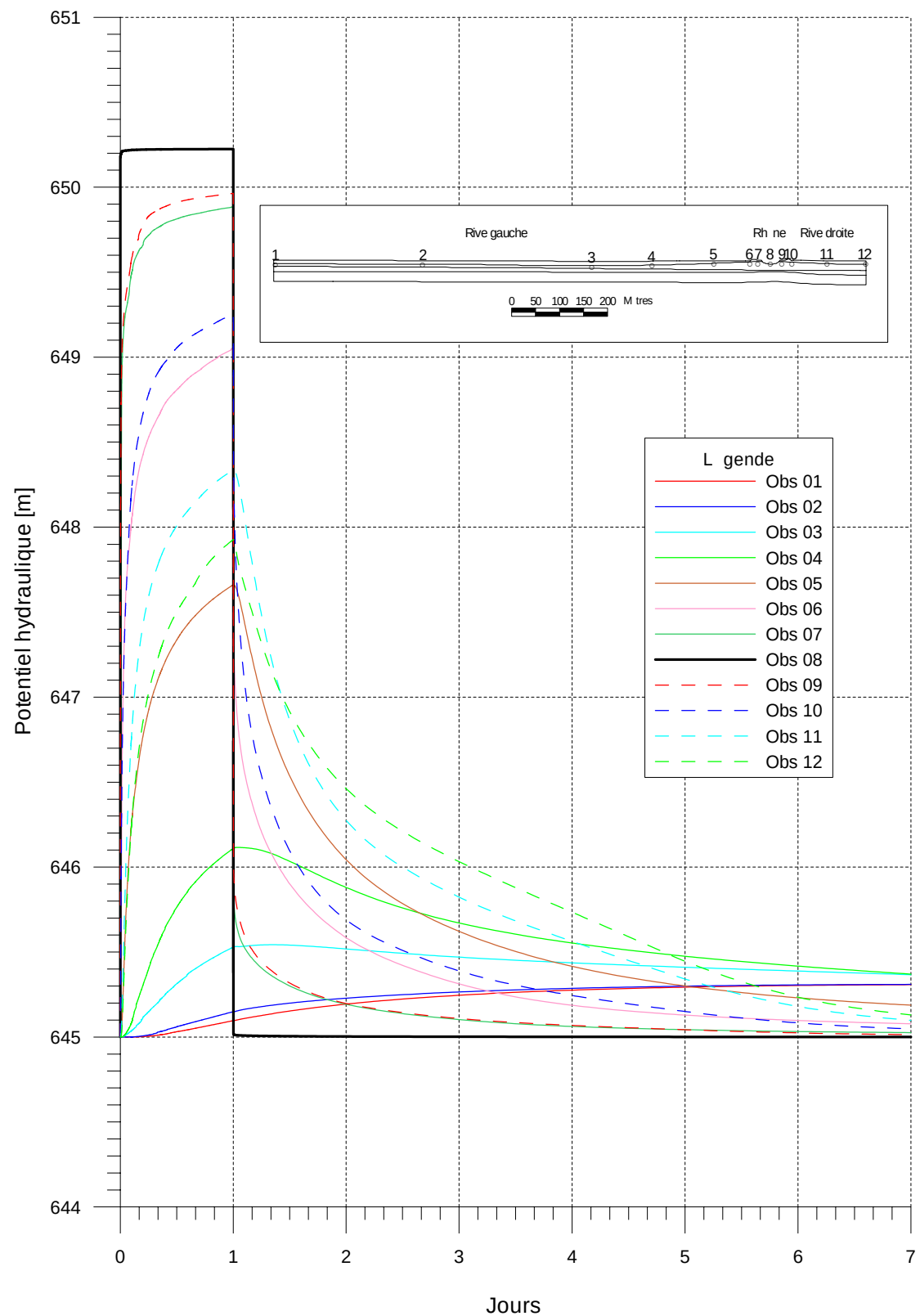


Figure 61 : Potentiels hydrauliques de la variante 03R sur le profil MQ2 étendu. Milieu hétérogène avec parois moulées +1, [Kimmeier & al., 2000] : $K_{\text{gravier}} = 10^{-3}$ [m/s], $K_{\text{limons}} = 10^{-5}$ [m/s], $K_{\text{paroi moulée +1}} = 10^{-8}$ [m/s]

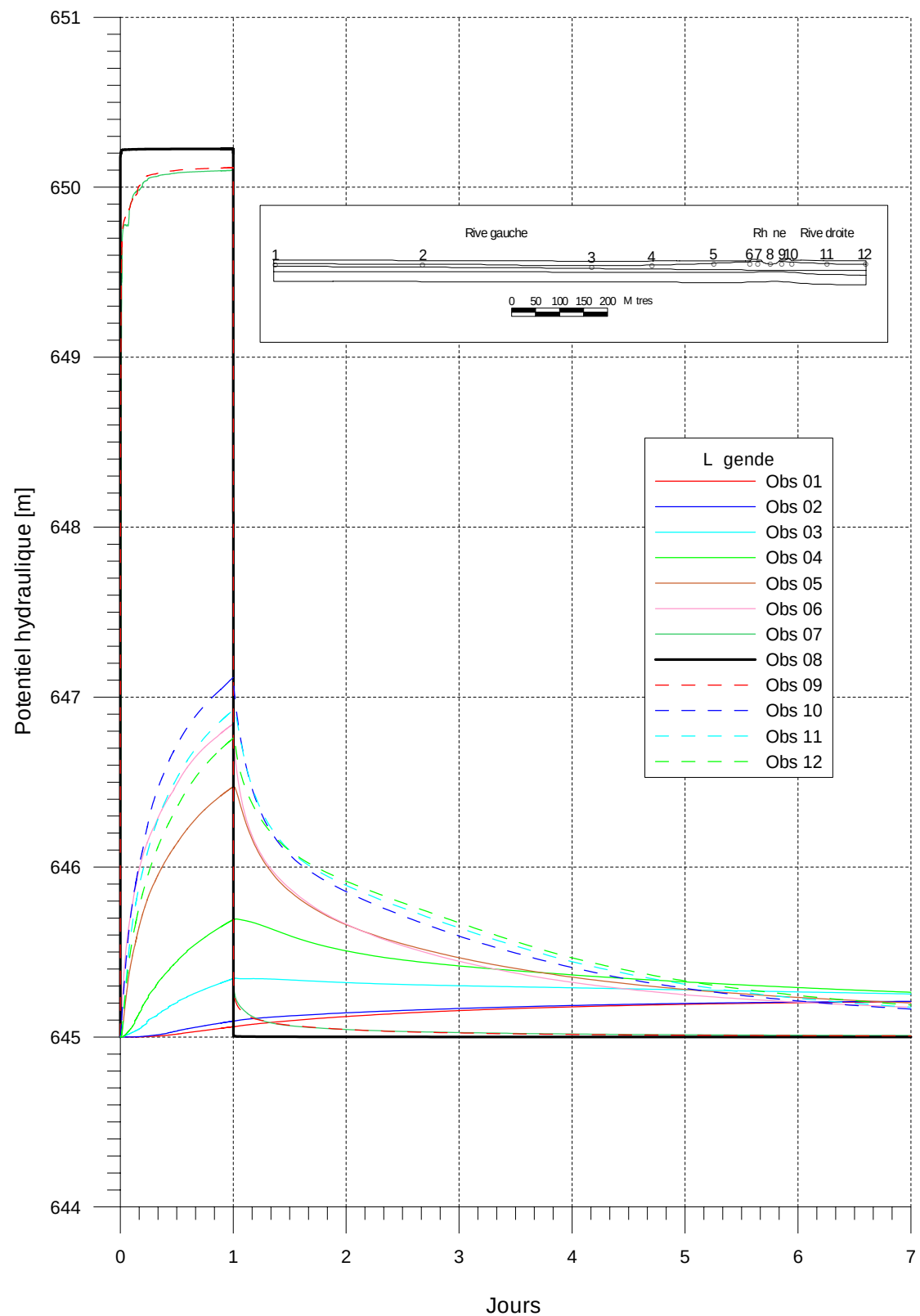


Figure 62 : Potentiels hydrauliques de la variante 04R sur le profil MQ2 étendu. Milieu hétérogène avec parois moulées +2, [Kimmeier & al., 2000]: $K_{\text{gravier}} = 10^{-3}$ [m/s], $K_{\text{limons}} = 10^{-5}$ [m/s], $K_{\text{paroi moulée +2}} = 10^{-8}$ [m/s]

les parois moulées. Les flux transitant à travers ces parois très peu perméables ($K = 10^{-8}$ m/s) sont quasi nuls, ce qui aura pour effet de diminuer considérablement l'effet de «renard hydraulique», et par conséquent, de protéger les digues lors de crues exceptionnelles. L'extension des parois moulées jusqu'aux limons intermédiaires diminue les débits de -50.4% à travers le lit du Rhône en rive gauche, et de -41.2% à travers le lit du Rhône en rive droite.

5.2 Simulation 3-D d'une pollution fictive liée à la décharge de Gamsen

La 2^{ème} application du modèle 3-D, liée à la base de données hydrogéologiques développée au cours du Fonds national, simule une pollution fictive liée à la décharge de Gamsen. Cette application se base sur les données des travaux antérieurs réalisés par Rossier [1989, 1990], qui a simulé la pollution de la nappe du Rhône en amont de Visp à l'aide d'un modèle 2-D coupe, dont le tracé correspond à une ligne de courant calculée par Marion Geister [1988] à l'aide de FEM301 en 3-D [Király, 1985]. Il a utilisé le code Sutra développé par Voss de l'US Geological Survey [1984]. Pour réaliser son étude mandatée par la Lonza AG, il s'est basé sur les travaux de Marion Geister qui a analysé pendant plusieurs années (1979 à 1986) l'aniline, le phénol, le pH, le TOC (Total Organic Carbon), l'ammonium, et les chlorures [Geister & Burger, 1986]. De ces études, il ressort que la qualité de l'eau de la nappe était gravement affectée par la pollution de la décharge entre Gamsen et Lalden. Depuis 10 ans, grâce aux mesures d'assainissement de la décharge, entreprise par la Lonza, la qualité des eaux s'améliore (communication orale de P. Ornstein, 2001).

Cette application n'a pas pour but d'étudier dans le détail la pollution liée à la décharge, mais montre la facilité de mise en œuvre, à partir d'une base de données hydrogéologiques d'un modèle 3-D (écoulement-transport) donnant des résultats plus proches de la réalité. Avec le modèle 3-D on s'affranchit des erreurs liées à la nature bidimensionnelle du modèle. L'usage d'une coupe présente l'inconvénient de ne pas prendre en considération ce qui se passe de part et d'autre de la ligne de courant.

5.2.1 Bases théoriques [in Rossier, 1990]

Partant de l'hypothèse que la densité du fluide est constante, c'est-à-dire que les concentrations en polluant sont assez faibles pour ne pas influencer sur la densité du fluide, il est possible d'écrire l'équation aux dérivées partielles régissant le transport de matière de la manière suivante [De Marsily, 1981] :

$$\text{Div} \left(-\overline{\overline{D}} \overrightarrow{\text{grad}} C \right) + \vec{u} \overrightarrow{\text{grad}} C + Q = \omega \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2)$$

où

C est la concentration de soluté [Kg/m³]

$\overline{\overline{D}}$ est le tenseur de dispersion [m²/s]

$\vec{u}$ est le vecteur vitesse [m/s]

t est le temps [s]

Q est le terme de source. il représente un flux [Kg/s.m³]

ω est la porosité du milieu [1]

Dans cette équation,

$$\vec{u} \overrightarrow{\text{grad}} C$$

représente la partie convective du transport : quantité de matière transportée par le flux d'écoulement moyen.

$$- \text{div} \left(\overline{\overline{D}} \overrightarrow{\text{grad}} C \right)$$

représente la partie dispersive du transport, où les variations de flux d'écoulement, liées à la complexité géométrique du milieu, provoquent des hétérogénéités autour de l'écoulement moyen, et une dispersion du soluté autour de l'axe moyen d'écoulement.

$$\omega \partial C / \partial t$$

représente la variation de concentration par unité de temps.

A cette équation, il faut ajouter des conditions aux limites S du système à étudier :

C est constante sur une partie de S

la concentration est donnée sur une portion de limite de l'aquifère et/ou,

dC/dt est constant sur une partie de S

c'est une condition de flux ; dans ce cas, une concentration est injectée ou retirée, par unité de temps, sur une portion de l'aquifère.

Les termes de source, représentés globalement par le terme Q, recouvrent l'ensemble des phénomènes de production et de substitution de soluté. Parmi ces phénomènes, il est possible de citer :

- les échanges d'ions,
- la dissolution-cristallisation des substances présentes dans l'eau,
- l'adsorption-résorption.

La mise sous forme d'équations de ces phénomènes est compliquée, et le couplage avec le modèle de transport difficile. Une représentation simple de l'adsorption-résorption peut être prise en considération. Dans ce type de phénomène, un élément contenu dans la phase fluide de l'eau peut être piégé dans la matrice poreuse. Il existe une relation établissant les échanges entre les deux phases :

$$\log F = \log K + (1/n) \log C \quad (3)$$

où

F est la concentration dans la matrice poreuse

C est la concentration dans la phase aqueuse

K [m^3/kg] et n [1], sont des paramètres de distribution de la concentration entre les deux phases.

Les cas les plus généraux font état de relations de type :

- linéaire, quand le paramètre n est égale à 1,

- Freundlich, quand le paramètre n est différent de 1.

Ces relations évoluent avec la température.

5.2.2 Choix du polluant modélisé, et conditions aux limites

Le choix du polluant modélisé s'est porté sur les chlorures, car comme le signale Yvan Rossier [1990], le cas des chlorures représente un cas idéal de pollution, en ce sens que cette substance peut être considérée comme un bon traceur. Il n'existe pas d'interaction avec la matrice poreuse.

Feflow a été utilisé pour le couplage écoulement-transport de masse [Diersch, 1999]. La variante utilisée correspond aux calculs 3-D des écoulements saturés (variante 06b) de la 3^{ème} correction du Rhône (Ann. 6). Les conditions aux limites correspondent aux basses-eaux 1992 et les débits pompés aux puits de la Lonza Sandmatt b1 et Nord 83 sont respectivement de 0.06 et 0.14 m³/s. L'alimentation distribuée (infiltrations efficaces) imposée est nulle. Le calcul effectué en 3-D simule une pollution de chlorures, dont la source se trouve dans la décharge de Gamsen, en aval du point de contrôle N° 19 (Fig. 63). La source de pollution est ponctuelle et correspond à l'injection dans le système de 250 mg/l pendant 10 ans, sans interruption. Le point d'injection est situé à la base des limons supérieurs. Toutes les limites du modèle sont considérées à flux massique nul. Seuls les chlorures provenant de la pollution sont pris en compte. Les chlorures présents dans l'état naturel des eaux souterraines sont négligés.

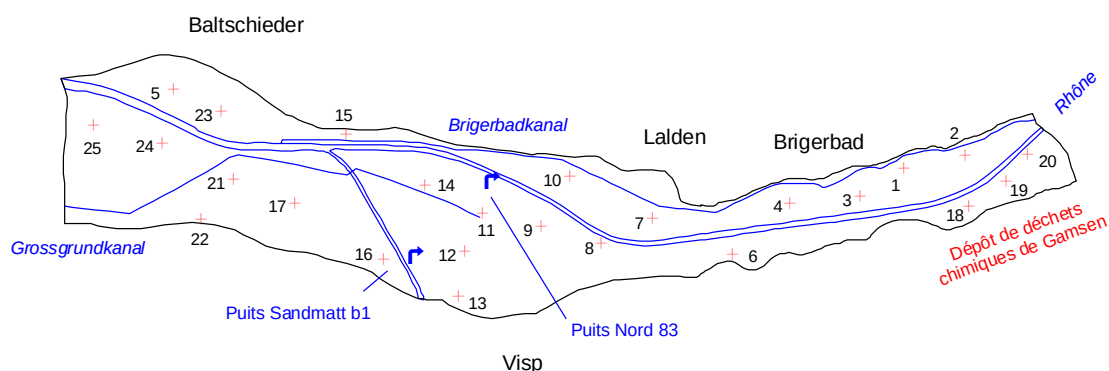


Figure 63 : Localisation des 25 points de contrôle de la propagation de la pollution fictive provenant de la décharge de Gamsen (voir Fig. 64, 65a-e)

Pour l'ensemble de l'aquifère, la dispersivité est anisotrope. La dispersivité longitudinale (α_l), dans le sens du vecteur moyen d'écoulement est de l'ordre de

$$\alpha_l = 45 \text{ m}$$

et la dispersivité transversale (α_t), perpendiculaire au vecteur moyen d'écoulement est de l'ordre de

$$\alpha_t = 10 \text{ m}$$

Enfin, la porosité des limons est de l'ordre de

$$\omega_{Ls} = 0.05 \text{ m}$$

et celle des graviers est de

$$\omega_{Gs} = 0.10 \text{ m}$$

Ces valeurs issues de la littérature sont reprise par Rossier [1990].

5.2.3 Résultats

La figure 63 montre la situation de la décharge de Gamsen. Le point d'injection des chlorures se situe immédiatement en aval du point N° 19. Elle montre également, la position des 25 points de contrôle pour détecter l'arrivée du front de pollution, et les 2 puits de pompage de la Lonza, Sandmatt b1 et Nord 83.

La figure 64 montre les temps d'arrivée du polluant aux différents points de contrôle, ainsi que la concentration maximale atteinte en chaque point. Par exemple, la concentration maximale (54 mg/l) s'observe au point de contrôle 18, situé à 300 mètres en aval du point d'injection. Le front de pollution est détectable, à ce point, après 1 mois, et la concentration maximale est atteinte après 2 ans ½.

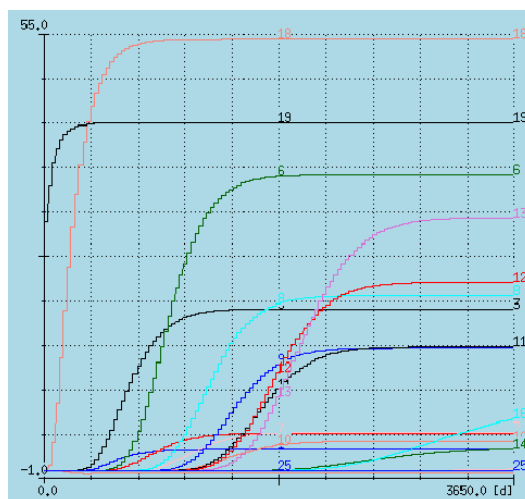


Figure 64 : Concentration locale de polluant en mg/l sur une durée de 10 ans au 25 points de contrôle (voir Fig 63)

La figure 65a-e montre l'avancée du front de pollution (représenté à la base des graviers supérieurs) respectivement après 4 mois, 1 an, 2 ans, 6 ans et 10 ans. On constate que la pollution reste cantonnée en rive gauche principalement. Le Rhône jouant un rôle de drain et la direction générale des écoulements se situant dans le sens de la vallée, ils empêchent la pollution de se répandre en forte concentration en rive droite.

Il est intéressant de remarquer que le modèle 2-D d'Yvan Rossier ne pouvait pas modéliser ce phénomène, car les écoulements 2-D étaient forcés dans le sens de la coupe, et par conséquent, traversaient le Rhône pour s'écouler en rive droite.

La pollution est perceptible aux puits de la Lonza après environ 3 ans ½, et le maximum de concentration est atteint après environ 8 ans. La situation en aval des puits de pompage reste relativement stable. Depuis la 6^{ème} année, jusqu'à la fin de la simulation, la propagation reste relativement cantonnée. On remarque enfin le rôle important des 2 puits de la Lonza qui jouent le rôle de barrage hydraulique en freinant la propagation de la pollution plus en aval.

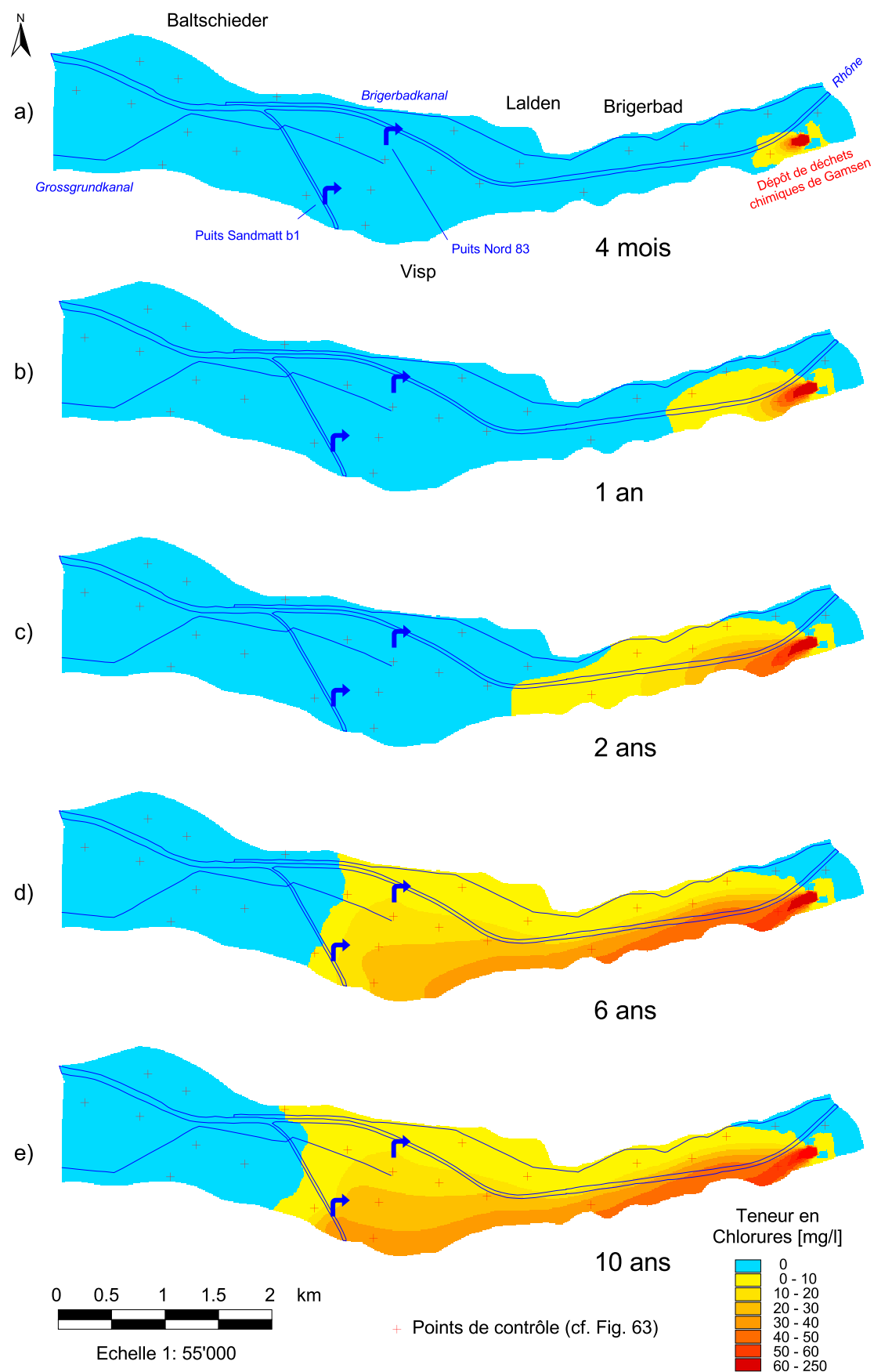


Figure 65a-e : Avancée du front de pollution pendant 10 ans depuis la décharge de Gamsen à la base des graviers supérieurs. Résultats issus d'un calcul 3-D d'un modèle hydrodynamique couplé à un modèle 3-D de transport

6. RÉFÉRENCES

- Ababou R., Saghar B., Wittmeyer G., 1992. *Testing procedures for spatially distributed flow models*. Advances in Water Resources, 15, 181-198.
- Ababou R., Bagtzoglou A.-C., 1993. *Bigflow: a numerical code for simulating flow in variably saturated, heterogeneous geologic media*. Theory and User's Manual, version 1.1, 1993. NUREG/CR-6028, USA.
- Ababou R., Trégarot G., Bouzelboudjen M., 1996. *Variably saturated subsurface flow and perched water tables : Effects of heterogeneity, slope angle, and hydrologic regime*. International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modeling (ModelCare'96), AIHS, Golden, Colorado, USA, 24-26 Sept. 1996, pp. 1-10.
- Barazzuoli P., Bouzelboudjen M., Cucini S., Király L., Menicori P., Salleolini M., 1999. *Olocenic alluvial aquifer of the River Cornia coastal plain (southern Tuscany, Italy) : database design for groundwater management*. Environmental geology 39 (2), 123-143, Springer-Verlag.
- Batelaan O., Wang Z.-M., De Smedt F., 1996. *An adaptative GIS toolbox for hydrological modelling*. Proceeding of HydroGIS 96 : Application of Geographic Information System in Hydrology and Water Resources Management, K. Kovar et H.P. Nachnebel (eds), IAHS, April 16-19, Vienna, Austria : 3-17.
- Bédard Y., Caron C., Maamar Y., Moulin B., Vallière D., 1996. *Adapting data models for the design of spatio-temporal databases*. Computer Environment and Urban Systems, 20 (1) : 19-41.
- Bel Hadj Kacem M.S., 1998. *Modélisation numérique de l'hydrologie pour l'aide à la gestion des bassins versants par l'utilisation conjointe des systèmes d'information géographique et de la méthode des éléments finis*. PhD thesis, Université Laval, Québec, Canada.
- Bouzelboudjen M., Király L., 1988. *Premiers commentaires sur la simulation 3-D pour les trois états: Rhône état naturel, déplacé et final avec ouvrages réalisés*. Rapport inédit., 15 p., 27 fig., novembre 1988, Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel - Service des Routes Nationales Suisses, Sion.
- Bouzelboudjen M., Király L., 1989. *Modélisation tridimensionnelle de la nappe phréatique de la plaine du Rhône à Viège*. Troisièmes Journées Valaisannes des Sciences Naturelles, Suisse, avril 1989. Bulletin Murithienne 107 (1989) p. 69-74.
- Bouzelboudjen M., 1990a. *Étude de la nappe alluviale de la plaine du Rhône à Viège par modèle mathématique tridimensionnelle*. État des travaux. 4 p., 12 fig., 3 ann., Rapport Inédit. février 1990, Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel - Service des Routes Nationales Suisses, Sion.
- Bouzelboudjen M., 1990b. *Influences du dimensionnement des ouvrages de génie civil sur l'écoulement souterrain naturel à Viège (Canton du Valais)*. 10 p., 20 fig., 1 ann., Rapport Inédit décembre. 1990, Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, Suisse - Service des Routes Nationales Suisses, Sion.
- Bouzelboudjen M., 1991. *3-D Modelling of the Rhône Aquifer at Visp (Valais Switzerland)*. In : Computer Methods and Water Ressources. 4th Vol., 2nd Internat.

- Conf. Rabat, + In : Bull. Du Centre d'Hydrogéol. De Neuchâtel. N° 10, p. 83-90, 8 fig.
- Bouzelboudjen M., 1996. *Base de Données et Systèmes d'Information Spatiale*. Cours Université de Neuchâtel. Inédit.
- Bouzelboudjen M., Kimmeier F., 1997a. *Système d'information géographique, méthodes géostatistiques et simulation numérique 3-D des écoulements souterrains en milieu poreux fortement hétérogène*. GeolGIS-CH'97 Atelier sur l'application des SIG en géologie. Service Hydrologique et Géologique National (SHGN), Berne, Suisse, 5 décembre 1997, p. 18-19.
- Bouzelboudjen M., Király L., Kimmeier F., Zwahlen F., 1997b. *Coupes géologiques et hydrogéologiques, 2^{ème} partie : hydrogéologie. Représentation schématique des écoulements souterrains en Suisse*. Planche 8.3 de l'Atlas Hydrologique de la Suisse. Institut de Géographie de l'Université de Berne, Office Fédéral de la Topographie Berne et Service Hydrologique et Géologique National Berne.
- Bouzelboudjen M., Kimmeier F., 1998a. *GIS Vector and Raster Database, Advanced Geostatistics, 3-D Groundwater Flow and Transport Modeling in Strongly Heterogeneous Geologic Media : An Integrated Approach*. The Eighteenth Annual Environmental Systems Research Institute Users Conference. San Diego, California, USA - 27-july 1998.
- Bouzelboudjen M., Király L., 1998b. *Étude de l'influence de la troisième correction du Rhône dans la région Baltschieder-Lalden sur les écoulements souterrains de la nappe alluviale : Premiers résultats de simulations numériques 3-D*. Université de Neuchâtel. Novembre 1998, 8 p., 14 fig., 3 pl. hors-texte. Inédit.
- Bouzelboudjen M., Graf M., 1999. *Analyse Numérique de Données Spatiales Dans les Sciences de l'Environnement (ANDSPAT)*. Cours formation continue. Université de Neuchâtel. Inédit.
- Burrough P.A., McDonell R. A., 1998. *Principles of Geographical Information Systems. Spatial Information Systems and Geostatistics*. Oxford University Press, 333 p.
- Caloz R., Collet C., 1997. *Geographic information systems (GIS) and remote sensing in aquatic botany : methodological aspects*. Aquatic botany, 58 : 209-228.
- Chauvet P., 1992. *Traitement des données à support spatial : la géostatistique et ses usages*. Centre de Géostatistique. École des mines de Paris, Fontainebleau, France, 43 p., 16 pl.
- Chilès J.P., 1977. *Géostatistique des phénomènes non stationnaires*. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Nancy-I, France. 152 p.
- Claramunt C., Thériault M., 1995. *Managing time in GIS – An event-oriented approach. Recent advances on temporal databases*, J. Clifford et A. Tuzhilin (eds), Zürich, Suisse : 23-42
- Clavien F., 1987 : *Routes Nationales Suisses. Route classe N9. Teilstrecke Visp West - Visp Ost Prpket gàmàrae 1 :5'000*. Étude géotechnique préliminaire Rapport géotechnique préliminaire inédit, N° 3.P6 40 31.226. (J.-M. Wicht).

- Clavien F., 1988 : *Schweizerische Nationalstrassen Str Nr N9 Teilstrecke Visp West - Visp Ost Generelles Projekt Hydrogeologische Studie Hydrogeologischer Zwischenbericht*, N° 3 P6 50 31 397 (G. Bianchetti).
- Clavien F., 1990 : *Schweiz. Nationalstrassen. Str. Nr. N9 Abschnitt Gampel - Brig-Glis. Teilstrecke Visp West - Visp Ost. Hydrogeologische Studie. Rapport hydrogéologique 1. Synthèse et traitement* Mads März 1990, N° 3 P6.40.31.579 Beilage 1 (G. Bianchetti).
- Cleveland W. S., 1993. *Visualizing Data*. AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey.
- Collet C., 1992. *Systèmes d'information géographique en mode image*. L. Maystre (eds). Presses polytechniques et universitaire romande, Lausanne.
- Dagan G., 1985. *Stochastic modeling of groundwater flow by unconditional and conditional probabilities, the inverse problem*. Water Resour. Res., 21 (1), p. 65-72.
- Davis John C., 1986. *Statistics and data analysis in Geology* (second edition). J. Wiley & Sons, Inc., New York, 646 p.
- De Marsily G., 1981. *Hydrogéologie quantitative*. Masson, Paris, 215 p.
- Delhomme, J.P., 1976. *Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau*. Thèse de Docteur-Ingénieur. Université Pierre & Marie Curie, laboratoire de géologie dynamique.
- De Smedt F., 1997. *IHSI. IDRISI hydrological simulation interface*, User manual, Laboratory of hydrology, Free University Brussels.
- Diersch H.-J. G. & al., 1999. *Interactive, Graphics-based Finite-Element Simulation System FEFLOW for Modeling Groundwater Flow. Contaminant Mass and Heat Transport Processes*. User's Manual Version 4.8. WASY Institute for Water Ressources Planning and System Research Ltd Berlin.
- Dong A., 1990. *Estimation géostatistique des phénomènes régis par des équations aux dérivées partielles*. Thèse de Docteur en Géostatistique, École des Mines de Paris, Fontainebleau, 262 p.
- Ebener S., Bouzelboudjen M., Wildi W., 1998. *Éléments hydrogéologiques dans l'étude de l'influence de deux décharges sur le système aquifère de la plaine du Rhône (Valais central, Suisse)*. Archs., Sci. Genève, Vol. 51, Fasc. 2, 153 – 170.
- Ebener S., 2000. *Utilisation d'un SIG en mode raster pour la spatialisation du bilan hydrique à l'échelle mensuelle. Application au bassin versant de l'Allondon (France, Suisse)*. Thèse, Université de Genève, 268 p., Terre et Environnement Vol. 20.
- Ebener S., Wildi W. , Bouzelboudjen M., Jaquet J.M., Fortin J.P., 2001. *Contribution of a GIS in the spatial modeling of the hydrologic balance of Allondon watershed (France, Switzerland)* 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal .
- ESRI, 1995. *Understanding GIS. The ArcInfo Method*. Version 7 for Unix and OpenVMS. Environmental Systems Research Institute, California, USA.
- ESRI, 1996a. *Getting to know ArcView*. Environmental Systems Research Institute, California, USA.

- ESRI, 1996b. *The GIS Glossary*. Environmental Systems Research Institute, Inc.
- Fetter C.W., 1994. *Applied Hydrogeology*. Third Edition, Prentice-Hall Inc., London.
- Flamm Ch., 1994. *Géostatistique et statistiques multivariées sur 3 cas d'études de sols contaminés*. Diplôme de Minéralogie présenté le 3 août 1994. Université de Lausanne, Institut de Minéralogie.
- Fröhlich Gugler A., 1997. *Étude de la variabilité spatiale des propriétés hydrogéologiques en milieu poreux hétérogènes : Application à la Vallée du Rhône entre Baltschieder et Gamsen (Valais)*. Travail de diplôme du cycle postgrade interuniversitaire EPFL et UNI-NE en hydrologie et hydrogéologie, spécialisation en hydrogéologie. Avril 1997. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
- Geister M., Burger A., 1986. *Interprétation hydrogéologique des analyses chimiques de la nappe sous la décharge et en aval (période de 1979 à 1986)*. Mandat de LONZA AG, Werkschutz, Visp. Centre d'hydrogéologie, Université Neuchâtel.
- Geister-Frantz M., 1988. *Modèles Gamsen-Viège: Construction et mise en service du modèle hydrodynamique pour la simulation des conditions naturelles (échanges Rhône-nappe)*. Rapport, Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel, Suisse, Inédit.
- Geister-Frantz M, Burger A., 1988. *Pollution de la nappe alluviale par la décharge de Gamsenried. Modèles Gamsen-Viège, Construction et mise en service du modèle hydrodynamique pour la simulation des conditions naturelles (échanges Rhône-nappe)*. N° Rapport : BG88/2. Mandat des : Département des travaux publics, Sion, Routes Nationales N9 et LONZA AG, Abteilung Umweltschutz, Visp Université de Neuchâtel.
- Gelhar L.W., 1993. *Stochastic Subsurface Hydrology*. Prentice Hall, Englewood, Cliffs, NJ.
- Geotest, 1992. Route Nationale 9, Commune de Lalden, Tronçon Viège Ouest - Viège Est. *Essais de Flowmeter Rapport V9215L*. Auteur du projet : Département des travaux publics du Canton du Valais Service des Routes Nationales, Sion. Martigny.
- Geotest, 1997. *Hydrogéologie de la nappe alluviale de la plaine du Rhône (Projet de recherche FNRS VII). Mesures de flowmètre dans la région de Visp (Viège). Rapport V9704*. Centre de Recherche Scientifiques Fondamentales et Appliquées de Sion (CRSFA).
- Geotest, 1998. *Hydrogéologie de la nappe alluviale de la plaine du Rhône (Projet de recherche FNRS VII). Mesures de flowmètre dans la région de Visp (Viège). Rapport V9704.1*. Centre de Recherche Scientifiques Fondamentales et Appliquées de Sion (CRSFA).
- Golay, 1992. *Modélisation des systèmes d'information à référence spatiale et de leurs domaines d'utilisation spécialisés – aspects méthodologiques, organisationnels et technologiques*. PhD thesis N° 1080, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- Isaaks E.H., Srivastava M.R., 1989. *An introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, 561 p.
- Isatis *The Geostatistical Key*, 1997. Geovariances, Paris. Ver 3.1 Unix.

- Jaquet J.M., 1996. *Applications SIG aux sciences de la terre : Introduction*. Polycopié du cours de 3^{ème} cycle, 17-20 juin 1996. Département de Géologie, Université de Genève.
- Kimmeier F., Perrochet P., Király L., Andrews R.-W., 1985. *Simulation par modèle mathématique des écoulements souterrains entre les Alpes et la Forêt Noire*. 169 p., NTB 84-50, Cédra, Baden, Switzerland.
- Kimmeier F., Wacker C., Perrochet P., Hufschmied P., Király L., 1986. *Code verification of the groundwater flow model FEM301. Hydrocoin - Level 1 - Case 2 and Case 6*, 65 p., NTB 86-22, CÉDRA, Baden, Switzerland.
- Kimmeier F., 1997. *Méthodologie d'étude d'un système aquifère dans une vallée alluviale en milieu Alpin: exemple de la vallée du Rhône, Valais central*. Deuxième phase, rapport intermédiaire inédit. Projet Fonds National de la Recherche Scientifiques (FNRS) N° 20-47064.96, CRSFA-CHYN, 59 p., 40 fig. Sion, Suisse.
- Kimmeier F., 1999a. *Méthodologie d'étude d'un système aquifère dans une vallée alluviale en milieu Alpin: exemple de la vallée du Rhône, Valais central*. Rapport final, deuxième phase, inédit. Projet FNRS N° 20-47064.96, CREALP-CHYN, 87 p., 57 fig.
- Kimmeier F., 1999b. *Élaboration d'une carte des infiltrations et exfiltrations pour les hautes eaux 1997 à l'aide d'un SIG (Arc/Info-ArcView) dans le cadre de la 3ème correction du Rhône*. CREALP, inédit.
- Kimmeier F., 2000. *Validation des mesures de potentiel hydraulique des basses eaux 1992 dans la nappe alluviale entre Baltschieder et Gamsen et élaboration d'une carte piézométrique dans le but de modéliser les écoulements souterrains par modèle mathématique tridimensionnel*. CREALP, inédit.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Perrochet P., 2000. *Simulations numériques 2-D et 3-D des écoulements souterrains saturés et non saturés en nappe libre pour les états permanent et transitoire dans la région de Baltschieder-Gamsen*. Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel, 26 p., 37 fig., 8 tab., rapport inédit.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Eisenlohr L., Rossier Y., Zwahlen F., 2001a. *A statistical analysis of hydro-climatic stress on karst aquifer system (Switzerland)*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Eisenlohr L., Rossier Y., 2001b. *Drought risk analysis applied to porous Swiss aquifers*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Ornstein P., Weber I., Rouiller J.-D., 2001c. *Geohydrological parameter identification and groundwater vulnerability to pollution: A Swiss case study*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Ababou R., Ribeiro L., 2001d. *Travel path uncertainty : a case study combining stochastic and deterministic hydraulic models in the Rhône valley, Switzerland*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Király L., 2001e. *3-D groundwater modeling at national scale*. Dans ce volume partie C1.

- Kinzelbach W., 1986. *Groundwater modelling*. Elsevier, 333 p.
- Király L., 1985. FEM301 - *A three Dimensional Model for Groundwater Flow Simulation*. Cédra 84-49.
- Király L., & Bouzelboudjen M., 1988a. *Étude hydrogéologique de la nappe souterraine par modélisation tridimensionnelle dans le secteur Visp West - Lalden. État Rhône naturel*. Rapport inédit, mars 1988, Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel. Inst. de Géologie. Neuchâtel.
- Király L., 1988b. *Large scale 3-D groundwater flow modelling in highly heterogenous geologic medium*. E. Custudio et al. (eds), *Groundwater flow and quality modelling*, p. 765-755.
- Király L., 1998. FEN' code family (Finite Element Neuchâtel) - *Three Dimensional Model for Groundwater Flow and Transport Simulation Codes (VAX-VMS, UNIX & Windows Systems)*. Hydrogeological Centre of Neuchâtel. Unpublished.
- Kitadinis P.K., 1997. *Introduction to Geostatistics, Applications in Hydrogeology*. Stanford University. Cambridge University Press. 249 p.
- Kovar K, & Nachnebel H.P, 1993. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*. IAHS Publication N° 211, 693p.
- Kovar K, & Nachnebel H.P, 1996. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*. IAHS Publication N° 235.
- Maidment D.R., 1996. *Environmental modeling within GIS. GIS and Environmental Modeling with GIS : Progress and Research Issues*, M.F. Goodchild & al (eds), Ford Collins : *GIS World* : 315-324.
- Matheron G., 1963. *Traité de Géostatistique Appliquée*. Edition du B.R.G.M., Paris (Ouvrage de Géostatistique Linéaire, orienté vers les applications minières).
- Matheron G., 1973. *The intrinsic random function and their applications*. *Advances in Applied Probability*, 5 : 439-468.
- Maxwell T. & Costanza R., 1997. *An open geographic modeling environment*. *Simulation*, 68 (3) : 175-185.
- Meijerink Allard M.J., De Brouwer Hans A.M., Mannaerts Chris M., Valenzuela Carlos R., 1994. *Introduction to the Use of Geographic Information Systems for Practical Hydrology*. Published with the support of : The International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), The Netherlands and UNESCO, Division of Water Sciences, France. 243 p. ITC Publication Number 23.
- Mendonça Santos M.L., Guenat C., Bouzelboudjen M., Golay F., 2000. *Three-dimensional GIS cartography applied to the study of the spatial variation of soil horizons in a Swiss floodplain*. *Geoderma* 97, p. 351-366.
- Mizell S.A., 1980. *Stochastic flow analysis of spatial variability in two-dimensional groundwater flow with implications for observation-well-network design*. PhD, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, New Mexico.
- Morel-Seytoux H.J., 1988. *Unsaturated flow in hydrologic modeling* ; NATO ASI Series, Vol. 275, Kluwa Verlag.
- Ornstein, P., 1997. *Jaugeage des canaux*. Rapport inédit CRSFA. Valais, Suisse.
- Ornstein, P., 1999. *Jaugeage des canaux*. Rapport inédit CRSFA. Valais, Suisse.

- Ornstein, P., Kimmeier F., Crestin M., 1999. 3^{ème} correction du Rhône : secteur Gamsen - Baltschieder. *Essais d'infiltration, octobre/novembre 1999*, CREALP, rapport inédit 3 p., 7 fig., 12 tab. 3 ann.
- Oukaci S., 1997a. *Mesures sur le terrain des caractéristiques physico-chimiques à l'aide de la sonde multi-paramètres dans 23 piézomètres*, CREALP, inédit.
- Oukaci S., 1997b. *Utilisation du système d'information géographique, de la géostatistique et de la simulation numérique des écoulements souterrains 2-D par éléments finis dans la caractérisation hydraulique d'un milieu poreux fortement hétérogène : Application au système aquifère de la plaine du Rhône entre Baltschieder et Gamsen. (Décembre 1997)*. Mémoire du cycle postgrade en hydrogéologie - Université de Neuchâtel et École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
- Pannatier Y., 1996. *Statistics and Computing. Variowin, Software for Spatial Data Analysis in 2D*. Springer. 91 p.
- Perrochet P., Burger A., 1989. *Calage du modèle 3-D des écoulements souterrains en régime permanent dans la région de Gamsen*. Dép. des travaux publics Sion, Routes nationales, Université Neuchâtel.
- Pouliot J., 1999. *Définition d'un cadre géosémantique pour le couplage des modèles prévisionnels de comportement et des SIG – Application pour les écosystèmes forestiers*. PhD thesis N°2087, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- Rossier, Y., 1989. *Modélisation de la pollution de la nappe du Rhône par la décharge de Gamsenried (VS)*. Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel, Suisse.
- Rossier, Y., 1990. *Simulation de la pollution de la nappe du Rhône en amont de Viège (Vs) : problèmes et résultats*. Bull. Du Centre d'Hydrogéol. De Neuchâtel. N° 9, p. 13-28, 10 fig.
- Roth C., 1995. *Contribution de la géostatistique à la résolution du problème inverse en hydrogéologie*. Thèse de Docteur en Géostatistique, École des Mines de Paris. Document du BRGM, n° 241, Orléans, 195 p.
- Roth C., Chilès J.-P., 1997. *Modélisation géostatistique des écoulements souterrains : comment prendre en compte les lois physiques*. Hydrogéologie N° 1, pp. 23-32, 8 fig.
- Rouiller J.-D., Ornstein P., Rey J.-M., Kimmeier F., Weber I., Bouzelboudjen M., 1998. *Système d'information Spatiale Orientée vers la Gestion et l'Optimisation des Ressources en Eaux du Canton du Valais*. GeoloGIS-CH'98 Atelier sur l'application des SIG en géologie. Service Hydrologique et Géologique National (SHGN), Berne, Suisse.
- Schmid Odilo, 1999. 3. *Rottenkorrektion, Abschnitt Susten - Brig, Generelles Projekt, Grundlagen. Zustand und Zusammensetzung des Rottendamms, 1. Phase der geologischen-geotechnischen Untersuchung 1996/1997*. I-DB-P13.7, Büro für beratende Geologie Odilo Schmid.
- Scholl M. et al., 1996. *SGBD Géographiques - Spécificités*. 185 p. International Thomson Publishing France. Paris.
- Surfer, 1996. *User's guide*. For windows, version 6.04. Golden software, Inc.

- Teyssiere & Candolfi AG, 1998. 3. Rottenkorrektion. Abschnitt Brig-Susten. Abschnitt Visp. Generelles Projekt. Variante Sohlenabsenkung. Längenprofil 1: 10'000/200.
- Teyssiere & Candolfi AG, 1999. 3. Rottenkorrektion. Jaugeages Grossgrundkanal.
- Tomlin C.D., 1993. *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. Prentice Hall, 249 p.
- Trégarot G., 2000. *Modélisation couplée des écoulements à saturation variable avec hétérogénéités, forçages et interfaces hydrologiques*. Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse (I.N.P.T.), 496 p.
- Van Deursen W.P.A., 1995. *Geographical information systems and dynamic models*. PhD thesis, Utrecht University Netherlands.
- Van Genuchten M. T., 1980. *A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Saturated Soils*. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, p. 892-898.
- Viszok J., 2000. *Subsurface fluid flow simulation with finite element method in the East Pannonian Basin*. Institut F.A. Forel, Thèse, Université de Genève.
- Voss C.I., 1984. *A finite element simulation model for saturated and unsaturated, fluid density dependent groundwater flow with energy transport or chemically reactive single species solute transport*. US Geological Survey. National Center Reston, Virginia, USA.
- Wesseling C.G., Deursen W.P.A., Burrough P.A., 1996. *A spatial modelling language that unifies dynamic environment models and GIS*. Proc. Third International Conference/Workshop on Integrating Geographic Information Systems and Environmental Modeling, Jan. 21-25, 1996, Santa Fe, New Mexico, USA.

Annexe 1 : Références des études traitées dans les requêtes Fonds national N° 21-39357.93 et 2047-064.96. Requérant principal : J.-D. Rouiller; co-requérants : Dr M. Bouzelboudjen, Prof. L. Király, F. Veuthey.

1. Aviolat P., Rey J.-M., 1994. Hydrogéologie de la plaine alluviale du Rhône entre Sierre et Granges (Valais). 72p., 38 fig., 7 tableaux, 9 cartes hors texte. Mémoire Diplôme 3ème cycle Hydrogéologie, Centre d'Hydrogéologie, Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel. Inédit. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
2. Bouzelboudjen M., Kimmeier F., 1997. Système d'information géographique, méthodes géostatistiques et simulation numérique 3-D des écoulements souterrains en milieu poreux fortement hétérogène. GeolGIS-CH'97 Atelier sur l'application des SIG en géologie. Service Hydrologique et Géologique National (SHGN), Berne, Suisse, 5 décembre 1997.
3. Bouzelboudjen M., Kimmeier F., 1998. GIS Vector and Raster Database, Advanced Geostatistics, 3-D Groundwater Flow Modeling in Strongly Heterogeneous Geologic Media : An Integrated Approach. The Eighteenth Annual Environmental Systems Research Institute Users Conference. San Diego, California, USA - 27-july 1998.
4. Ebener S., 1994. Etude hydrogéologique de la plaine du Rhône à Pramont (Valais). Approche tridimensionnelle. 86p., 85 fig., 17 tableaux, 2 annexes. Mémoire Diplôme Géologie, Département de géologie et paléontologie de l'Université de Genève, Centre d'Hydrogéologie, Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel. Inédit.
5. Fröhlich Gugler A., 1997. Etude de la variabilité spatiale des propriétés hydrogéologiques en milieu poreux hétérogènes : Application à la Vallée du Rhône entre Baltschieder et Gamsen (Valais). Travail de diplôme du cycle postgrade interuniversitaire EPFL et UNI-NE en hydrologie et hydrogéologie, spécialisation en hydrogéologie. Avril 1997. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
6. Kimmeier F., 1997. Méthodologie d'étude d'un système aquifère dans une vallée alluviale en milieu Alpin: exemple de la vallée du Rhône, Valais central. Rapport intermédiaire, deuxième phase, inédit. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
7. Kimmeier F. (1999).- Système d'information géographique, approches géostatistiques et simulations tridimensionnelles pour la gestion et la protection des eaux souterraines en milieu alluvial. Thèse en préparation. Université de Neuchâtel. Projet FNRS CREALP-CHYN.
8. Ornstein P., 1995. Méthodologie d'étude d'un système aquifère dans une vallée alluviale en milieu alpin : exemple de la Vallée du Rhône, Valais Central, 13 p., 13 fig., 7 annexes. Rapport intermédiaire, première phase, inédit. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
9. Ornstein, P., 1996. Méthodologie d'étude d'un système aquifère dans une vallée alluviale en milieu Alpin: exemple de la vallée du Rhône, Valais Central. 46 p., 21 fig., 12 tab. 8 annexes. Rapport intermédiaire, première phase, inédit. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
10. Oukaci S., 1997. Utilisation du système d'information géographique, de la géostatistique et de la simulation numérique des écoulements souterrains 2-D par éléments finis dans la caractérisation hydraulique d'un milieu poreux fortement hétérogène : Application au système aquifère de la plaine du Rhône entre Baltschieder et Gamsen. Mémoire du cycle postgrade en hydrogéologie - Université de Neuchâtel et Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 25 p., 50 fig., 12 tab. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
11. Rouiller J.-D., Ornstein P., Rey J.-M., Kimmeier F., Weber I., Bouzelboudjen M., 1998. Système d'information Spatiale Orientée vers la Gestion et l'Optimisation des Ressources en Eaux du Canton du Valais. GeoloGIS-CH'98 Atelier sur l'application des SIG en géologie. Service Hydrologique et Géologique National (SHGN), Berne, Suisse, 27 novembre 1998.
12. Schürch M., 1995. Tranchée couverte de Champsec à Sion (Valais, Suisse) : Hydrogéologie et expérimentations numériques sur modèle mathématique à éléments finis. 71 p., 87 fig., 10 tab., 2 ann.. Mémoire Diplôme 3ème cycle Hydrogéologie, Centre d'Hydrogéologie, Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel. Inédit. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
13. Weber I., 1998. SIG et vulnérabilité des aquifères à la pollution : Application dans la région Sierre-Vétroz, Valais central. Mémoire Diplôme 3ème cycle Hydrogéologie, Centre d'Hydrogéologie, Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel. Inédit, décembre 1998. Projet FNRS CRSFA-CHYN.

Annexe 2 : Valeurs des 145 mesures de potentiel hydraulique (hautes-eaux 1997)

Id	x [m]	y [m]	h [m]	Id	x [m]	y [m]	h [m]
11	637'015.00	127'563.00	651.09	201	633'993.86	127'924.07	642.42
14	637'626.00	127'456.00	653.11	203	633'947.25	127'709.89	642.36
15	637'495.85	127'833.96	652.17	207	633'869.32	128'003.77	642.79
18	637'954.00	127'926.00	653.39	208	633'952.00	128'008.00	642.79
21	637'533.00	127'638.00	652.09	209	633'931.65	128'081.66	642.92
24	637'372.27	127'481.27	652.09	210	633'794.55	127'942.74	642.27
25	637'128.43	127'447.55	651.33	211	633'671.52	128'010.26	642.61
26	637'360.96	127'428.26	652.29	213	633'782.44	128'038.36	642.88
27	637'344.51	127'534.81	651.99	215	633'581.33	127'951.86	642.15
29	637'596.00	127'598.00	652.81	219	633'584.85	127'745.46	642.56
31	637'085.71	127'497.96	651.27	221	633'648.57	127'446.09	642.92
32	637'172.57	127'626.91	651.77	223	637'838.53	127'526.05	653.36
36	636'870.70	127'412.55	650.61	224	633'490.38	128'010.47	642.47
39	637'811.00	127'511.00	653.28	227	633'602.03	128'110.91	642.95
40	637'786.00	127'510.00	653.21	232	633'355.68	127'955.09	642.10
42	636'492.16	127'266.68	649.44	233	633'292.07	127'939.00	642.45
43	638'345.00	127'790.00	653.81	240	633'321.55	128'028.46	642.45
45	636'890.22	127'322.62	650.58	244	638'074.00	127'828.00	653.88
47	636'628.32	127'439.65	650.02	252	637'794.00	127'797.00	653.13
49	636'876.00	127'492.00	650.79	257	638'119.40	127'646.68	653.81
50	637'003.00	127'572.00	651.17	258	638'109.86	127'660.67	653.64
51	636'591.61	127'459.79	649.87	265	637'035.46	127'785.00	651.75
52	636'876.82	127'578.30	650.68	266	637'485.08	127'912.27	652.27
55	636'822.71	127'724.77	651.58	267	637'786.20	127'974.02	652.99
58	632'606.94	128'308.60	641.38	268	634'452.50	127'743.62	642.78
61	632'380.51	128'438.40	640.92	283	633'256.44	127'904.42	642.36
63	632'197.81	128'600.49	640.93	285	633'264.57	127'875.38	642.34
66	631'861.95	128'637.14	639.84	288	633'449.31	127'644.79	642.33
68	631'656.56	128'567.03	639.82	289	633'189.94	127'609.37	642.11
69	631'530.65	128'461.06	639.57	290	633'595.12	127'403.90	642.36
70	631'656.00	128'424.64	639.91	291	633'637.16	127'163.59	642.33
71	631'867.34	128'335.86	640.09	293	633'235.53	128'136.42	642.32
72	632'080.63	128'418.27	640.45	294	633'012.75	127'928.26	641.98
73	632'092.51	128'231.76	640.56	297	632'984.34	127'578.62	641.92
74	632'234.95	128'451.51	640.73	298	633'007.51	127'267.07	641.96
76	636'224.23	127'326.27	648.45	300	633'005.00	128'199.00	641.95
79	636'226.45	127'270.36	648.18	301	637'978.09	127'551.95	653.35
82	635'859.82	127'242.75	646.79	302	638'207.74	127'785.89	654.51
86	636'229.89	127'196.74	648.31	303	638'261.52	127'738.23	654.24
94	636'408.55	127'409.31	649.34	304	638'358.41	127'924.01	655.04
98	636'237.61	127'406.63	648.61	306	638'418.31	127'938.03	655.10
100	636'208.10	127'382.17	648.63	307	638'459.87	127'972.98	655.30
103	636'209.16	127'537.52	648.72	308	638'524.70	128'020.46	655.50
104	636'195.09	127'536.27	648.61	309	638'601.44	128'043.48	655.74
110	635'588.92	127'247.05	646.01	313	637'712.88	127'534.67	653.37
112	635'415.14	127'258.04	645.62	315	637'820.37	127'566.64	653.51
116	635'597.35	127'209.31	646.02	325	631'365.78	128'283.31	639.26
118	635'481.97	127'041.18	644.99	326	631'659.00	128'217.00	640.03
122	635'582.59	127'315.15	645.99	332	632'749.11	128'104.09	641.86
127	635'594.22	127'363.48	646.08	339	632'482.73	127'872.33	641.23
129	635'657.05	127'557.92	645.85	340	632'531.39	127'754.32	641.27
131	635'136.91	127'381.41	644.89	341	632'552.40	128'045.29	641.52
134	635'256.12	127'276.45	645.32	349	632'307.26	127'973.30	641.02
135	635'197.27	127'140.30	645.10	350	632'282.34	127'796.39	640.77
144	635'363.86	127'435.61	645.36	353	632'291.49	127'454.94	640.76
151	634'611.92	127'689.25	643.29	355	632'402.60	128'079.59	641.33
153	634'847.00	127'526.00	644.15	356	632'229.45	128'174.27	640.85
154	634'805.00	127'402.00	643.79	358	632'440.00	128'256.00	641.22
162	634'909.49	127'622.56	644.20	367	631'796.00	128'230.00	639.97
163	635'020.21	127'771.68	644.49	368	631'792.00	128'109.00	639.92
171	634'420.00	127'622.00	642.99	371	631'297.27	128'357.96	638.91
172	634'373.00	127'502.00	642.93	383	631'268.91	127'922.99	638.52
174	634'241.00	127'218.00	642.68	384	631'274.42	127'525.74	639.30
175	634'192.90	126'884.76	643.27	388	633'657.00	127'697.00	642.77
178	634'552.24	127'954.59	643.79	389	633'694.00	127'831.00	642.92
180	634'276.69	127'842.37	642.48	390	633'851.00	127'798.00	642.68
181	634'134.31	127'892.19	642.71	391	634'142.00	127'775.00	642.67
187	636'457.00	127'531.00	649.86	392	634'160.00	127'503.00	642.98
188	636'369.00	127'643.00	650.46	393	633'796.00	127'464.00	642.51
192	634'195.00	127'992.00	642.84	407	638'247.62	128'127.10	654.45
193	635'014.00	127'909.00	643.35	408	638'290.91	128'050.18	654.68
194	635'077.00	127'787.00	644.23	409	638'527.36	128'173.92	655.44
196	635'170.00	127'636.00	644.50				

Annexe 3 : Perméabilités, épaisseurs, transmissivités et Log₁₀T des transmissivités mesurées à 55 forages et au niveau des graviers supérieurs

Code P	X [m]	Y [m]	K [m/s]	Épais. [m]	T [m ² /s]	Log ₁₀ T
12	637865.50	127452.50	1.20	16.00	19.20	-2.72
14	637626.00	127456.00	1.60	16.50	26.40	-2.58
25	637128.00	127448.00	10.10	15.00	151.50	-1.82
27	637345.00	127535.00	7.60	16.00	121.60	-1.92
36	636871.00	127413.00	23.00	15.00	345.00	-1.46
37	636529.00	127366.00	13.10	9.00	117.90	-1.93
47	636628.00	127440.00	28.00	11.00	308.00	-1.51
49	636876.00	127492.00	76.00	11.00	836.00	-1.08
76	636224.00	127326.00	20.60	16.00	330.00	-1.48
94	636409.00	127409.00	96.00	12.00	1152.00	-0.94
98	636238.00	127407.00	16.50	14.77	244.00	-1.61
101	636208.00	127382.00	10.20	12.00	122.40	-1.91
110	635589.00	127247.00	20.00	16.30	326.00	-1.49
112	635415.00	127258.00	13.40	13.60	183.00	-1.74
115	637895.95	127455.74	4.80	16.00	76.80	-2.11
119	638266.50	127615.95	2.90	13.00	37.70	-2.42
120	638456.53	127748.92	2.20	15.00	33.00	-2.48
121	638382.87	127815.12	6.00	13.00	78.00	-2.11
122	635583.00	127315.00	19.90	9.93	198.00	-1.70
126	638653.92	127799.55	7.20	15.00	108.00	-1.97
130	635272.00	127303.00	15.80	10.25	162.00	-1.79
131	635137.00	127381.00	32.60	15.22	497.00	-1.30
137	635305.00	127369.00	13.10	15.33	201.00	-1.70
149	634872.00	127555.00	34.30	15.26	523.00	-1.28
150	634737.00	127625.00	47.20	16.71	789.00	-1.10
151	634612.00	127689.00	33.80	13.99	473.00	-1.33
164	635015.00	127464.00	43.00	16.35	703.00	-1.15
169	634480.00	127750.00	15.70	15.09	237.00	-1.63
176	634503.00	127809.00	6.70	15.69	105.00	-1.98
179	634374.00	127798.00	31.80	15.43	491.00	-1.31
180	634277.00	127842.00	14.60	15.99	233.00	-1.63
181	634134.00	127892.00	24.70	13.88	343.00	-1.46
201	633994.00	127924.00	22.90	15.21	348.00	-1.46
210	633795.00	127943.00	19.60	15.39	301.00	-1.52
215	633581.00	127952.00	17.90	13.25	237.00	-1.63
232	633356.00	127955.00	36.50	15.95	583.00	-1.23
282	633192.00	127925.00	7.00	16.79	118.00	-1.93
294	633013.00	127928.00	4.10	17.50	71.50	-2.15
301	637978.10	127552.00	4.40	11.50	50.60	-2.30
303	638261.50	127738.20	4.50	15.00	67.50	-2.17
306	638418.31	127938.03	3.20	15.00	48.00	-2.32
307	638459.87	127972.98	1.70	15.00	25.50	-2.59
317	637918.90	127673.20	8.00	11.00	88.00	-2.06
318	637945.00	127616.90	2.20	13.50	29.70	-2.53
327	632702.00	127941.00	20.40	18.52	378.00	-1.42
329	632626.00	127428.00	6.20	8.93	55.40	-2.26
333	637078.00	127497.00	50.00	14.00	700.00	-1.15
336	632497.00	127958.00	26.30	14.75	388.00	-1.41
340	632531.00	127754.00	1.70	14.30	23.70	-2.63
349	632307.00	127973.00	9.40	15.95	150.00	-1.82
356	632229.00	128174.00	18.00	16.54	298.00	-1.53
364	632004.00	128022.00	5.90	13.90	81.40	-2.09
371	631297.00	128358.00	14.00	12.47	175.00	-1.76
375	631488.00	128149.00	10.80	12.02	129.00	-1.89
384	631274.00	127526.00	12.90	15.15	195.00	-1.71

Annexe 4 : Valeurs des 769 mesures de perméabilité effectuées au flowmètre tous les mètres dans 30 forages

Code p	Piezo	Code f	Forage	X	Y	Z terrain	Prof. [m]	Cotes	K [m/s]	K [m/s] * 10 ⁻⁴	Log ₁₀ K * 10 ⁻⁴	Date exécution
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	6.00	649.28	0.00076653	07.67	00.88	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	7.00	648.28	0.00147039	14.70	01.17	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	8.00	647.28	0.00046002	04.60	00.66	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	9.00	646.28	0.00027499	02.75	00.44	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	10.00	645.28	0.00002212	00.22	-00.66	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	11.00	644.28	0.00045717	04.57	00.66	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	12.00	643.28	0.00054052	05.41	00.73	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	13.00	642.28	0.00044757	04.48	00.65	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	14.00	641.28	0.00033832	03.38	00.53	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	15.00	640.28	0.00041596	04.16	00.62	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	16.00	639.28	0.00018167	01.82	00.26	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	17.00	638.28	0.00001191	00.12	-00.92	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	18.00	637.28	0.00052137	05.21	00.72	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	19.00	636.28	0.00012096	01.21	00.08	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	20.00	635.28	0.00004963	00.50	-00.30	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	21.00	634.28	0.00056355	05.64	00.75	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	22.00	633.28	0.00061801	06.18	00.79	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	23.00	632.28	0.00058244	05.82	00.77	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	24.00	631.28	0.00429973	43.00	01.63	26 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	1.46	650.79	0.00002030	00.20	-00.69	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	14.00	638.25	0.00025400	02.54	00.40	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	14.50	637.75	0.00033800	03.38	00.53	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	15.00	637.25	0.00067600	06.76	00.83	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	15.50	636.75	0.00078900	07.89	00.90	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	16.00	636.25	0.00042300	04.23	00.63	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	16.50	635.75	0.00569000	56.90	01.76	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	17.00	635.25	0.00187000	18.70	01.27	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	17.50	634.75	0.00383000	38.30	01.58	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	18.00	634.25	0.00344000	34.40	01.54	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	18.50	633.75	0.00314000	31.40	01.50	27 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	3.57	648.97	0.00000097	00.01	-02.01	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	7.50	645.04	0.00000021	00.00	-02.67	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	8.00	644.54	0.00000014	00.00	-02.85	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	8.50	644.04	0.00408123	40.81	01.61	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	9.00	643.54	0.00059499	05.95	00.77	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	9.50	643.04	0.00007323	00.73	-00.14	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	10.00	642.54	0.00017392	01.74	00.24	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	10.50	642.04	0.00016477	01.65	00.22	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	11.00	641.54	0.00084214	08.42	00.93	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	11.50	641.04	0.00164766	16.48	01.22	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	12.00	640.54	0.00110510	11.05	01.04	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	12.50	640.04	0.00023381	02.34	00.37	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	13.00	639.54	0.00049950	04.99	00.70	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	13.50	639.04	0.00043573	04.36	00.64	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	14.00	638.54	0.00004251	00.43	-00.37	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	14.50	638.04	0.00005314	00.53	-00.27	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	15.00	637.54	0.00001063	00.11	-00.97	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	15.50	637.04	0.00006377	00.64	-00.20	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	16.00	636.54	0.00004724	00.47	-00.33	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	16.50	636.04	0.00000590	00.06	-01.23	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	17.00	635.54	0.00012753	01.28	00.11	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	17.50	635.04	0.00017004	01.70	00.23	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	18.00	634.54	0.00037197	03.72	00.57	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	18.50	634.04	0.00004251	00.43	-00.37	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	19.00	633.54	0.00005471	00.55	-00.26	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	19.50	633.04	0.00038778	03.88	00.59	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	20.00	632.54	0.00030070	03.01	00.48	26 juin 97
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	7.50	643.36	0.00151970	15.20	01.18	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	8.00	642.86	0.00098900	09.89	01.00	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	8.50	642.36	0.00133530	13.35	01.13	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	9.00	641.86	0.00061170	06.12	00.79	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	9.50	641.36	0.00280740	28.07	01.45	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	10.00	640.86	0.00306920	30.69	01.49	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	10.50	640.36	0.00259710	25.97	01.41	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	11.00	639.86	0.00341150	34.12	01.53	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	11.50	639.36	0.00167430	16.74	01.22	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	12.00	638.86	0.00295840	29.58	01.47	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	12.50	638.36	0.00267800	26.78	01.43	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	13.00	637.86	0.00151680	15.17	01.18	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	13.50	637.36	0.00084340	08.43	00.93	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	14.00	636.86	0.00140140	14.01	01.15	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	14.50	636.36	0.00161810	16.18	01.21	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	15.00	635.86	0.00124840	12.48	01.10	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	15.50	635.36	0.00052870	05.29	00.72	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	16.00	634.86	0.00173710	17.37	01.24	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	16.50	634.36	0.00143420	14.34	01.16	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	17.00	633.86	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	17.50	633.36	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	18.00	632.86	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	18.50	632.36	-	-	-	22 oct 86

98	60	88	S31	636238	127407	650.86	19.00	631.86	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	19.50	631.36	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	20.00	630.86	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	20.50	630.36	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	21.00	629.86	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	21.50	629.36	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	22.00	628.86	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	22.50	628.36	0.00042340	04.23	00.63	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	23.00	627.86	0.00046710	04.67	00.67	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	23.50	627.36	0.00031700	03.17	00.50	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	24.00	626.86	0.00031770	03.18	00.50	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	24.50	626.36	0.00021440	02.14	00.33	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	25.00	625.86	0.00296130	29.61	01.47	22 oct 86
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	3.60	648.49	0.00005932	00.59	-00.23	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	8.00	644.09	0.00076405	07.64	00.88	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	9.00	643.09	0.00196709	19.67	01.29	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	10.00	642.09	0.00713678	71.37	01.85	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	11.00	641.09	0.00529549	52.95	01.72	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	12.00	640.09	0.00290768	29.08	01.46	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	13.00	639.09	0.00506439	50.64	01.70	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	14.00	638.09	0.01111848	111.18	02.05	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	15.00	637.09	0.00482189	48.22	01.68	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	16.00	636.09	0.00347029	34.70	01.54	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	17.00	635.09	0.00577970	57.80	01.76	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	18.00	634.09	0.00182362	18.24	01.26	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	19.00	633.09	0.00019411	01.94	00.29	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	20.00	632.09	-	-	-	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	21.00	631.09	-	-	-	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	22.00	630.09	-	-	-	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	23.00	629.09	0.00012846	01.28	00.11	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	24.00	628.09	0.00221158	22.12	01.34	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	25.00	627.09	0.00181746	18.17	01.26	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	26.00	626.09	0.00048468	04.85	00.69	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	27.00	625.09	0.00124377	12.44	01.09	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	28.00	624.09	0.00057369	05.74	00.76	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	29.00	623.09	0.00070353	07.04	00.85	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	30.00	622.09	0.00054600	05.46	00.74	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	31.00	621.09	0.00027044	02.70	00.43	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	32.00	620.09	0.00027300	02.73	00.44	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	33.00	619.09	0.00039925	03.99	00.60	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	34.00	618.09	0.00027556	02.76	00.44	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	35.00	617.09	0.00080362	08.04	00.91	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	36.00	616.09	0.00053831	05.38	00.73	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	37.00	615.09	0.00083717	08.37	00.92	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	38.00	614.09	0.00002100	00.21	-00.68	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	39.00	613.09	0.00027300	02.73	00.44	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	40.00	612.09	0.00028875	02.89	00.46	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	41.00	611.09	0.00005250	00.53	-00.28	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	42.00	610.09	0.00046300	04.63	00.67	26 juin 97
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	9.50	640.99	0.00009650	00.97	-00.02	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	10.00	640.49	0.00017840	01.78	00.25	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	10.50	639.99	0.00045650	04.57	00.66	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	11.00	639.49	0.00018500	01.85	00.27	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	11.50	638.99	0.00025220	02.52	00.40	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	12.00	638.49	0.00009600	00.96	-00.02	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	12.50	637.99	0.00012230	01.22	00.09	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	13.00	637.49	0.00009610	00.96	-00.02	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	13.50	636.99	0.00005830	00.58	-00.23	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	14.00	636.49	0.00027910	02.79	00.45	24 oct 86
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	5.06	644.73	0.00000984	00.10	-01.01	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	10.50	639.29	0.00001549	00.15	-00.81	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	11.00	638.79	0.00003873	00.39	-00.41	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	11.50	638.29	0.00017431	01.74	00.24	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	12.00	637.79	0.00000387	00.04	-01.41	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	12.50	637.29	0.00082019	08.20	00.91	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	13.00	636.79	0.00092643	09.26	00.97	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	13.50	636.29	0.00074654	07.47	00.87	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	14.00	635.79	0.00012592	01.26	00.10	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	14.50	635.29	0.00065500	06.55	00.82	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	15.00	634.79	0.00034870	03.49	00.54	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	15.50	634.29	0.00015400	01.54	00.19	26 juin 97
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	8.00	641.44	0.00138900	13.89	01.14	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	8.50	640.94	0.00127400	12.74	01.11	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	9.00	640.44	0.00003340	00.33	-00.48	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	9.50	639.94	0.00219340	21.93	01.34	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	10.00	639.44	0.00228710	22.87	01.36	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	10.50	638.94	0.00070850	07.09	00.85	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	11.00	638.44	0.00026770	02.68	00.43	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	11.50	637.94	0.00026230	02.62	00.42	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	12.00	637.44	0.00025710	02.57	00.41	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	12.50	636.94	0.00025200	02.52	00.40	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	13.00	636.44	0.00024710	02.47	00.39	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	13.50	635.94	0.00024230	02.42	00.38	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	14.00	635.44	0.00160110	16.01	01.20	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	14.50	634.94	0.00196940	19.69	01.29	24 oct 86

133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	15.00	634.44	0.00138300	13.83	01.14	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	15.50	633.94	0.00621200	62.12	01.79	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	16.00	633.44	0.00200390	20.04	01.30	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	16.50	632.94	0.00071140	07.11	00.85	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	17.00	632.44	0.00097030	09.70	00.99	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	17.50	631.94	0.00170450	17.05	01.23	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	18.00	631.44	0.00179560	17.96	01.25	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	18.50	630.94	0.00345910	34.59	01.54	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	19.00	630.44	0.00103890	10.39	01.02	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	19.50	629.94	0.00214530	21.45	01.33	24 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	10.00	641.91	0.00048740	04.87	00.69	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	10.50	641.41	0.00034060	03.41	00.53	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	11.00	640.91	0.00087720	08.77	00.94	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	11.50	640.41	0.00028840	02.88	00.46	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	12.00	639.91	0.00065800	06.58	00.82	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	12.50	639.41	0.00007390	00.74	-00.13	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	13.00	638.91	0.00031530	03.15	00.50	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	13.50	638.41	0.00044730	04.47	00.65	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	14.00	637.91	-	-	-	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	14.50	637.41	0.00229540	22.95	01.36	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	15.00	636.91	0.00330250	33.03	01.52	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	15.50	636.41	0.00196010	19.60	01.29	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	16.00	635.91	0.00242300	24.23	01.38	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	16.50	635.41	0.00662830	66.28	01.82	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	17.00	634.91	0.00345330	34.53	01.54	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	17.50	634.41	0.00161250	16.13	01.21	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	18.00	633.91	0.00002790	00.28	-00.55	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	18.50	633.41	0.00002860	00.29	-00.54	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	19.00	632.91	0.00012620	01.26	00.10	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	19.50	632.41	0.00031170	03.12	00.49	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	20.00	631.91	0.00095770	09.58	00.98	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	20.50	631.41	0.00116240	11.62	01.07	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	21.00	630.91	0.00291250	29.13	01.46	22 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	9.50	641.26	0.00214710	21.47	01.33	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	10.00	640.76	0.00117740	11.77	01.07	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	10.50	640.26	0.00204680	20.47	01.31	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	11.00	639.76	0.00390360	39.04	01.59	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	11.50	639.26	0.00269710	26.97	01.43	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	12.00	638.76	0.00106870	10.69	01.03	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	12.50	638.26	0.00300330	30.03	01.48	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	13.00	637.76	0.00206180	20.62	01.31	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	13.50	637.26	0.00171940	17.19	01.24	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	14.00	636.76	0.00209040	20.90	01.32	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	14.50	636.26	0.00173010	17.30	01.24	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	15.00	635.76	0.00200780	20.08	01.30	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	15.50	635.26	0.00160080	16.01	01.20	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	16.00	634.76	0.00093550	09.36	00.97	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	16.50	634.26	0.00081870	08.19	00.91	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	17.00	633.76	0.00131170	13.12	01.12	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	17.50	633.26	0.00099770	09.98	01.00	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	18.00	632.76	0.00024380	02.44	00.39	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	18.50	632.26	0.00387580	38.76	01.59	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	19.00	631.76	0.00195830	19.58	01.29	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	19.50	631.26	0.00128920	12.89	01.11	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	20.00	630.76	0.00331260	33.13	01.52	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	20.50	630.26	0.00516960	51.70	01.71	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	9.00	640.15	0.00152410	15.24	01.18	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	9.50	639.65	0.00318460	31.85	01.50	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	10.00	639.15	0.00127670	12.77	01.11	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	10.50	638.65	0.00121820	12.18	01.09	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	11.00	638.15	-	-	-	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	11.50	637.65	0.00330600	33.06	01.52	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	12.00	637.15	0.00077590	07.76	00.89	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	12.50	636.65	0.00074000	07.40	00.87	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	13.00	636.15	0.00332510	33.25	01.52	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	13.50	635.65	0.00278430	27.84	01.44	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	14.00	635.15	0.00153750	15.38	01.19	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	14.50	634.65	0.00143010	14.30	01.16	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	15.00	634.15	0.00303790	30.38	01.48	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	15.50	633.65	0.00219330	21.93	01.34	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	16.00	633.15	0.00400310	40.03	01.60	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	16.50	632.65	0.00255890	25.59	01.41	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	17.00	632.15	0.00304440	30.44	01.48	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	17.50	631.65	0.00239150	23.92	01.38	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	18.00	631.15	0.00149900	14.99	01.18	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	18.50	630.65	0.00135080	13.51	01.13	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	19.00	630.15	0.00247820	24.78	01.39	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	19.50	629.65	0.00344610	34.46	01.54	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	20.00	629.15	0.00433300	43.33	01.64	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	20.50	628.65	0.00292060	29.21	01.47	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	21.00	628.15	0.00085750	08.58	00.93	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	21.50	627.65	0.00649360	64.94	01.81	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	22.00	627.15	0.00105310	10.53	01.02	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	22.50	626.65	0.00078570	07.86	00.90	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	23.00	626.15	0.00107590	10.76	01.03	27 oct 86

169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	23.50	625.65	0.00071860	07.19	00.86	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	24.00	625.15	0.00015780	01.58	00.20	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	24.50	624.65	0.00014460	01.45	00.16	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	25.00	624.15	0.00020480	02.05	00.31	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	25.50	623.65	0.00018090	01.81	00.26	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	26.00	623.15	0.00079580	07.96	00.90	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	26.50	622.65	0.00045500	04.55	00.66	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	27.00	622.15	0.00485330	48.53	01.69	27 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	8.00	640.64	0.00230550	23.06	01.36	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	8.50	640.14	0.00186980	18.70	01.27	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	9.00	639.64	0.00128680	12.87	01.11	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	9.50	639.14	0.00102530	10.25	01.01	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	10.00	638.64	0.00018180	01.82	00.26	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	10.50	638.14	0.00022530	02.25	00.35	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	11.00	637.64	0.00017870	01.79	00.25	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	11.50	637.14	0.00017740	01.77	00.25	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	12.00	636.64	0.00017600	01.76	00.25	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	12.50	636.14	0.00017470	01.75	00.24	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	13.00	635.64	0.00114610	11.46	01.06	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	13.50	635.14	0.00113040	11.30	01.05	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	14.00	634.64	0.00073550	07.36	00.87	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	14.50	634.14	0.00067460	06.75	00.83	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	15.00	633.64	0.00223830	22.38	01.35	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	15.50	633.14	0.00198620	19.86	01.30	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	16.00	632.64	0.00314070	31.41	01.50	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	16.50	632.14	0.00266870	26.69	01.43	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	17.00	631.64	0.00627090	62.71	01.80	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	17.50	631.14	0.00568210	56.82	01.75	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	18.00	630.64	0.00062040	06.20	00.79	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	18.50	630.14	0.00057680	05.77	00.76	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	19.00	629.64	0.00183520	18.35	01.26	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	19.50	629.14	0.02069990	207.00	02.32	23 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	8.50	640.52	0.00083570	08.36	00.92	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	9.00	640.02	0.00043310	04.33	00.64	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	9.50	639.52	0.00117740	11.77	01.07	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	10.00	639.02	0.00811160	81.12	01.91	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	10.50	638.52	0.00232590	23.26	01.37	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	11.00	638.02	-	-	-	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	11.50	637.52	-	-	-	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	12.00	637.02	0.00025530	02.55	00.41	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	12.50	636.52	0.00118840	11.88	01.07	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	13.00	636.02	0.00145130	14.51	01.16	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	13.50	635.52	0.00091100	09.11	00.96	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	14.00	635.02	0.00055200	05.52	00.74	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	14.50	634.52	0.00048390	04.84	00.68	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	15.00	634.02	0.00046920	04.69	00.67	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	15.50	633.52	0.00042860	04.29	00.63	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	16.00	633.02	0.00108390	10.84	01.03	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	16.50	632.52	0.00253480	25.35	01.40	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	17.00	632.02	0.00295330	29.53	01.47	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	17.50	631.52	0.00120010	12.00	01.08	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	18.00	631.02	0.00170010	17.00	01.23	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	18.50	630.52	0.00102310	10.23	01.01	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	19.00	630.02	0.00176260	17.63	01.25	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	19.50	629.52	0.00122810	12.28	01.09	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	20.00	629.02	0.00201760	20.18	01.30	27 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	8.50	642.17	0.00098600	09.86	00.99	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	9.00	641.67	0.00099780	09.98	01.00	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	9.50	641.17	0.00037190	03.72	00.57	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	10.00	640.67	0.00038060	03.81	00.58	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	10.50	640.17	0.00003080	00.31	-00.51	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	11.00	639.67	0.00556850	55.69	01.75	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	11.50	639.17	0.00020420	02.04	00.31	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	12.00	638.67	0.00399460	39.95	01.60	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	12.50	638.17	0.00397430	39.74	01.60	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	13.00	637.67	0.00150360	15.04	01.18	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	13.50	637.17	0.00562060	56.21	01.75	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	14.00	636.67	0.00240550	24.06	01.38	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	14.50	636.17	0.00557180	55.72	01.75	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	15.00	635.67	0.00187570	18.76	01.27	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	15.50	635.17	0.00407000	40.70	01.61	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	16.00	634.67	0.00044560	04.46	00.65	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	16.50	634.17	0.00035820	03.58	00.55	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	17.00	633.67	0.00093050	09.31	00.97	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	17.50	633.17	0.00081960	08.20	00.91	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	18.00	632.67	0.00100920	10.09	01.00	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	18.50	632.17	0.00225710	22.57	01.35	28 oct 86
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	1.90	649.77	0.00014345	01.43	00.16	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	5.00	646.67	0.00011309	01.13	00.05	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	6.00	645.67	0.00141357	14.14	01.15	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	7.00	644.67	0.00642702	64.27	01.81	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	8.00	643.67	0.00150781	15.08	01.18	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	9.00	642.67	0.00192245	19.22	01.28	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	10.00	641.67	0.00054658	05.47	00.74	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	11.00	640.67	0.00065967	06.60	00.82	27 juin 97

187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	12.00	639.67	0.00614431	61.44	01.79	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	13.00	638.67	0.00065967	06.60	00.82	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	14.00	637.67	0.00116855	11.69	01.07	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	15.00	636.67	0.00030156	03.02	00.48	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	16.00	635.67	0.00026952	02.70	00.43	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	17.00	634.67	0.00128442	12.84	01.11	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	18.00	633.67	0.00113923	11.39	01.06	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	19.00	632.67	0.00070783	07.08	00.85	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	20.00	631.67	0.00001885	00.19	-00.72	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	21.00	630.67	0.00001885	00.19	-00.72	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	22.00	629.67	0.00016963	01.70	00.23	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	23.00	628.67	0.00064780	06.48	00.81	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	24.00	627.67	0.00034714	03.47	00.54	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	25.00	626.67	0.00085570	08.56	00.93	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	26.00	625.67	0.00139865	13.99	01.15	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	27.00	624.67	0.00022202	02.22	00.35	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	28.00	623.67	0.00096146	09.61	00.98	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	29.00	622.67	0.00122542	12.25	01.09	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	30.00	621.67	0.00072440	07.24	00.86	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	31.00	620.67	0.00146598	14.66	01.17	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	32.00	619.67	0.00059883	05.99	00.78	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	33.00	618.67	0.00019961	02.00	00.30	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	34.00	617.67	0.00011990	01.20	00.08	27.juin.97
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	5.05	642.26	0.00192000	19.20	01.28	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	6.00	641.31	0.00192000	19.20	01.28	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	7.00	640.31	0.00192000	19.20	01.28	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	8.00	639.31	0.00192000	19.20	01.28	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	9.00	638.31	0.00192000	19.20	01.28	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	10.00	637.31	0.00192000	19.20	01.28	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	11.00	636.31	0.00436000	43.60	01.64	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	12.00	635.31	0.00010000	01.00	00.00	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	13.00	634.31	0.00010000	01.00	00.00	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	14.00	633.31	0.00010000	01.00	00.00	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	15.00	632.31	0.00010000	01.00	00.00	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	16.00	631.31	0.00010000	01.00	00.00	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	17.00	630.31	0.01840000	184.00	02.26	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	18.00	629.31	0.00286000	28.60	01.46	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	19.00	628.31	0.00286000	28.60	01.46	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	20.00	627.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	21.00	626.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	22.00	625.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	23.00	624.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	24.00	623.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	25.00	622.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	26.00	621.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	27.00	620.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	28.00	619.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	29.00	618.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	30.00	617.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	31.00	616.31	0.00220000	22.00	01.34	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	32.00	615.31	0.00220000	22.00	01.34	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	33.00	614.31	0.00220000	22.00	01.34	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	34.00	613.31	0.00010000	01.00	00.00	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	35.00	612.31	0.00010000	01.00	00.00	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	36.00	611.31	0.00010000	01.00	00.00	08.sept.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	3.43	643.53	0.01170000	117.00	02.07	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	4.00	642.96	0.01170000	117.00	02.07	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	5.00	641.96	0.01170000	117.00	02.07	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	6.00	640.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	7.00	639.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	8.00	638.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	9.00	637.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	10.00	636.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	11.00	635.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	12.00	634.96	0.00175000	17.50	01.24	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	13.00	633.96	0.00175000	17.50	01.24	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	14.00	632.96	0.00175000	17.50	01.24	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	15.00	631.96	0.00175000	17.50	01.24	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	16.00	630.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	17.00	629.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	18.00	628.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	19.00	627.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	20.00	626.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	21.00	625.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	22.00	624.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	23.00	623.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	24.00	622.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	25.00	621.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	26.00	620.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	27.00	619.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	28.00	618.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	29.00	617.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	30.00	616.96	0.00065000	06.50	00.81	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	31.00	615.96	0.00057700	05.77	00.76	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	32.00	614.96	0.00163000	16.30	01.21	19.août.92

193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	33.00	613.96	0.00195000	19.50	01.29	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	34.00	612.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	35.00	611.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	36.00	610.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	37.00	609.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	38.00	608.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	3.22	644.40	0.00000265	00.03	-01.58	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	4.00	643.62	0.00000248	00.02	-01.61	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	5.00	642.62	0.00000256	00.03	-01.59	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	6.00	641.62	0.00000256	00.03	-01.59	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	7.00	640.62	0.00000256	00.03	-01.59	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	8.00	639.62	0.00004950	00.50	-00.31	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	9.00	638.62	0.00001730	00.17	-00.76	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	10.00	637.62	0.00003740	00.37	-00.43	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	11.00	636.62	0.00013000	01.30	00.11	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	12.00	635.62	0.00009960	01.00	00.00	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	13.00	634.62	0.00007920	00.79	-00.10	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	14.00	633.62	0.00008600	00.86	-00.07	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	15.00	632.62	0.00014400	01.44	00.16	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	16.00	631.62	0.00007350	00.74	-00.13	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	17.00	630.62	0.00005080	00.51	-00.29	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	18.00	629.62	0.00004630	00.46	-00.33	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	19.00	628.62	0.00006380	00.64	-00.20	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	20.00	627.62	0.00005770	00.58	-00.24	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	21.00	626.62	0.00000734	00.07	-01.13	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	22.00	625.62	0.00000623	00.06	-01.21	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	23.00	624.62	0.00002930	00.29	-00.53	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	24.00	623.62	0.00003260	00.33	-00.49	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	25.00	622.62	0.00001500	00.15	-00.82	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	26.00	621.62	0.00011500	01.15	00.06	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	27.00	620.62	0.00004420	00.44	-00.35	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	28.00	619.62	0.00003490	00.35	-00.46	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	29.00	618.62	0.00002970	00.30	-00.53	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	30.00	617.62	0.00009350	00.94	-00.03	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	31.00	616.62	0.00016300	01.63	00.21	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	32.00	615.62	0.00024500	02.45	00.39	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	33.00	614.62	0.00058000	05.80	00.76	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	34.00	613.62	0.00000100	00.01	-02.00	20.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	3.36	644.68	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	4.00	644.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	5.00	643.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	6.00	642.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	7.00	641.04	0.00013200	01.32	00.12	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	8.00	640.04	0.00030100	03.01	00.48	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	9.00	639.04	0.00072500	07.25	00.86	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	10.00	638.04	0.00163000	16.30	01.21	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	11.00	637.04	0.00093800	09.38	00.97	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	12.00	636.04	0.00034300	03.43	00.54	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	13.00	635.04	0.00016300	01.63	00.21	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	14.00	634.04	0.00076700	07.67	00.88	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	15.00	633.04	0.00120000	12.00	01.08	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	16.00	632.04	0.00252000	25.20	01.40	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	17.00	631.04	0.00102000	10.20	01.01	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	18.00	630.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	19.00	629.04	0.00000962	00.10	-01.02	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	20.00	628.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	21.00	627.04	0.00001870	00.19	-00.73	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	22.00	626.04	0.00000161	00.02	-01.79	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	23.00	625.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	24.00	624.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	25.00	623.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	26.00	622.04	0.00067700	06.77	00.83	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	27.00	621.04	0.00117000	11.70	01.07	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	28.00	620.04	0.00078500	07.85	00.89	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	29.00	619.04	0.00038700	03.87	00.59	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	30.00	618.04	0.00040200	04.02	00.60	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	31.00	617.04	0.00000711	00.07	-01.15	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	32.00	616.04	0.00000203	00.02	-01.69	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	33.00	615.04	0.00002470	00.25	-00.61	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	34.00	614.04	0.00004070	00.41	-00.39	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	35.00	613.04	0.00016500	01.65	00.22	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	36.00	612.04	0.00017200	01.72	00.24	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	37.00	611.04	0.00017000	01.70	00.23	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	38.00	610.04	0.00062400	06.24	00.80	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	39.00	609.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	8.50	639.38	0.00014760	01.48	00.17	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	9.00	638.88	0.00076890	07.69	00.89	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	9.50	638.38	0.00258670	25.87	01.41	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	10.00	637.88	0.00842520	84.25	01.93	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	10.50	637.38	0.00117020	11.70	01.07	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	11.00	636.88	0.00041290	04.13	00.62	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	11.50	636.38	0.00049160	04.92	00.69	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	12.00	635.88	0.00171710	17.17	01.23	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	12.50	635.38	0.00722600	72.26	01.86	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	13.00	634.88	0.00773040	77.30	01.89	28.oct.86

232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	13.50	634.38	0.00322390	32.24	01.51	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	14.00	633.88	0.00072970	07.30	00.86	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	14.50	633.38	0.00143720	14.37	01.16	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	15.00	632.88	0.00318210	31.82	01.50	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	15.50	632.38	0.00124220	12.42	01.09	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	16.00	631.88	0.00032330	03.23	00.51	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	16.50	631.38	0.00034700	03.47	00.54	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	17.00	630.88	0.00020520	02.05	00.31	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	17.50	630.38	0.00048270	04.83	00.68	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	18.00	629.88	0.00046870	04.69	00.67	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	18.50	629.38	0.00023940	02.39	00.38	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	19.00	628.88	0.00018390	01.84	00.26	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	19.50	628.38	0.00010310	01.03	00.01	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	20.00	627.88	0.00079650	07.97	00.90	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	20.50	627.38	0.00365320	36.53	01.56	28.oct.86
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	5.89	642.47	0.00005193	00.52	-00.28	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	11.00	637.36	0.00110901	11.09	01.04	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	11.50	636.86	0.00445964	44.60	01.65	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	12.00	636.36	0.00148655	14.87	01.17	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	12.50	635.86	0.00181689	18.17	01.26	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	13.00	635.36	0.00051911	05.19	00.72	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	13.50	634.86	0.00306748	30.67	01.49	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	14.00	634.36	0.00115857	11.59	01.06	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	14.50	633.86	0.00052051	05.21	00.72	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	15.00	633.36	0.00020950	02.09	00.32	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	15.50	632.86	0.00009186	00.92	-00.04	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	16.00	632.36	0.00002740	00.27	-00.56	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	16.50	631.86	0.00001450	00.15	-00.84	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	17.00	631.36	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	17.50	630.86	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	18.00	630.36	0.00158894	15.89	01.20	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	18.50	629.86	0.00197248	19.72	01.30	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	19.00	629.36	0.00117801	11.78	01.07	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	19.50	628.86	0.00194997	19.50	01.29	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	20.00	628.36	0.00015619	01.56	00.19	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	20.50	627.86	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	21.00	627.36	0.00017684	01.77	00.25	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	4.35	642.44	0.00020940	02.09	00.32	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	8.00	638.79	0.00040255	04.03	00.60	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	9.00	637.79	0.00000373	00.04	-01.43	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	10.00	636.79	0.00314549	31.45	01.50	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	11.00	635.79	0.00245176	24.52	01.39	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	12.00	634.79	0.00135804	13.58	01.13	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	13.00	633.79	0.00030098	03.01	00.48	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	14.00	632.79	0.00022765	02.28	00.36	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	15.00	631.79	0.00017902	01.79	00.25	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	16.00	630.79	0.00036608	03.66	00.56	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	17.00	629.79	0.00009745	00.97	-00.01	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	18.00	628.79	0.00048804	04.88	00.69	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	19.00	627.79	0.00033902	03.39	00.53	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	20.00	626.79	0.00003706	00.37	-00.43	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	21.00	625.79	0.00001863	00.19	-00.73	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	22.00	624.79	0.00006490	00.65	-00.19	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	23.00	623.79	0.00007412	00.74	-00.13	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	24.00	622.79	0.00012059	01.21	00.08	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	25.00	621.79	0.00010961	01.10	00.04	25.juin.97
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	9.00	636.05	0.00018710	01.87	00.27	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	9.50	635.55	0.00013910	01.39	00.14	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	10.00	635.05	0.00009220	00.92	-00.04	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	10.50	634.55	0.00001840	00.18	-00.74	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	11.00	634.05	0.00276490	27.65	01.44	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	11.50	633.55	0.00002360	00.24	-00.63	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	12.00	633.05	0.00001570	00.16	-00.80	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	12.50	632.55	0.00187390	18.74	01.27	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	13.00	632.05	0.00233850	23.39	01.37	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	13.50	631.55	0.00302140	30.21	01.48	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	14.00	631.05	0.00175060	17.51	01.24	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	14.50	630.55	0.00372340	37.23	01.57	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	15.00	630.05	0.00169720	16.97	01.23	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	15.50	629.55	0.00463590	46.36	01.67	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	16.00	629.05	0.00013980	01.40	00.15	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	16.50	628.55	0.00124900	12.49	01.10	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	17.00	628.05	0.00359520	35.95	01.56	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	17.50	627.55	0.00094650	09.47	00.98	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	18.00	627.05	0.00032480	03.25	00.51	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	18.50	626.55	0.00456520	45.65	01.66	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	19.00	626.05	0.00015680	01.57	00.20	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	19.50	625.55	-	-	-	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	20.00	625.05	-	-	-	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	20.50	624.55	-	-	-	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	21.00	624.05	0.00004580	00.46	-00.34	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	21.50	623.55	0.00004280	00.43	-00.37	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	22.00	623.05	0.00035610	03.56	00.55	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	22.50	622.55	0.00029120	02.91	00.46	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	23.00	622.05	0.00072590	07.26	00.86	28.oct.86

282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	23.50	621.55	0.00072370	07.24	00.86	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	24.00	621.05	0.00033670	03.37	00.53	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	24.50	620.55	0.00019980	02.00	00.30	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	25.00	620.05	0.00206760	20.68	01.32	28.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	6.00	637.89	0.00195090	19.51	01.29	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	7.00	636.89	0.00414940	41.49	01.62	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	8.00	635.89	0.00742370	74.24	01.87	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	9.00	634.89	0.00306990	30.70	01.49	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	10.00	633.89	0.00665980	66.60	01.82	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	11.00	632.89	0.00198820	19.88	01.30	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	12.00	631.89	0.00646670	64.67	01.81	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	13.00	630.89	0.00422780	42.28	01.63	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	14.00	629.89	0.00349420	34.94	01.54	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	15.00	628.89	0.00355370	35.54	01.55	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	16.00	627.89	0.00176720	17.67	01.25	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	17.00	626.89	0.00005450	00.55	-00.26	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	18.00	625.89	-	-	-	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	19.00	624.89	-	-	-	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	20.00	623.89	0.00026250	02.63	00.42	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	21.00	622.89	0.00055040	05.50	00.74	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	22.00	621.89	0.00021300	02.13	00.33	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	23.00	620.89	0.00058760	05.88	00.77	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	24.00	619.89	0.00000980	00.10	-01.01	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	25.00	618.89	0.00045900	04.59	00.66	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	26.00	617.89	0.00031720	03.17	00.50	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	27.00	616.89	0.00075850	07.59	00.88	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	28.00	615.89	0.00229450	22.95	01.36	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	5.00	637.87	0.00352280	35.23	01.55	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	5.50	637.37	0.00287430	28.74	01.46	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	6.00	636.87	0.00176580	17.66	01.25	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	6.50	636.37	0.00799760	79.98	01.90	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	7.00	635.87	0.00487290	48.73	01.69	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	7.50	635.37	0.00308700	30.87	01.49	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	8.00	634.87	0.00156390	15.64	01.19	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	8.50	634.37	0.00144090	14.41	01.16	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	9.00	633.87	0.00303580	30.36	01.48	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	9.50	633.37	0.00257580	25.76	01.41	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	10.00	632.87	0.00240120	24.01	01.38	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	10.50	632.37	0.00205740	20.57	01.31	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	11.00	631.87	0.00507960	50.80	01.71	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	11.50	631.37	0.00337200	33.72	01.53	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	12.00	630.87	0.00258730	25.87	01.41	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	12.50	630.37	0.00191670	19.17	01.28	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	13.00	629.87	0.00354760	35.48	01.55	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	13.50	629.37	0.00203190	20.32	01.31	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	14.00	628.87	0.00162310	16.23	01.21	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	14.50	628.37	0.00099830	09.98	01.00	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	15.00	627.87	0.00077520	07.75	00.89	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	15.50	627.37	0.00053840	05.38	00.73	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	16.00	626.87	0.00055680	05.57	00.75	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	16.50	626.37	0.00038210	03.82	00.58	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	17.00	625.87	0.00401620	40.16	01.60	23.oct.86
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	2.19	638.53	0.00243052	24.31	01.39	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	6.00	634.72	0.00204779	20.48	01.31	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	7.00	633.72	0.00278534	27.85	01.44	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	8.00	632.72	0.00242723	24.27	01.39	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	9.00	631.72	0.00257534	25.75	01.41	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	10.00	630.72	0.00272210	27.22	01.43	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	11.00	629.72	0.00030829	03.08	00.49	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	12.00	628.72	0.00519520	51.95	01.72	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	13.00	627.72	0.00315117	31.51	01.50	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	14.00	626.72	0.00419358	41.94	01.62	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	15.00	625.72	0.00114647	11.46	01.06	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	16.00	624.72	0.00098900	09.89	01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	17.00	623.72	0.00290024	29.00	01.46	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	18.00	622.72	0.00099499	09.95	01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	19.00	621.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	20.00	620.72	0.00012846	01.28	00.11	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	21.00	619.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	22.00	618.72	0.00011879	01.19	00.07	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	23.00	617.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	24.00	616.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	25.00	615.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	26.00	614.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	27.00	613.72	0.00028362	02.84	00.45	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	28.00	612.72	0.00113726	11.37	01.06	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	29.00	611.72	0.00123027	12.30	01.09	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	30.00	610.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	31.00	609.72	0.00007275	00.73	-00.14	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	32.00	608.72	0.00029698	02.97	00.47	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	33.00	607.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	34.00	606.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	35.00	605.72	0.00010544	01.05	00.02	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	36.00	604.72	0.00007275	00.73	-00.14	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	37.00	603.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97

383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	38.00	602.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	39.00	601.72	0.00004604	00.46	-00.34	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	40.00	600.72	0.00001335	00.13	-00.87	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	41.00	599.72	0.00009347	00.93	-00.03	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	42.00	598.72	0.00001335	00.13	-00.87	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	43.00	597.72	0.00015148	01.51	00.18	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	44.00	596.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	45.00	595.72	0.00020627	02.06	00.31	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	46.00	594.72	0.00072599	07.26	00.86	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	47.00	593.72	0.00025883	02.59	00.41	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	48.00	592.72	0.00034130	03.41	00.53	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	49.00	591.72	0.00031283	03.13	00.50	25.juin.97
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	4.82	643.18	0.00023856	02.39	00.38	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	9.00	639.00	0.00018117	01.81	00.26	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	10.00	638.00	0.00001812	00.18	-00.74	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	11.00	637.00	0.00000906	00.09	-01.04	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	12.00	636.00	0.00002718	00.27	-00.57	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	13.00	635.00	0.00017211	01.72	00.24	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	14.00	634.00	0.00024458	02.45	00.39	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	15.00	633.00	0.00040763	04.08	00.61	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	16.00	632.00	0.00009964	01.00	00.00	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	17.00	631.00	0.00028081	02.81	00.45	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	18.00	630.00	0.00041669	04.17	00.62	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	19.00	629.00	0.00089236	08.92	00.95	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	20.00	628.00	0.00034707	03.47	00.54	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	21.00	627.00	0.00055741	05.57	00.75	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	22.00	626.00	0.00034707	03.47	00.54	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	23.00	625.00	0.00030500	03.05	00.48	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	24.00	624.00	0.00018931	01.89	00.28	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	25.00	623.00	0.00010517	01.05	00.02	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	26.00	622.00	0.00030500	03.05	00.48	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	27.00	621.00	0.00023299	02.33	00.37	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	28.00	620.00	0.00070656	07.07	00.85	07.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	7.00	639.00	0.00285120	28.51	01.46	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	8.00	638.00	0.00311520	31.15	01.49	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	9.00	637.00	0.00239400	23.94	01.38	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	10.00	636.00	0.00254800	25.48	01.41	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	11.00	635.00	0.00188066	18.81	01.27	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	12.00	634.00	0.00269750	26.98	01.43	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	13.00	633.00	0.00046926	04.69	00.67	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	14.00	632.00	0.00138105	13.81	01.14	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	15.00	631.00	0.00405008	40.50	01.61	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	16.00	630.00	0.00160328	16.03	01.21	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	17.00	629.00	0.00134605	13.46	01.13	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	18.00	628.00	0.00000989	00.10	-01.00	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	19.00	627.00	0.00105811	10.58	01.02	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	20.00	626.00	0.00269100	26.91	01.43	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	21.00	625.00	0.00202240	20.22	01.31	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	22.00	624.00	0.00007688	00.77	-00.11	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	23.00	623.00	0.00079056	07.91	00.90	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	24.00	622.00	0.00111581	11.16	01.05	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	25.00	621.00	0.00008239	00.82	-00.08	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	26.00	620.00	0.00145386	14.54	01.16	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	27.00	619.00	0.00082858	08.29	00.92	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	28.00	618.00	0.00041488	04.15	00.62	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	29.00	617.00	0.00052954	05.30	00.72	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	30.00	616.00	0.00069738	06.97	00.84	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	31.00	615.00	0.00112172	11.22	01.05	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	32.00	614.00	0.00074584	07.46	00.87	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	33.00	613.00	0.00019148	01.91	00.28	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	1.91	639.09	0.00028900	02.89	00.46	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	6.00	635.00	0.00015392	01.54	00.19	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	7.00	634.00	0.00076818	07.68	00.89	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	8.00	633.00	0.00013673	01.37	00.14	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	9.00	632.00	0.00069734	06.97	00.84	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	10.00	631.00	0.00041750	04.18	00.62	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	11.00	630.00	0.00052452	05.25	00.72	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	12.00	629.00	0.00050676	05.07	00.70	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	13.00	628.00	0.00057218	05.72	00.76	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	14.00	627.00	0.00043802	04.38	00.64	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	15.00	626.00	0.00004608	00.46	-00.34	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	16.00	625.00	0.00005855	00.59	-00.23	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	17.00	624.00	0.00044604	04.46	00.65	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	18.00	623.00	0.00083304	08.33	00.92	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	19.00	622.00	0.00043518	04.35	00.64	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	20.00	621.00	0.00001248	00.12	-00.90	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	21.00	620.00	0.00002298	00.23	-00.64	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	22.00	619.00	0.00033018	03.30	00.52	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	23.00	618.00	0.00040601	04.06	00.61	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	24.00	617.00	0.00032318	03.23	00.51	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	25.00	616.00	0.00040018	04.00	00.60	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	26.00	615.00	0.00048418	04.84	00.69	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	27.00	614.00	0.00028351	02.84	00.45	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	28.00	613.00	0.00117837	11.78	01.07	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	29.00	612.00	0.00110136	11.01	01.04	06.avr.98

419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	30.00	611.00	0.00024034	02.40	00.38	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	31.00	610.00	0.00014700	01.47	00.17	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	32.00	609.00	0.00123670	12.37	01.09	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	33.00	608.00	0.00165671	16.57	01.22	06.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	4.70	639.30	0.00069100	06.91	00.84	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	8.00	636.00	0.00167000	16.70	01.22	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	9.00	635.00	0.00088700	08.87	00.95	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	10.00	634.00	0.00234000	23.40	01.37	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	11.00	633.00	0.00086500	08.65	00.94	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	12.00	632.00	0.00088600	08.86	00.95	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	13.00	631.00	0.00154000	15.40	01.19	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	14.00	630.00	0.00227000	22.70	01.36	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	15.00	629.00	0.00030700	03.07	00.49	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	16.00	628.00	0.00051700	05.17	00.71	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	17.00	627.00	0.00063200	06.32	00.80	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	18.00	626.00	0.00001190	00.12	-00.92	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	19.00	625.00	0.00031500	03.15	00.50	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	20.00	624.00	0.00015000	01.50	00.18	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	21.00	623.00	0.00012000	01.20	00.08	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	22.00	622.00	0.00003730	00.37	-00.43	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	23.00	621.00	0.00028400	02.84	00.45	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	24.00	620.00	0.00063900	06.39	00.81	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	25.00	619.00	0.00088500	08.85	00.95	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	26.00	618.00	0.00134000	13.40	01.13	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	27.00	617.00	0.00115000	11.50	01.06	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	28.00	616.00	0.00111000	11.10	01.05	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	29.00	615.00	0.00024300	02.43	00.39	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	30.00	614.00	0.00012300	01.23	00.09	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	31.00	613.00	0.00040300	04.03	00.61	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	32.00	612.00	0.00001920	00.19	-00.72	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	33.00	611.00	0.00055700	05.57	00.75	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	34.00	610.00	0.00034400	03.44	00.54	07.avr.98

Annexe 5: Analyses chimiques des eaux souterraines au niveau des graviers supérieurs (hautes-eaux 1987)

N° Piezo	X	Y	T° [C°]	K ₂₀ [µS/cm]	SO ₄ ⁻ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	Dt [°F]	O ₂ [mg/l]
A01	637'372.27	127'481.27	10.60	580.00	33.00	3.60	10.80	0.70
A02	637'128.43	127'447.55	8.40	200.00	19.00	2.30	1.30	1.10
A10	637'360.96	127'428.26	15.50	780.00	86.00	12.80	43.70	7.00
A51	637'596.00	127'598.00	11.90	300.00	239.00	241.00	15.90	1.10
A52	637'596.00	127'598.00	11.70	950.00	228.00	75.00	23.20	1.40
A60	637'413.00	127'598.00	9.40	990.00	55.00	127.00	39.50	2.10
A65	637'172.57	127'626.91	12.10	810.00	10.00	53.00	42.80	1.70
A70	637'386.77	127'798.08	10.90	410.00	27.00	35.20	18.50	1.10
A71	637'386.77	127'798.08	11.90	610.00	180.00	93.00	26.50	1.20
A85	637'074.00	127'765.00	15.60	640.00	231.00	15.30	30.80	5.20
B01	636'870.70	127'412.55	8.10	140.00	16.00	0.40	6.90	1.90
B05	636'528.56	127'365.77	10.20	290.00	56.00	7.60	8.70	1.70
B10	636'676.10	127'323.81	9.30	430.00	26.00	28.50	2.00	2.40
B20	636'890.22	127'322.62	10.90	1070.00	152.00	23.70	50.00	0.90
B60	636'876.00	127'492.00	8.90	840.00	198.00	57.00	13.00	2.20
B65	637'003.00	127'572.00	10.70	840.00	86.00	14.10	48.00	2.50
B67	636'591.61	127'459.79	-	-	34.00	9.40	18.90	-
B70	636'876.82	127'578.30	11.70	-	167.00	17.70	24.70	1.20
B75	636'656.23	127'582.05	10.30	780.00	195.00	19.00	15.70	1.30
B76	636'656.23	127'582.05	10.30	830.00	243.00	13.40	25.40	1.30
C01	636'224.23	127'326.27	8.40	220.00	39.00	1.40	12.10	1.60
C02	636'224.23	127'326.27	7.60	570.00	-	-	-	2.30
C10	636'226.45	127'270.36	9.50	430.00	10.00	8.00	24.30	2.00
C15	635'859.82	127'242.75	9.70	640.00	53.00	12.10	39.80	1.70
C20	636'238.17	127'194.88	14.30	930.00	122.00	27.70	47.60	3.50
C70	636'209.16	127'537.52	11.70	390.00	86.00	2.30	21.70	3.20
D01	635'588.92	127'247.05	7.10	220.00	25.00	2.30	12.30	2.10
D02	635'588.92	127'247.05	6.90	380.00	-	-	-	1.00
D04	635'415.14	127'258.04	6.50	300.00	56.00	5.50	13.70	1.60
D05	635'415.14	127'258.04	6.50	350.00	-	-	-	1.50
D10	635'597.35	127'209.31	8.20	380.00	58.00	12.10	18.00	1.20
D20	635'481.97	127'041.18	15.30	640.00	27.00	18.00	33.10	1.70
D50	635'582.59	127'315.15	8.40	260.00	27.00	0.80	14.80	3.90
D70	635'632.90	127'462.18	12.90	730.00	98.00	8.40	41.60	2.10
E01	635'271.93	127'303.23	7.10	320.00	39.00	1.90	17.30	3.00
E05	635'136.91	127'381.41	6.30	140.00	13.00	0.10	7.80	6.50
E06	635'136.91	127'381.41	6.20	240.00	-	-	-	1.40
E10	635'256.12	127'276.45	8.30	470.00	71.00	21.60	19.10	1.50
E20	635'197.27	127'140.30	7.90	620.00	10.00	5.10	33.60	2.10
E60	635'363.86	127'435.61	8.80	580.00	47.00	3.60	36.20	1.60
E80	635'485.14	127'796.04	12.30	1060.00	35.00	6.40	68.50	1.20
G01	634'871.58	127'555.13	5.80	170.00	17.00	0.30	9.70	6.40
G07	634'611.92	127'689.25	9.50	220.00	-	-	-	3.10
G08	634'611.92	127'689.25	9.50	350.00	6.20	6.50	15.20	1.40
G10	634'847.00	127'526.00	11.20	370.00	61.00	3.30	17.90	1.80
G20	634'805.00	127'402.00	10.00	410.00	57.00	7.70	20.30	2.20
G60	634'909.49	127'622.56	10.70	490.00	52.00	1.40	29.50	2.00
G70	635'020.21	127'771.68	12.90	1060.00	29.00	1.70	60.10	0.50
G85	634'906.00	127'904.00	15.00	480.00	135.00	11.00	22.60	6.70
H20	634'416.00	127'621.00	8.40	470.00	32.00	25.40	24.00	1.70

H30	634'373.00	127'502.00	15.00	630.00	69.00	27.00	31.20	1.40
H32	634'369.00	127'483.00	-	-	20.00	2.70	6.60	-
H40	634'241.00	127'218.00	12.00	1420.00	131.00	138.00	44.50	0.50
L01	633'993.86	127'924.07	9.40	210.00	34.00	1.70	11.80	3.30
L02	633'993.86	127'924.07	9.40	300.00	-	-	-	1.80
L20	633'947.25	127'709.89	9.20	810.00	125.00	30.50	46.70	0.60
L40	633'840.78	127'125.32	8.00	220.00	27.00	2.00	12.60	3.60
L45	633'811.00	127'077.00	-	110.00	23.00	0.50	6.10	-
L70	633'931.65	128'081.66	13.90	1200.00	184.00	36.30	69.50	0.90
M01	633'794.55	127'942.74	10.30	270.00	31.00	2.00	14.80	1.60
N01	633'581.33	127'951.86	8.50	130.00	10.00	0.30	8.80	4.70
N02	633'581.31	127'951.82	8.50	250.00	-	-	-	1.60
N20	633'584.85	127'745.46	14.00	450.00	47.00	10.60	25.70	1.80
N60	633'600.03	128'039.99	12.80	300.00	58.00	9.40	16.10	0.30
N70	633'602.03	128'110.91	11.50	830.00	38.00	5.40	52.90	0.80
O01	633'355.68	127'955.10	11.70	580.00	96.00	4.70	35.60	1.50
O10	633'389.07	127'915.21	11.30	700.00	103.00	4.00	40.50	0.60
O20	633'481.98	127'752.59	10.10	340.00	17.00	6.30	18.70	0.30
O65	633'289.60	128'032.99	9.40	440.00	57.00	6.20	23.70	4.20
O66	633'289.00	128'040.00	4.50	70.00	-	-	-	13.40
O70	633'364.35	128'084.68	11.60	890.00	192.00	6.00	56.80	0.20
Q20	633'264.57	127'875.38	8.50	220.00	-	38.00	11.70	1.10
Q25	633'191.48	127'829.74	9.90	400.00	36.00	3.80	22.90	0.90
Q30	633'449.31	127'644.79	8.70	210.00	26.00	1.50	12.00	0.90
Q35	633'189.94	127'609.37	10.10	480.00	43.00	4.90	28.30	0.90
Q40	633'637.16	127'163.59	10.30	470.00	49.00	4.60	27.60	2.10
Q60	633'151.90	128'046.11	13.60	230.00	40.00	29.40	11.90	1.90
R10	633'012.75	127'928.26	9.40	550.00	-	4.70	-	1.50
R20	633'005.80	127'889.82	9.40	390.00	40.00	61.40	23.20	1.50
R30	632'984.34	127'578.62	11.00	490.00	59.00	7.00	28.60	1.00
R40	633'007.51	127'267.07	11.20	300.00	21.00	0.50	15.90	2.60
R60	632'983.00	128'097.00	16.50	250.00	35.00	3.20	13.21	0.90
R70	633'005.00	128'199.00	12.50	280.00	10.00	7.80	15.60	0.60
T11	632'702.17	127'940.65	7.90	210.00	40.00	0.70	11.60	1.70
U20	632'482.73	127'872.33	9.00	420.00	78.00	7.30	22.70	2.00
U30	632'531.39	127'754.32	13.80	610.00	60.00	6.50	34.40	1.40
W20	632'282.34	127'796.39	-	270.00	45.00	2.90	14.80	-
W22	632'097.00	127'681.00	-	570.00	49.00	112.00	16.30	-
W25	632'087.00	127'668.00	-	470.00	39.00	5.60	27.90	-
W40	632'291.49	127'454.94	-	700.00	121.00	45.30	39.00	-
W50	632'354.00	128'071.00	-	70.00	13.00	0.80	3.80	-
W60	632'402.60	128'079.59	12.20	520.00	12.00	2.40	31.50	0.50
W70	632'450.11	128'245.48	10.90	460.00	10.00	2.40	26.40	0.30
X20	632'003.57	128'022.04	-	310.00	41.00	1.70	18.00	-
X60	632'065.00	128'342.00	11.30	370.00	11.00	3.20	21.20	0.40
Y10	631'796.00	128'230.00	-	190.00	24.00	0.90	10.40	-
Z20	631'488.00	128'149.00	-	290.00	-	-	-	-

Annexe 6 : : Valeurs des conductivités hydrauliques en m/s pour les variantes 00 à 10 du modèle 3-D^{ème} (3 corr. du Rhône)

Variante	Lithologie	Conductivité horizontale Kx, Ky [m/s]	Conductivité verticale Kz [m/s]
00	Ls	10-4	10-4
01a	Gs	10-4	10-4
01b	Li	10-4	10-4
	Gi	10-4	10-4
02a	Ls	10-4	10-4
02b	Gs	10-3	10-3
	Li	10-4	10-4
	Gi	10-3	10-3
03a1	Ls	10-5	10-5
03b1	Gs	10-3	10-3
	Li	10-5	10-5
	Gi	10-3	10-3
03a2	Ls	10-5	10-6
03b2	Gs	10-3	10-3
	Li	10-5	10-6
	Gi	10-3	10-3
03a3	Ls	10-5	10-7
03b3	Gs	10-3	10-3
	Li	10-5	10-7
	Gi	10-3	10-3
04a	Ls	10-4	10-4
04b	Gs	hétérogène: 3.9x10-3 à 4.2x10-4	10-4
	Li	10-4	10-4
	Gi	10-3	10-3
05a	Ls	10-5	10-5
05b	Gs	hétérogène: 3.9x10-3 à 4.2x10-4	10-5
	Li	10-5	10-5
	Gi	10-3	10-3
06a	Ls	hétérogène: 6.9x10-4 à 3x10-7	10-5
06b	Gs	hétérogène: 3.9x10-3 à 4.2x10-4	10-6
	Li	10-5	10-6
	Gi	10-3	10-3
07a	CR1MD	10-5	10-5
07b	Ls	hétérogène: 6.9x10-4 à 3x10-7	10-5
	Gs	hétérogène: 3.9x10-3 à 4.2x10-4	10-6
	Li	10-5	10-6
	Gi	10-3	10-3
08a	CR1M	10-5	10-5
08b	Ls	hétérogène: 6.9x10-4 à 3x10-7	10-5
	Gs	hétérogène: 3.9x10-3 à 4.2x10-4	10-6
	Li	10-5	10-6
	Gi	10-3	10-3
09a	CR1M	10-5	10-6
09b	Ls	hétérogène: 6.9x10-4 à 3x10-7	10-6
	Gs	hétérogène: 3.9x10-3 à 4.2x10-4	10-6
	Li	10-5	10-6
	Gi	10-3	10-3
10a	CR1M	10-5	10-7
10b	Ls	hétérogène: 6.9x10-4 à 3x10-7	10-7
	Gs	hétérogène: 3.9x10-3 à 4.2x10-4	10-6
	Li	10-5	10-6
	Gi	10-3	10-3

CR1MD = Couche de colmatage du Rhône de 1 m d'épaisseur fonctionnant comme un drain

CR1M = Couche de colmatage du Rhône de 1 m d'épaisseur fonctionnant comme une barrière hydraulique

Ls = Limons supérieurs

Gs = Gravieres supérieurs

Li = Limons intermédiaires

Gi = Gravieres inférieurs

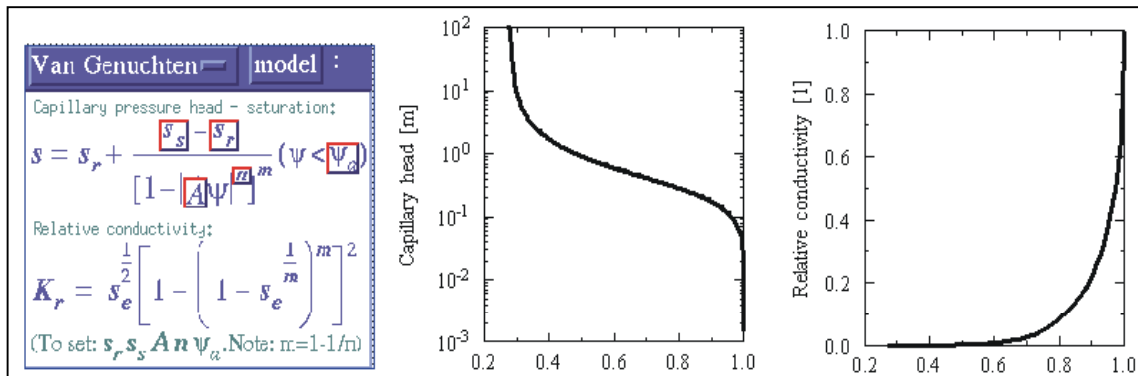
vert = Variante avec puits de la Lonza (Sandmatt B1 et Lonza 83)

rouge = Modification par rapport à la variante précédente

Paramètres hydrauliques pour le milieu saturé

Paramètre	Variante				
	00R	01R	02R	03R	04R
K limons [m/s]	10-3	10-5	10-5	10-5	10-5
K graviers [m/s]	10-3	10-3	10-3	10-3	10-3
K parois moulées [m/s]	10-3	10-5/10-3	10-8	10-8	10-8
Compressibilité [1/m]	10-4	10-4	10-4	10-4	10-4

Paramètres hydrauliques pour le milieu non-saturé (Feflow 4.8, Diersch, 1999) Modèle de Van Genuchten (1980)



Paramètres	Limons	Graviers
Porosité maximale [1]	0.3	0.3
Saturation maximale S_s [1]	1	1
Saturation résiduelle S_r [1]	0.03	0.001
Coefficient d'ajustage A [1/m]	5	10
Exposant d'ajustage n [1]	1.55	2
Pression d'air d'entrée P_{sia} [m]	0	0

Annexe 7 : Paramètres hydrauliques utilisés pour les milieux saturé et non saturé pour les profils MQ1 et MQ2 étendus

3-D Groundwater Flow Modeling in Heterogeneous Geologic Media : Integrated Approach Using Spatial and Temporal Database, Geostatistics and GIS

Francesco Kimmeier

SHORT TABLE OF CONTENTS

I. INTRODUCTION GENERALE

II. GIS DATABASE AS SUPPORT TO GROUNDWATER PROBLEM RESOLUTION

II.1 TRACES/VIEW - TRAÇAGE DES EAUX SOUTERRAINES : APPLICATION SIG EN MILIEU KARSTIQUE JURASSIEN (SUISSE)

II.2 GEOHYDROLOGICAL PARAMETERS IDENTIFICATION AND GROUNDWATER VULNERABILITY TO POLLUTION: A SWISS CASE STUDY

III. GROUNDWATER MODELING AT DIFFERENT SCALE USING FINITE ELEMENTS METHOD AND STOCHASTIC MODELING FOR UNCERTAINTY ESTIMATION

III.1 3-D GROUNDWATER MODELING AT REGIONAL SCALE

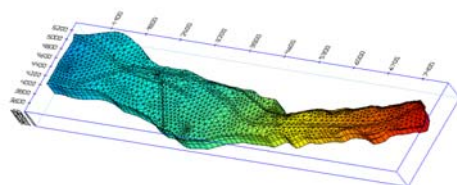
III.2 BASE DE DONNEES, SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE, GEO-STATISTIQUE ET MODELISATION 3-D DES EAUX SOUTERRAINES A L'ECHELLE LOCALE DANS LA REGION DE VISP (SUISSE)

III.3 TRAVEL PATH UNCERTAINTY : A CASE STUDY COMBINING STOCHASTIC AND DETERMINISTIC HYDRODYNAMIC MODELS IN THE RHÔNE VALLEY, SWITZERLAND

IV. CONCLUSIONS GENERALES ET TRAVAUX FUTURS

KIMMEIER'S SHORT CURRICULUM VITAE AND LIST OF PUBLICATIONS

**Base de données, Systèmes d'Information Géographique,
géostatistique et modélisation 3-D des eaux souterraines à l'échelle
locale : Approche intégrée appliquée à la région de Visp (Suisse)**



RÉSUMÉ

Le but de cette partie est de décrire la méthodologie de la construction d'un modèle hydrodynamique 3-D performant, décrivant la géométrie des aquifères et aquitards, leurs lithologies, leurs caractéristiques hydrodynamiques (perméabilité, porosité et coefficient d'emmagasinement) aussi bien que les paramètres hydrochimiques afin, d'obtenir un instrument pour la gestion et la protection des eaux souterraines. Ce modèle a été utilisé comme instrument prévisionnel dans le cadre de l'étude d'impact de travaux de génie civil futurs sur les eaux souterraines et pourrait être utilisé, à l'avenir, par le canton du Valais, pour d'autres projets comme l'étude de l'impact sur les eaux souterraines de la pollution de la décharge de Gamsen. Les données proviennent de 144 forages, 386 piézomètres et 23 points d'observation des eaux de surface. La procédure, depuis l'acquisition des données jusqu'à l'élaboration d'un modèle hydrodynamique 3-D fonctionnel, se décompose en 3 étapes principales : i) la réalisation de la base de données spatiales raster et vecteur, ii) le traitement des données par statistique et géostatistique, iii) la réalisation d'un modèle hydrodynamique 2-D puis 3-D. ArcInfo et ArcView ont été utilisés comme Système d'Information Géographique et MS Access comme système de gestion de base de données sur station de travail et ordinateur individuel. Actuellement, ArcInfo, ArcView et MS Access permettent de conserver et de gérer les données de base ainsi que les différents plans d'information 2-D sous forme de cartes et de profils. L'extraction automatique de sections verticales pour des systèmes multicouches permet une vérification aisée de la géométrie 3-D du modèle hydrogéologique (algorithmes présents dans les modules Tin et Grid d'ArcInfo). Le traitement par géostatistique des données spatiales de base a été réalisé à l'aide de plusieurs techniques (krigeage et simulations conditionnelles). Les modèles mathématiques hydrogéologiques développés sont basés sur la méthode des éléments finis. Les logiciels FEN's code family et Feflow ont été utilisés. Le modèle hydrodynamique 3-D a été construit comme un instrument pour le gestionnaire. Nous le montrons à travers deux applications (3^{ème} correction du Rhône phase II et influence potentielle de la décharge de Gamsen). L'intérêt de ce travail est évident dans une région où les eaux souterraines en relation avec le Rhône sont facilement accessibles et, par conséquent, exploitables à faibles coûts. De plus, leur situation dans une vallée en général étroite avec une forte activité anthropique (industrie, agriculture, routes et autoroute) font qu'elles sont spécialement vulnérables, tant du point de vue de la qualité (pollution industrielle et/ou agricole), que de la quantité (perturbations locales ou régionales

dues à des ouvrages souterrains ; palplanches, barrages, etc.).

Mots-clefs : Hydrogéologie, base de données, Systèmes d'Information Géographique, géostatistique, modélisation des écoulements et du transport des eaux souterraines, éléments finis 3-D, Valais, Suisse

1. OBJECTIF

Le but de cette partie est de décrire la méthodologie intégrée de la construction d'un modèle hydrodynamique 3-D performant, décrivant la géométrie des aquifères et aquitards, leurs lithologies, leurs caractéristiques hydrodynamiques (perméabilité, porosité et coefficient d'emmagasinement) aussi bien que les paramètres hydrochimiques.

La démarche, destinée principalement aux hydrogéologues praticiens non initiés aux techniques les plus récentes du traitement numérique des données spatiales, adopte volontairement un style descriptif. Toutefois, la description des étapes a été réalisée de la manière la plus complète possible, dans le but de reproduire le plus rapidement des scénarios de simulations. Ces simulations utiliseront la base de données spatiales de Visp, qui sera gérée par le Centre de Recherche en Environnement Alpin (CREALP, Sion, Suisse). En effet, nous mettons à leur disposition un instrument de gestion des eaux souterraines. Il consiste en un modèle 3-D à éléments finis permettant :

- *de visualiser et de gérer les données hydrogéologiques spatiales et temporelles (bases de données sous ArcInfo et ArcView),*
- *de réaliser de nouveaux scénarios de prévision dans le cadre de la gestion des ressources en eaux de la région (impacts de nouvelles perturbations sur les eaux souterraines de travaux de génie civil – par exemple correction du Rhône – pollutions accidentelles liées au transport de matières polluantes ou à la décharge de déchets industriels de la Lonza dans la région de Gamsen).*

La procédure, depuis l'acquisition des données spatiales jusqu'à l'élaboration d'un modèle hydrodynamique 3-D fonctionnel, est représentée sur l'organigramme de la figure 1. Il montre l'approche intégrée qui se décompose en 3 principales étapes qui sont :

1. la réalisation de la base de données raster (données sur grille régulière ; Modèle Numérique de Terrain (MNT), images, etc.) et mode vecteur (données sous forme de points, lignes et polygones) depuis l'acquisition des données au moyen de scanners, tables à numériser, traitement de texte et tableur jusqu'à l'obtention de plans d'information 2-D (hydrographie, lithologie, piézométrie, etc.) - la validation des données constituant une étape intermédiaire importante,
2. le traitement des données par statistique et géostatistique en utilisant différentes techniques (krigeage standard et simulations conditionnelles),
3. la réalisation de modèles hydrodynamiques 2-D et 3-D en utilisant la méthode des éléments finis et le logiciel Feflow [Diersch, 1999] et/ou FEN's code family [Király, 1985, 1998].

Cette méthodologie est dite intégrée, car les techniques SIG, statistique et géostatistique sont utilisées tout au long du processus de modélisation. Ce modèle a

été utilisé comme un instrument de gestion prévisionnel dans le cadre de travaux futurs de génie civil et pourrait être utilisé, à l'avenir, par le canton du Valais, pour d'autres projets comme l'étude de l'impact sur les eaux souterraines de la pollution de la décharge de Gamsen. Les données proviennent de 144 forages, 386 piézomètres et 23 points d'observation des eaux de surface.

Cette partie s'attache d'avantage à la description de la démarche d'obtention de l'instrument 3-D, plutôt qu'à une description technique de la modélisation numérique des eaux souterraines. Nous renvoyons le lecteur, pour cet aspect particulier, à la description de la méthode des éléments finis décrite par Király en 1985 dans «FEM 301 – A Three Dimensional Model for Groundwater Flow Simulation» ou au manuel de Feflow [Diersch, 1999].

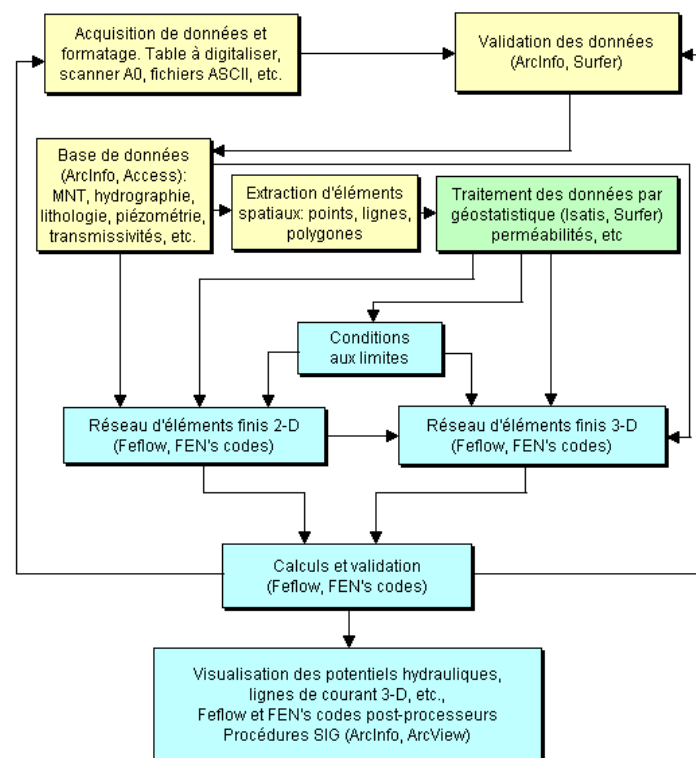


Figure 1 : Liens entre les bases de données spatiales en mode raster et vecteur, les SIG, l'étude géostatistique des données et les modèles hydrodynamiques tridimensionnels

2. BASE DE DONNÉES SPATIALES HYDROGÉOLOGIQUE EN MODE RASTER ET VECTEUR

2.1 Système d'information géographique ou système d'information géospatiale

Un système d'information géographique se définit à l'heure actuelle de manière générale comme un environnement informatisé de traitement d'informations spatiales numériques et multivariées [Burrough, 1998 ; Tomlin, 1993 ; Collet, 1992 ; Caloz & Collet, 1997 ; Golay, 1992 ; Jaquet, 1996]. Le système d'information géographique ou système d'information géospatiale se réfère donc autant aux concepts de l'analyse spatiale qu'aux outils informatiques, à savoir les équipements et les logiciels. Le Système d'Information Géographique prend en compte les dimensions des variables qui peuvent être d'ordre thématique, spatial et/ou temporel. L'aspect temporel

constitue un domaine de recherche en plein développement dans les SIG [Bédard et al., 1996 ; Claramunt & Thériault, 1995].

Les Systèmes d'Information Géographique offrent les fonctions d'acquisition de données sous forme numériques, de validation, de gestion, de traitement et d'analyse spatiale, thématique et multithématique de données géoréférencées [Burrough, 1998, Maidment 1996, Barazzuoli & al, 1999]. Ils permettent aussi la représentation de ces données sous forme de cartes, tableaux et images. Enfin, ils offrent la possibilité de couplage avec les logiciels de simulation. La simulation dynamique des processus, dans les sciences de l'environnement dont la composante spatiale est prépondérante, se base de plus en plus sur les SIG [Maxwell & Costanza, 1998 ; Pouliot, 1999 ; Maidment, 1996]. Le couplage des SIG et des modèles dans les sciences de l'environnement est aussi en plein essor marqué par les nombreuses conférences consacrées à ce sujet [Kovar & Nachtnebel 1993, 1996]. De nombreuses applications liées à la problématique de la notion de couplage des SIG et de la modélisation des ressources en eau ont été abordées ces dernières années [Van Deursen, 1995 ; De Smedt F., 1997 ; Batelaan & al., 1996 ; Bel Hadj Kacem, 1998 ; Wesseling & al., 1996, Bouzelboudjen & Kimmeier, 1998].

2.2 Données de base

La base de données hydrogéologique utilisée pour l'élaboration du modèle 3-D dans la région de Visp [Fröhlich, 1997 ; Kimmeier, 1997, 1999], développée sous MS Access depuis 1993 dans le cadre du projet Fonds national (N° 21-39357.93 et 2047-064.96), s'intègre dans un concept global de banque de données cantonale mise sur pied par le canton du Valais. Cette banque de données a été alimentée en partie par des modèles 3-D précédents [Bouzelboudjen & Király, 1988 ; Király & Bouzelboudjen, 1988a ; Bouzelboudjen, 1991 ; Geister & Burger, 1988] et l'est actuellement par divers organismes cantonaux comme le Service des routes et des cours d'eau (SRCE) et le Centre de recherche en environnement alpin (CREALP).

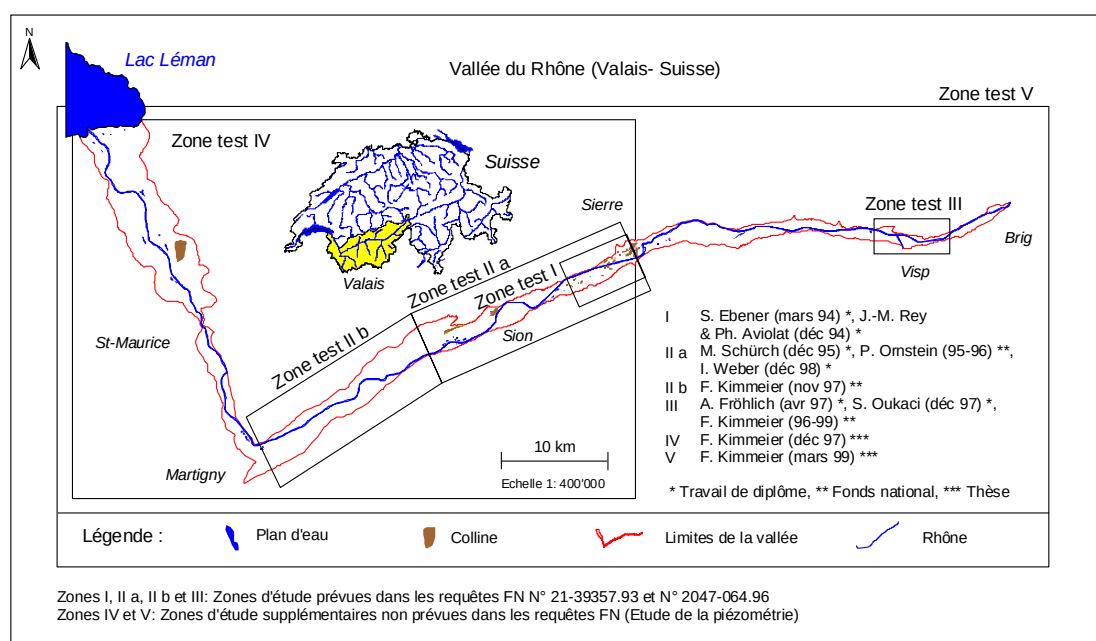


Figure 2 : Situation géographique des différentes études traitées dans la requête Fonds national (N° 21-39357.93 et N° 2047-064.96). Requêteur principal : J.-D Rouiller; co-requêteurs : Dr M. Bouzelboudjen, Prof. L. Király, F. Veuthey.

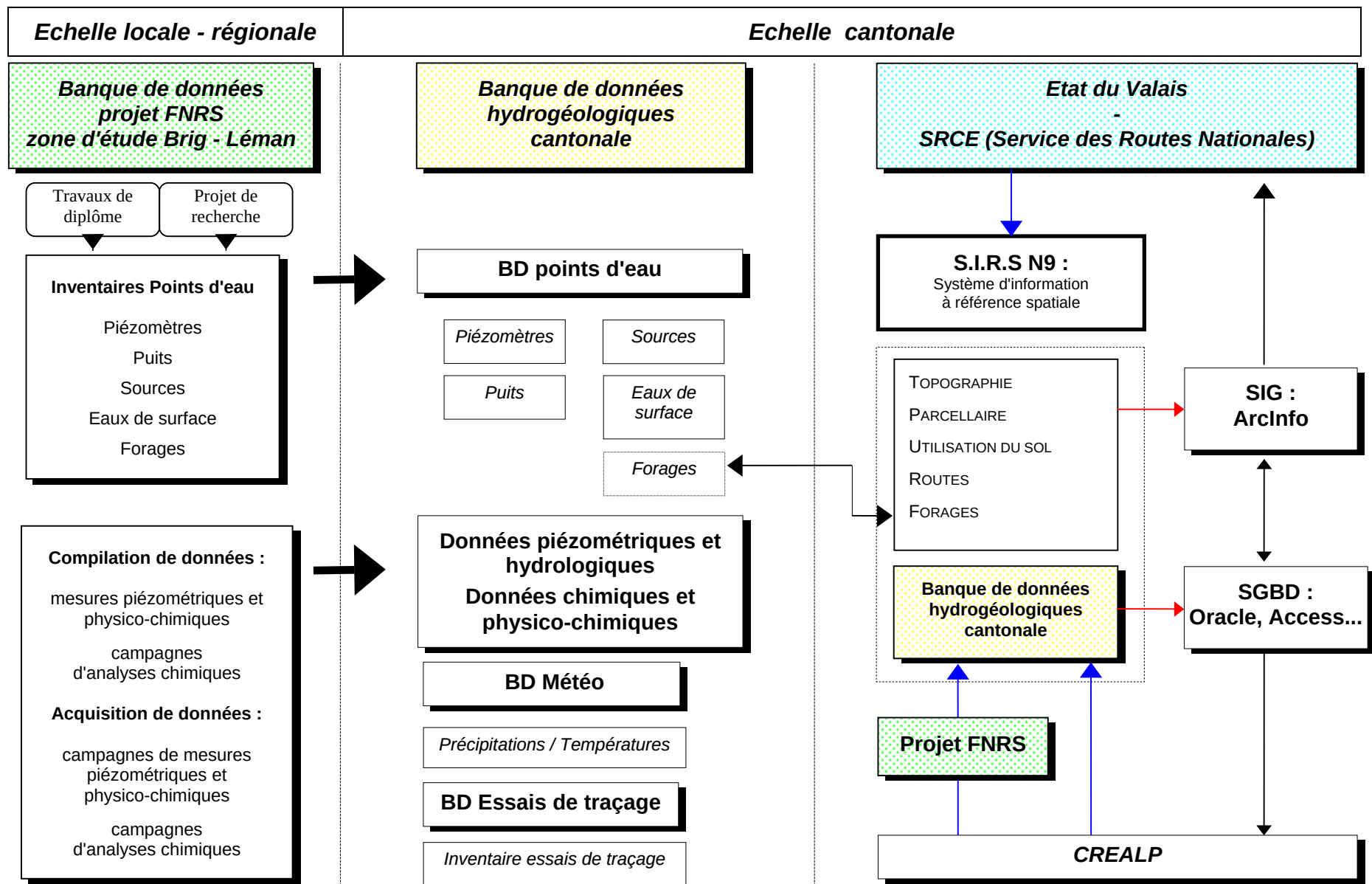


Figure 3 : Concept global de la banque de données hydrogéologiques du canton du Valais (d'après P. Ornstein, rapport FN nov. 1996)

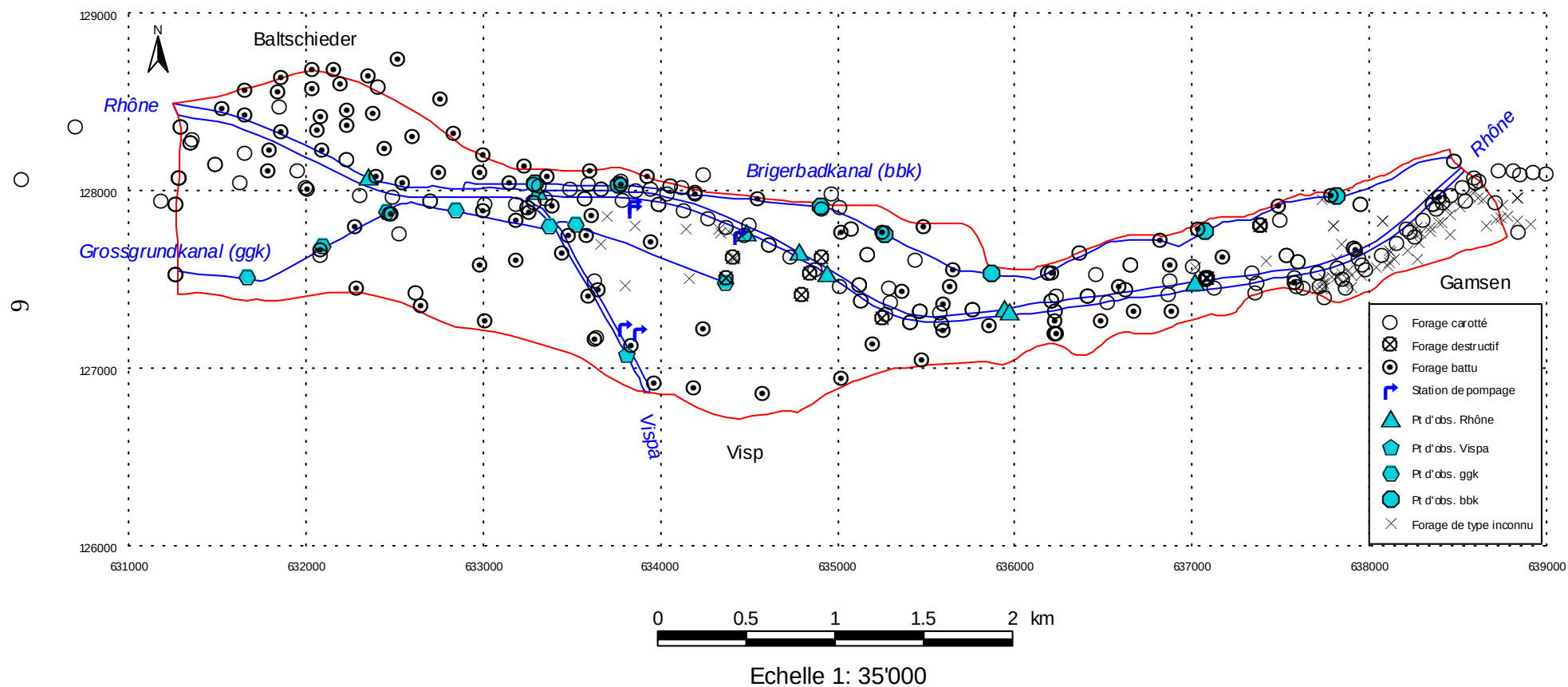


Figure 4 : Type d'ouvrage des 144 forages, 386 piézomètres, 5 stations de pompage et 23 points d'observation des eaux de surface dans la région de Visp.
(Base de données : A. Fröhlich, 1997 ; Kimmeier, 1997, 1999).

La figure 2 montre la localisation des différentes études entreprises dans le cadre du projet Fonds national et plus particulièrement dans la zone de Visp, où se situe le modèle 3-D décrit dans cette démarche. L'annexe 1 liste les titres des différents travaux entrepris dans ce cadre, entre 1993 et 2001. La figure 3, quant à elle, illustre le concept global de cette banque de données, avec les différents intervenants.

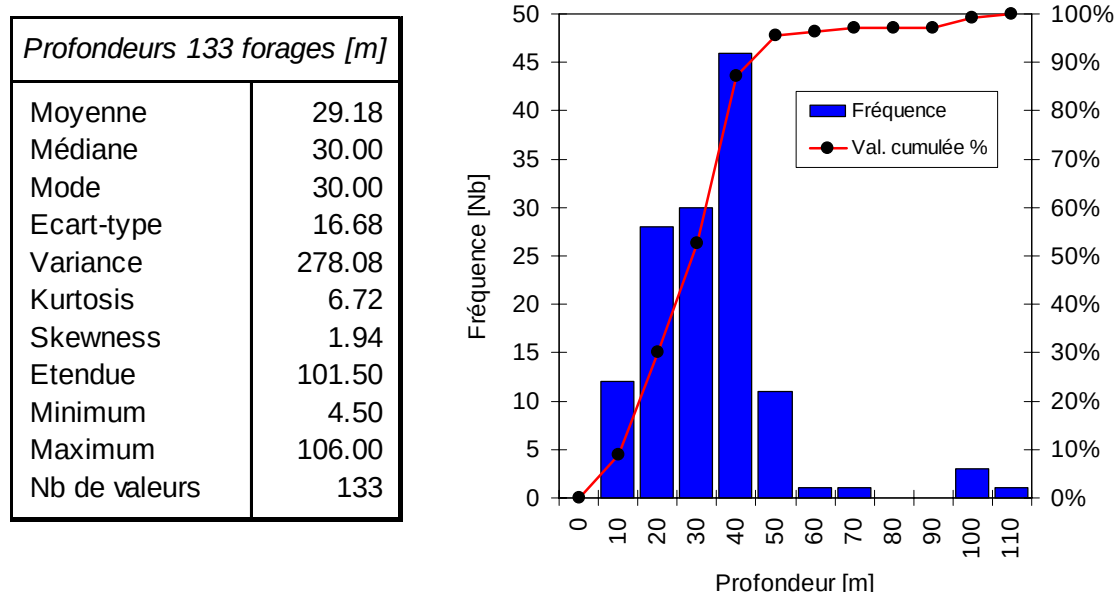
Pour générer la géométrie du modèle 3-D, ainsi que pour effectuer des calculs et les valider dans le but d'obtenir des vitesses de filtration (et par suite des débits) et des valeurs de potentiels hydrauliques, il est nécessaire de connaître les points suivants : (voir dans ce volume «3-D groundwater modeling at national scale, Kimmeier & al., 2001e») :

- les différentes surfaces structurales ainsi que les épaisseurs des différentes formations que l'on veut modéliser,
- les valeurs de potentiels hydrauliques mesurées dans les piézomètres,
- les valeurs de perméabilités et de coefficients d'emménagement mesurées dans les forages,
- les valeurs de débits mesurées dans les canaux, et
- les paramètres physico-chimiques majeurs.

La figure 4 montre l'emplacement des points d'observation des eaux souterraines et des eaux de surface. Elles sont effectuées dans :

- 144 forages soit carottés, soit destructifs ou battus,
- 386 piézomètres isolés ou parfois regroupés à plusieurs par forage,
- 5 stations de pompage sur le site de la Lonza (industrie agro-chimique), et
- 23 points d'observation des eaux de surface sur le Rhône et les canaux du Grossgrund et du Brigerbad.

La figure 5 montre les statistiques descriptives et un histogramme des profondeurs atteintes par les forages. Seules 133 profondeurs sont connues. On constate que 45 forages atteignent 40 m de profondeur. Cette valeur constitue la profondeur moyenne



de la base de l'aquifère inférieur. Il est par conséquent intéressant de noter que bien que le nombre de forages par km² soit important dans cette région ils ne permettent pas tous de décrire complètement la géométrie du système aquifère. La plupart de ces forages a été effectué dans le cadre de la construction de l'autoroute A9 et non pas à des fins hydrogéologiques uniquement. Ces forages sont majoritairement alignés le long du Rhône et le long d'une variante de tracé de la future autoroute. C'est pourquoi pour compléter l'information 3-D nécessaire à la construction du modèle hydrogéologique sept forages d'environ 40 m de profondeur ont été réalisés en 1988 dans le cadre du mandat réalisé par Bouzelboudjen & Király [1988]. Cinq autres forages ont été réalisés en 1998 dans le cadre du Fonds national afin de compléter la base de données hydrogéologiques (paramètres structuraux et mesures de perméabilité par flowmètre tous les mètres [Geotest, 1998, Kimmeier, 1999 a]). Les nouveaux forages FR 5, 6, 8 et 11 sont localisés sur la figure 4.

2.2.1 Surfaces structurales

L'ensemble des forages carottés a permis de définir un schéma conceptuel de la succession des formations dans le sous-sol de la région de Visp. Le complexe aquifère de cette région se compose (Fig. 6) de dépôts quaternaires d'origine glaciaire, lacustre ou fluvial. Les dépôts graveleux du Rhône forment le principal aquifère de la région. La distribution des différentes formations lithologiques retenues pour le modèle 3-D sont du sommet vers le bas : les limons de surface (Ls) avec une épaisseur moyenne de 10 m (absents par endroits), les graviers supérieurs (Gs) d'une épaisseur moyenne de 16 m (10 à 19 m), les limons intermédiaires (Li) qui ne sont jamais épais de plus de 20 m et qui sont absents par endroits, notamment en amont de la région étudiée où le

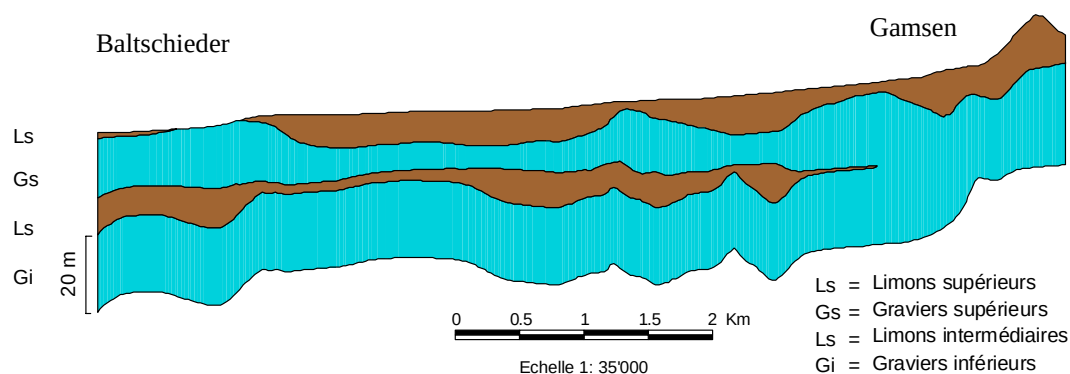


Figure 6 : Section 6 (cf. Fig 38) amont aval avec lithologie du complexe aquifère entre Gamsen et Baltschieder

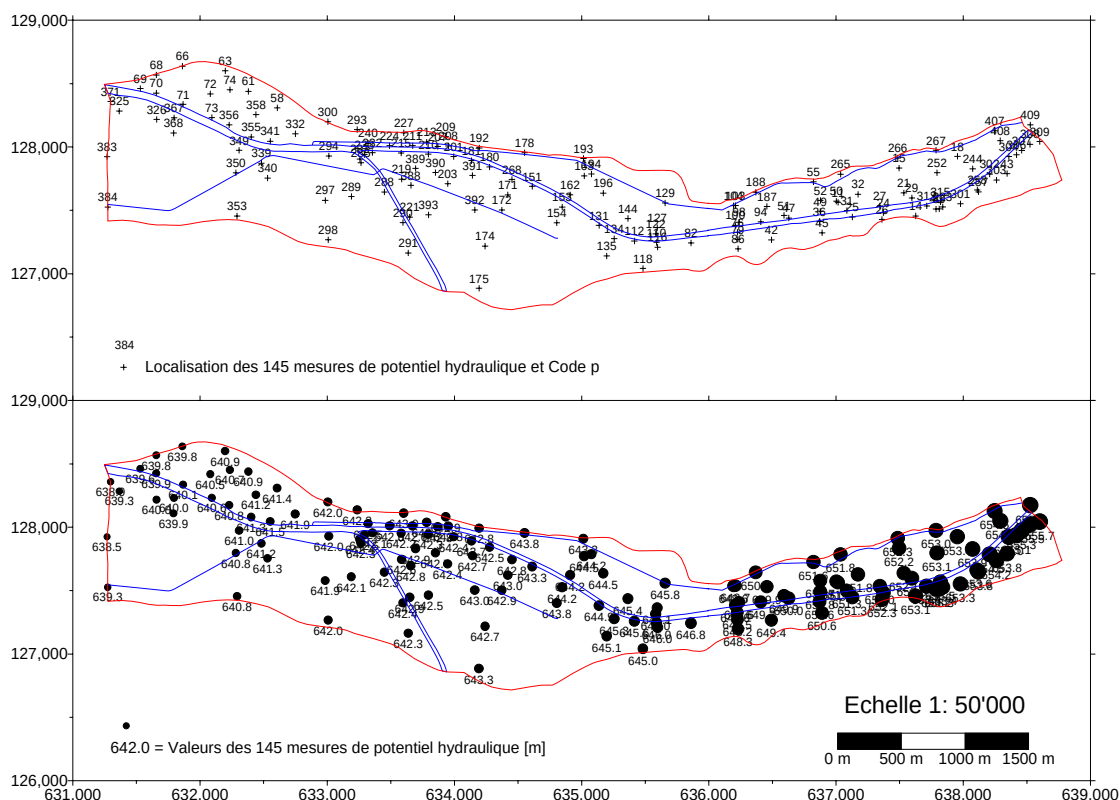
complexe aquifère composé d'un bi-couches se transforme en un mono-couche, et finalement une couche de graviers inférieurs (Gi) dont l'épaisseur n'est connue qu'à quelques endroits. Dans le modèle 3-D construit en 1988 une couche d'une épaisseur moyenne de 20 m a été introduite [Bouzelboudjen & Király, 1988 ; Bouzelboudjen, 1991].

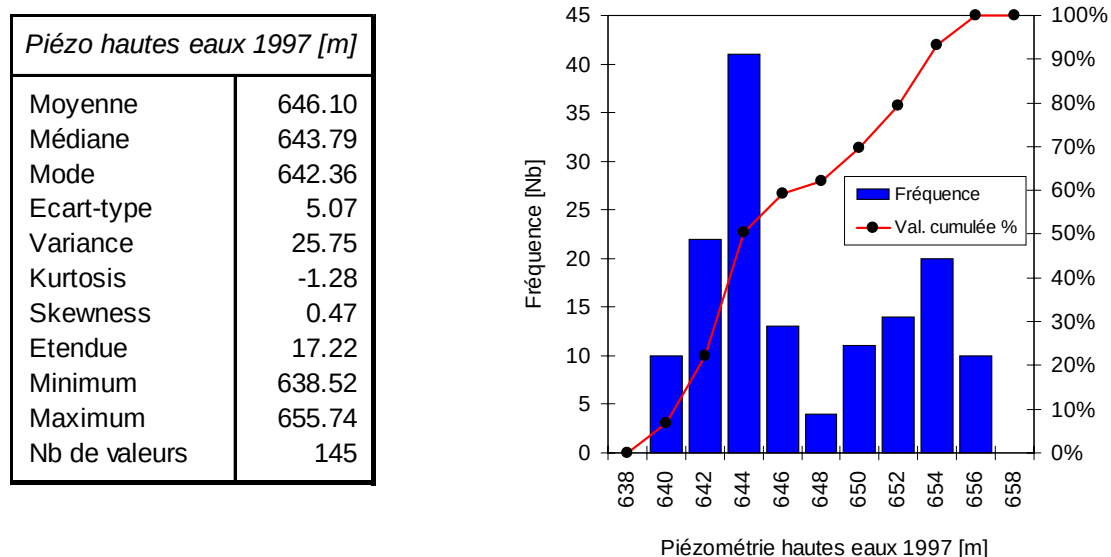
Les données structurales de base (mode vecteur points et raster) se composent donc : 1) de la surface topographique définie soit par le MNT (Modèle Numérique de Terrain de l'Office fédéral de la topographie), soit par les points cotés des différents piézomètres de la zone d'étude, 2) du mur des limons de surface, 3) du mur des graviers supérieurs, 4) du mur des limons intermédiaires et 5) du mur des graviers

inférieurs. Les cartes en isopaches pour chacune des formations sont également stockées. Sur la figure 35 sont consignés les plans d'information qui ont été utilisés pour la construction de la géométrie du modèle hydrodynamique 3-D. Ces plans d'information proviennent de la compilation des documents de J.-M Wicht [Clavien, 1987], M. Bouzelboudjen [1988, 1990], M. Geister [1988].

2.2.2 Mesures de piézométrie du complexe alluvionnaire

En principe les valeurs de piézométrie sont mesurées 2 fois par année, soit pendant les basses et hautes-eaux. C'est le CREALP qui se charge de la réalisation des tournées depuis 1999. Dans le modèle développé à Visp les basses-eaux 1992 et les hautes-eaux 1997 ont été retenues comme conditions aux limites du modèle hydrodynamique et comme valeurs de contrôle des calculs. La figure 7 montre





position et les valeurs des quelques mesures de potentiels hydrauliques dans les graviers inférieurs. Ces mesures montrent que la nappe des graviers inférieurs est en général mise en charge par les limons intermédiaires. En juillet 1988, pour le besoin du modèle 3-D [Bouzelboudjen & Király, 1988 ; Bouzelboudjen, 1991], Bianchetti a suivi les 7 forages aux limites amont et aval du modèle [Clavien, 1988]. Les résultats de cette campagne de terrain (mesures différenciées en profondeur de potentiels hydrauliques et de perméabilités) montrent que, si la mise en charge de l'aquifère inférieur est peu perceptible (à Lalden), ce n'est pas le cas 5 km plus bas en aval (à Baltschieder), où la mise en charge dépasse le mètre. On observe donc une drainance du bas vers le haut.

Les potentiels hydrauliques mesurés dans les limons supérieurs et intermédiaires sont très peu nombreux et les valeurs ne sont pas très fiables à cause des difficultés de la mise en œuvre des techniques de mesure [Clavien, 1988 ; Geotest, 1992].

1.1.1 Mesures de débits dans les canaux

Les débits mesurés dans les canaux de Brigerbad et de Grossgrund donnent des valeurs qui permettent de vérifier les résultats des calculs du modèle hydrodynamique. La fonction première de ces canaux étant de drainer les eaux souterraines de la plaine, on estime donc que l'eau présente dans ces canaux provient de la nappe phréatique. La figure 55 montre la position des points de mesure des débits sur les canaux de Grossgrund et de Brigerbad lors de la campagne des hautes-eaux 1997. Elle montre, aussi, pour chaque station, la valeur des débits mesurés ainsi que leurs valeurs corrigées en soustrayant les apports des émissaires naturels ou artificiels (industrie). La participation de chaque tronçon est également consignée. On remarque que certains tronçons peuvent être infiltrants alors que d'autres sont exfiltrants.

Les mesures de débits dans les canaux ont été réalisées en 1988, 1997 et 1999 [Clavien, 1988 ; Bouzelboudjen & Király, 1988 ; Ornstein, 1997, 1999 ; Teyssiere & Candolfi, 1999]. Les valeurs de 1997 ont été utilisées pour la vérification des résultats

du modèle 3-D. Elles ont été mesurées en même temps que la campagne de piézométrie des hautes-eaux de cette année et correspondent donc aux conditions aux limites imposées au modèle.

2.2.4 Valeurs de perméabilité

Le tableau 1 résume les valeurs de perméabilité ainsi que les statistiques descriptives pour chaque variable.

Méthode de mesure	Nombre de valeur	Moyenne $\times 10^{-4}$ [m/s]	Minimum $\times 10^{-4}$ [m/s]	Maximum $\times 10^{-4}$ [m/s]	Écart-type $\times 10^{-4}$ [m/s]
K-NICONP	95	19.10	0.120	93.20	18.80
K-NICONI	38	18.30	0.452	138.00	30.80
K-POMPC	19	23.30	2.680	98.00	26.90
K-POMPL	4	55.40	1.000	210.00	103.00
K-FLOWM	769	12.66	0.010	207.00	18.88

K-NICONP : Perméabilités mesurées par essais de pompage à niveau constant

K-NICONI : Perméabilités mesurées par essais d'injection à niveau constant

K-POMPC : Perméabilités mesurées par essais de pompage de courte durée (quelques heures)

K-POMPL : Perméabilités mesurées par essais de pompage de longue durée (2-3 jours)

K-FLOWM : Perméabilités mesurées par essais au flowmètre

Tableau 1 : Résumé des données de perméabilités à disposition dans les graviers supérieurs (état 1998) et sur l'ensemble du complexe alluvionnaire (méthode K-FLOWM)

Les valeurs de perméabilité des graviers supérieurs sont relativement «abondantes» en comparaison avec les mesures dans les graviers inférieurs. Elles sont mesurées à l'aide de plusieurs méthodes (Tab. 1). Seules les valeurs de perméabilités mesurées

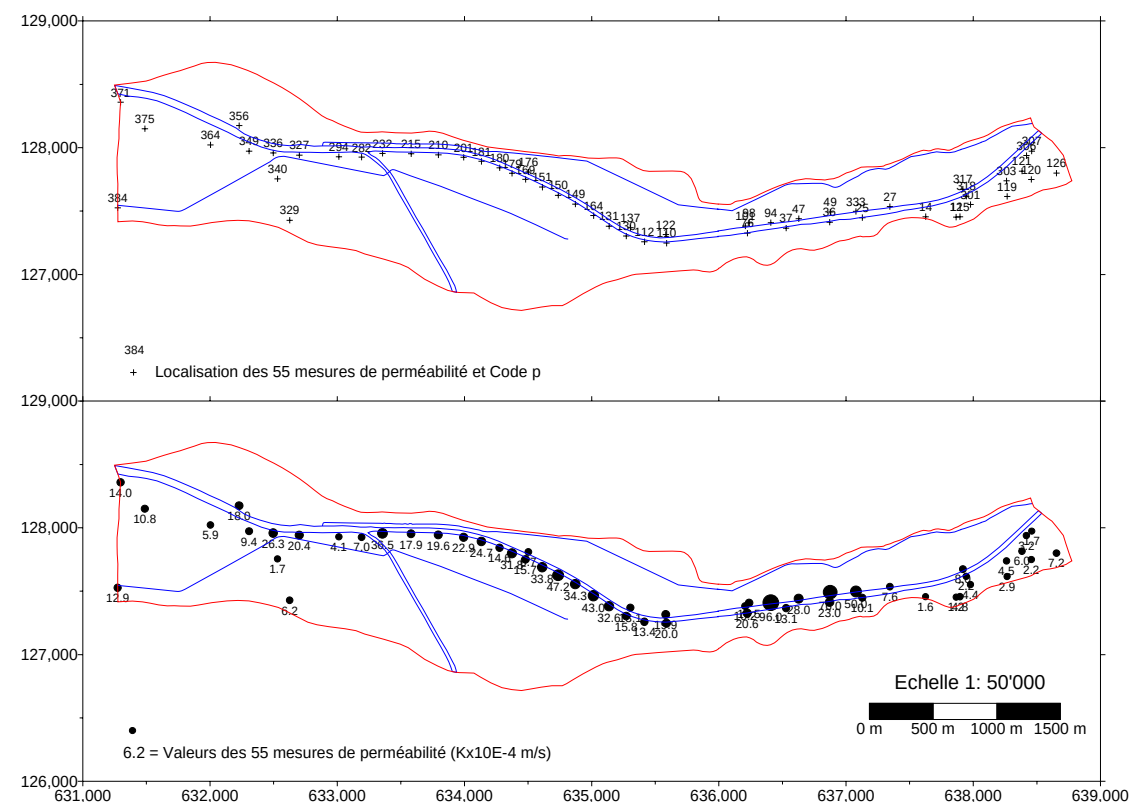


Figure 9 : Carte de la répartition et carte à symbole proportionnel des mesures de perméabilité moyenne des graviers supérieurs

par essais de pompage à niveau constant ont été retenues pour la modélisation 3-D, car elles sont plus nombreuses. Parfois, plusieurs mesures existent dans le même forage pour les graviers supérieurs à des niveaux différents. Une seule valeur moyenne a été retenue par forage, ce qui donne en définitive 55 valeurs sur toute la région de Visp. Les valeurs provenant de plusieurs méthodes n'ont pas été mixées. La figure 9 montre respectivement la position des mesures de perméabilité obtenues par essais de pompage à niveau constant, et une représentation graphique de leurs valeurs sous forme d'une carte à symboles proportionnels. L'annexe 3 consigne les 55 valeurs de perméabilité et la figure 10 montre les statistiques descriptives de cette variable ainsi que son histogramme. On peut remarquer que 58% des valeurs sont comprises entre 2.5 et 5×10^{-3} m/s, et que 98% sont comprises entre 0.25 et 5×10^{-3} m/s.

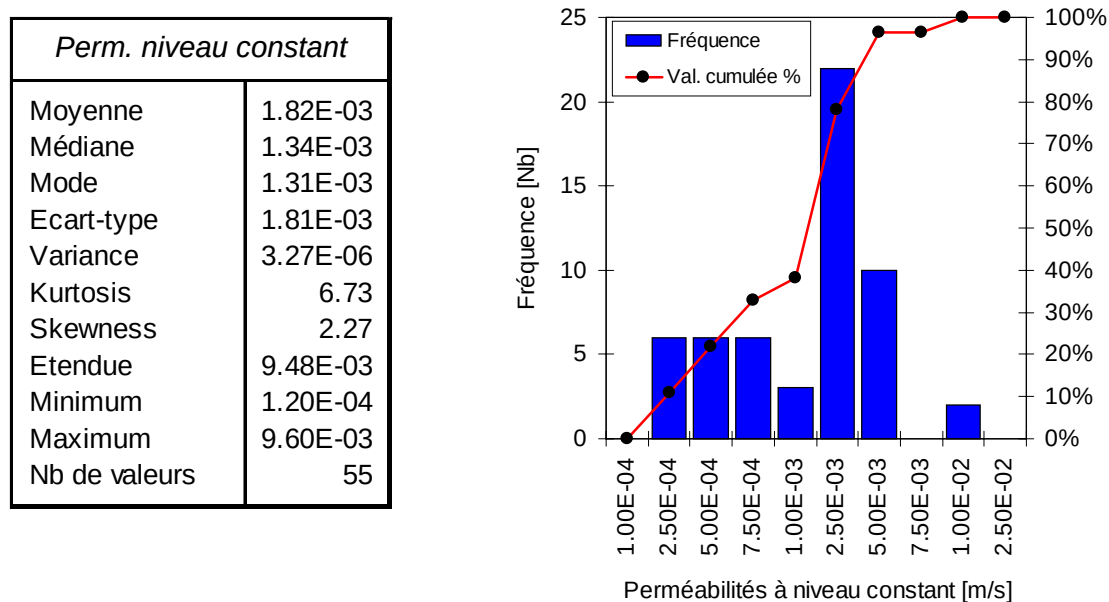


Figure 10 : Statistiques descriptives, histogramme et courbe de fréquence des 55 valeurs de perméabilité moyenne mesurées par essais de pompage à niveau constant

Les valeurs de perméabilité mesurées dans les limons supérieurs à l'aide d'essais de pompage sont rares et ne figurent pas dans le tableau ci-dessus. Cependant, 25 essais par infiltration ont été réalisés (Schmid, 1999 ; Teyssiere & Candolfi 1999 ; Ornstein & al., 1999). Les résultats donnent des valeurs de perméabilité comprises entre 6.9×10^{-4} et 3×10^{-7} m/s. Les valeurs de perméabilité mesurées dans les graviers inférieurs sont également peu nombreuses, elles sont du même ordre de grandeur que les valeurs des graviers supérieurs. Les valeurs de perméabilités des limons intermédiaires sont peu nombreuses. Néanmoins pour les besoins du modèle 3-D développé par Bouzelboudjen en 1988 [Bouzelboudjen & Király, 1988], la perméabilité des limons intermédiaires a été mesurée dans les 7 forages spécialement exécutés aux limites amont et aval de ce modèle. Ces forages ont été suivis par G. Bianchetti [Clavien, 1988]. Les valeurs moyennes sont comprises entre 2.3 et 6.5×10^{-4} m/s.

Pour palier au manque de valeurs dans les aquitards et les graviers inférieurs les 769 valeurs de perméabilité mesurées par flowmètre tous les mètres dans 30 forages de 4 pouces ont été traitées. La figure 11 montre la position des forages où ces mesures ont été effectuées et la figure 12 montre les statistiques descriptives de cette variable ainsi que son histogramme. On constate que 47% des valeurs sont comprises

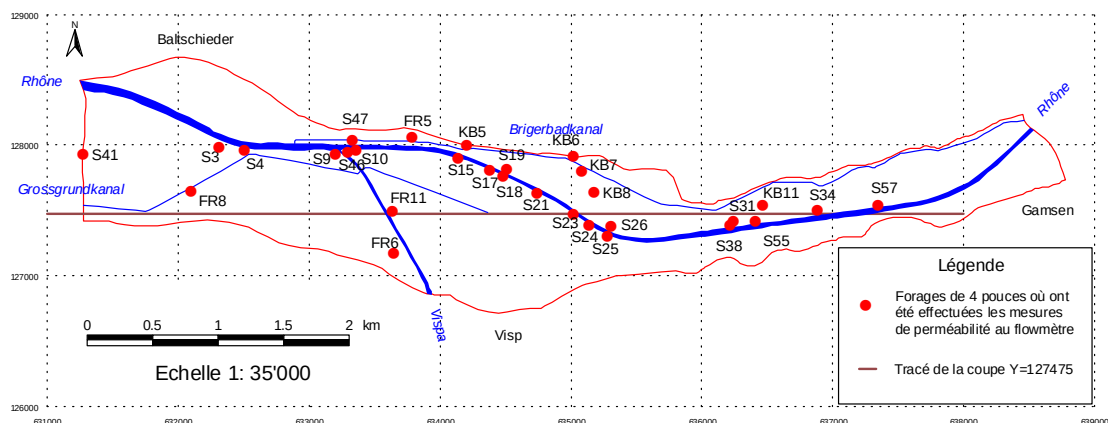


Figure 11 : Localisation des forages où des mesures verticales de perméabilité ont été effectuées tous les mètres avec la méthode au flowmètre et tracé de la coupe où des valeurs de perméabilités ont été extraites de la grille 3-D de l'estimation du champ des perméabilités. Les forages FR 5, 6, 8 et 11 ont été effectués dans le cadre du FN N° 2047-064.96 en 1998

entre 1 et 5×10^{-3} m/s. Les valeurs de perméabilité mesurées au flowmètre sont consignées dans l'annexe 4. Ces valeurs n'ont pas été utilisées dans la description de la méthodologie car sa mise en œuvre est relativement complexe et laborieuse. Par contre, une régionalisation 3-D par géostatistique de cette variable a été effectuée. Les résultats de ce travail sont présentés dans ce volume «Travel path uncertainty : a Swiss case study combining stochastic and deterministic hydrodynamic models in the Rhône valley, Switzerland» [Kimmeier & al., 2001d].

Perm.au flowmètre [m/s]	
Moyenne	1.26E-03
Médiane	5.57E-04
Mode	1.00E-04
Ecart-type	1.89E-03
Variance	3.56E-06
Kurtosis	27.95
Skewness	4.10
Etendue	2.07E-02
Minimum	1.42E-07
Maximum	2.07E-02
Nb de valeurs	769

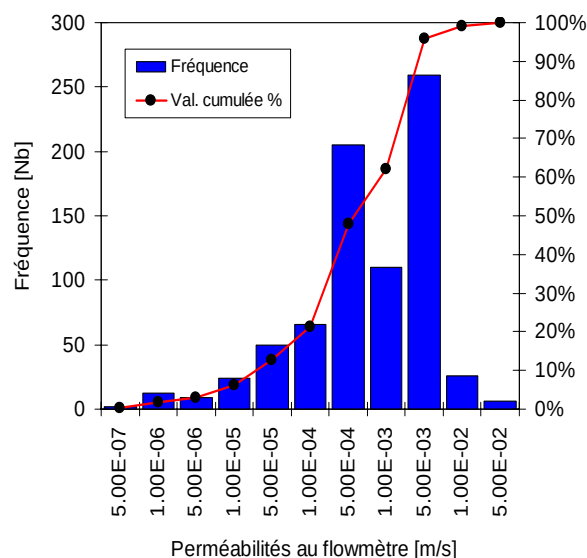


Figure 12 : Statistiques descriptives, histogramme et courbe de fréquence des 769 valeurs de perméabilité mesurées par flowmètre dans 30 forages de 4 pouces

2.2.5 Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques majeurs tels la température (T°), la conductibilité électrique à 20 °C (K_{20}), les sulfates (SO_4^{--}), les chlorures (Cl^-), la dureté totale (Dt) et la teneur en oxygène dissous (O_2), sont intégrés dans la base de

données hydrogéologiques de Visp. Ces valeurs ne sont pas directement utilisées lors de la modélisation des écoulements souterrains, mais sont un atout précieux lors de la validation des résultats d'un modèle mathématique comme cela a été vu pour le modèle régional développé entre la Forêt Noire et le massif de l'Aar (voir dans ce volume «3-D Groundwater modeling at national scale» [Kimmeier & al., 2001e]).

A Visp, les caractéristiques physico-chimiques naturelles de l'eau de la nappe phréatique ont été fortement modifiées par la pollution d'origine minérale et organique issue de la décharge de la Lonza SA, à Gamsen et mise en évidence depuis 1978. Deux campagnes d'échantillonnage chimique ont été organisées en mars et août 1987 par Bianchetti [Clavien, 1988] dans le cadre du modèle 3-D de Bouzelboudjen & Király [1988], afin d'établir une cartographie du chimisme de la nappe. Environ 96 échantillons ont été analysés dans l'aquifère supérieur (Ann. 5). Les figures 14 à 19 présentent la répartition spatiale des 6 paramètres physico-chimiques suivants pour la campagne hautes-eaux 1987 : température [T°], conductibilité électrique à 20 °C $\mu\text{S}/\text{cm}$, sulfates [mg/l], chlorures [mg/l], dureté totale [°F], oxygène dissout [mg/l].

Statistiques Descriptives	T° [C°]	K ₂₀ [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	Dt [°F]	O ₂ [mg/l]
Moyenne	10.33	481.49	65.70	19.27	24.58	2.04
Médiane	10.15	425.00	42.00	6.35	21.70	1.60
Mode	9.40	300.00	10.00	2.30	14.80	1.70
Écart-type	2.46	274.67	60.72	35.97	14.86	1.89
Variance	6.07	75445.07	3686.43	1293.71	220.75	3.58
Kurtosis	-0.08	0.72	1.49	18.05	0.68	15.36
Skewness	0.30	0.98	1.54	3.84	0.99	3.32
Étendue	12.00	1350.00	236.80	240.90	68.20	13.20
Minimum	4.50	70.00	6.20	0.10	1.30	0.20
Maximum	16.50	1420.00	243.00	241.00	69.50	13.40
Nb de valeurs	86	94	86	88	87	86

Tableau 2 : Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques mesurés dans les graviers supérieurs en août 1987 [Bianchetti in Clavien, 1988]

Le tableau 2 liste les statistiques descriptives de ces paramètres qui correspondent à la campagne des hautes-eaux 1987.

La figure 13 montre la localisation des 96 valeurs mesurées lors de la campagne

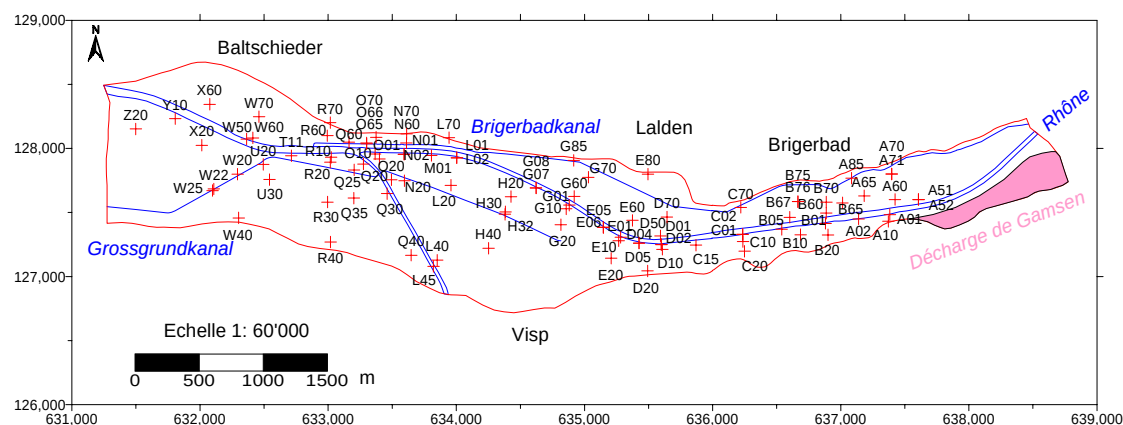


Figure 13 : Localisation des piézomètres où ont été effectuées les mesures de paramètres physico-chimiques dans les eaux souterraines au niveau des graviers supérieurs (août 1987)

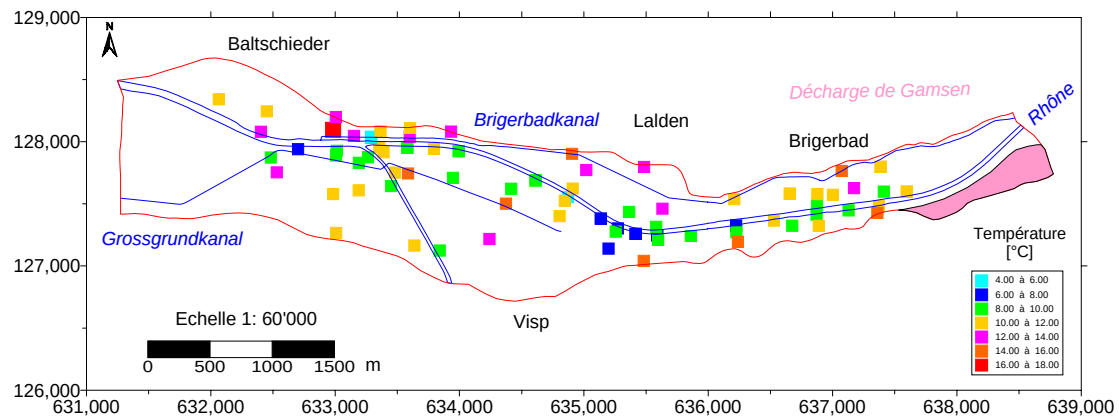


Figure 14 : Carte en points des mesures de température en degré Celsius [°C] des eaux souterraines (août 1987) au niveau des graviers supérieurs

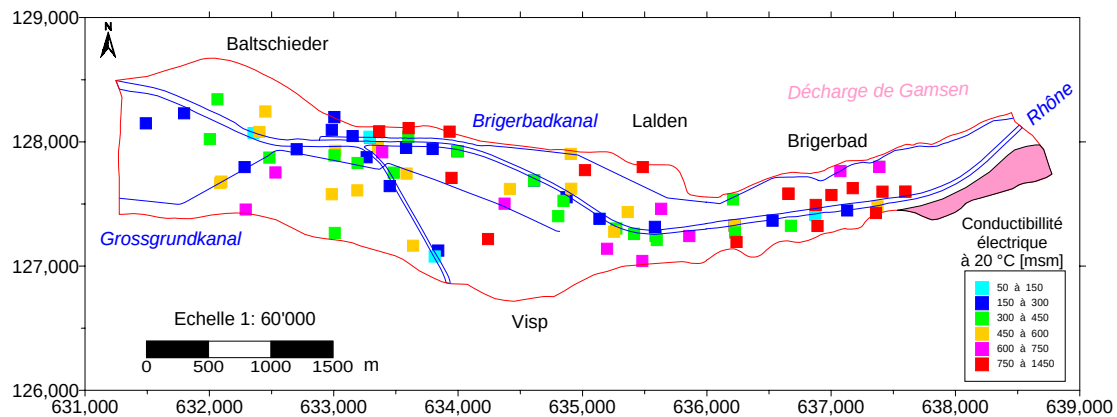


Figure 15 : Carte en points des mesures de conductibilité électrique à 20 °C en [msm/cm] des eaux souterraines (août 1987) au niveau des graviers supérieurs

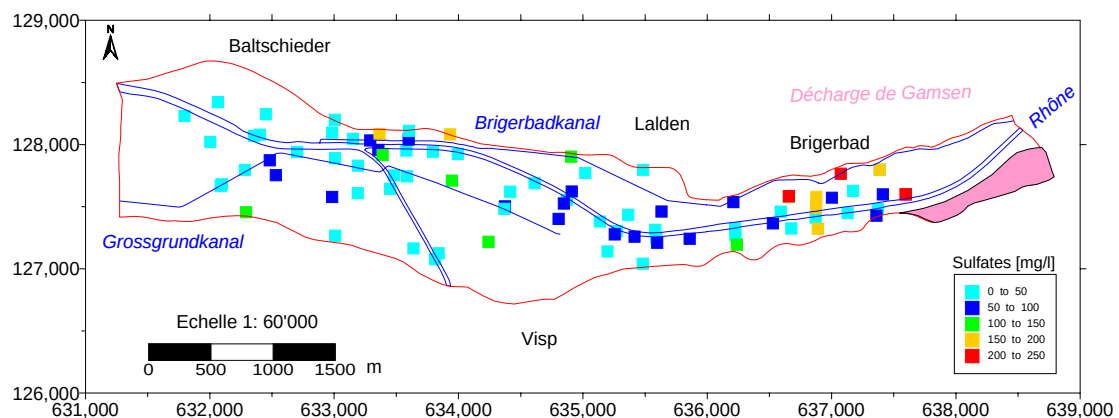


Figure 16 : Carte en points des mesures de sulfates en mg/l des eaux souterraines (août 1987) au niveau des graviers supérieurs

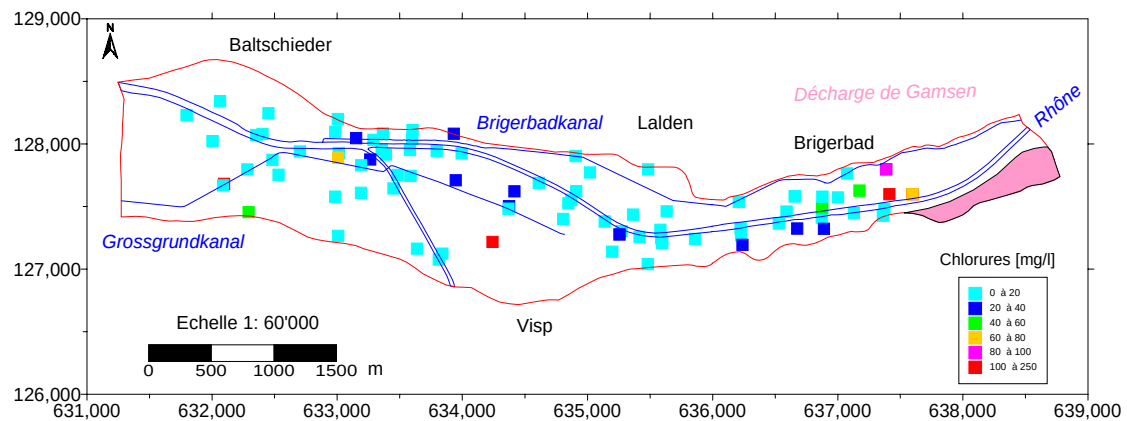


Figure 17 : Carte en points des mesures de chlorures en mg/l des eaux souterraines (août 1987) au niveau des graviers supérieurs

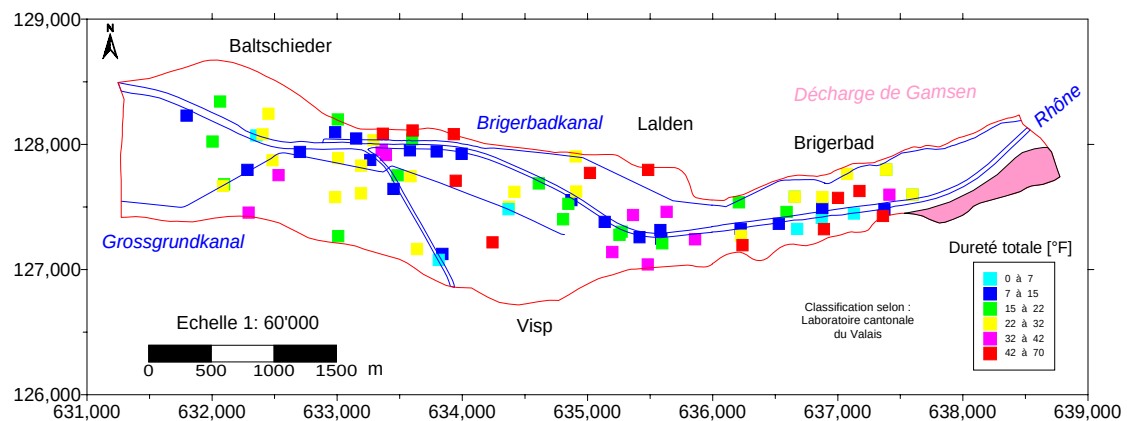


Figure 18 : Carte en points des mesures de dureté totale (Dt) en degrés français (°F) des eaux souterraines (août 1987) au niveau des graviers supérieurs

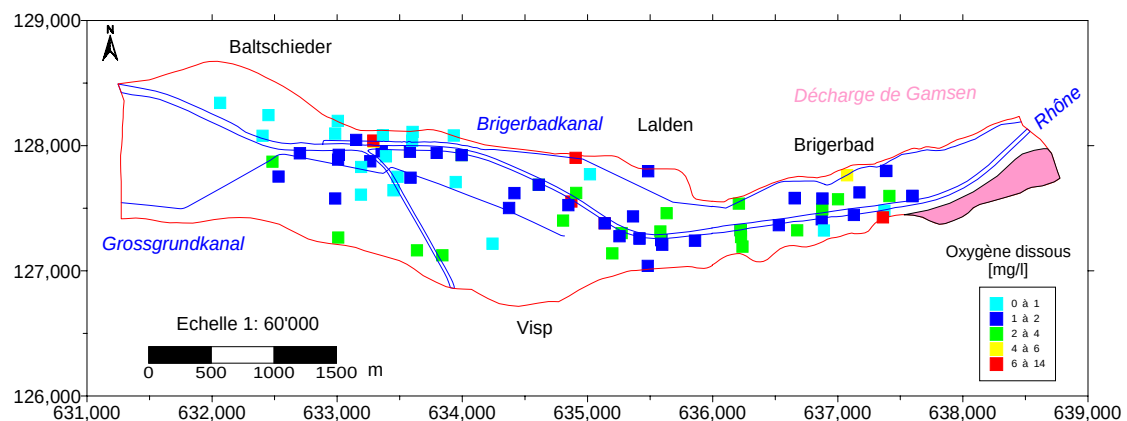


Figure 19 : Carte en points des mesures d'oxygène dissous (O2) en mg/l des eaux souterraines (août 1987) au niveau des graviers supérieurs

d'août 1987. Les figures 14 à 19 mettent en évidence les points importants suivants décrits par Bianchetti [Clavien 1988] :

1. infiltration des canaux dans la nappe (température Fig. 14, et conductibilité électrique Fig. 15) :
 - a) Brigerbadkanal : à l'Ouest de Lalden
 - le canal draine 60 l/s entre le point A85 et le petit pont situé 150 m à l'amont de C70 (tronçon de 870 m) ;
 - 60 l/s s'infiltrent dans la nappe sur le tronçon compris entre le petit pont situé à environ 140 m à l'aval de E72 et le point G85 (longueur 240 mètres).
 - b) Grossgrundkanal : entre H32 et N15
 - canal alimentant la nappe à raison de 80 l/s entre les points H32 et N15 (tronçon de 880 m) ;
 - canal drainant la nappe entre les points U15 et Y40 (200 l/s tronçon de 900 m).

Ces observations ont été confirmées par les jaugeages au moulinet effectués en juin 1988 (calculs des débits pour le calage du modèle 3-D [Bouzelboudjen & Király, 1988]).

2. progression de la nappe polluée par la décharge de Gamsen, jusqu'à l'ouest de Brigerbad, partiellement masquée en hautes-eaux, grâce aux infiltrations massives du Rhône qui diluent les polluants (carte des conductibilités électriques, sulfates Fig. 16, chlorures Fig. 17) ;
3. mise en évidence de la pollution de la nappe par les activités anthropogènes en ville de Visp (conductibilités électriques, chlorures) ;
4. infiltrations du Rhône entre Brigerbad et Baltschieder, qui provoquent une dilution des éléments chimiques (sulfates, chlorures, conductibilités électriques), une baisse de la température, de la dureté totale (Fig. 18) et une oxygénation de la nappe (Fig. 19). Ces infiltrations sont particulièrement importantes en période de hautes-eaux, notamment sur le tronçon Brigerbad - secteur Ouest de la Lonza. L'effet des pompages de la Lonza est très visible sur la carte de l'oxygène dissout : le Rhône qui s'infiltré massivement dans la nappe, provoque une oxygénation importante (Fig. 19) et une baisse de la minéralisation (Fig. 15).
5. anomalie thermique des versants. En observant la carte de température (Fig. 14), on s'aperçoit que la température de la nappe phréatique à proximité des versants dépasse en moyenne 12 °C, et localement 14 voire 16 °C (piézomètre L70). On peut admettre, dès lors, que la vallée du Rhône est caractérisée par une anomalie thermique régionale, confirmée d'ailleurs par la présence d'une source thermique (Brigerbad). Ce phénomène est confirmé par le gradient thermique anormalement élevé rencontré dans le forage profond [Geister, Burger, 1988].

2.2.5.1 Mesures temporelles de quelques paramètres physico-chimiques

Des mesures en continu des paramètres physico-chimiques de la nappe ont été effectuées à l'aide d'acquisiteurs automatiques (MADD). Ils ont été installés le long

d'une variante du futur tracé de l'autoroute N9 dans des puits spécialement aménagés (8 appareils). Ces MADD sont équipés d'une sonde à trois paramètres (pression, température et conductibilité électrique). Les paramètres pH, T° et K₂₀ sont mesurés également manuellement deux fois par an en même temps que la campagne de piézométrie et permettent de contrôler et de valider les données en continu.

Les données issues des enregistrements en continu (MADD) ont permis de mettre en évidence une très bonne liaison hydraulique entre la nappe phréatique et le Rhône, surtout en période de hautes-eaux. Les transmissions par pression sont rapides à proximité du fleuve, au maximum de quelques heures. Le Rhône montre de fortes variations journalières de niveau (>50 cm), qui se répercutent sur la nappe mais de manière amortie [Bianchetti in Clavien, 1988].

2.2.5.2 Sonde multi-paramètres : mesures verticales de quelques paramètres physico-chimiques

Les mesures verticales de quelques paramètres physico-chimiques comme la conductibilité électrique, la température, l'oxygène dissout, le pH, le potentiel Redox, la turbidité ont été intégrées dans la base de données. Ces valeurs ont été obtenues à l'aide d'une sonde multi-paramètres en octobre 1996 [Fröhlich, 1997] dans 9 piézomètres de 4 pouces (Fig. 20), et en décembre 1997, dans 23 piézomètres [Oukaci, 1997]. Ces mesures permettent d'appréhender les variations verticales de ces paramètres et de

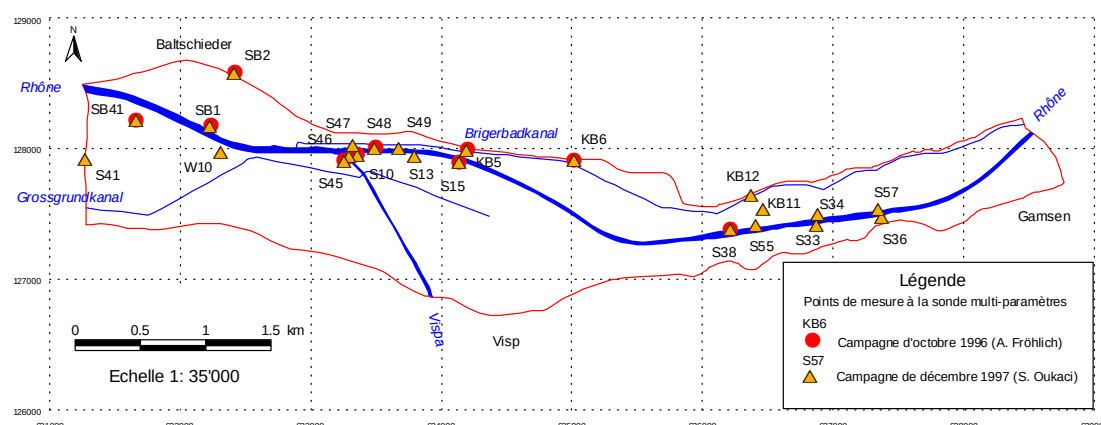


Figure 20 : Localisation des forages où ont été effectués les mesures verticales de paramètres physico-chimiques au cours des campagnes d'octobre 1996 et de décembre 1997

cartographier ainsi les zones d'infiltration et d'exfiltration, les relations du réseau hydrographique et des versants avec la nappe. Les distributions verticales de la conductibilité électrique, du pH et de la température pour le forage S38 sont comparées avec la distribution de la perméabilité et le log lithologique simplifié (Fig. 21).

Les mesures sans pompage montrent s'il existe un écoulement provoqué par la différence de pression entre deux ou plusieurs horizons aquifères. Souvent, lorsqu'on est en présence d'une circulation verticale, on n'observe pas de gradient de la température. Lorsqu'on rencontre un terrain perméable, le gradient thermique reste faible. Pendant le pompage, on peut observer les arrivées d'eau par une hausse ou une baisse des paramètres mesurés.

Seule une description succincte des résultats du piézomètre S38 (Fig. 21) est

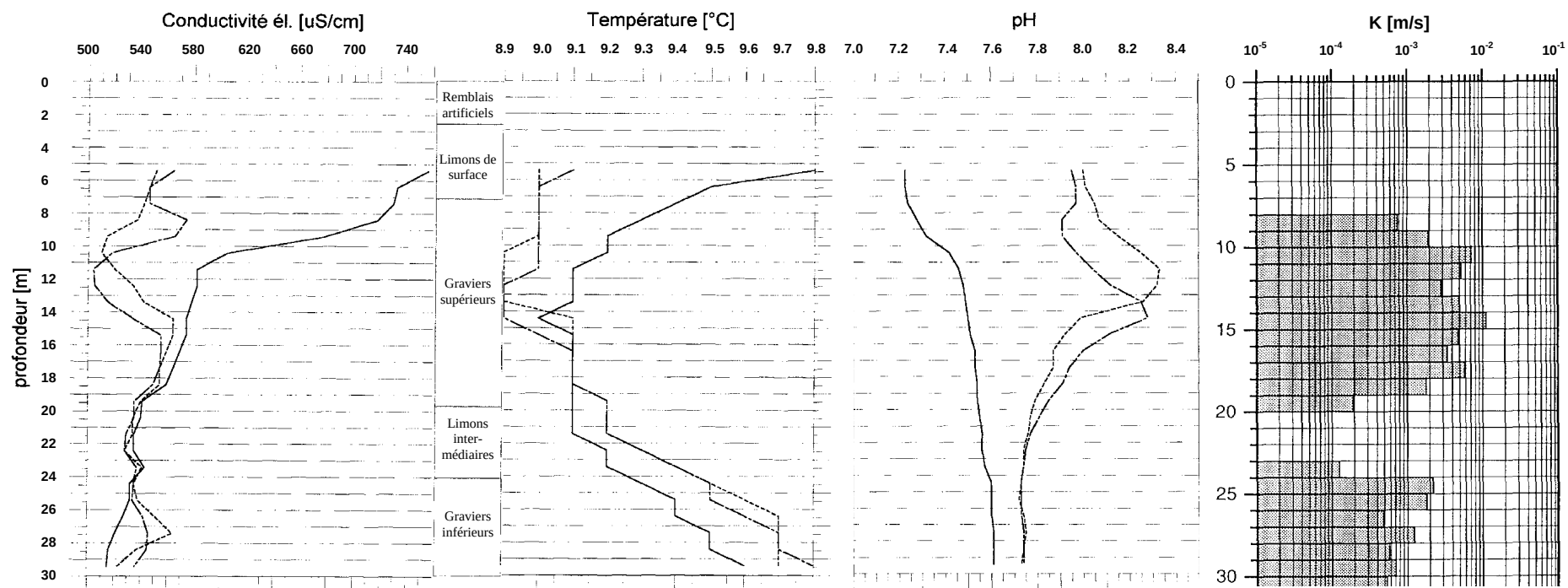


Figure 21 : Mesures de conductibilité électrique, de température et du pH dans le forage S38 (Eyholz) avant, pendant et après pompage (5 minutes) [Fröhlich, 1997] et mesures de perméabilité en m/s au flowmètre tous les mètres [Geotest, 1997]

présentée pour la campagne de 1996 [Fröhlich, 1997, Geotest, 1997 pour le log des perméabilités par essai au flowmètre].

Le piézomètre C65 dans le forage S38 est crépiné entre 6.5 et 20 m, puis entre 23.5 et 48 m de profondeur, respectivement dans les graviers supérieurs et inférieurs.

Au niveau des conductibilités électriques, les mesures pendant et après pompage montrent des valeurs inférieures d'environ 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre 8 et 15 m de profondeur. En comparant les valeurs obtenues avant et après pompage, on remarque un décalage de 1.5 m de l'anomalie vers le bas. Le même phénomène s'observe pour les températures et le pH.

Au delà de 15 mètres de profondeur, la conductibilité électrique reste assez stable (540 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Par contre, les températures augmentent régulièrement à partir de 23 m. Le pH se stabilise (pendant et après pompage) autour de 7.7.

A travers cette illustration de la répartition verticale des paramètres physique de la nappe, on constate que les graviers supérieurs et les graviers inférieurs sont nettement différenciés. On remarque sur la figure 21, la grande variabilité de la conductibilité électrique en fonction de la profondeur. En effet, ce paramètre varie de 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 6 m de profondeur contre 520 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 29 m. La même variabilité s'observe pour les autres paramètres. Une étude sur la répartition verticale (15 prélèvements le long de 24.5 mètres) de quelques paramètres physico-chimiques de l'aquifère alluvial de la plaine du Rhône dans la région de Pramont (Valais) a été effectuée [Ebener & al., 1998]. Les résultats obtenus (pour ce seul forage) montrent globalement trois tendances principales :

1. diminution des valeurs avec la profondeur pour le pH, la température, le potassium et les nitrates,
2. augmentation des valeurs avec la profondeur de la conductibilité électrique, du TSD, de l'ammonium, du magnésium, du calcium et des sulfates,
3. apparition de valeurs singulières en surface et en profondeur de sodium, de fluor et de chlorures.

Ces résultats, peu nombreux car coûteux, montrent que la connaissance verticale des paramètres physico-chimiques est importante dans la re-construction des systèmes d'écoulements souterrains.

2.2.5.3 Pollution des eaux souterraines par la décharge de Gamsen

La qualité de l'eau de la nappe est gravement affectée par la pollution de la décharge entre Gamsen et Lalden. Mme Geister a établi pendant plusieurs années (1979 à 1986) des cartes de zonation chimique pour la région comprise entre la décharge de Gamsen et l'usine de la Lonza [Geister & Burger, 1986]. Ces cartes concernent : l'aniline, le phénol, le pH, le TOC (Total Organic Carbon), l'ammonium, et les chlorures.

Grossièrement, dans cette zone, presque toutes les valeurs maximales admises sont largement dépassées. Les fourchettes consignées dans le tableau 3 ont été mesurées en période de basses-eaux 1987.

Éléments	Valeur max. [mg/l]	Valeur min. [mg/l]	Val. limite admise [mg/l]
Aniline	57.3	<0.01	0.01
Phénol	36.2	0.03	
Ammonium	713.0	1.60	0.5
Chlorures	525.0	2.20	200
Total Organic Carbon	767.0	1.50	
pH	12.5	7.70	9.2

Tableau 3 : Valeurs extrêmes de quelques paramètres de la qualité des eaux souterraines dans la région de Gamsen [Bianchetti in Clavien, 1988 ; Geister & Burger, 1986]

Ces valeurs sont inférieures en période de hautes-eaux, à cause de l'effet du Rhône qui s'infiltre massivement en diluant les éléments chimiques ; mais cette baisse n'est pas importante, car en cette période, le niveau piézométrique s'élève jusqu'à la partie inférieure de la décharge en entraînant les polluants.

A l'aval de Lalden, ces teneurs diminuent nettement, mais des foyers de pollution subsistent, notamment dans la zone de l'usine Lonza (aniline, chlorures, ammonium) et en ville de Visp (chlorures, ammonium).

2.3 Base de données spatiales en modes vecteur et raster environnementales et hydrogéologiques dans la région de Visp

Pour générer la base de données spatiales hydrogéologiques, ArcInfo et ArcView ont été utilisés comme Systèmes d'Information Géographique et MS Access comme système de gestion de base de données sur station de travail et ordinateur individuel. Actuellement, ArcInfo, ArcView et MS Access permettent de conserver, de traiter et de présenter les différents plans d'informations 2-D sous forme de tableaux et de

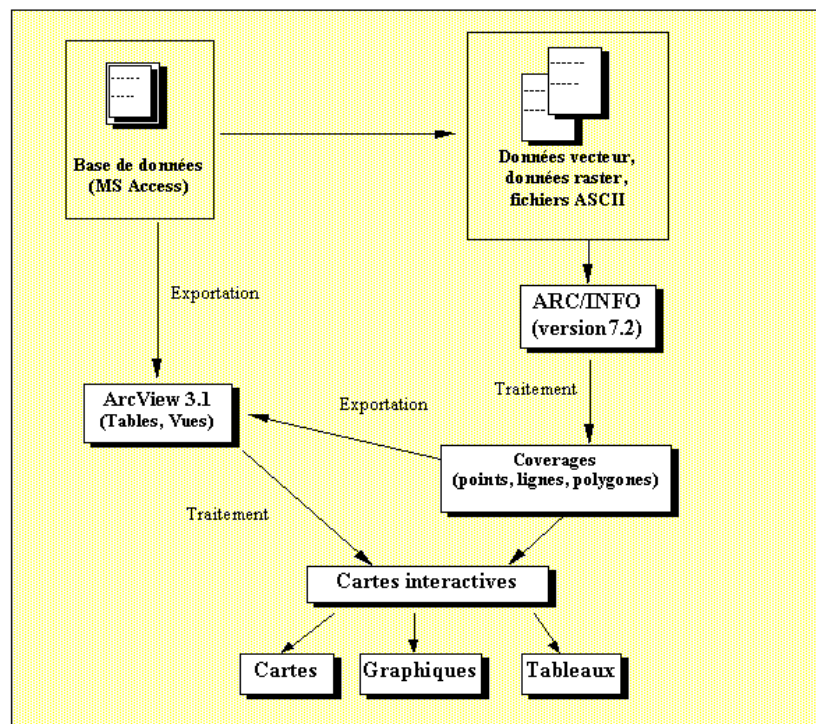


Figure 22 : Structure schématique de l'application Système d'Information Géographique

cartes (Fig. 24), et de profils (Fig. 39). La figure 22 montre schématiquement le processus de création de la base de données spatiales en modes raster et vecteur. Les données stockées sous MS Access (paramètres structuraux, hydrodynamiques et physico-chimiques) peuvent être directement accessibles par le SIG ArcView. Ce dernier peut également accéder à des données exportées de MS Access sous format Excel ou ASCII. Les données en modes raster ou vecteur, saisies par table à numériser ou scanner A3 ou A0, subissent un traitement dans ArcInfo permettant de les convertir en plans d'information 2-D appelés «coverages». Ces derniers sont exportés dans ArcView (SIG «end-user») afin de créer des applications simples et sorties graphiques. C'est ainsi que seul ArcInfo est capable de créer la topologie des entités points, lignes et polygones. La topologie est la description détaillée des relations entre les entités. Par exemple, un polygone sera défini par les arcs qui le composent et chaque arc sera défini par le premier et le dernier nœud qui le composent. De plus, pour chaque arc sera défini le polygone qui se trouve à sa gauche et celui qui se trouve à sa droite. C'est grâce à la topologie que des requêtes spatiales peuvent être effectuées ainsi que différents traitement sur les entités («clipping» extrait d'un plan d'information par exemple).

L'application TracES/View (voir dans ce volume «TracES/View - Traçage des Eaux Souterraines : Application SIG en milieu karstique jurassien (Suisse)» [Bouzelboudjen & al., 2001]) créée avec ArcView-MS Access permet de gérer les essais de traçages du canton de Neuchâtel. Cette application interactive est destinée à des non-initiés dans le domaine des SIG afin d'effectuer des requêtes spatiales et de présenter les résultats sous forme de tableaux, de graphiques et de cartes (Fig. 22). La figure 23 montre d'une manière simplifiée l'architecture d'un projet ArcView. Toutes les entités au sein de ce SIG sont liées dynamiquement : les tables numériques, les vues contenant les différents plans d'information, les graphiques (camemberts,

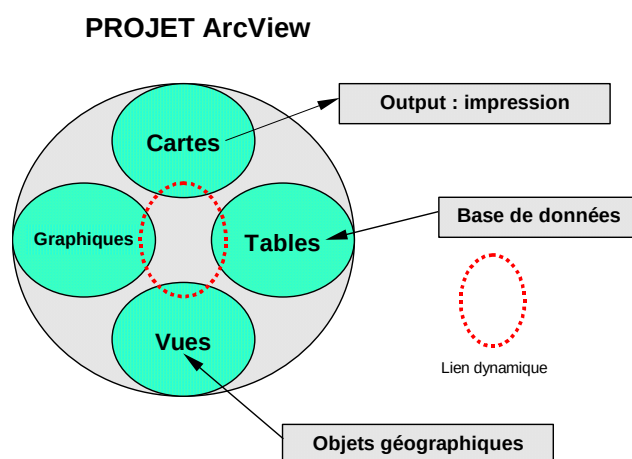
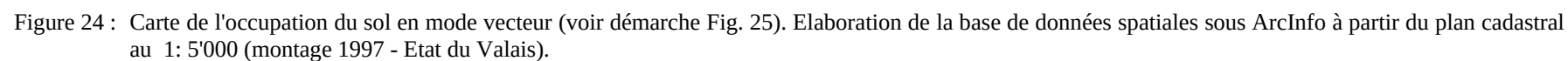


Figure 23 : Structure logique d'un projet ArcView (ESRI, 1996)

histogrammes, etc.) et les cartes prêtes pour l'impression. Par conséquent, toute requête sur l'une de ces entités ou toute modification se reflétera automatiquement sur les autres.

Le projet SIG Visp contient les données hydrogéologiques de base (paramètres structuraux, hydrodynamiques et hydrochimiques), également tous les plans



d'informations 2-D préparés sous ArcInfo comme l'occupation du territoire présenté en figure 24. Ce projet contient également toutes les sorties graphiques post-calculs de Feflow et permet de les présenter d'une façon professionnelle (Fig. 38, 39, 42 à 44, 46, 48 et 49, 57 et 65). La figure 24 montre l'exemple d'un plan d'information issu de la base de données spatiales constituée dans la région de Visp ; il s'agit de l'occupation du territoire en 43 modes dans la zone où le modèle 3-D a été construit, soit entre Gamsen et Baltschieder. La figure 25 montre sous forme graphique la démarche pour l'obtention de ce plan d'information en mode vecteur. La légende montre les différentes utilisations du sol avec la surface occupée par chacune d'elle en pour-cents obtenue automatiquement lors de la génération de la topologie des polygones constituant la carte. Le «coverage» occupation du sol a été élaboré à partir du plan cadastrale au 1 : 5'000. Cette démarche standard peut-être appliquée à tout plan d'information constitués de polygones (infiltrations, perméabilités, porosités, etc.). L'occupation du territoire est un plan d'information important qui a été utilisé dans le cadre de la génération de la carte des infiltrations et exfiltrations (Fig. 58) au 1 : 5'000 entre Baltschieder et Gamsen pour la phase II de la 3^{ème} correction du Rhône [Kimmeier & al., 2000]. Pour des travaux futurs concernant l'étude de la vulnérabilité des aquifères ou pour la constitution de cartes de risques il constituera, une pièce maîtresse grâce au degré élevé de précision.

Des fonctionnalités existent dans les SIG ArcInfo et ArcView pour le traitement des données continues régulièrement et irrégulièrement distribuées comme la

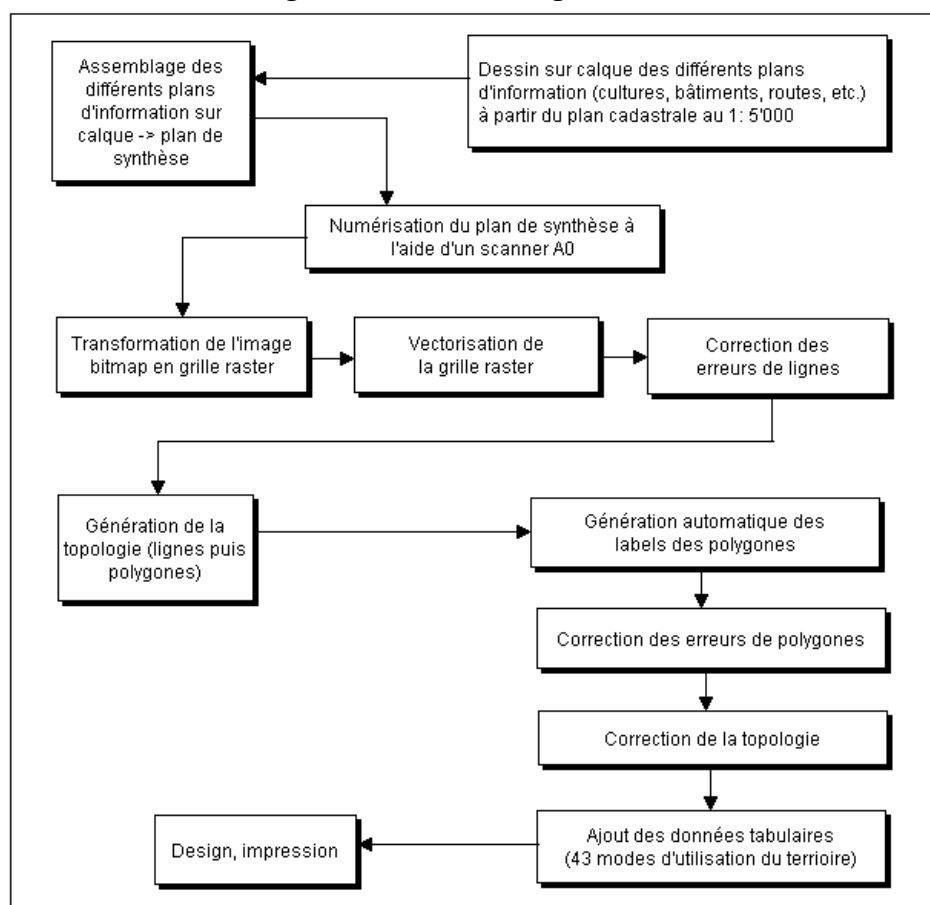


Figure 25: Démarche de l'élaboration de la base de données spatiales à partir du plan cadastrale au 1: 5'000 pour la carte de l'occupation du territoire entre Gamsen et Baltschieder.

pluviométrie, la topographie, les perméabilités, etc. Ces fonctions d'interpolation permettent de réaliser des cartes sous formes raster ou vecteur en isolignes comme le montre la figure 27. Elle met en évidence la problématique du choix du meilleur interpolateur des données, en fonction des mesures et de leur répartition.

Nous reportons le lecteur aux différents chapitres de ce volume pour les diverses applications des techniques SIG qui sont largement utilisées. Ces SIG sont devenus plus que des outils incontournables. Ils sont une façon d'appréhender des projets complexes aux données spatiales très hétérogènes avec la rigueur nécessaire. Ils ne remplacent pas le recours aux papiers millimétrés et calques si chers aux hydrogéologues, mais permettent de conserver les données brutes et interprétées sous forme électronique moderne.

3. APPROCHE GÉOSTATISTIQUE - LA MODÉLISATION ENVIRONNEMENTALE OU RE-CONSTRUCTION DES CHAMPS DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES

Afin de construire un modèle hydrodynamique cohérent, certaines variables comme la lithologie et la perméabilité connues seulement localement, doivent être régionalisées avant d'être introduites dans le modèle. Dans cette partie nous ne décrirons pas en détail les méthodes d'interpolation statistiques et géostatistiques. Le lecteur qui désire approfondir ses connaissances en la matière est prié de se reporter aux travaux des auteurs suivants : Chauvet, Chilès, Delhomme, Davis, Isaaks, Kitanidis, et Matheron (voir références). Néanmoins, les méthodes géostatistiques (krigeage ordinaire et simulations conditionnelles) appliquées aux données hydrogéologiques dans la région de Visp (perméabilité, transmissivité et potentiels hydrauliques) sont décrites dans l'article «Travel path uncertainty : a case study combining stochastic and deterministic hydrodynamic models in the Rhône valley, Switzerland » dans ce volume.

La présentation des données sous une forme cartographique permet de donner rapidement une idée de la variation d'un paramètre dans l'espace. Cependant, comme le note le Guide des Pratiques Hydrométéorologiques de l'O.M.M. in Delhomme [1976], «si l'on ne dispose que d'une information peu abondante, la carte présentera, dans une certaine mesure, une interprétation subjective des données et on risque d'ignorer partiellement ou totalement les différents degrés de subjectivité qui se rapportent aux diverses parties de la carte, ce qui produira des résultats dont la précision apparente dépassera de beaucoup la précision réelle». Cette difficulté à quantifier la précision se retrouve lorsqu'on doit estimer, à partir des données, les valeurs moyennes prises par un paramètre, sur chacune des mailles d'un modèle mathématique discrétisé.

La plupart des méthodes utilisées couramment pour répondre aux besoins de la cartographie et de l'estimation de moyennes spatiales ne permettent pas d'accéder à la moindre indication sur l'incertitude du résultat : seules le permettent les méthodes prenant en compte la variabilité des phénomènes étudiés.

3.1 Méthodes usuelles d'interpolation

Quand les données sont abondantes, la plupart des techniques d'interpolation donnent des résultats similaires ; mais quand les données sont dispersées, les hypothèses faites sur les variations sous-jacentes, ainsi que le choix des méthodes et

de leurs paramètres, peuvent être critiques à déterminer si on veut éviter des résultats erronés [Burrough, 1998]. L'inverse de la distance ou une simple triangulation donnera d'aussi bons résultats qu'une méthode plus sophistiquée comme le krigeage. A l'inverse, il est illusoire de vouloir estimer raisonnablement le champ d'une variable à l'aide de données groupées («clustérisées») et dont la variabilité est grande. En d'autres termes si la variabilité locale est plus grande que la variabilité régionale, il n'est pas possible d'estimer notre variable sans commettre de grosses erreurs d'estimation. Ces méthodes sont intéressantes dans une première approche lorsqu'on veut par exemple se faire une idée de la répartition d'une variable ou encore pour valider rapidement un jeu de données. Une méthode rapide comme l'inverse de la distance va faire ressortir immédiatement les données extrêmes qui pourront être alors examinées par l'hydrogéologue qui les rejettera ou au contraire les gardera après validation. Par contre ces méthodes ne donnent aucun renseignement sur l'erreur d'estimation elles sont bien décrites par des auteurs comme Delhomme [1976], Davis [1986], Isaaks & al. [1989], Burrough [1998].

3.2 Méthode optimale d'interpolation - La géostatistique

Les débuts de la géostatistique sont d'inspiration exclusivement minière. C'est pour pallier les insuffisances des statistiques «classiques» constatées dans l'étude des gisements très disséminés, que sont élaborées, au début des années 50, des méthodes d'estimation nouvelles. Le néologisme «krigeage», en hommage à D.G. Krige et ses travaux sur les minerais d'or d'Afrique du Sud, reste pour rappeler cette rencontre entre une technique mathématique de régression et les problèmes très concrets d'exploitation des mines d'or [Chauvet, 1992]. Une des richesses de la Géostatistique est de ne pas être tributaire d'un champ d'application particulier.

La géostatistique permet de mettre en évidence les caractéristiques des variables étudiées (perméabilités, transmissivités, etc.) et les décrit mathématiquement, afin de mettre en œuvre un estimateur (krigeage) qui les prenne en compte. Le travail d'interrogation des données, puis de modélisation de leurs propriétés structurales, constitue, sous le nom d'Analyse Variographique, la phase initiale incontournable de toute étude concrète de géostatistique.

La géostatistique permet également une évaluation de la «qualité» des estimations et par conséquent, des cartes obtenues. La qualité d'un estimateur est une notion abstraite qui procède d'un choix arbitraire. Il faut donc convenir, a priori, d'un critère de qualité. Un critère possible est, par exemple, l'écart-type d'estimation. Schématiquement, une valeur estimée est d'autant plus fiable que son écart-type d'estimation est faible [Chauvet, 1992]. Cet écart-type dépend de la structure propre à la variable étudiée, mais aussi de la configuration de l'échantillonnage. Ce critère est particulièrement simple d'utilisation, et constitue d'ailleurs la pierre angulaire de la géostatistique. On peut aussi l'utiliser pour aller plus loin et s'interroger, par exemple, sur la stratégie des campagnes de reconnaissance, sur l'implantation optimale d'un complément d'information, ou encore sur l'impact d'une incertitude de localisation des sondes. On peut aborder des problèmes notablement plus complexes : définir par exemple des probabilités de hauts-fonds ou des intervalles de confiance sur la carte des bathymétries, ou s'interroger sur la longueur d'un câble sous-marin qui reposerait sur le fond entre deux points désignés, ou encore, s'interroger sur l'influence de la variabilité spatiale de la transmissivité sur la dispersion de polluants dans les eaux souterraines (voir «Travel path uncertainty : a case study combining stochastic and

deterministic hydrodynamic models in the Rhône valley, Switzerland» dans ce volume). Dans un autre ordre d'idées, on peut vouloir relier les paramètres issus de l'Analyse Variographique à des phénomènes géologiques, et donc envisager une analyse interprétative des données. On peut aussi s'aider de l'Analyse Variographique pour comparer des méthodes d'échantillonnage [Chauvet, 1992].

Le but de tout traitement géostatistique de données spatiales, dans le but de modélisation hydrodynamique des eaux souterraines, est d'estimer les variables K , T ,

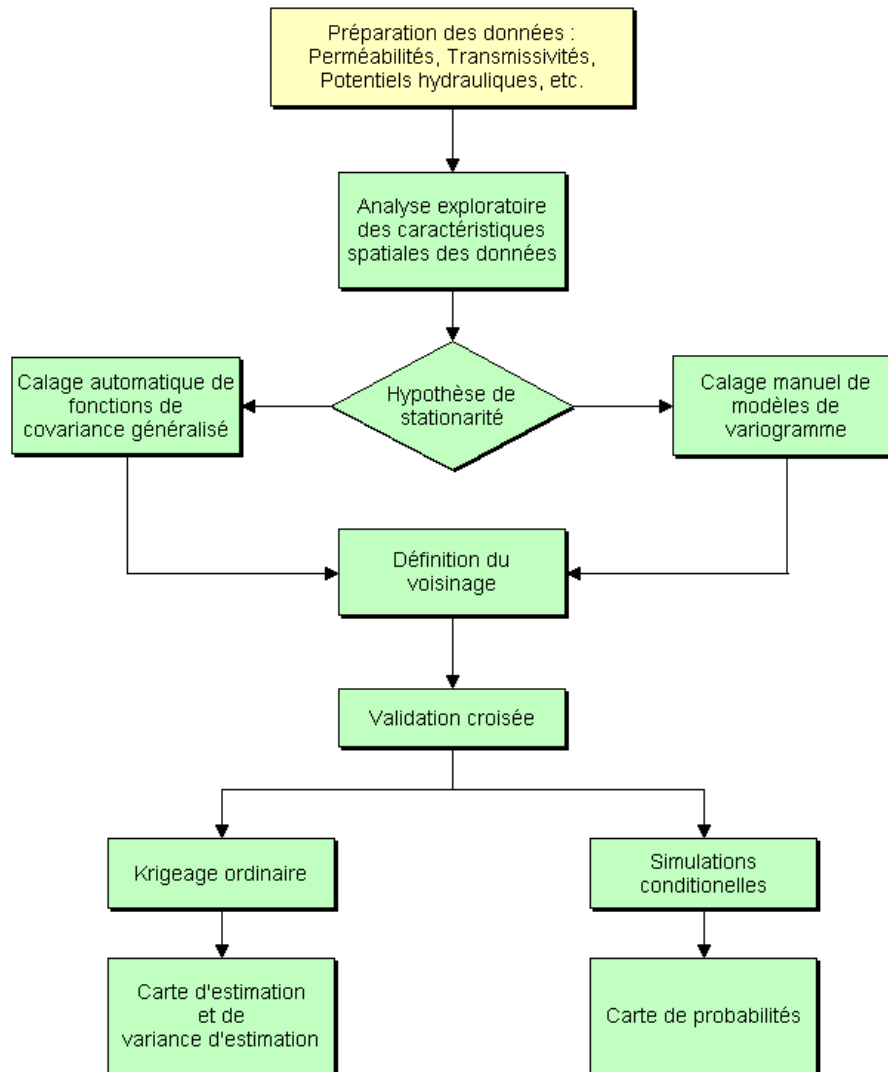


Figure 26 : Procédure de traitement spatial des données hydrogéologiques avec une approche géostatistique dans le but de modélisation hydrodynamique

S , m_e en tous points de l'espace à modéliser. En effet, les modèles hydrodynamiques ont besoin pour fonctionner de champs continus. La figure 26 montre un organigramme simplifié des différentes étapes conduisant à l'obtention de ces champs.

3.3 Re-construction des champs des variables K, T et H

Nous avons vu l'importance pour l'hydrogéologue d'obtenir des champs continus pour les variables qui seront utilisées par le modèle hydrodynamique. Si dans le cadre du modèle régional de la Cédra [Kimmeier & al., 1985], les mesures de H et de K étaient trop peu nombreuses pour effectuer une régionalisation des données, ce n'est pas le cas pour l'instrument 3-D développé dans le cadre du Fonds national. La régionalisation des mesures de K, T et H est décrite ci-dessous.

3.3.1 Re-construction du champ des perméabilités 2D

Les valeurs de perméabilité obtenues par essai de pompage à niveau constant ont été retenues pour la re-construction du champ des perméabilités 2-D, car elles sont les plus nombreuses (Tab. 1). C'est délibérément que les valeurs obtenues avec des

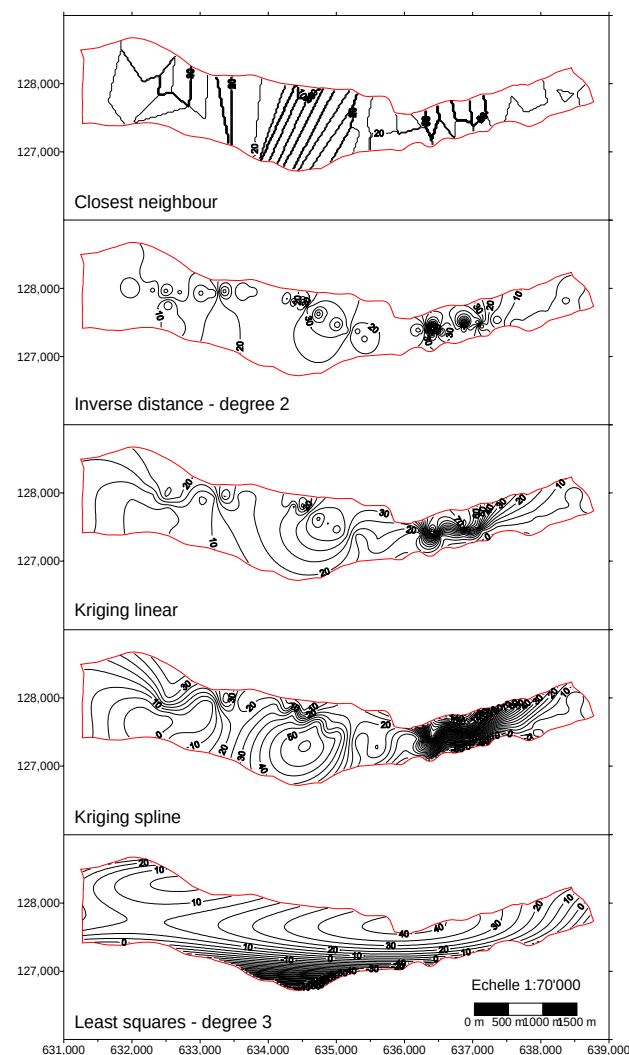


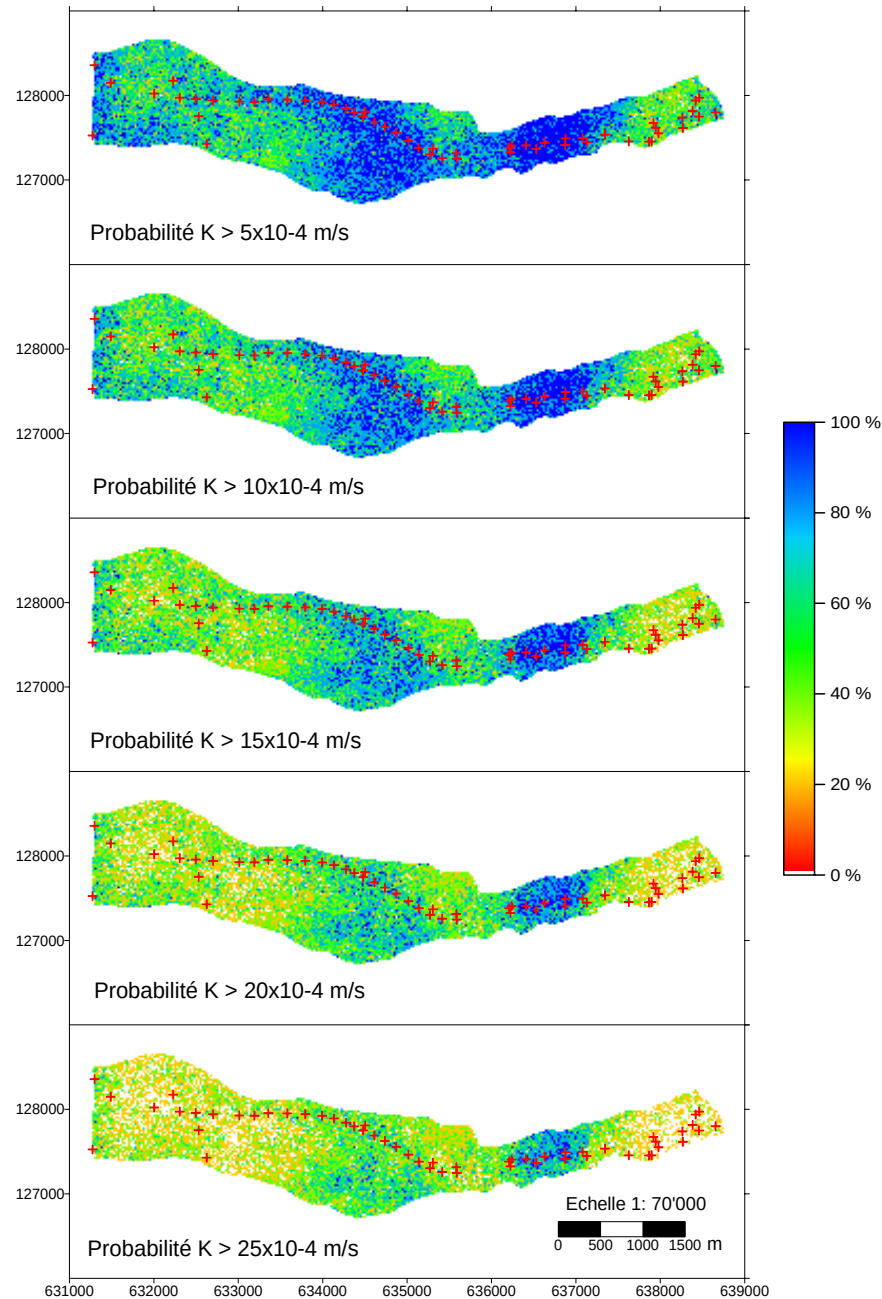
Figure 27 : Comparaison de différents interpolateurs appliqués aux mesures de perméabilités des graviers supérieurs ($K \times 10^{-4}$ m/s)

méthodes différentes n'ont pas été mélangées. La figure 9 montre la répartition des valeurs de K dans la zone de Visp dans le périmètre du modèle hydrodynamique ainsi qu'une représentation des valeurs par symbole proportionnel. Les 55 valeurs moyennes de K ont été traitées par géostatistique (cf. Ann. 3). On remarque que les mesures sont surtout concentrées le long du Rhône alors que d'autres régions ne présentent aucune mesure. Les valeurs de K ont été estimées sur une grille régulière de 25 x 25 mètres en utilisant 5 interpolateurs différents. Du fait de la mauvaise répartition des mesures, les résultats sont très différents (Fig. 27). Ces méthodes d'interpolation ne donnent aucune indication sur l'erreur d'estimation et par conséquent, il est difficile de déterminer qu'elle est la meilleure. C'est pourquoi nous avons préféré utiliser la théorie des variables régionalisées pour estimer les champs de toutes nos variables et par conséquent les valeurs de K ont été transformées en $\text{Log}_{10} K$ de la même manière que pour la transmissivité. Dans ce chapitre, le traitement du $\text{Log}_{10} K$ n'est pas montré car similaire à celui du

$\text{Log}_{10} T$ décrit dans «Travel path uncertainty: a Swiss case study combining stochastic and deterministic hydrodynamic models in the Rhône valley, Switzerland» [Kimmeier & al., 2001d] dans ce volume. Cependant, nous montrons en figure 28

cinq cartes de probabilité pour cinq seuils de valeurs de perméabilité. Ces cartes résultent du traitement géostatistique par simulations conditionnelles en utilisant la méthode des bandes tournantes (1000 bandes).

Figure 28 : Carte de probabilités des perméabilités des graviers supérieurs (grille 25mx25m)



3.3.2 Re-construction du champ des perméabilités 3D

L'approche décrite ci-dessus suppose une schématisation préalable de la zone à étudier et la construction d'un modèle tenant compte de cette schématisation (subdivision du terrain 3-D selon sa lithologie). Cette démarche introduit forcément une part de subjectivité, car le schéma simplifie toujours la réalité. Il pourrait être intéressant de s'affranchir de ce schéma et par conséquent, de ne considérer la succession des différents terrains rencontrés lors d'un forage qu'en terme de

conductivité hydraulique. Cette démarche particulière est rendue possible dans notre région grâce à la présence de 30 forages répartis d'une manière plus ou moins homogène sur la zone d'étude (Fig. 11) et dans lesquels des mesures de K ont été effectuées tous les mètres avec la méthode du flowmètre. Nous obtenons ainsi 769 valeurs (cf. Ann. 4) réparties verticalement. Les K ont été transformées en log K. Un variogramme omnidirectionnel a été calculé et un modèle sphérique a été calé sur ce variogramme expérimental. La figure 8 de l'article «Travel path uncertainty : a Swiss case study combining stochastic and deterministic hydrodynamic models in the Rhône valley, Switzerland» [Kimmeier & al., 2001d] montre le résultat de ce traitement sous forme d'un écorché d'un bloc diagramme 3-D (grille de 25 x 25 x 1 m) avec la position de toutes les mesures. La figure 9 de ce même article montre un extrait 2-D de la répartition des K, selon la coupe dont le tracé se trouve sur la figure 11. Il est intéressant de remarquer que notre schéma lithologique (Fig. 6) constitué par la succession de 4 couches est reproduit par cette estimation 3-D. Dans le futur, il serait intéressant de traiter ces données en considérant des variogrammes directionnels tenant compte des phénomènes d'anisotropie 3-D.

3.3.3 Re-construction du champ des potentiels et effet d'échelle sur la précision de l'estimation. Résultats des approches multi-échelles (6.5 km² à 252 km²)

Depuis de nombreuses années dans le canton du Valais des mesures régulières de potentiel hydraulique sont effectuées deux fois par année au cours des basses-eaux (BE) et des hautes-eaux (HE) dans plus de 1200 piézomètres situés dans la vallée du Rhône depuis Brig jusqu'au lac Léman (Fig. 2). Les valeurs de potentiel hydraulique de la campagne HE 97 ont été traitées à différentes échelles pour reconstituer la piézométrie d'une manière continue. Les zones étudiées sont les suivantes :

- de Baltschieder à Gamsen, 145 valeurs (environ 8 km de long et 6.5 km²),
- de Sierre au Lac Léman, 632 valeurs (environ 70 km et 206 km²),
- de Brig au Lac Léman, 1160 valeurs (environ 100 km et 252 km²).

Seules les valeurs du réseau de surveillance concernant les eaux souterraines ont été retenues ; par conséquent, toutes les valeurs concernant les eaux de surface (Rhône et canaux) ont été écartées du traitement. Comme la piézométrie est un phénomène typiquement non-stationnaire, nous avons estimé le champ des potentiels à différentes échelles en utilisant les fonctions de covariances généralisées. Les résultats de ces trois approches (Fig. 29, 30 et 31) montrent que plus la zone étudiée est grande, plus l'erreur d'estimation est grande. Dans la zone de Visp (6.5 km²), l'erreur moyenne d'estimation de krigeage se situe autour de 0.20 m, alors que pour l'estimation des potentiels couvrant toute la vallée, la moyenne de l'erreur se situe au environ de 1.10 m. Par conséquent, une estimation à grande échelle ne pourra pas être utilisée dans le cadre de travaux locaux de modélisation ; seule une estimation plus fine sera valide. De plus, même à grande échelle, une carte krigée ne recrée pas les relations complexes entre la nappe aquifère et le réseau hydrographique. Il est vain de penser que l'on peut complètement automatiser le traitement de cette variable. L'intervention de l'hydrogéologue est nécessaire dans les zones sensibles afin de ne pas introduire dans le modèle hydrodynamique des données erronées qui seront lourdes de conséquences dans le calcul des débits d'exfiltration ou d'infiltration dans le réseau hydrographique de la zone à étudier. Des techniques sophistiquées sont de plus en

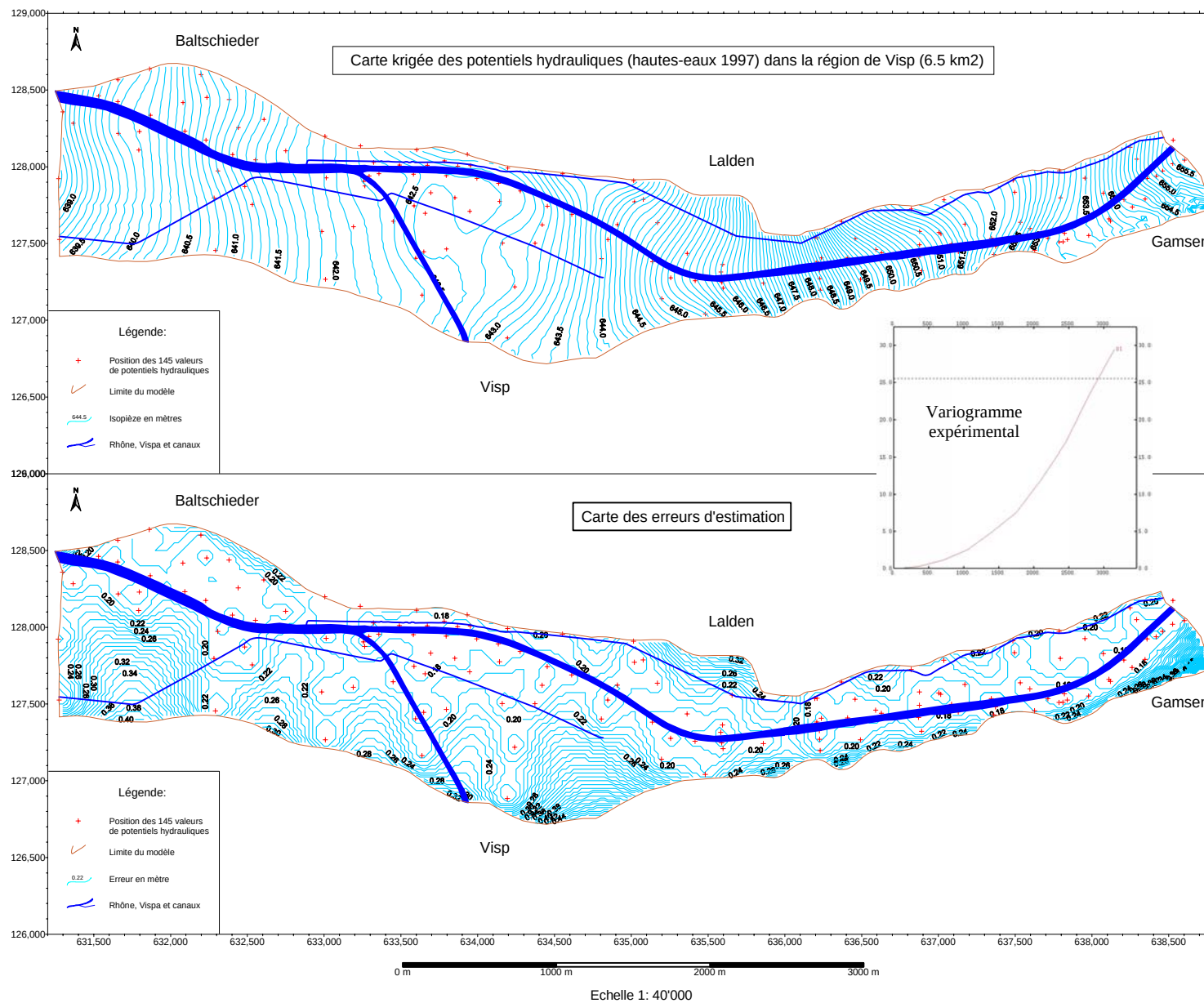


Figure 29 : Carte des potentiels hydrauliques estimés par la méthode des covariances généralisées et carte des erreurs d'estimation. Mesures effectuées dans l'aquifère des graviers supérieurs de la plaine du Rhône entre Gamsen et Baltschieder (juillet 1997).

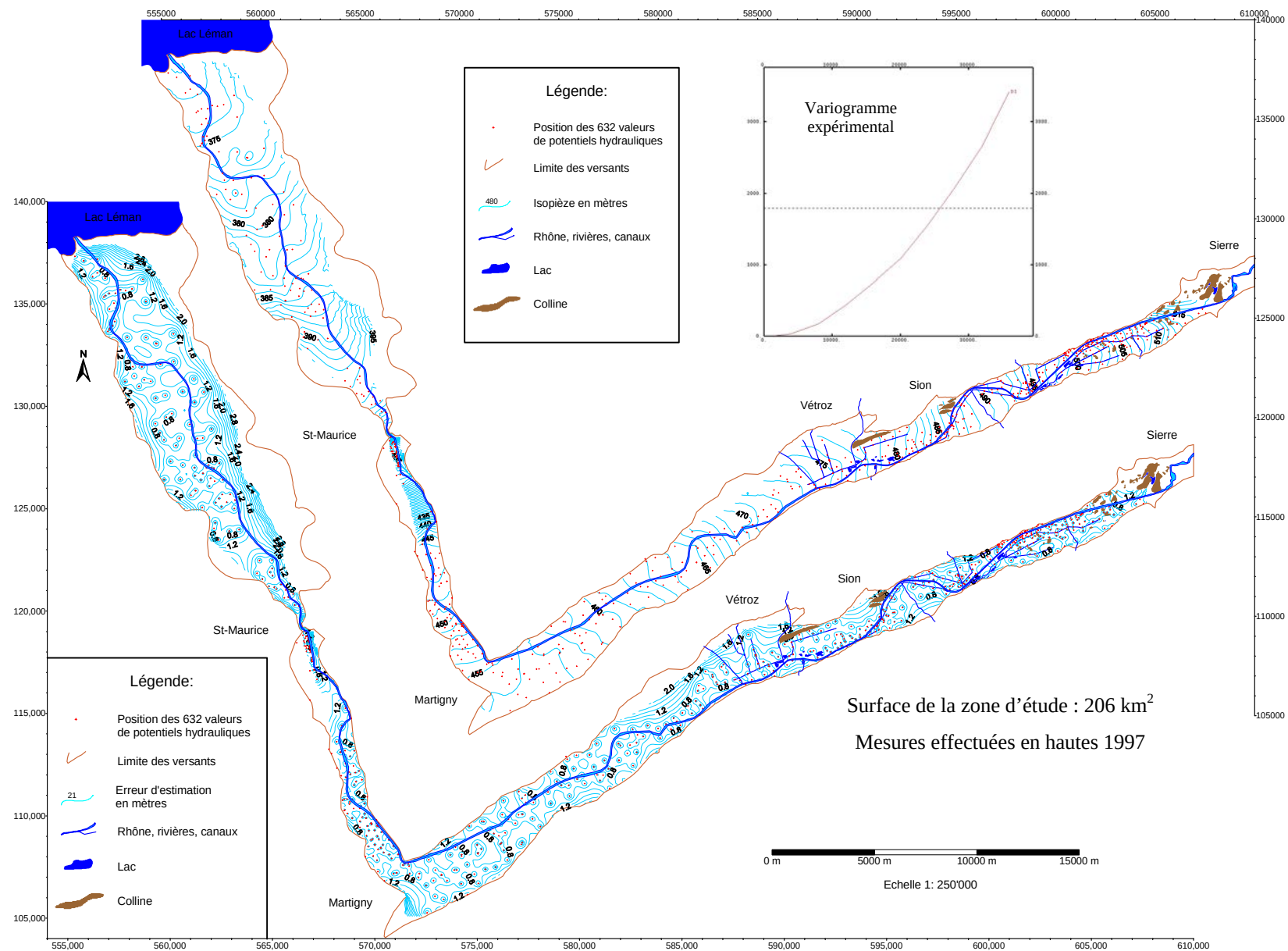


Figure 30 : Carte des potentiels hydrauliques estimés par la méthode des covariances généralisées et carte des erreurs d'estimation. Mesures effectuées dans l'aquifère des graviers supérieurs de la plaine du Rhône entre Siere et le lac Léman (juillet 1997)

Figure 31 : Carte des potentiels hydrauliques estimés par la méthode des covariances généralisées et carte des erreurs d'estimation. Mesures effectuées dans l'aquifère des graviers supérieurs de la plaine du Rhône entre Brig et le lac Léman (juillet 1997).

plus mises en œuvre pour essayer de prendre en compte les conditions aux limites hydrauliques dans la régionalisation de la piézométrie [Roth, 1995 ; Matheron & al, 1997]. Plusieurs auteurs proposent des approches géostatistiques de type co-krigeage, basées sur des modèles stochastiques qui mettent en relation les corrélations spatiales entre T (transmissivités) et H (potentiel hydraulique) [Mizell, 1980 ; Dagan, 1985 ; Gelhar, 1993 ; Dong, 1990 ; Roth, 1997] et prenant plus ou moins en compte les lois physiques.

4. MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS

Les variables structurales ainsi qu'hydrodynamiques, ayant subi un traitement géostatistique, sont intégrées dans le processus de modélisation des écoulements souterrains proprement dit. La figure 32 illustre et résume la démarche de modélisation. On constate qu'après la création de la base de données hydrogéologiques et le traitement de ces données par géostatistique, on obtient des

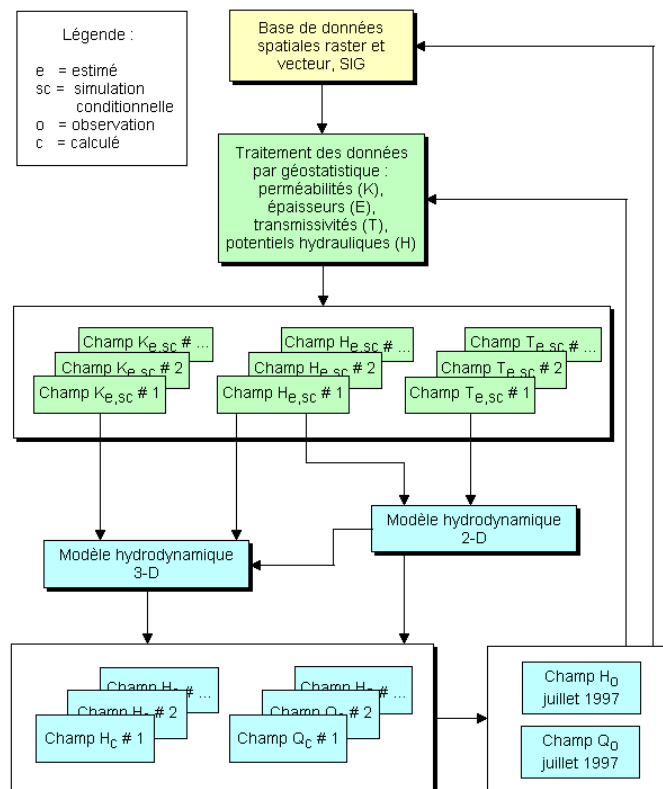


Figure 32: Démarche pour la simulation numérique des écoulements souterrains bidimensionnels et tridimensionnels

champs continus des variables (perméabilités, épaisseurs, potentiels hydrauliques, etc.). Les champs obtenus sont de deux sortes : estimés par krigeage standard ou simulés par simulations conditionnelles. Les variables structurales (topographie, niveaux structuraux, cartes en isopaches) permettent de construire la géométrie de la maille 2-D puis 3-D, alors que les variables hydrogéologiques permettent de définir les conditions aux limites ainsi que les propriétés hydrodynamiques de chaque élément (perméabilité, porosité, coefficient d'emmagasinement). Enfin, les calculs

effectués donnent des champs de débits et de potentiels hydrauliques calculés, qui seront comparés aux mesures de terrain afin de valider les hypothèses simplificatrices que l'on introduit dans le processus de modélisation. En résumé, la démarche d'obtention de la géométrie à l'aide du logiciel Feflow [Diersch, 1999] ou du FEN's code family [Király, 1998] jusqu'à l'obtention de résultats se décompose en 11 étapes successives qui sont :

1. définition du modèle conceptuel,
2. définition de la «supermaille» 2-D plan de surface,
3. génération du maillage 2-D plan de surface,
4. génération du maillage 3-D à partir du maillage 2-D,
5. vérification du maillage 3-D,
6. imposition des conditions aux limites,
7. imposition des propriétés intrinsèques au milieu modélisé,
8. définition des points de contrôle des débits et des potentiels hydrauliques,
9. calcul à tous les nœuds de la maille 3-D des débits et des potentiels hydrauliques,
10. présentation des résultats sous forme d'équipotentiels sur blocs diagrammes, profils et plans à différentes profondeurs, ainsi que des vecteurs vitesse de filtration et de lignes de courant avec isochrones et,
11. validation des résultats par comparaison aux points de contrôle des valeurs calculées de potentiels hydrauliques et de débits avec les valeurs mesurées sur le terrain.

Ces 11 étapes sont décrites succinctement ci-dessous.

4.1 Définition du modèle conceptuel

La définition du modèle conceptuel est la première étape que le modélisateur doit entreprendre avant de créer la géométrie. Toutes les complexités du terrain ne peuvent pas être prises en compte, et l'hydrogéologue devra faire un effort de réflexion pour regrouper des séries lithologiques semblables en des unités équivalentes, ou pour englober des petites lentilles dans des unités plus grandes. Dans la région de Visp, le modèle conceptuel a été élaboré par Bouzelboudjen en 1987 pour réaliser le premier modèle 3-D de la région, dans le cadre de la construction de l'autoroute N9. Il a identifié un complexe aquifère composé de deux aquifères séparés par deux aquitards, dont la représentation graphique se trouve sur la figure 6. Nous avons vu au préalable qu'on pourrait s'affranchir de ce modèle conceptuel, en utilisant directement un champ de perméabilité régionalisé en 3-D à l'aide de la géostatistique. Cependant comme généralement des données de perméabilité ne sont pas disponibles en grand nombre, l'étape du modèle conceptuel reste la plupart du temps incontournable, comme ce fut le cas pour le modèle de la Cédra (voir l'annexe 2 de «3-D groundwater modeling at national scale» dans ce volume.

4.2 Définition de la supermaille 2-D plan de surface

L'étape suivante consiste à générer des super-éléments 2-D plan de surface au sein de la zone d'étude afin de tenir compte des zones d'infiltration et d'exfiltration. Dans ces zones, les gradients hydrauliques sont plus élevés que dans les autres zones ; par conséquent, le maillage devra être plus fin pour que le modèle puisse recréer ces gradients. La figure 33 montre les 89 super-éléments ayant servis à la génération

automatique des éléments finis triangulaires. Les super-éléments respectant le réseau hydrographique constitué par le Rhône et les canaux de Grossgrund et de Brigerbad ont été générés automatiquement à l'aide de «buffers» dans ArcView. Les «buffers»

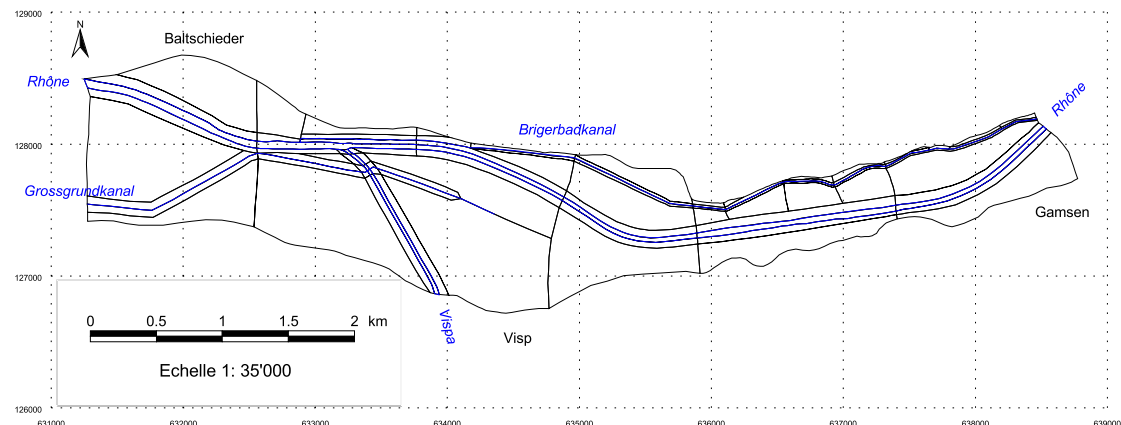


Figure 33 : Super-éléments (89) ayant servi à la génération automatique des éléments finis triangulaires générés dans ArcView puis importés dans Feflow.

sont des polygones créés automatiquement à une distance prédéfinie par l'utilisateur. Les autres polygones ont été ajoutés à l'aide d'ArcView. Les polygones ainsi constitués ont été traités par ArcInfo pour la création de la topologie, puis importés dans Feflow afin d'élaborer le réseau 2-D à éléments finis.

4.3 Maillage 2-D plan de surface

Après importation de la super-maille dans Feflow, le réseau 2-D de surface a été généré automatiquement à l'aide d'un algorithme nommé T-mesh développé par L. Tacher [1999]. Puis, dans les zones d'exutoire et d'infiltration potentielles, la maille a été «raffinée», c'est-à-dire que les éléments se trouvant dans ces zones ont été subdivisés en éléments plus petits (Fig. 34). Cette opération s'effectue interactivement jusqu'à l'obtention du degré d'affinage désiré. Cette maille est constituée de 6'485 éléments triangulaires linéaires et de 3'393 nœuds. Il est à remarquer que Feflow autorise également la génération de maille à éléments rectangulaires linéaires ou quadratiques (un nœud se situant au milieu de chaque arête). Il est important de remarquer que l'étape de création de super-éléments doit se faire d'une manière minutieuse afin d'éviter la génération d'éléments à angles trop obtus. En effet, ce genre d'éléments est la source d'imprécision dans les calculs. Il faut cependant noter que Feflow autorise le déplacement spatial des nœuds, ce qui permet de corriger les triangles trop obtus. Finalement le réseau 2-D de surface a été importé dans ArcView à des fins de traitement spatial et de présentation (voir «conditions aux limites imposées»).

4.4 Maillage 3-D

L'étape suivante consiste à générer le réseau 3-D en définissant le nombre de couches à ajouter parallèlement au réseau d'éléments 2-D de surface, puis d'y incorporer les différentes surfaces structurales (Fig. 35) sous forme de fichiers ASCII. Feflow attribue à chaque nœud de la maille une cote z en utilisant le krigeage ordinaire, la méthode d'interpolation Akima (linéaire ou cubique) ou la méthode

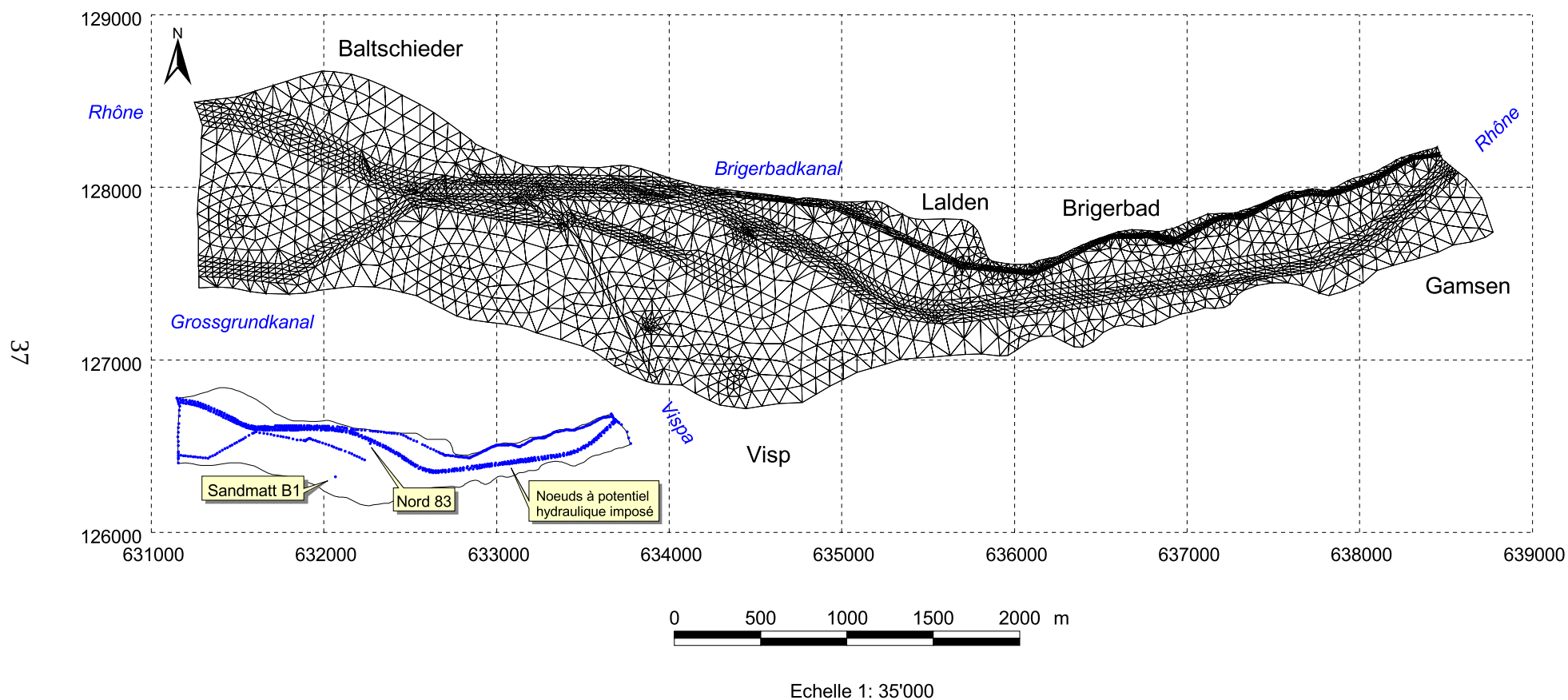


Figure 34 : Réseau 2-D de surface affiné du modèle 3-D : résultats de la combinaison de la base de données GIS et du générateur de mailles Tmesh de Feflow et positions des noeuds à potentiel imposé le long du Rhône, du Grossgrundkanal du Brigerbadkanal, des puits de la Lonza et des limites amont et aval. Les valeurs imposées sont déduites de la carte piézométrique des basses eaux 1992 [Kimmeier, 2000].

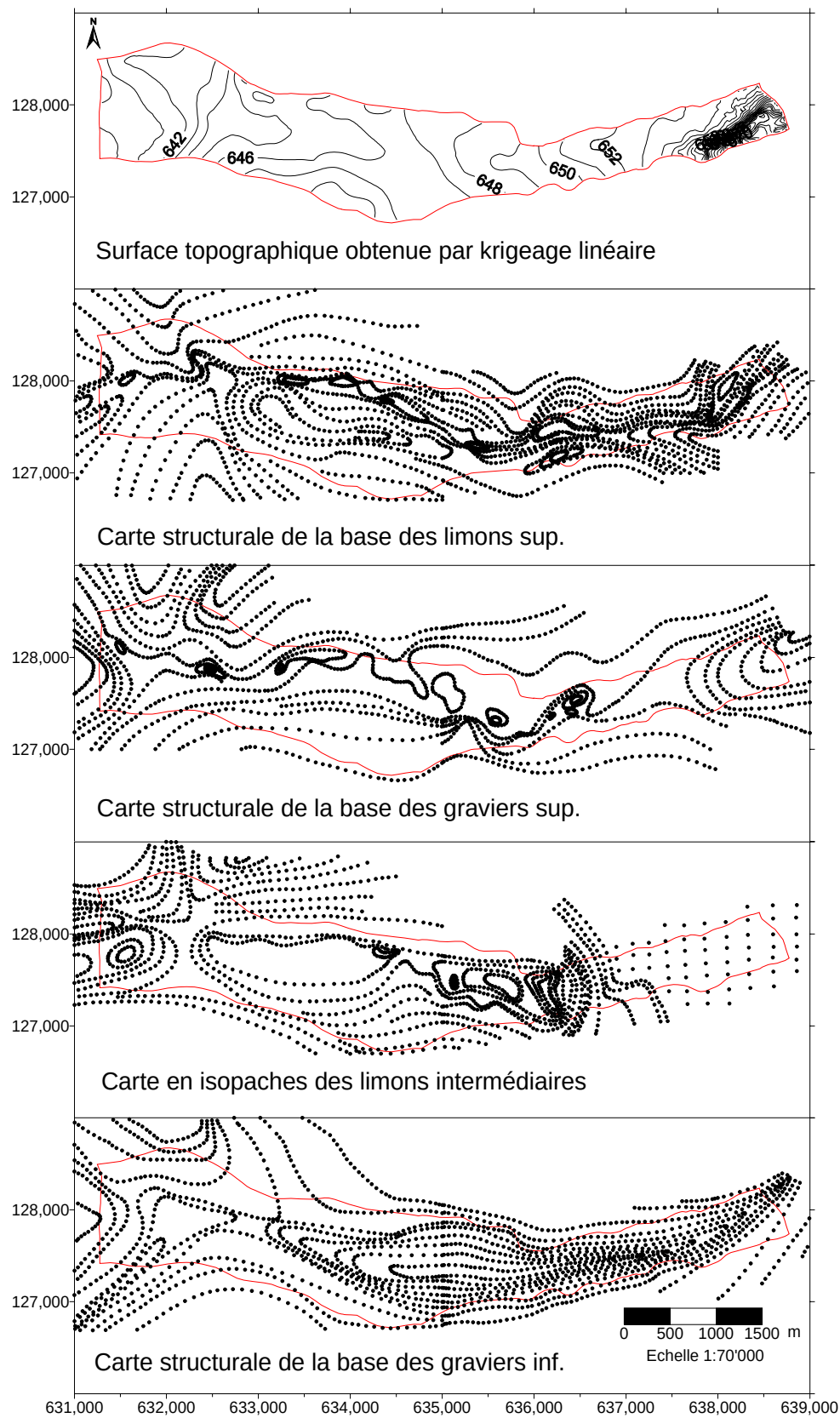


Figure 35 : Plans d'information utilisés pour la construction de la géométrie 3-D du complexe alluvionnaire dans la région de Visp.

inverse de la distance. Si les cartes structurales ont été élaborées par régionalisation, en les important dans Feflow, les valeurs subissent une double interpolation pouvant générer des erreurs. Pour éviter cette double interpolation, la maille 2-D peut être importée dans le logiciel Isatis [1997], afin d'estimer les valeurs, non pas sur une grille régulière, mais sur une grille irrégulière dont les nœuds correspondent à notre réseau 2-D. Les valeurs ainsi obtenues peuvent être injectées dans Feflow en utilisant la méthode inverse de la distance, ce qui évitera la double interpolation. Dans notre cas, les surfaces structurales sont sous forme de points et de lignes et n'ont pas subi de traitement géostatistique. La figure 35 montre ces cartes structurales. On peut y observer un grand nombre de points qui ne sont pas tous issus des données des forages mais ajoutés à la main par l'hydrogéologue afin de «forcer» l'interpolation de Feflow. Pour la surface topographique cette méthode n'a pas été utilisée car elle constitue un plan plus régulier que les autres surfaces structurales. Cette surface a été régionalisée à partir des points cotés où se situent les forages et piézomètres puis injectée dans Feflow. Comme la zone non-saturée est, en moyenne, à 3 mètres de profondeur, et que la surface topographique est constituée, «en gros», par un plan régulier, cela ne prête pas à conséquence. La figure 45 montre le résultat final de la création de cette maille 3-D. Elle est constituée de 25'940 éléments prismatiques linéaires à base triangulaire et de 16'965 nœuds.

Lorsque deux surfaces s'interpénètrent, Feflow propose de corriger automatiquement les cotes des nœuds, afin de laisser une distance minimale entre les deux couches choisies par l'utilisateur. Cette fonctionnalité est très utile dans le cas de formations géologiques qui disparaissent naturellement de part leur genèse, et permet d'éviter des erreurs grossières de géométrie. En effet, il n'est pas possible de modéliser, avec Feflow, des couches qui se pincent, comme c'est le cas pour les limons intermédiaires. Avec ce logiciel, pour simuler une couche lithologique qui disparaît, on a recourt à une astuce. La couche qui se pince est prolongée jusqu'aux limites latérales du modèle en réduisant son épaisseur à quelques dizaines de cm (dépend du choix de l'utilisateur en fonction de la géométrie et de la précision liée au problème à résoudre). C'est le cas des limons intermédiaires qui se pincent dans la partie amont du modèle, mettant en contact direct les deux aquifères. Les «limons», dans cette partie, sont représentés par une couche de 50 cm qui a, en fait, les mêmes propriétés hydrodynamiques que les graviers. La fonctionnalité vue plus haut est donc intéressante, car elle a permis de corriger automatiquement les cotes des nœuds où les surfaces se recoupaient, laissant ainsi un minimum de 50 cm entre les deux couches. Cette valeur et cette astuce ont été reprises de l'étude de l'impact sur les eaux souterraines de la construction de l'autoroute A9 à Visp par modèle hydrodynamique [Bouzelboudjen & Király, 1988]. Par ailleurs, d'autres routines de pré-processing accompagnant la suite des FEN's code family [Király, 1998] autorisent le pincement des couches [Kimmeier & al., 1985 ; Király, 1985 ; Király, 1988 et Bouzelboudjen & Kimmeier, 1997]. Une autre fonctionnalité très intéressante des FEN's code family est de permettre, par exemple, la double numérotation pour simuler des couches et limites imperméables de manière très flexible, sans ajouts de nouveaux éléments. Cette technique a été utilisée notamment pour simuler le rideau de palplanches des fouilles de l'autoroute A9 à Visp (Fig. 36) [Bouzelboudjen & Király, 1988 ; Bouzelboudjen, 1990, 1991]. Une autre fonctionnalité est de permettre, soit l'introduction d'éléments unidimensionnels dans un milieu bidimensionnel pour simuler des fractures (Fig. 37), comme cela a été réalisé par Kimmeier & al. dans le cadre du projet Hydrocoin en 1986, soit l'introduction d'éléments unidimensionnels et de plan bidimensionnels dans un milieu tridimensionnel, afin de simuler un réseau karstique ou de failles [Király, 1979 ; Kimmeier & al., 1985].

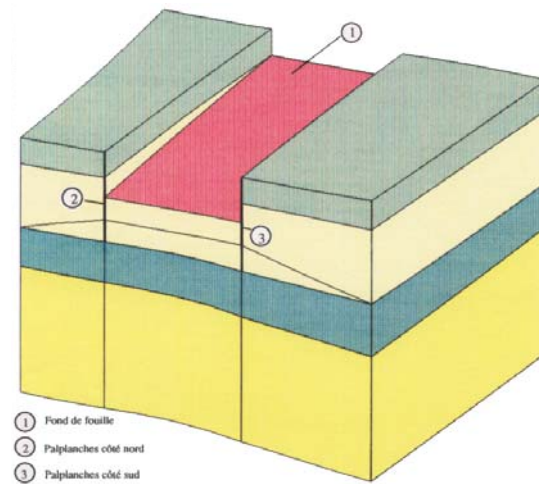


Figure 36 : Bloc diagramme illustrant l'astuce de la double numérotation pour simuler des palplanches avec la méthode FEN [Bouzelboudjen & Király; 1988, 1990].

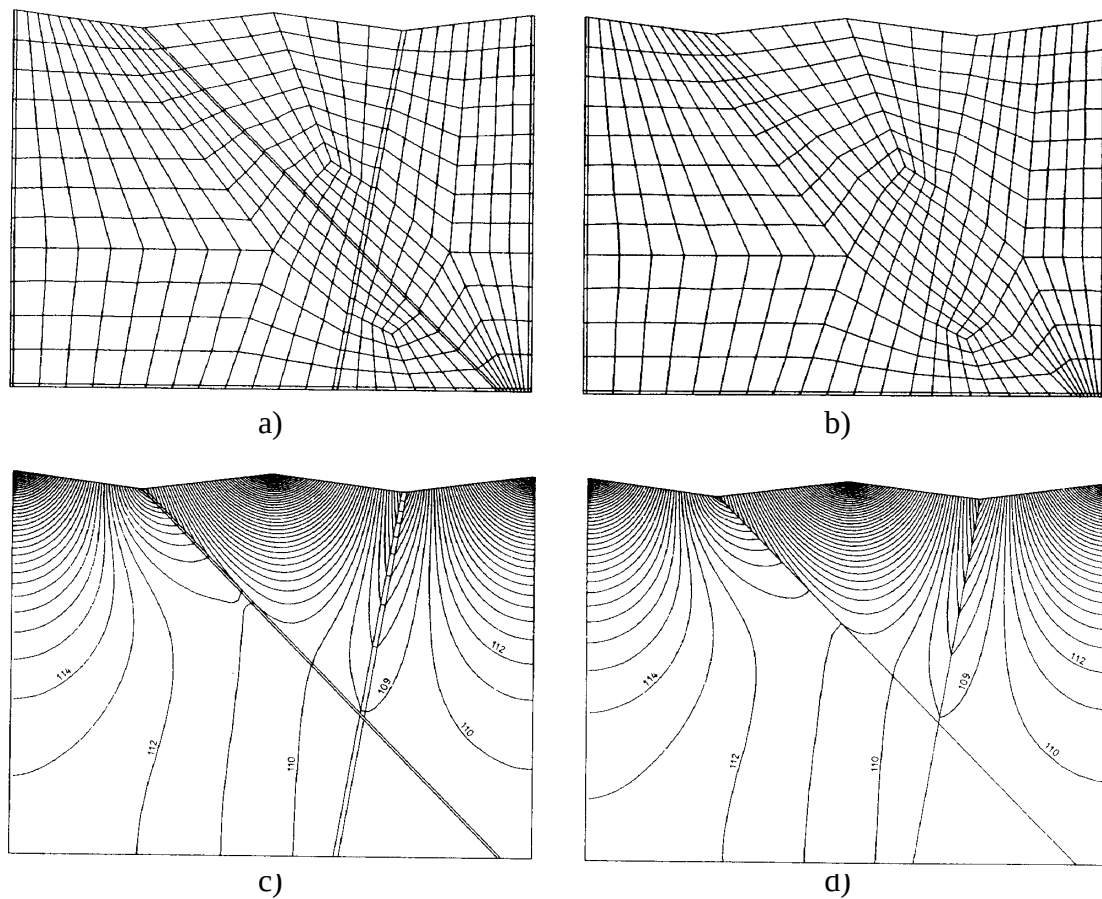


Figure 37 : Mailles 2-D [a) et b)] et résultats [c) et d)] du projet Hydrocoin [Kimmeier & al., 1986] cas 2 (mailles fines). Comparaison entre milieu avec fractures 2-D et milieu avec fracture 1-D. Les résultats obtenus avec FEM301 [Király, 1985] sont représentés sous forme d'équipotentiels [m].

4.5 Vérification du maillage 3-D

La maille 3-D étant prête, il s'agit maintenant de procéder à une vérification minutieuse afin de valider la géométrie souhaitée. Pour effectuer cette opération, Feflow intègre certaines fonctionnalités d'ArcInfo permettant de générer des profils verticaux. Ces profils pouvant être exportés, soit au format DXF (Data Exchange Format : format de fichier d'AutoCAD), soit au format Shapefile (format de fichier d'ArcView), puis importés directement dans ArcInfo ou ArcView. La figure 38 montre le tracé des 11 coupes longitudinales et des 22 coupes transversales ayant servi à vérifier la géométrie 3-D. La figure 39 montre les 22 coupes en travers et la figure 48 montre le profil en long numéro 6. Il est à noter qu'à partir de la coupe numéro 26, ainsi que sur la coupe numéro 6, le pincement des limons intermédiaires a été réalisé par « manipulation » de la base de données spatiales à l'aide d'ArcView.

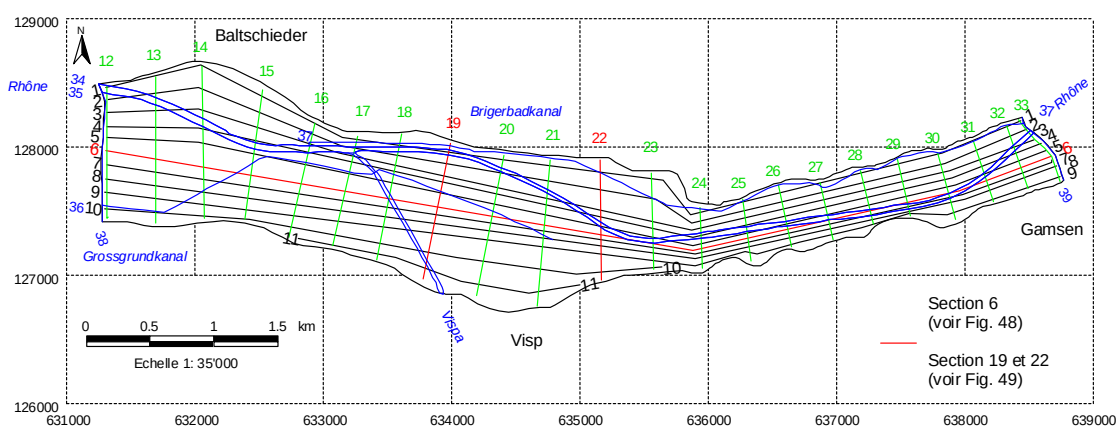


Figure 38 : Position des sections représentées sur la Fig. 40 permettant de vérifier la géométrie du modèle 3-D et de visualiser les équipotentielles (cf Fig. 48 et 49)

La vérification de la géométrie 3-D entre Baltschieder et Lalden a été réalisée avec ArcInfo et les modules Tin et Grid, en exportant les surfaces structurales qui composent les quatre couches du modèle 3-D, et en utilisant une AML* pour générer les profils [Bouzelboudjen, 1996]. Cette approche a aussi été appliquée pour la modélisation de 12 horizons pédologiques [Mendonça & al., 2000].

* AML signifie ARC Macro Language. Il s'agit d'un langage algorithmique de haut niveau permettant de générer des applications par l'utilisateur [ESRI, 1996b].

4.6 Conditions aux limites imposées

Pour réaliser des calculs, il est nécessaire d'imposer des conditions aux limites. Ces conditions sont de deux types : Conditions de potentiel et conditions de flux. En général, les débits entrants ou sortants du système, autres que les infiltrations efficaces, sont mal ou pas connus. Au contraire, les potentiels hydrauliques sont relativement mieux connus de par la position des sources ou par les mesures de potentiels hydrauliques réalisées dans les piézomètres permettant de dessiner des cartes piézométriques. C'est ainsi qu'en général, on impose des valeurs de potentiels comme conditions aux limites. La figure 34 montre les nœuds auxquels une valeur de potentiel a été assignée. Il s'agit des nœuds se trouvant le long des canaux du Brigerbad et du Grossgrund, de la rive droite et gauche du Rhône, de la limite amont et aval, ainsi que des puits de Sandmatt B1 et Nord 83. En régime permanent, les

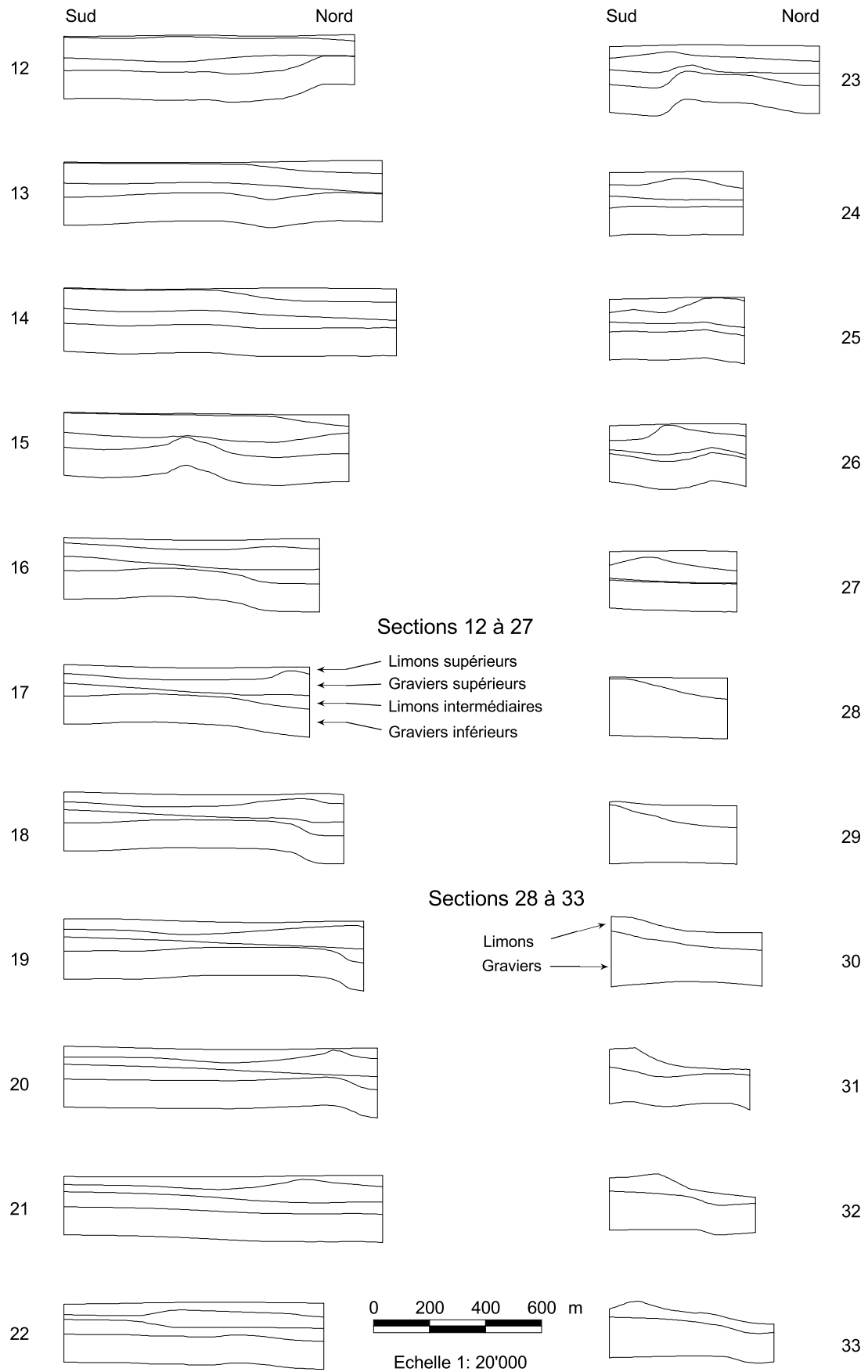


Figure 39 : Sections nord-sud 12 à 33 du modèle 3-D (voir Fig. 38)

conditions aux limites imposées ne varient pas, alors qu'en régime transitoire, elles varient avec le temps ; on n'impose plus une valeur unique aux nœuds, mais une fonction variant en fonction du temps. Les enregistrements en continu du niveau de la nappe sont donc des données importantes pour les calculs en régime transitoire. Dans le cas du modèle 3-D de Visp (Fig. 45 à 52), les calculs ont été effectués en régime permanent, avec calcul de la nappe libre. D'autres modèles 2-D coupe ont été effectués en régime transitoire et variablement saturé (Fig. 57 à 62) dans le cadre de la 2^{ème} phase de la 3^{ème} correction du Rhône. Un autre modèle 3-D d'écoulement et de transport, simulant l'impact potentiel de la décharge de Gamsen, a nécessité la définition de conditions aux limites spécifiques précisées plus loin (Fig. 63 à 65).

Les potentiels imposés correspondent, soit à la carte automatique générée par géostatistique des hautes-eaux 1997 (voir la figure 5 dans «Travel path uncertainty : a Swiss case study combining stochastic and deterministic hydrodynamic models in the Rhône valley, Switzerland» [Kimmeier & al., 2001d] dans ce volume), soit à la carte manuelle des basses-eaux 1992 (Fig. 40). La carte des basses-eaux 1992 a été réalisée dans le cadre de l'expertise de la 3^{ème} correction du Rhône, en essayant de recréer, le plus fidèlement possible, la relation nappe rivière et nappe canaux. La carte piézométrique des hautes-eaux 1997 ne recrée pas aussi fidèlement la relation nappe rivière, car les données aux abords du réseau hydrographique ne sont pas assez abondantes. Pour contourner ce problème, il aurait fallu ajouter artificiellement des valeurs, déduites des mesures, proches du réseau hydrographique, pour forcer le logiciel d'interpolation à tenir compte de ces relations. L'avantage d'une telle démarche, est la génération automatique des isovaleurs, en évitant à l'hydrogéologue de les dessiner, puis de les numériser. Cette opération, qui peut être longue et fastidieuse, est souvent entachée d'erreurs qu'il faut corriger.

Les potentiels imposés sur le réseau hydrographique le sont au sommet du modèle. Par contre, les potentiels imposés aux puits, le sont verticalement à tous les nœuds, jusqu'à la base des graviers supérieurs, car seul cet aquifère est exploité. De même les potentiels imposés aux limites amont et aval, le sont verticalement, alors qu'en réalité, ils varient avec la profondeur, comme cela a été mis en évidence par Bouzelboudjen [Bouzelboudjen & Király, 1988] dans le cadre des travaux de la N9. En effet, les limites amont et aval du modèle de 1988, premier modèle 3-D de la région, coïncidaient avec sept forages dont les mesures de potentiels hydrauliques ont été effectuées à l'avancement des travaux, donnant ainsi une image 2-D verticale de la représentation des potentiels. Par manque d'information pour les hautes-eaux 1997 et basses-eaux 1992, les potentiels n'ont donc pas été imposés d'une manière variable avec la profondeur, admettant ainsi un flux à travers les limites amont et aval proche du maximum, car les vecteurs flux sont perpendiculaires à cette surface équipotentielle.

Les conditions aux limites étant imposées, il s'agit de les vérifier. Les figures 41a à 41d montrent les conditions aux limites imposées le long de la rive gauche et droite du Rhône ainsi, que le long des canaux de Brigerbad et de Grossgrund. Ces valeurs sont issues du traitement géostatistique du potentiel hydraulique de la campagne des hautes-eaux 1997. Chaque rupture de pente doit être confrontée à la carte piézométrique réalisée et interprétée par l'hydrogéologue afin de dépister d'éventuelles erreurs.

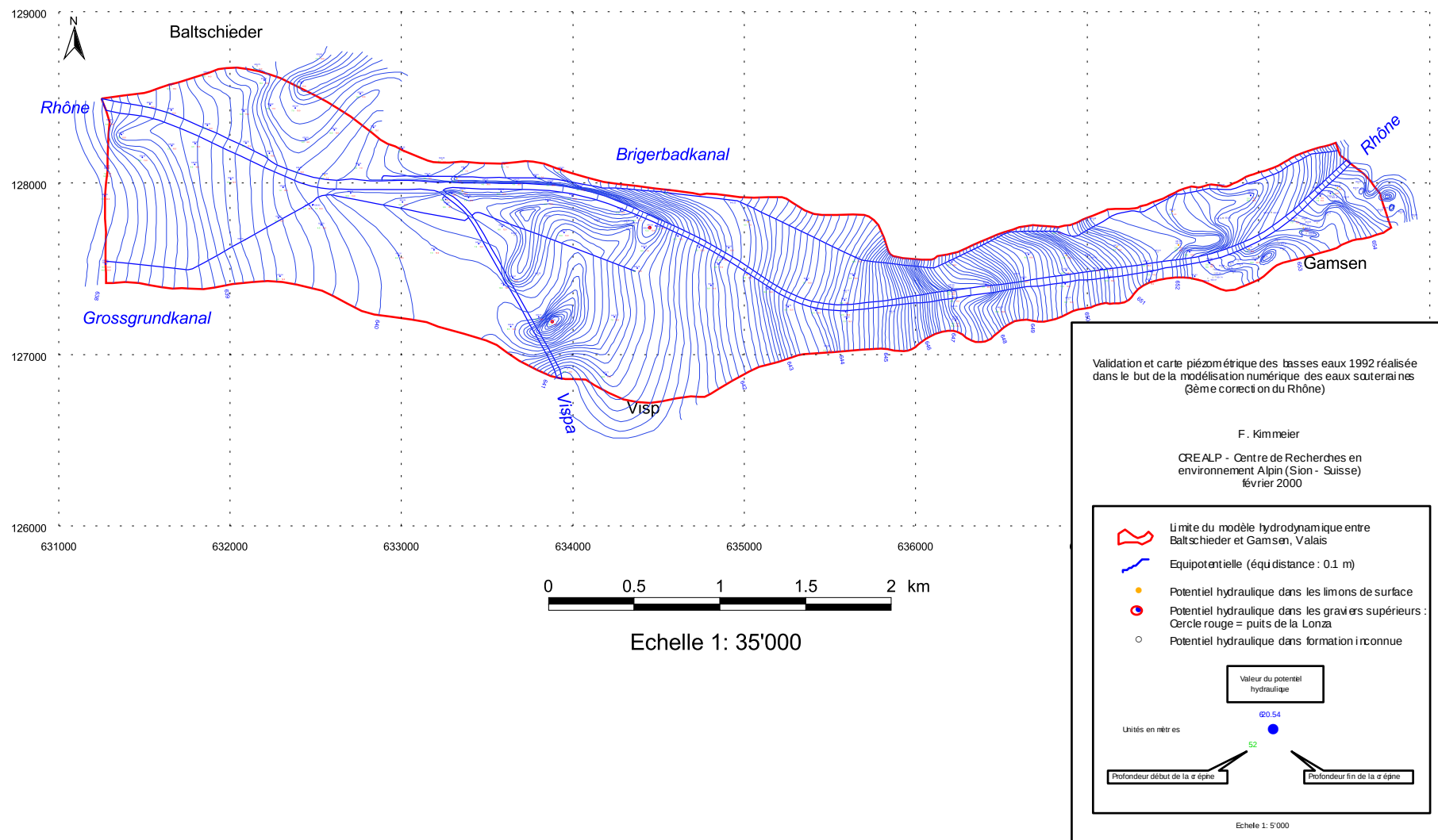


Figure 40 : Validation et carte piézométrique des basses eaux 1992 réalisée dans le but de la modélisation numérique des eaux souterraines (3ème correction du Rhône) [Kimmeier, 2000]. Carte originale au 1: 5'000.

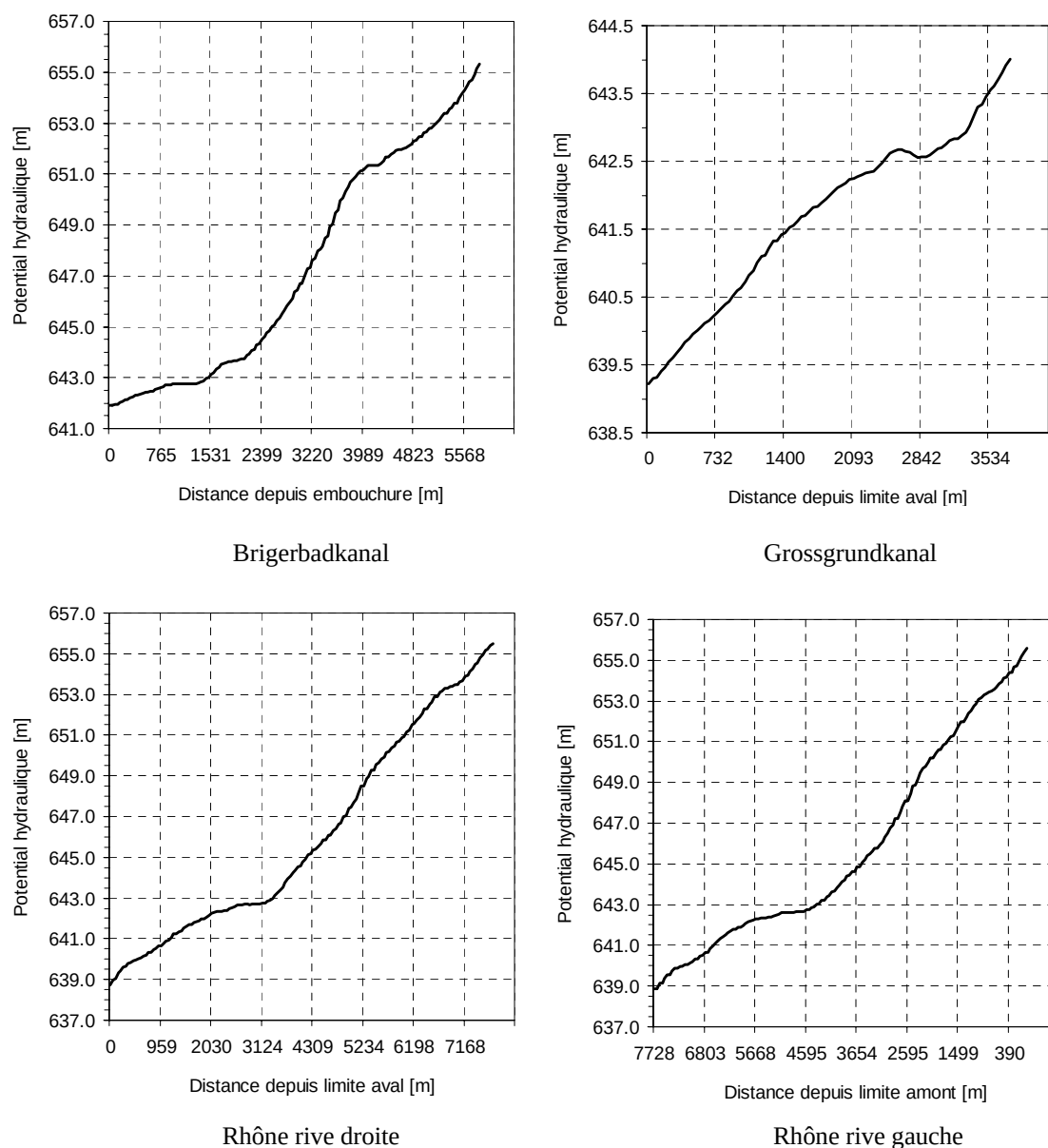


Figure 41a-d: Potentiels hydrauliques imposés aux limites correspondant aux hautes-eaux 1997. Valeurs estimées tirées de la carte krigée obtenue par covariance généralisée

4.7 Imposition des propriétés intrinsèques au milieu modélisé

Pour calculer des variantes, il ne manque à la géométrie 3-D que la définition à chaque élément 3-D, des propriétés intrinsèques du milieu modélisé, à savoir la perméabilité (transmissivité en 2-D) et le coefficient d'emmagasinement. Pour le modèle développé à Visp, plusieurs champs de perméabilité ont été utilisés pour tester diverses hypothèses. Des champs homogènes isotropes, des champs homogènes anisotropes, ainsi que des champs hétérogènes pour les limons de surface et les graviers supérieurs ont été introduits. Les champs hétérogènes ont été obtenus par géostatistique. L'annexe 6 résume les valeurs de perméabilité testées dans le cadre de l'expertise de la 3^{ème} correction du Rhône phase II [Kimmeier & al., 2000].

En général, le coefficient d'emmagasinement est déduit des essais de pompage. Il est rarement disponible. Cette variable n'est utilisée que pour les calculs en régime

transitoire, et, généralement, des hypothèses doivent être émises quant à sa valeur, en fonction de la lithologie.

4.8 Définition des points de contrôle des débits et des potentiels hydrauliques

La géométrie étant prête à être utilisée pour effectuer diverses variantes de calcul, elle pourrait l'être telle quelle, mais dans un souci de validation des résultats, il est préférable de préparer un certain nombre de points de contrôle, afin de comparer les

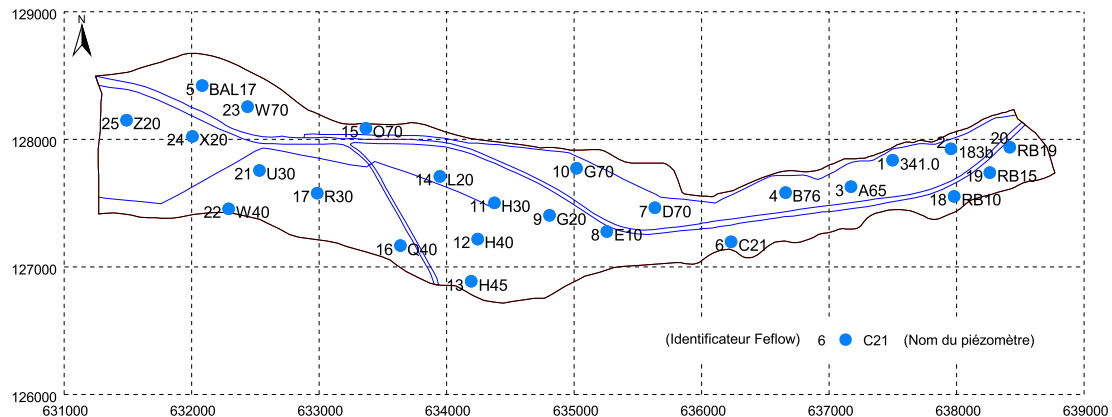


Figure 42 : Position des points de contrôle pour la comparaison des potentiels hydrauliques mesurés et calculés

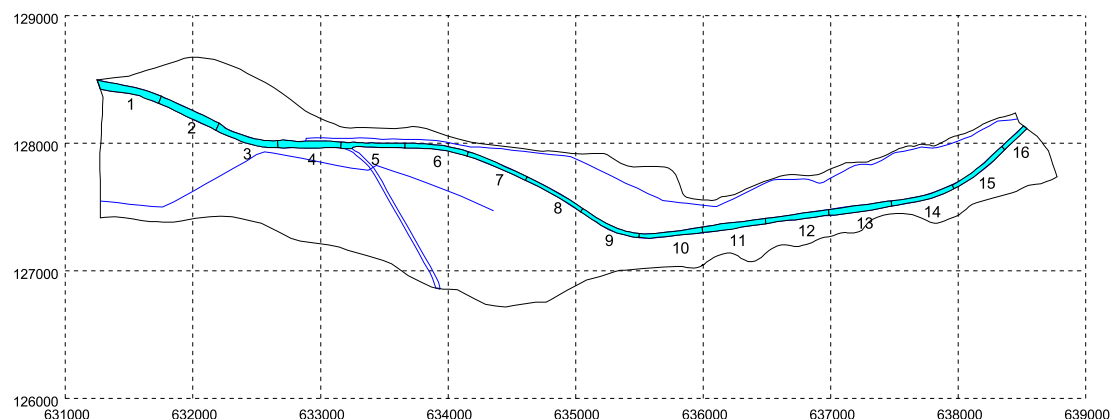


Figure 43 : Position des groupes de noeuds où les débits nodaux ont été sommés par intervalle de 500 mètres sauf le groupe 16 (intervalle de 236 mètres)

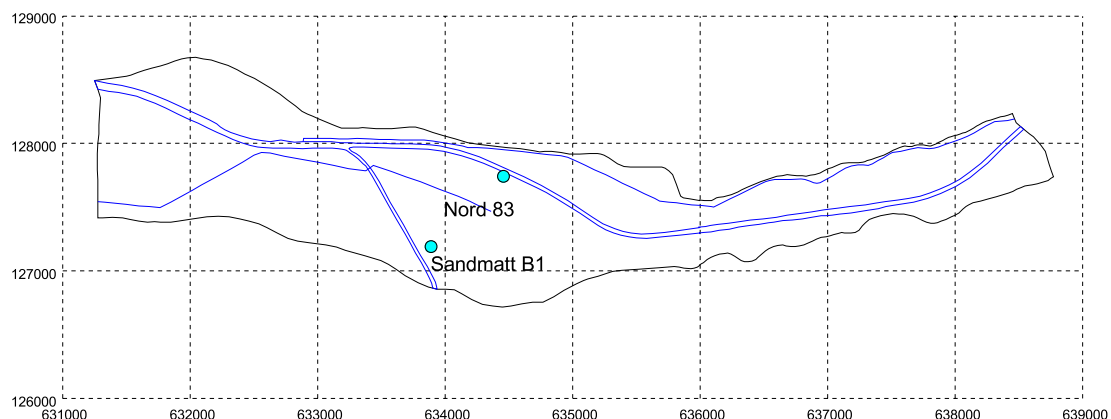


Figure 44 : Position des groupes de noeuds où les débits nodaux ont été sommés à l'emplacement des puits de la Lonza dans les graviers supérieurs

résultats du modèle avec les mesures effectuées sur le terrain. La figure 42 montre la localisation des points où les potentiels hydrauliques calculés sont comparés avec les potentiels mesurés dans les piézomètres. La figure 53 montre la position des points de mesure des débits, dans les canaux de Brigerbad et de Grossgrund, où les débits calculés par le modèle ont été comparés aux débits mesurés. La figure 43 montre les 16 segments le long du Rhône où les débits calculés par le modèle ont été comparés entre différentes variantes. La figure 44 montre la position des puits de pompage de la Lonza en activité lors des hautes-eaux 1997.

4.9 Variantes de calcul pour tester différentes hypothèses

La géométrie du modèle étant prête, différentes variantes de calcul peuvent être testées en changeant les valeurs des paramètres hydrodynamiques (alimentations distribuées, potentiels hydrauliques, perméabilités, etc). Les modèles FEN's code family [Király, 1985, 1998], utilisés pour la première partie de l'expertise de la 3^{ème} correction du Rhône [Bouzelboudjen & Király, 1998], calculent pour tous les nœuds de la maille 3-D, des débits et/ou des potentiels hydrauliques qui peuvent ensuite être confrontés aux mesures de terrain.

Pour simuler les écoulements souterrains dans un milieu hétérogène, l'utilisation d'un modèle mathématique à éléments finis est particulièrement bien adaptée. Les écoulements permanents et transitoires de densité constante en zone saturée sont décrits par l'équation générale suivante :

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \text{div} \left(-\overline{\overline{K}} \cdot \vec{\text{grad}} h \right) + q = 0 \quad (1)$$

où

- S_s = le coefficient d'emménagement spécifique [m^{-1}]
- h = potentiel hydraulique [m],
- t = temps [s],
- $\overline{\overline{K}}$ = tenseur des perméabilités [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
- q = terme de source (alimentation ou prélèvement) [$\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$].

Afin de résoudre l'équation générale (1) et calculer la distribution des potentiels, la région d'écoulement est subdivisée en éléments tridimensionnels. Ces éléments sont reliés entre eux par des points discrets appelés «nœuds». La distribution des potentiels est «approximée» sur chaque élément par un polynôme de deuxième degré. En remplaçant la fonction inconnue h par l'approximation polynomiale dans l'équation (1), cette dernière, multipliée par une fonction de pondération, peut être intégrée sur chaque élément (méthode de Galerkin). Le résultat est un système d'équations linéaires (il y aura autant d'équations linéaires qu'il y a de nœuds dans le modèle) que l'on résout par la méthode d'élimination de Gauss, pour obtenir les potentiels à chaque nœud du modèle.

Afin de résoudre le système d'équations linéaires, il faut imposer à chaque nœud, soit le potentiel (limites à potentiels imposés où l'on calculera les flux), soit le terme de source (limites à flux imposés où l'on calculera les potentiels). A la fin des calculs, on aura, pour chaque nœud, à la fois le potentiel et le terme de source.

Les données nécessaires pour la simulation découlent de la méthode présentée ci-dessus :

- géométrie des éléments (coordonnées des nœuds),
- perméabilité pour chaque élément,
- coefficient d'emménagement spécifique pour chaque élément,
- limites à potentiels imposés,
- limites à flux imposés (si possible : limites à flux nul).

Dans le cas de la 2^{ème} phase de l'expertise de la 3^{ème} correction du Rhône, une dizaine de variantes a été testée. L'annexe 6 résume les champs de perméabilité utilisés. Les calculs ont été réalisés en régime permanent et en nappe libre, c'est-à-dire que Feflow calcule la position de la nappe libre, au travers des éléments 3-D. Ces derniers sont donc parfois partiellement dénoyés.

Dans le cadre du Fonds national et des mandats pour la 3^{ème} correction du Rhône, les logiciels FEN's code family [Király, 1985, 1998] et Feflow [Diersch, 1999] ont été utilisés pour modéliser les écoulements souterrains et les processus de transport. Ces modèles ont permis de calculer les systèmes d'écoulement 2-D et 3-D, les champs des vitesses, les trajectoires et les temps de parcours [Bouzelboudjen & Király, 1998 ; Bouzelboudjen & Kimmeier, 1998 ; Kimmeier & al, 2000 ; Kimmeier & al., 2001d].

Remarque : les traitements mathématiques de la surface de la nappe libre en régimes permanent et transitoire en 2-D et 3-D de la zone non saturée, ainsi que du transport, sont décrits en détail, dans le manuel d'utilisation de Feflow [Diersch, 1999]. Nous ne développerons pas ici cette partie technique.

En général, il est judicieux d'intégrer les complexités dans le modèle, au fur et à mesure, et non pas en bloc, afin de tester la sensibilité du modèle. A Visp, les 5 étapes réalisées sont résumées ci-dessous :

1. test de la cohérence du maillage, en effectuant un calcul en milieu homogène et en imposant des potentiels hydrauliques seulement aux limites aval et amont,
2. test des conditions aux limites imposées (également en milieu homogène) en imposant les potentiels hydrauliques aux limites aval et amont du modèle, le long du Rhône et le long des canaux de Brigerbad et de Grossgrund (permet de dépister des systèmes d'écoulement artificiels dus à des erreurs d'imposition de potentiels),
3. introduction de l'anisotropie des perméabilités entre les différentes couches (Ls, Gs, Li et Gi), les différentes couches restant isotropes,
4. introduction de l'hétérogénéité ainsi que de l'anisotropie au sein des limons de surface et des graviers supérieurs et,
5. introduction de l'hétérogénéité à l'intérieur des limons de surface et des graviers supérieurs.

Les étapes ci-dessus ont été réalisées pour les basses-eaux 1992 et pour les hautes-eaux 1997.

4.10 Analyse et présentation des résultats

Une fois les calculs réalisés, il faut les analyser et les présenter au gestionnaire sous forme d'équipotentiels sur blocs diagrammes, de profils et plans à différentes

profondeurs, de vecteurs vitesse de filtration et de lignes de courant avec isochrones. La figure 45 montre un bloc diagramme du modèle 3-D avec une exagération verticale de 10. On y voit le maillage, ainsi que les équipotentiels dont les valeurs sont représentées par différentes couleurs (voir légende). Il est à remarquer que Feflow est étroitement connecté à quelques procédures basiques d'ArcInfo ; le «Map manager» (gestionnaire de cartes) qui permet uniquement de visualiser des points, des lignes et des polygones.

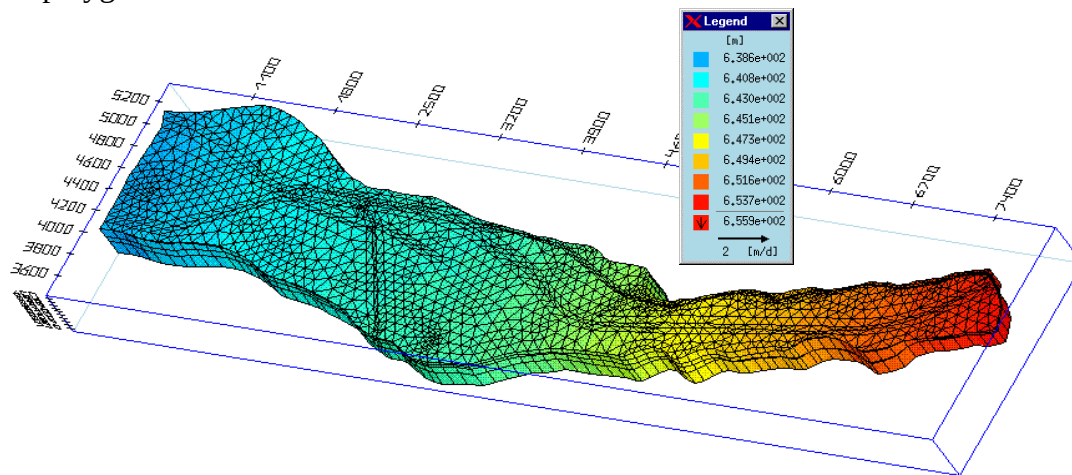


Figure 45 : Bloc diagramme 3D montrant le maillage et les potentiels simulés sous forme de plage de couleurs (variante: Visp3d07b).

La figure 46 montre une projection des équipotentiels 3-D, ainsi que des vecteurs flux sur la base des graviers supérieurs. Elle montre clairement les zones où le Rhône et les canaux ont un rôle de drainage, ainsi que les zones où elles jouent plutôt un rôle d'injection. Les vecteurs flux permettent d'estimer la relative quantité d'eau qui est drainée ou injectée.

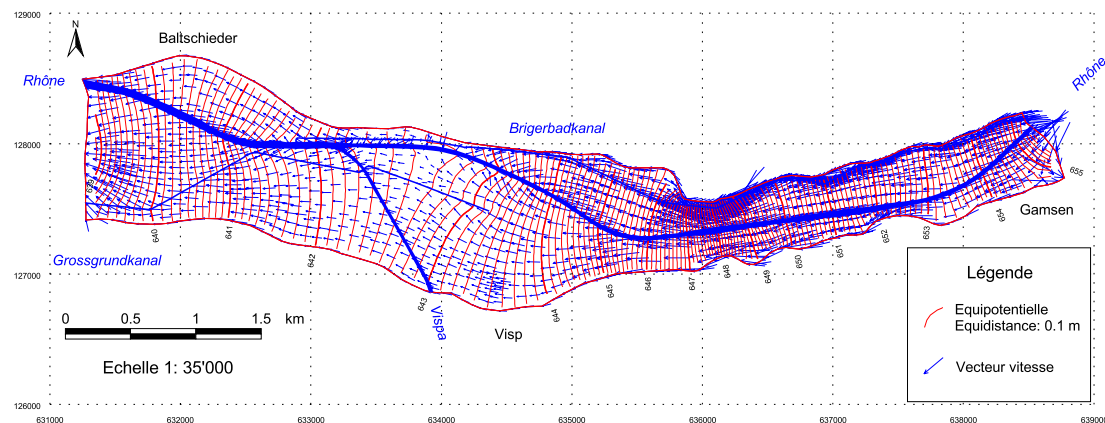


Figure 46 : Projection 2-D, à la base des graviers supérieurs, des équipotentiels et vecteurs vitesse simulés de la variante 3-D Visp3D04.

On pourrait de même représenter des blocs diagrammes sous forme d'écorchés. Feflow ne se prête pas bien à ce genre d'opération. Par contre, FEN's code family permet de remarquables représentations 3-D des résultats sous forme de blocs diagrammes et blocs diagrammes sériés (voir Fig. 47a, b et c), comme ce fut le cas pour la 1^{ère} partie de l'expertise de la 3^{ème} correction du Rhône [Bouzelboudjen & Király, 1998]. Dans cette étude, des interfaces ont été créées afin d'exporter les

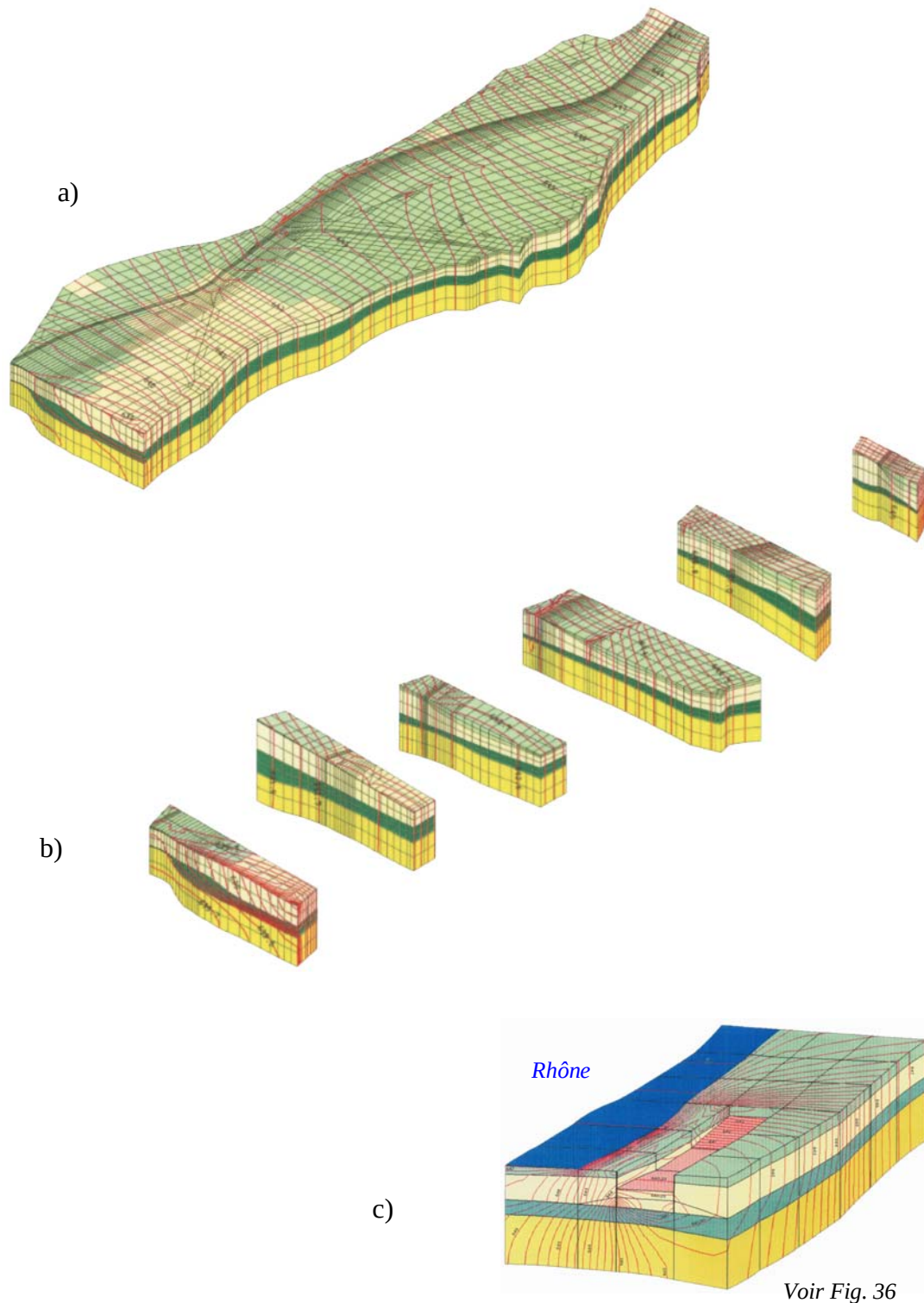


Figure 47a, b, c : Blocs diagrammes générés avec FEN's code family issus de l'expertise de la 3ème correction du Rhône – phase I [Bouzelboudjen & Király, 1998]. Le bloc diagramme c) illustre un résultat utilisant l'astuce de la double numérotation pour simuler des palplanches et montre la combinaison d'éléments, 2D et 3-D quadratiques à base triangulaire ou rectangulaire [Bouzelboudjen & Király, 1988, 1990].

fichiers FEN vers ArcInfo et ArcView [FEN-ARC, Király, 1998]. Une autre interface a été créée entre les logiciels Feflow et FEN's code family (FEN-FEFLOW & FEFLOW-FEN, [Király, 1998]) pour la réalisation du modèle du bassin Pannonien dans le cadre de la thèse de J. Viskok, soutenue à l'Université de Genève [Viskok, 2000].

La figure 48 montre un profil en long (profil 6 voir Fig. 38), alors que la figure 49 montre deux profils en travers, correspondant aux sections 19 et 22. La surface de la nappe libre est représentée par une ligne rouge. Rappelons que le sommet du modèle représente la surface topographique. L'épaisseur des limons saturés peut être estimée sur ces figures et comparée à la figure 53, représentant la carte 2-D des limons saturés. L'influence des puits Sandmatt B1, Nord 83, ainsi que du Rhône et des canaux, est très prononcée. Des petits systèmes locaux sont créés par leur présence, alors que l'écoulement général (régional) se fait d'est en ouest. Les figures 48 et 49 ont été exportées de Feflow puis finalisées dans ArcView. Les longueurs des flèches des vecteurs vitesse de filtration ne sont pas proportionnelles à leur vitesse. La figure 50 montre un bloc diagramme écorché, ainsi qu'un certain nombre de lignes de courant représentées par des tubes rouges, dont la largeur peut être définie par l'utilisateur. Dans la partie amont, par exemple, on peut remarquer la forte influence du Rhône et du canal de Brigerbad. Les lignes de courant sont pratiquement toutes verticales. Cette figure montre la complexité des lignes de courant 3-D simulées. En regardant cette image, il est clair qu'il est dangereux de traiter en 2-D des phénomènes qui se déploient en 3-D. Une ligne de courant peut traverser toutes les couches en direction de la surface et ensuite les retraverser en direction de la base du modèle. La figure 51 montre ce genre de ligne de courant, et la figure 52, sa projection sur un plan vertical. Cette figure montre également des isochrones sous forme de disques perpendiculaires à la ligne de courant. Chaque isochrone représente 50 jours.

4.11 Validation des résultats

La dernière étape de la modélisation consiste à confronter les résultats du modèle, soit les débits et potentiels calculés, avec les mesures de terrain. Le tableau 4 montre la comparaison des potentiels mesurés aux 25 points de contrôle (Fig. 42) et calculés pour une variante. On remarque une bonne concordance entre les valeurs calculées aux points de contrôle et les valeurs mesurées. La moyenne des différences est de 20 cm, alors que le minimum est de 0.01 cm, le maximum de 86 cm et l'écart-type de 23 cm. La figure 54 montre la dispersion des résultats sous forme de «box plots» pour 5 champs de perméabilité simulés par géostatistique. On remarque, par exemple, que la dispersion des potentiels est relativement faible et est en moyenne inférieure à 50 cm. Ce phénomène est normal, car les conditions aux limites imposées le long des limites aval et amont, ainsi que le long du Rhône et des canaux, restent constantes pour toutes les variantes.

Alors qu'il est relativement aisé de caler un modèle avec les potentiels hydrauliques, cela devient un peu plus difficile avec les débits. Le tableau 5 montre la comparaison des débits calculés par le modèle et les débits mesurés sur le terrain (jaugeages au sel par secteur [Ornstein, 1997]). La localisation des stations de mesures se trouve sur la figure 53 qui montre, pour chaque station, le débit mesuré et le débit corrigé, ainsi que la participation de chaque tronçon à la recharge ou décharge de l'aquifère. Les débits aux stations sont corrigés afin de ne prendre en compte que la participation des eaux souterraines. C'est ainsi que tous les débits des émissaires

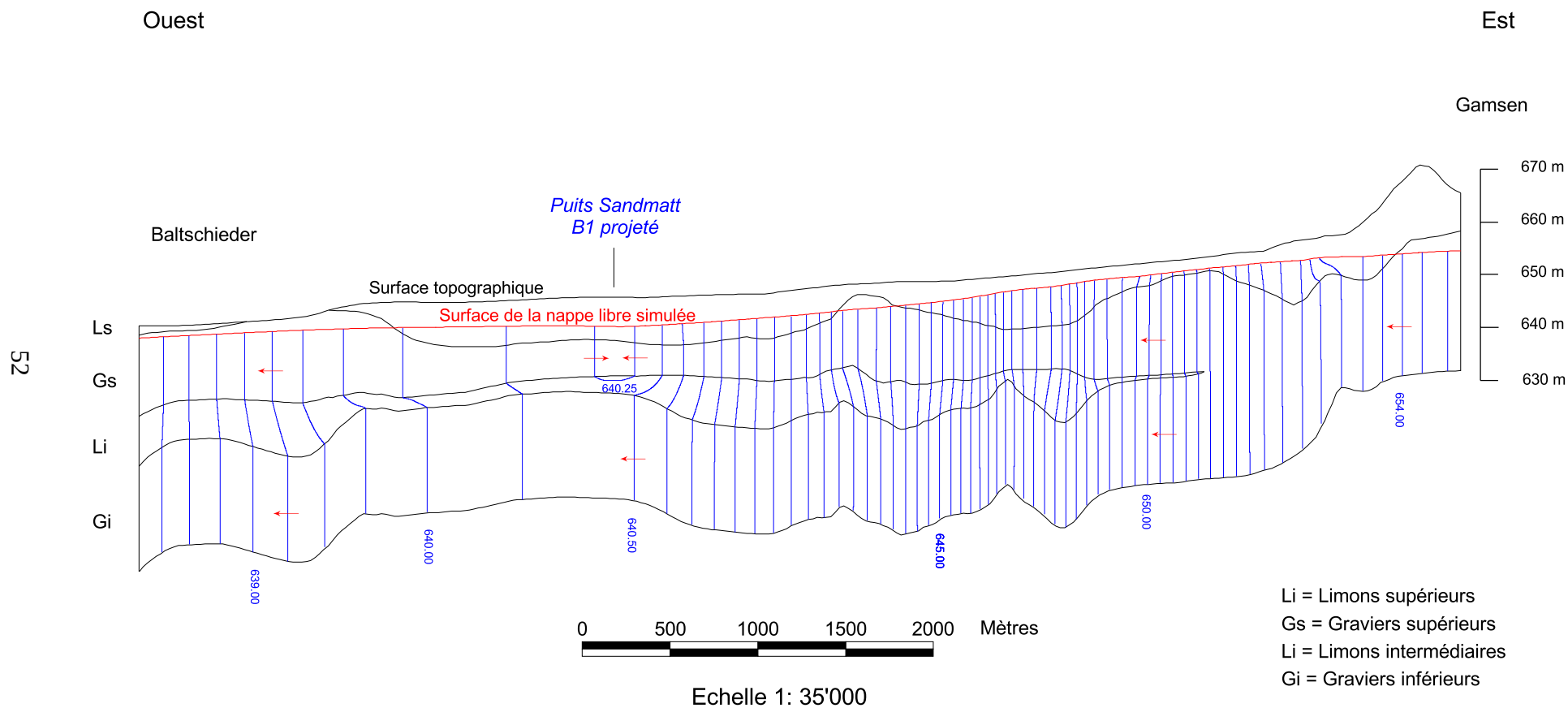


Figure 48 : Equipotentiels en mètres et surface de la nappe libre simulée de la variante 06a le long de la section 6 (Fig. 38). Exagération verticale 1: 30

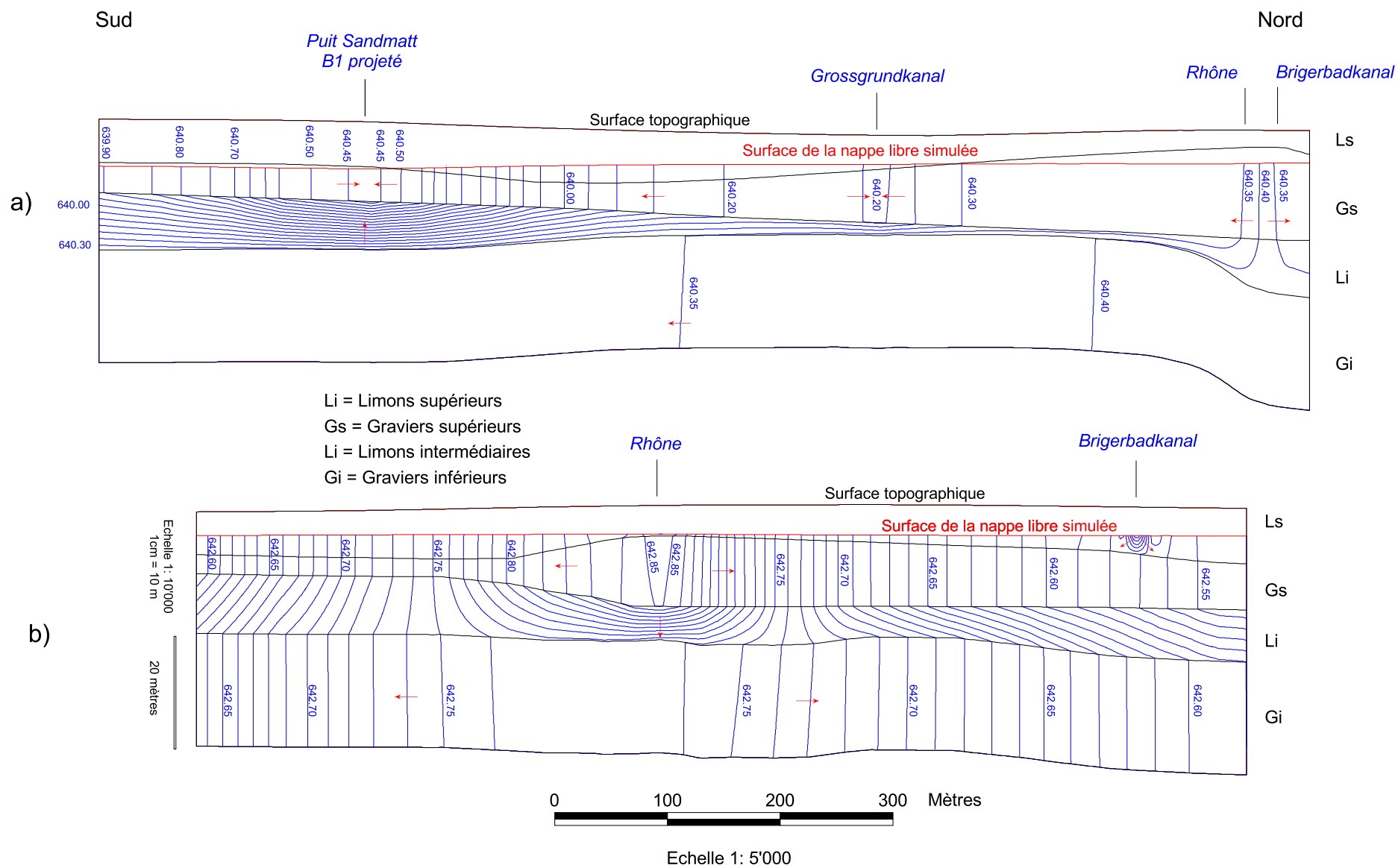


Figure 49 : Equipotentiels en mètres et surface de la nappe libre simulée de la variante 06a (exagération verticale 1: 5) a) Section 19, b) Section 22 (voir Fig. 38)

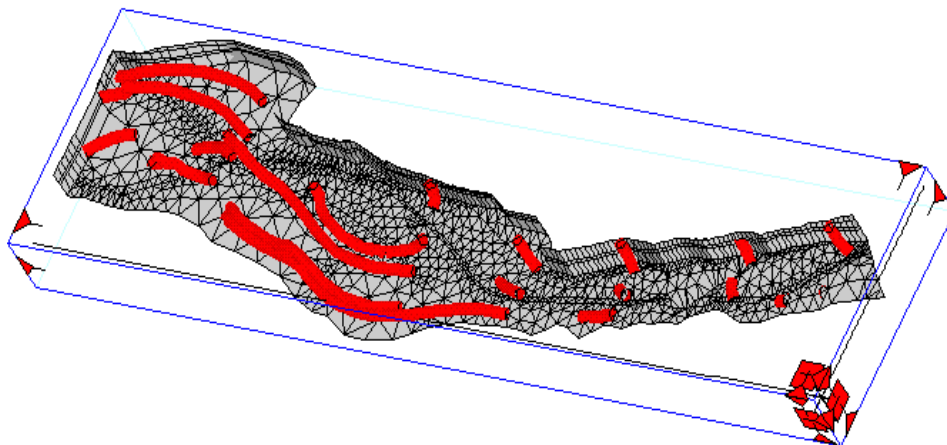


Figure 50 : Bloc diagramme 3-D montrant des lignes de courant simulées

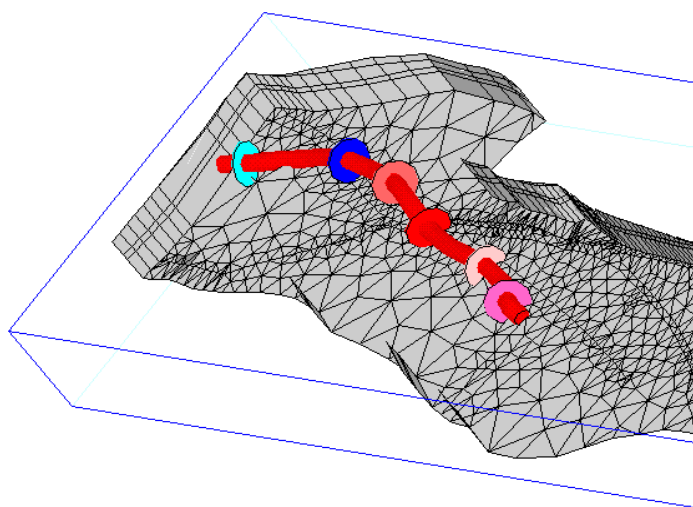


Figure 51 : Bloc diagramme 3-D montrant une ligne de courant simulée avec isochrones (50 jours)

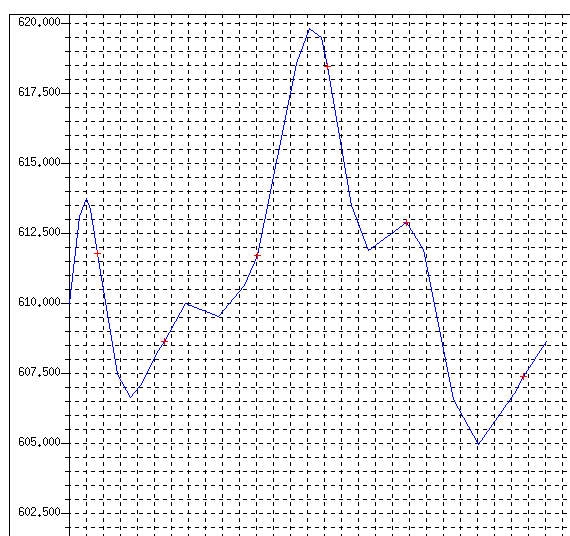


Figure 52 : Ligne de courant simulée de la figure 50 projetée sur un plan vertical

Id Feflow	X [m]	Y [m]	H mesuré [m]	H calculé [m]	Différence mes.-calc. [m]	Différence mes.-calc. Val abs [m]
1	637172.57	127626.91	651.77	651.54	0.23	0.23
2	636492.16	127266.68	649.44	649.45	-0.01	0.01
3	638345.00	127790.00	653.81	654.67	-0.86	0.86
4	636890.22	127322.62	650.58	650.65	-0.07	0.07
5	636876.82	127578.30	650.68	650.72	-0.04	0.04
6	632080.63	128418.27	640.45	640.43	0.02	0.02
7	636229.89	127196.74	648.31	648.48	-0.17	0.17
8	635481.97	127041.18	644.99	645.78	-0.79	0.79
9	635197.27	127140.30	645.10	644.94	0.16	0.16
10	634805.00	127402.00	643.79	644.04	-0.25	0.25
11	634420.00	127622.00	642.99	643.18	-0.19	0.19
12	634241.00	127218.00	642.68	643.27	-0.59	0.59
13	634192.90	126884.76	643.27	643.34	-0.07	0.07
14	636457.00	127531.00	649.86	649.63	0.23	0.23
15	635170.00	127636.00	644.50	644.73	-0.23	0.23
16	637794.00	127797.00	653.13	653.21	-0.08	0.08
17	632984.34	127578.62	641.92	641.94	-0.02	0.02
18	633007.51	127267.07	641.96	642.02	-0.06	0.06
19	637978.09	127551.95	653.35	653.51	-0.16	0.16
20	632531.39	127754.32	641.27	641.32	-0.05	0.05
21	632440.00	128256.00	641.22	641.10	0.12	0.12
22	631792.00	128109.00	639.92	639.94	-0.02	0.02
23	633851.00	127798.00	642.68	642.65	0.03	0.03
24	633796.00	127464.00	642.98	642.73	0.25	0.25
25	638290.91	128050.18	654.45	654.75	-0.30	0.30

Tableau 4 : Comparaison des potentiels mesurés et calculés pour la variante Visp3d07

Canal	Tronçon	Q mesuré [l/s]	Q calculé [l/s]	Différence [l/s]
Brigerbad	01-02	-300	-5	295
	02-03	610	-21	631
	03-04	-430	-23	407
	04-05	-28	-6	22
	05-06	29	4	25
	06-07	38	2	36
	07-08	-8	2	10
	08-09	-2	-30	28
	09-10	-3	-4	1
	10-11	56	-2	58
	11-12	44	-1	45
	12-13	28	1	27
Grossgrund	02-03	1182	8	1174
	03-04	-110	-2	108
	04-05	670	0	670
	05-06	-170	-1	169
	06-07	-136	2	138

Tableau 5 : Comparaison entre débits mesurés et calculés (variante Visp3d07) le long des canaux de Brigerbad et Grossgrund (voir localisation des tronçons sur Fig. 53)

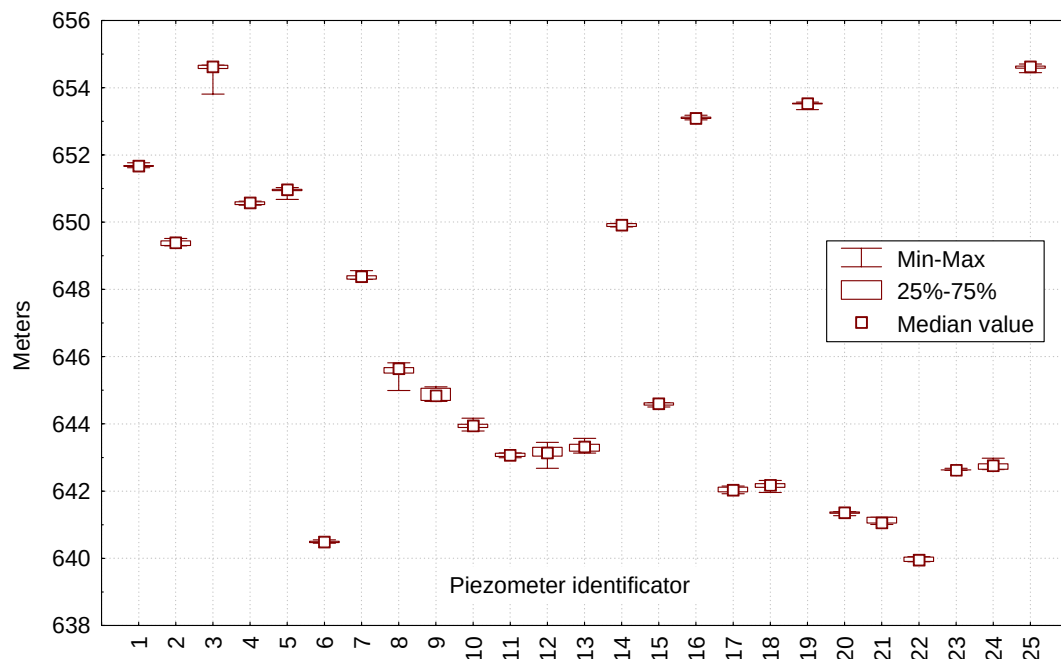


Figure 54 : Résultats sous forme de Box et Whisker Plot pour les potentiels hydrauliques calculés aux 25 points de contrôle (cf fig 43) pour 5 champs de perméabilité simulés par géostatistique.

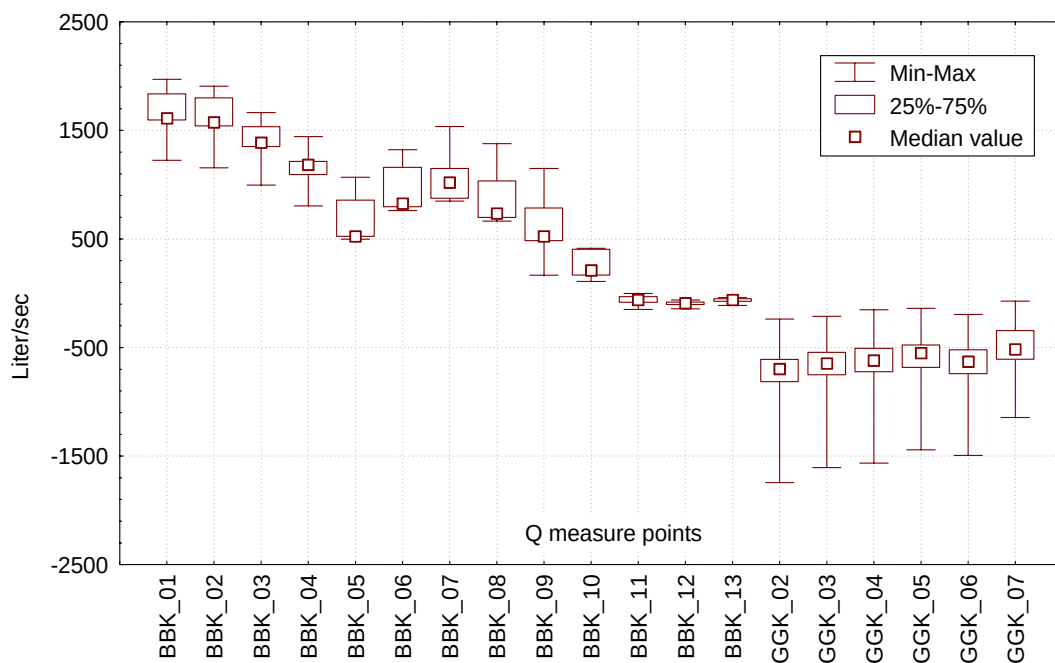


Figure 55 : Résultats sous forme de Box et Whisker Plot pour les débits calculés aux stations de jaugeage situées sur les canaux de Brigerbad et de Grossgrund (cf fig 53) pour 5 champs de perméabilité simulés par géostatistique. Le débit à une station (par ex. BBK_01) est la somme de tous les débits nodaux situés en amont de ce point. (-) = débit sortant du modèle, (+) = débit entrant dans le modèle.

arrivant dans les canaux sont soustraits des débits aux stations. La comparaison des débits calculés et des débits mesurés devrait faire l'objet d'un calage plus minutieux, ce qui n'entre pas dans le cadre de la description de la méthodologie. L'influence sur les débits du champ de perméabilité est primordial. La figure 55 montre la dispersion des résultats sous forme de «box plots» pour 5 champs de perméabilité simulés par géostatistique. On remarque, par exemple, que la dispersion des débits sur le tronçon 2 du canal du Grossgrund est de 1'430 l/s, avec -280 l/s comme minimum et -1'710 l/s comme maximum.

5. APPLICATIONS DU MODELE 3-D DEVELOPPE DANS LA REGION DE VISP

Dans ce chapitre, nous présentons deux applications du modèle 3-D lié à la base de données hydrogéologiques développée au cours du Fonds national. Ces deux applications sont la 3^{ème} correction du Rhône, phase II (étude mandatée par le canton du Valais) et la simulation 3-D d'une pollution fictive liée à la décharge de Gamsen.

5.1 Étude de l'influence de la 3^{ème} correction du Rhône, phase II, sur les écoulements souterrains à Visp

Le modèle 3-D développé à l'échelle 1: 5'000 dans le cadre du Fonds national a été utilisé pour l'expertise de la 3^{ème} correction du Rhône phase II. La réactualisation de ce modèle a été rendue possible grâce à la base de données SIG 1: 5'000 en modes raster et vecteur développée au cours du Fonds national. Cette étude, réalisée dans la région de Baltschieder-Gamsen pour le Service des routes et des cours d'eau, Département des transports, de l'équipement et de l'environnement de l'État du Valais, fait suite à celle effectuée par le Dr M. Bouzelboudjen et le Prof. L. Király [1998] et tient compte de leurs recommandations. Cette première phase a permis d'étudier l'influence de la 3^{ème} correction du Rhône (abaissement de son lit), dans la région de Baltschieder-Lalden, sur les écoulements souterrains, pour la période des hautes-eaux de juillet 1987 [Bouzelboudjen & Király, 1988, 1990, 1991]. De ces recommandations découlent les travaux préparatoires réalisés dans le cadre de cette étude par le CREALP (Centre de Recherches en Environnement Alpin, Sion), à savoir la carte des infiltrations et exfiltrations [Kimmeier, 1999 – Fig. 56], ainsi que la validation et l'élaboration de la carte piézométrique des basses-eaux 1992 [Kimmeier, 2000 – Fig. 40]. Les valeurs de potentiels et de débits mesurées dans les canaux de Brigerbad et de Grossgrund lors des basses-eaux 1999 (prévues initialement pour cette étude) n'ont pas été utilisées, car elles correspondent à une situation de dégel et par conséquent, ne sont pas représentatives de basses-eaux. Le choix s'est porté, en accord avec le CREALP, sur les valeurs des basses-eaux 1992.

Les objectifs de cette étude sont :

- a) la simulation numérique des écoulements souterrains 3-D (tridimensionnels) lors des basses-eaux 1992 et l'évaluation des échanges entre le Rhône et la nappe alluviale,
- b) l'étude de l'effet du «colmatage» du Rhône sur les infiltrations dans la nappe (introduction d'une couche de 1 mètre d'épaisseur et de conductivité hydraulique variant de 10^{-5} à 10^{-7} m/s), et

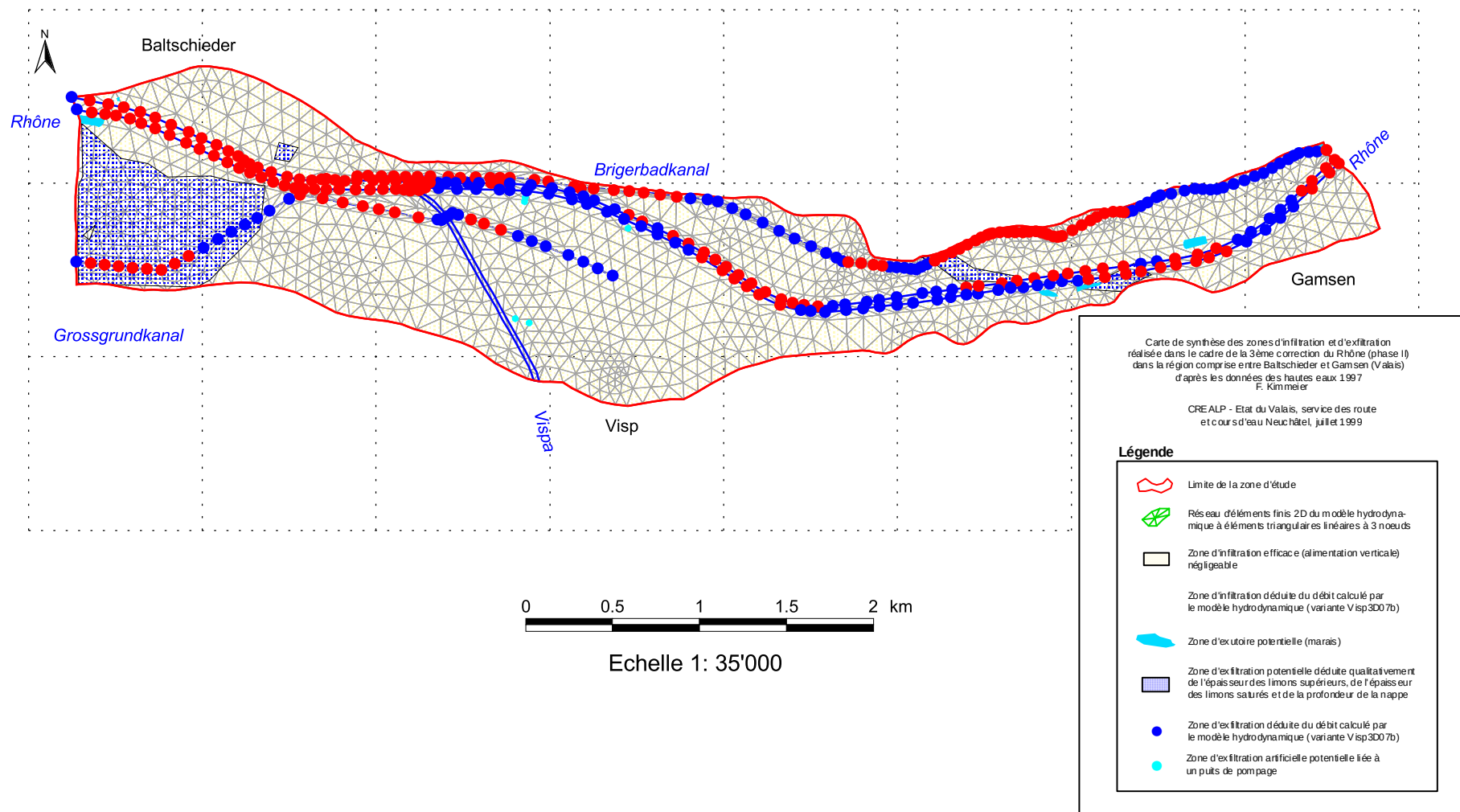


Figure 56 : Carte de synthèse des zones d'infiltration et d'exfiltration réalisée dans le cadre de la 3ème correction du Rhône (phase II) dans la région comprise entre Baltschieder et Gamsen (Valais) d'après les données des hautes 1997. Carte originale au 1: 5'000.

- c) l'étude de l'impact de parois moulées dans les digues du Rhône, lors d'une crue exceptionnelle (lit majeur complètement inondé).

Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide de modèles mathématiques à éléments finis tridimensionnels et bidimensionnels à l'aide du logiciel Feflow [Diersch, 1999].

Toutes les données utilisées dans le cadre de cette étude font partie intégrante de la base de données spatiales élaborée dans le cadre du projet Fonds national (N° 21-39357.93 et N° 2047-064-96) initié par M. J.-D. Rouiller (géologue cantonal du Valais et directeur du CREALP) et par le Dr M. Bouzelboudjen (chargé de cours et chef de projet au CHYN, Université de Neuchâtel).

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) Arc/Info 7.2 Unix [ESRI, 1995] et ArcView 3.1 Windows [ESRI, 1996a] ont été utilisés conjointement au logiciel Feflow comme pré- et post-processeurs. Cette démarche d'intégration et «d'interfaçage» entre les modèles hydrogéologiques et les SIG est décrite dans Bouzelboudjen & Kimmeier [1998].

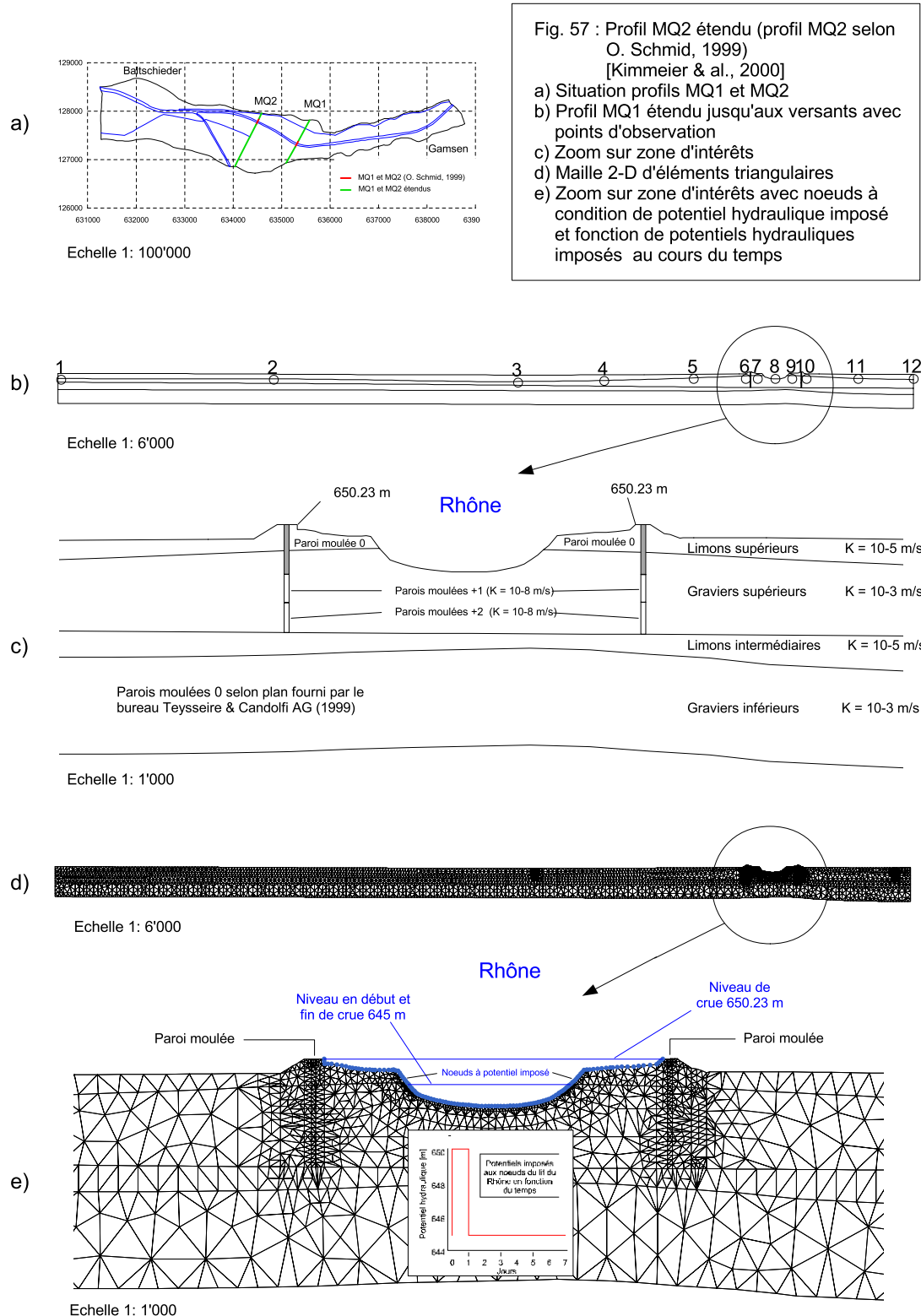
Seule l'étude de l'impact de parois moulées dans les digues du Rhône lors d'une crue exceptionnelle sera décrite ici, la description du modèle 3-D ayant fait l'objet du chapitre précédent.

Pour simuler l'effet de parois moulées dans les digues du Rhône lors d'une crue exceptionnelle, des modèles en deux dimensions (coupes verticales) tirés du modèle 3-D ont été utilisés. L'approche 2-D est suffisante pour mettre en évidence les variations de trajectoire et de vitesse des flux dans les digues du Rhône lors d'une crue soudaine. En effet, les gradients hydrauliques perpendiculaires aux digues, lors d'une crue, sont nettement supérieurs au gradient général de la nappe qui n'excède pas quelques pour mille. Par conséquent, la composante parallèle à la direction générale des écoulements dans la vallée peut être négligée lors de la crue et décrue rapide du Rhône. Les simulations ont été faites en régime transitoire, avec calcul de la nappe libre en milieu variablement saturé.

Pour l'étude de l'impact des parois moulées, les deux coupes MQ1 et MQ2 étendues, fournies par le bureau O. Schmid [1999] dont la lithologie et les paramètres hydrodynamiques (potentiels hydrauliques et conductivités hydrauliques) sont relativement bien connus, ont été modélisées. Ces coupes ont été combinées avec des profils 2-D extraits du modèle 3-D. Elles s'étendent jusqu'aux limites du modèle 3-D qui sont des limites à flux nul. Seule la coupe MQ2 sera présentée ici (Fig. 57a à 57e).

La position et la profondeur respectives des parois moulées, prévues par le bureau Teyssie et Candolfi [1998], ont été modélisées, non seulement jusqu'à la profondeur prévue dans les graviers supérieurs (parois moulées 0), mais également à une profondeur supérieure d'environ un 1/2 pour le profil MQ2 étendu (parois moulées +1). De plus, une dernière variante (parois moulées +2) simule des parois moulées atteignant les limons intermédiaires constituant ainsi, un barrage hydraulique complet (Fig. 57c).

Cette démarche a été utilisée par Bouzelboudjen et Király en 1988 et 1990. L'élaboration complexe de la coupe MQ2 étendue (géométrie et base de données des paramètres hydrauliques saturés et non saturés) a été réalisée à l'aide des SIG Arc/Info et ArcView.



Le réseau 2-D coupe MQ2 étendu comporte 5'606 éléments triangulaires linéaires avec 3'187 noeuds. Le temps de calcul, sur une station Compaq/Unix 500 AU, pour une variante, est de l'ordre de 60 minutes. Les travaux effectués sont les suivants :

génération de la géométrie et constitution de la base de données des paramètres hydrauliques saturés et non saturés à l'échelle 1: 1'000, selon le profil MQ2

- fourni, pour l'étude de l'impact de parois moulées dans les digues du Rhône (étape réalisée à l'aide du SIG Arc/Info),
2. calculs en régime transitoire avec calcul de la nappe libre et en incluant la zone non saturée, des potentiels hydrauliques et des débits maximaux perpendiculaires aux digues sans parois moulées en situation de conductivités hydrauliques homogènes et isotropes (variante 00R) et hétérogènes (variante 01R),
 3. idem mais en intégrant une conductivité hydraulique de 10^{-8} m/s pour les parois moulées (variante 02R, voir Fig. 57c),
 4. idem mais en prolongeant les parois moulées d'environ 1/2 (variante 03R),
 5. idem mais en prolongeant les parois moulées jusqu'aux limons intermédiaires (variante 04R).

Le profil MQ2, étendu jusqu'aux limites du modèle 3-D (Fig. 57a et Fig. 57b), qui correspondent plus ou moins aux limites de la vallée, permet de tester l'impact de parois moulées dans les digues du Rhône. La lithologie simplifiée de ce modèle, ainsi que son maillage, sont représentés sur la figure 57d. Les conditions aux limites imposées à flux nul sont issues du modèle 3-D (limites verticales et limite inférieure). Les potentiels hydrauliques ont été imposés sur les nœuds du lit du Rhône pour simuler une crue et une décrue. Les paramètres imposés aux milieux saturé et non saturé sont consignés dans l'annexe 7. Le modèle de Van Genuchten [1980] a été retenu pour les propriétés hydrodynamiques de la zone non saturée [Morel-Seytoux, 1988]. Une revue détaillée de la modélisation et de la paramétrisation des propriétés hydrauliques des sols est exposée dans le chapitre 2 de la thèse de Trégarot [2000] et dans les travaux de Ababou [1992] et Ababou & al. [1993 et 1996]. De nouvelles expérimentations numériques à l'aide du code Bigflow2000 offrent de nouvelles perspectives pour aborder la simulation des écoulements en zone non-saturée et en zone variablement saturée, pour différents milieux fortement hétérogènes, voire fissurés et karstiques [Trégarot, 2000].

Les résultats du profil MQ2 étendu (2 parois moulées) sont présentés ci-après. Le fond du lit du Rhône se trouve dans les graviers. Il se trouve à environ 1.70 m à l'intérieur des graviers supérieurs. Le Rhône se trouve à environ 200 m du bord droite de la vallée et à environ 1000 m de la limite gauche du modèle 3-D. Deux parois moulées ont été introduites, une dans la digue gauche du Rhône et l'autre dans la digue droite. Cinq variantes ont été testées (00R à 04R).

Pour chacune de ces variantes, on a simulé la même crue et décrue, en imposant aux nœuds situés dans le lit du Rhône, un potentiel de 650.23 m, pendant un jour, puis pendant 6 jours un potentiel de 645 m. Cette crue représente une crue extrême avant débordement par-dessus les digues du Rhône. Comme condition initiale, le modèle a été saturé jusqu'à une cote de 645 m, ce qui correspond à un niveau du Rhône situé à 4.53 m comme profondeur maximale. La crue correspond donc à une montée des eaux de 5.22 m. Le niveau du Rhône a été stabilisé, après la crue, au même niveau qu'au début, soit à 645 m. La zone non saturée avant la crue est en moyenne de 4 m au-dessous du lit majeur du Rhône. Il faut signaler que la fonction des potentiels imposés pour simuler la crue du Rhône est fortement simplifiée (en rouge dans la figure 57e). Classiquement, pour simuler une crue-décru, des fonctions triangulaires ou mieux trapézoïdales plus proche de la réalité sont préférables.

La variante 00R simule un milieu homogène avec $K = 10^{-3}$ m/s. Pour toutes les autres variantes, on a introduit un champ de conductivités hydrauliques homogène avec $K = 10^{-5}$ m/s pour les limons, et $K = 10^{-3}$ m/s pour les graviers, ce qui correspond à des conductivités hydrauliques moyennes pour ces deux couches. Les parois moulées prévues ne sont introduites que dans la variante 02R, avec $K = 10^{-8}$ m/s (paroi moulée 0, Fig. 57c). Dans la variante 03R, les parois moulées sont étendues vers le bas d'environ la moitié de leur profondeur initiale (paroi moulée +1), et dans la variante 04R, elles sont prolongées jusqu'aux limons intermédiaires, afin de créer un barrage hydraulique complet (paroi moulée +2).

Les résultats de ces 5 variantes sont représentés sous forme de graphiques montrant la variation du potentiel hydraulique pendant 7 jours (1 jour de crue et 6 jours de décrue) à 12 points de contrôle situés à une profondeur identique de 640 m (Fig. 58 à 62). Ils sont tous situés dans les graviers supérieurs, sauf le point 12 sur la rive droite. Le tableau 6 montre la valeur du potentiel après 1 jour de crue aux points 1 à 12, ainsi que la comparaison de ces potentiels hydrauliques avec et sans parois moulées. Les débits à travers le fond du lit du Rhône après 1 jour de crue sont également présentés pour toutes les variantes, ainsi que la comparaison de ces débits entre certaines variantes.

En comparant les graphiques des potentiels hydrauliques simulés pour les variantes 01R et 02R (Fig. 58, 59), on constate que l'introduction de parois moulées dans les digues jusqu'à une profondeur d'environ 10 m a un effet relativement faible. Les points 7 et 9 (situés avant les parois moulées) présentent une différence de 1 et 0 cm. Les points 6 et 10 (situés après les parois moulées) présentent une différence de 8 et 5 cm. Les autres points présentent une variation comprise entre 3 et 0 cm. Dans la variante 03R (paroi moulée +1), l'effet est un peu plus marqué, mais reste relativement faible. Les points 7 et 9 (situés avant les parois moulées) présentent une différence de 4 et 2 cm. Les points 6 et 10 (situés après les parois moulées) présentent une différence de -35 et -26 cm. Les autres points présentent une variation comprise entre -16 et -1 cm. Par contre, dans la variante 04R, où les parois moulées ont été étendues jusqu'aux limons intermédiaires, l'effet sur les points 6 et 10 (situés après les parois moulées) est très marqué, les potentiels hydrauliques chutent de -2.56 et -2.39 m. Aux points 7 et 9, situés avant les parois moulées, le potentiel augmente de 25 et 17 cm. Les autres points présentent des variations de -1.35 m à -0.03 m.

En ce qui concerne les débits simulés transitant au travers du lit du Rhône, ils suivent les variations de potentiels hydrauliques. En comparant les débits entrant à la fin de la crue (après 1 jour), on constate que l'introduction des parois moulées (parois moulées 0, variante 02R) a un effet relativement faible, soit une diminution de $-0.9 \text{ m}^3/\text{j}$, représentant une variation de -1.9% en rive gauche et -2.2% en rive droite. L'extension de cette paroi vers le bas (paroi moulée +1, variante 03R) a un effet un peu plus marqué. En rive gauche, on a une diminution de débit de $-2.60 \text{ m}^3/\text{j}$ (-5.6%), alors qu'en rive droite, la diminution est de $-1.9 \text{ m}^3/\text{j}$ (-4.7%). Par contre, l'extension de la paroi moulée jusqu'aux limons intermédiaires (paroi moulée +2, variante 04R) a un effet très marqué sur les débits. En rive gauche, les débits chutent de 46.4 à $23.0 \text{ m}^3/\text{j}$, soit une diminution de $-23.4 \text{ m}^3/\text{j}$ (-50.4%). En rive droite, les débits chutent de 40.4 à $22.6 \text{ m}^3/\text{j}$, soit une diminution de $-17.8 \text{ m}^3/\text{j}$ (-44.1%).

En conclusion, les parois moulées prévues, situées à environ 10 m de profondeur [Schmid, 1999], ont un effet relativement faible sur les potentiels hydrauliques aux points de contrôle 1 à 12, et sur les débits à travers le lit du Rhône. L'eau passe sous

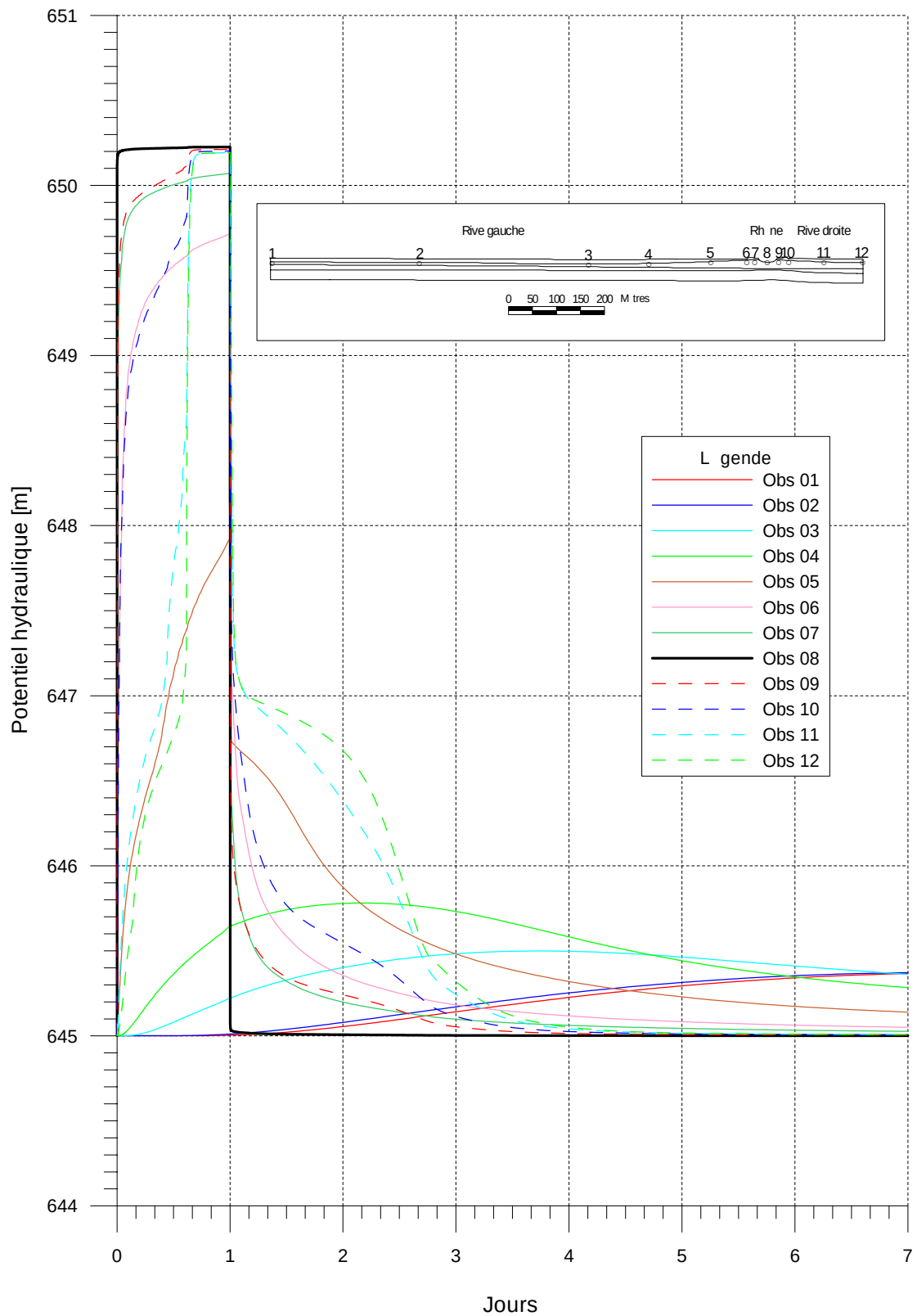


Figure 58 : Potentiels hydrauliques de la variante 00R sur le profil MQ2 étendu. Milieu homogène: $K = 10^{-3}$ [m/s], [Kimmeier & al., 2000].

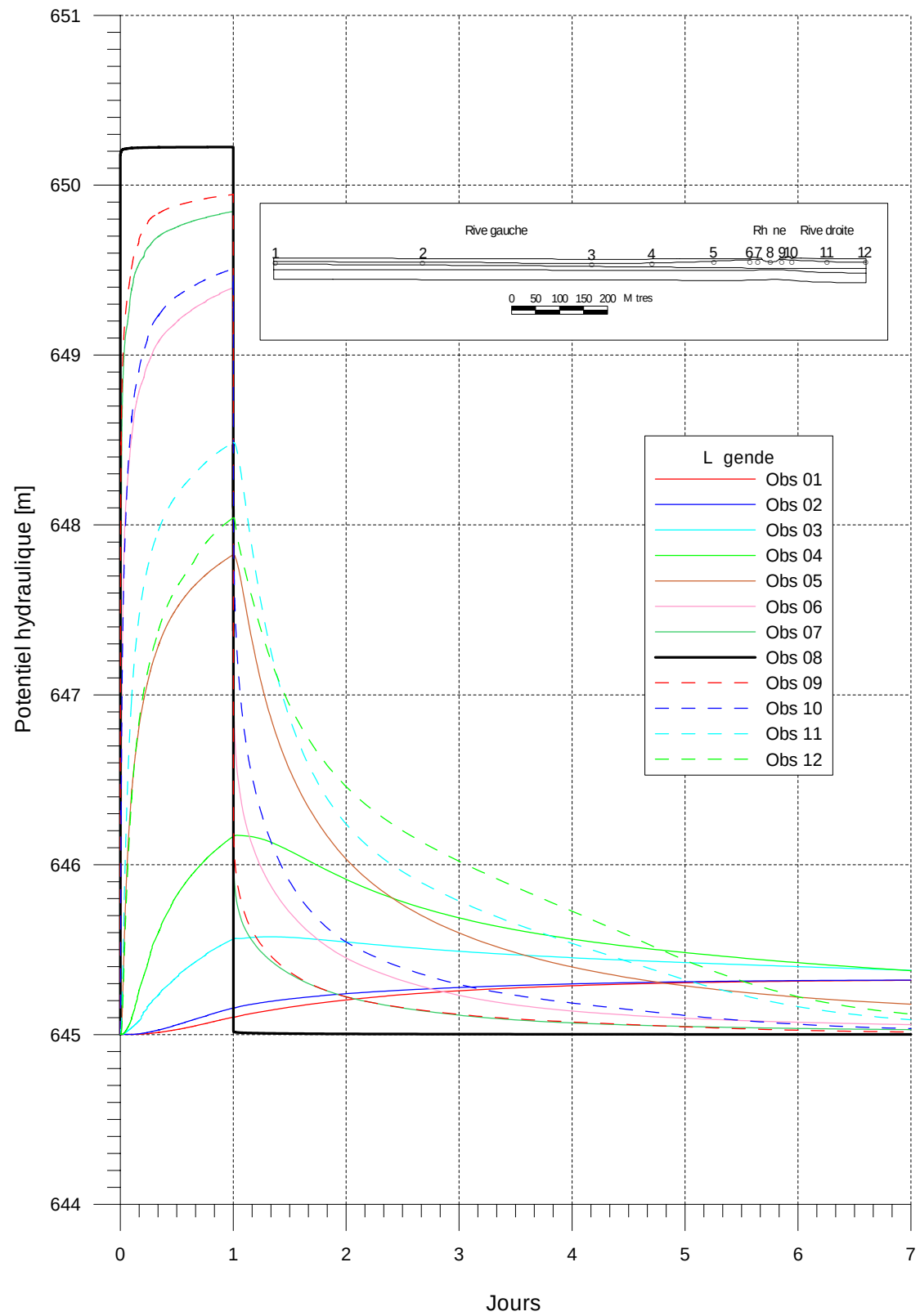


Figure 59 : Potentiels hydrauliques de la variante 01R sur le profil MQ2 étendu. Milieu hétérogène sans paroi moulée : $K_{\text{gravier}} = 10^{-3}$ [m/s], $K_{\text{limons}} = 10^{-5}$ [m/s], [Kimmeier & al., 2000].

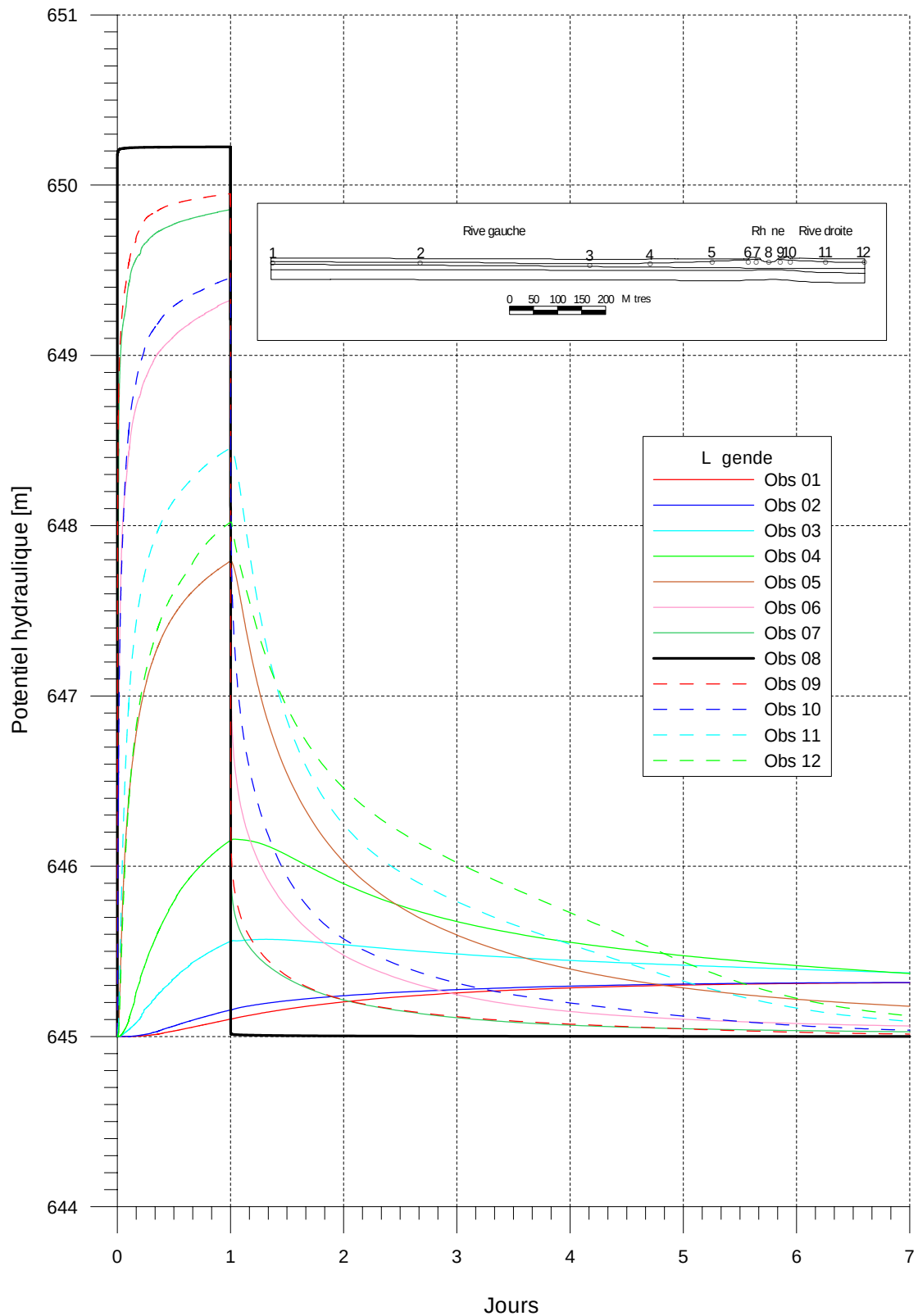


Figure 60 : Potentiels hydrauliques de la variante 02R sur le profil MQ2 étendu. Milieu hétérogène avec parois moulées, [Kimmeier & al., 2000] : $K_{\text{gravier}} = 10^{-3}$ [m/s], $K_{\text{limons}} = 10^{-5}$ [m/s], $K_{\text{paroi moulée}} = 10^{-8}$ [m/s].

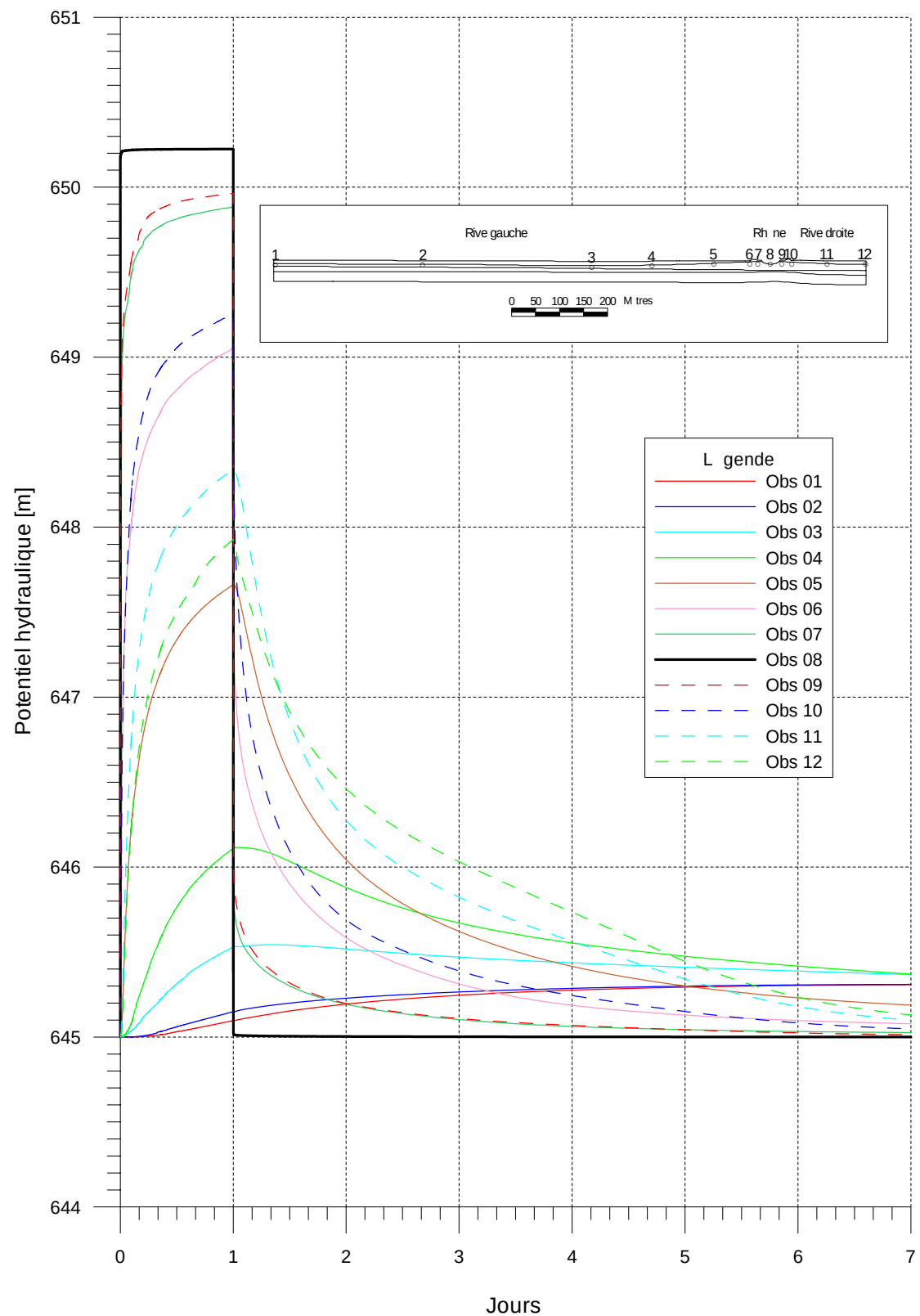


Figure 61 : Potentiels hydrauliques de la variante 03R sur le profil MQ2 étendu. Milieu hétérogène avec parois moulées +1, [Kimmeier & al., 2000] : $K_{\text{gravier}} = 10^{-3}$ [m/s], $K_{\text{limons}} = 10^{-5}$ [m/s], $K_{\text{paroi moulée +1}} = 10^{-8}$ [m/s]

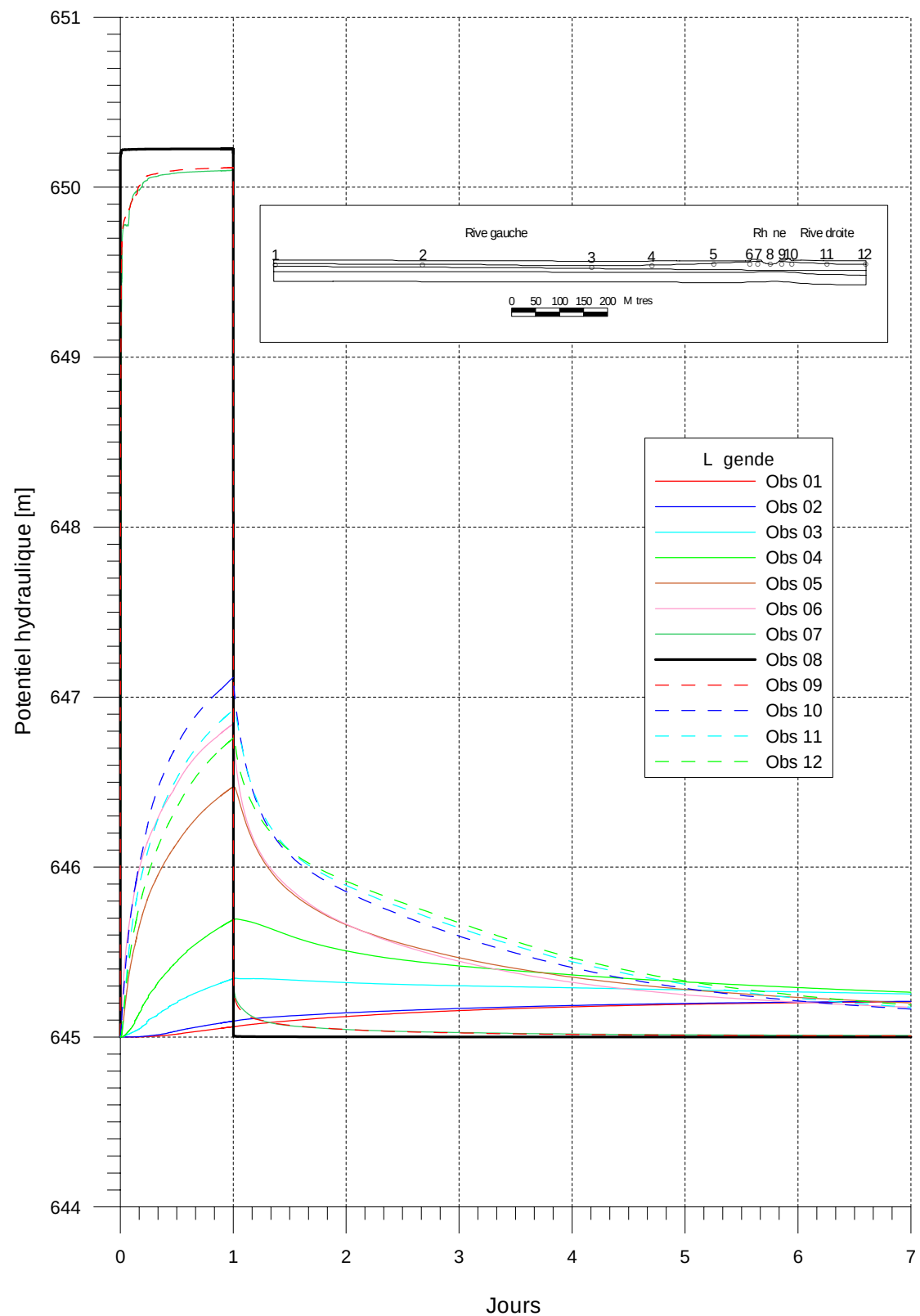


Figure 62 : Potentiels hydrauliques de la variante 04R sur le profil MQ2 étendu. Milieu hétérogène avec parois moulées +2, [Kimmeier & al., 2000]: $K_{\text{gravier}} = 10^{-3}$ [m/s], $K_{\text{limons}} = 10^{-5}$ [m/s], $K_{\text{paroi moulée +2}} = 10^{-8}$ [m/s]

les parois moulées. Les flux transitant à travers ces parois très peu perméables ($K = 10^{-8}$ m/s) sont quasi nuls, ce qui aura pour effet de diminuer considérablement l'effet de «renard hydraulique», et par conséquent, de protéger les digues lors de crues exceptionnelles. L'extension des parois moulées jusqu'aux limons intermédiaires diminue les débits de -50.4% à travers le lit du Rhône en rive gauche, et de -41.2% à travers le lit du Rhône en rive droite.

5.2 Simulation 3-D d'une pollution fictive liée à la décharge de Gamsen

La 2^{ème} application du modèle 3-D, liée à la base de données hydrogéologiques développée au cours du Fonds national, simule une pollution fictive liée à la décharge de Gamsen. Cette application se base sur les données des travaux antérieurs réalisés par Rossier [1989, 1990], qui a simulé la pollution de la nappe du Rhône en amont de Visp à l'aide d'un modèle 2-D coupe, dont le tracé correspond à une ligne de courant calculée par Marion Geister [1988] à l'aide de FEM301 en 3-D [Király, 1985]. Il a utilisé le code Sutra développé par Voss de l'US Geological Survey [1984]. Pour réaliser son étude mandatée par la Lonza AG, il s'est basé sur les travaux de Marion Geister qui a analysé pendant plusieurs années (1979 à 1986) l'aniline, le phénol, le pH, le TOC (Total Organic Carbon), l'ammonium, et les chlorures [Geister & Burger, 1986]. De ces études, il ressort que la qualité de l'eau de la nappe était gravement affectée par la pollution de la décharge entre Gamsen et Lalden. Depuis 10 ans, grâce aux mesures d'assainissement de la décharge, entreprise par la Lonza, la qualité des eaux s'améliore (communication orale de P. Ornstein, 2001).

Cette application n'a pas pour but d'étudier dans le détail la pollution liée à la décharge, mais montre la facilité de mise en œuvre, à partir d'une base de données hydrogéologiques d'un modèle 3-D (écoulement-transport) donnant des résultats plus proches de la réalité. Avec le modèle 3-D on s'affranchit des erreurs liées à la nature bidimensionnelle du modèle. L'usage d'une coupe présente l'inconvénient de ne pas prendre en considération ce qui se passe de part et d'autre de la ligne de courant.

5.2.1 Bases théoriques [in Rossier, 1990]

Partant de l'hypothèse que la densité du fluide est constante, c'est-à-dire que les concentrations en polluant sont assez faibles pour ne pas influencer sur la densité du fluide, il est possible d'écrire l'équation aux dérivées partielles régissant le transport de matière de la manière suivante [De Marsily, 1981] :

$$\text{Div} \left(-\overline{\overline{D}} \overrightarrow{\text{grad}} C \right) + \vec{u} \overrightarrow{\text{grad}} C + Q = \omega \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2)$$

où

C est la concentration de soluté [Kg/m³]

$\overline{\overline{D}}$ est le tenseur de dispersion [m²/s]

$\vec{u}$ est le vecteur vitesse [m/s]

t est le temps [s]

Q est le terme de source. il représente un flux [Kg/s.m³]

ω est la porosité du milieu [1]

Dans cette équation,

$$\vec{u} \overrightarrow{\text{grad}} C$$

représente la partie convective du transport : quantité de matière transportée par le flux d'écoulement moyen.

$$- \text{div} \left(\overline{\overline{D}} \overrightarrow{\text{grad}} C \right)$$

représente la partie dispersive du transport, où les variations de flux d'écoulement, liées à la complexité géométrique du milieu, provoquent des hétérogénéités autour de l'écoulement moyen, et une dispersion du soluté autour de l'axe moyen d'écoulement.

$$\omega \partial C / \partial t$$

représente la variation de concentration par unité de temps.

A cette équation, il faut ajouter des conditions aux limites S du système à étudier :

C est constante sur une partie de S

la concentration est donnée sur une portion de limite de l'aquifère et/ou,

dC/dt est constant sur une partie de S

c'est une condition de flux ; dans ce cas, une concentration est injectée ou retirée, par unité de temps, sur une portion de l'aquifère.

Les termes de source, représentés globalement par le terme Q, recouvrent l'ensemble des phénomènes de production et de substitution de soluté. Parmi ces phénomènes, il est possible de citer :

- les échanges d'ions,
- la dissolution-cristallisation des substances présentes dans l'eau,
- l'adsorption-résorption.

La mise sous forme d'équations de ces phénomènes est compliquée, et le couplage avec le modèle de transport difficile. Une représentation simple de l'adsorption-résorption peut être prise en considération. Dans ce type de phénomène, un élément contenu dans la phase fluide de l'eau peut être piégé dans la matrice poreuse. Il existe une relation établissant les échanges entre les deux phases :

$$\log F = \log K + (1/n) \log C \quad (3)$$

où

F est la concentration dans la matrice poreuse

C est la concentration dans la phase aqueuse

K [m^3/kg] et n [1], sont des paramètres de distribution de la concentration entre les deux phases.

Les cas les plus généraux font état de relations de type :

- linéaire, quand le paramètre n est égale à 1,

- Freundlich, quand le paramètre n est différent de 1.

Ces relations évoluent avec la température.

5.2.2 Choix du polluant modélisé, et conditions aux limites

Le choix du polluant modélisé s'est porté sur les chlorures, car comme le signale Yvan Rossier [1990], le cas des chlorures représente un cas idéal de pollution, en ce sens que cette substance peut être considérée comme un bon traceur. Il n'existe pas d'interaction avec la matrice poreuse.

Feflow a été utilisé pour le couplage écoulement-transport de masse [Diersch, 1999]. La variante utilisée correspond aux calculs 3-D des écoulements saturés (variante 06b) de la 3^{ème} correction du Rhône (Ann. 6). Les conditions aux limites correspondent aux basses-eaux 1992 et les débits pompés aux puits de la Lonza Sandmatt b1 et Nord 83 sont respectivement de 0.06 et 0.14 m³/s. L'alimentation distribuée (infiltrations efficaces) imposée est nulle. Le calcul effectué en 3-D simule une pollution de chlorures, dont la source se trouve dans la décharge de Gamsen, en aval du point de contrôle N° 19 (Fig. 63). La source de pollution est ponctuelle et correspond à l'injection dans le système de 250 mg/l pendant 10 ans, sans interruption. Le point d'injection est situé à la base des limons supérieurs. Toutes les limites du modèle sont considérées à flux massique nul. Seuls les chlorures provenant de la pollution sont pris en compte. Les chlorures présents dans l'état naturel des eaux souterraines sont négligés.

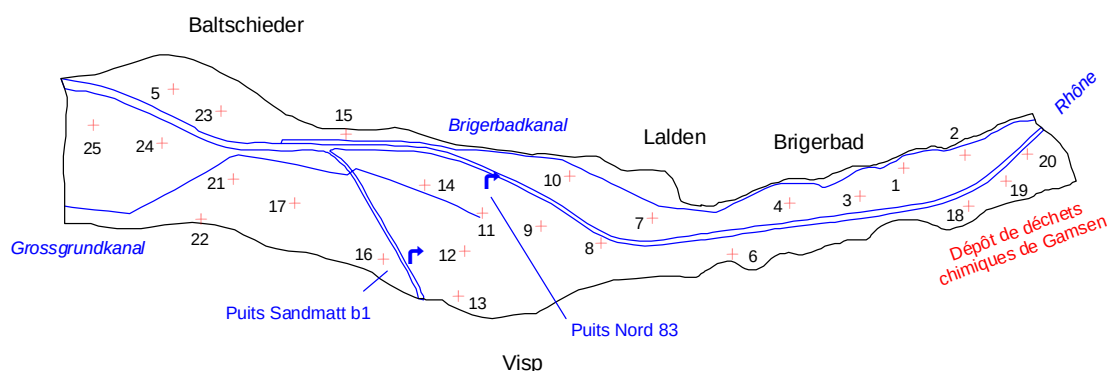


Figure 63 : Localisation des 25 points de contrôle de la propagation de la pollution fictive provenant de la décharge de Gamsen (voir Fig. 64, 65a-e)

Pour l'ensemble de l'aquifère, la dispersivité est anisotrope. La dispersivité longitudinale (α_l), dans le sens du vecteur moyen d'écoulement est de l'ordre de

$$\alpha_l = 45 \text{ m}$$

et la dispersivité transversale (α_t), perpendiculaire au vecteur moyen d'écoulement est de l'ordre de

$$\alpha_t = 10 \text{ m}$$

Enfin, la porosité des limons est de l'ordre de

$$\omega_{Ls} = 0.05$$

et celle des graviers est de

$$\omega_{Gs} = 0.10 \text{ m}$$

Ces valeurs issues de la littérature sont reprise par Rossier [1990].

5.2.3 Résultats

La figure 63 montre la situation de la décharge de Gamsen. Le point d'injection des chlorures se situe immédiatement en aval du point N° 19. Elle montre également, la position des 25 points de contrôle pour détecter l'arrivée du front de pollution, et les 2 puits de pompage de la Lonza, Sandmatt b1 et Nord 83.

La figure 64 montre les temps d'arrivée du polluant aux différents points de contrôle, ainsi que la concentration maximale atteinte en chaque point. Par exemple, la concentration maximale (54 mg/l) s'observe au point de contrôle 18, situé à 300 mètres en aval du point d'injection. Le front de pollution est détectable, à ce point, après 1 mois, et la concentration maximale est atteinte après 2 ans ½.

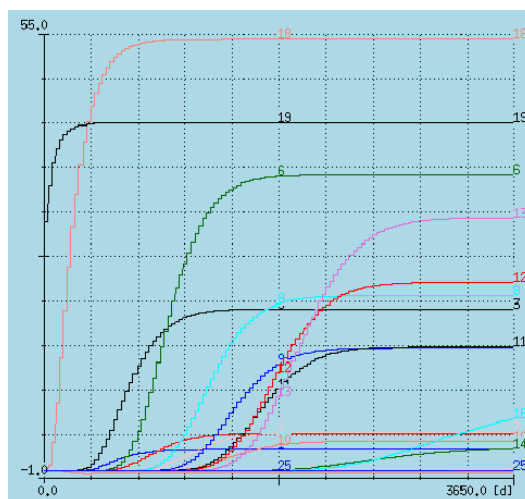


Figure 64 : Concentration locale de polluant en mg/l sur une durée de 10 ans au 25 points de contrôle (voir Fig 63)

La figure 65a-e montre l'avancée du front de pollution (représenté à la base des graviers supérieurs) respectivement après 4 mois, 1 an, 2 ans, 6 ans et 10 ans. On constate que la pollution reste cantonnée en rive gauche principalement. Le Rhône jouant un rôle de drain et la direction générale des écoulements se situant dans le sens de la vallée, ils empêchent la pollution de se répandre en forte concentration en rive droite.

Il est intéressant de remarquer que le modèle 2-D d'Yvan Rossier ne pouvait pas modéliser ce phénomène, car les écoulements 2-D étaient forcés dans le sens de la coupe, et par conséquent, traversaient le Rhône pour s'écouler en rive droite.

La pollution est perceptible aux puits de la Lonza après environ 3 ans ½, et le maximum de concentration est atteint après environ 8 ans. La situation en aval des puits de pompage reste relativement stable. Depuis la 6^{ème} année, jusqu'à la fin de la simulation, la propagation reste relativement cantonnée. On remarque enfin le rôle important des 2 puits de la Lonza qui jouent le rôle de barrage hydraulique en freinant la propagation de la pollution plus en aval.

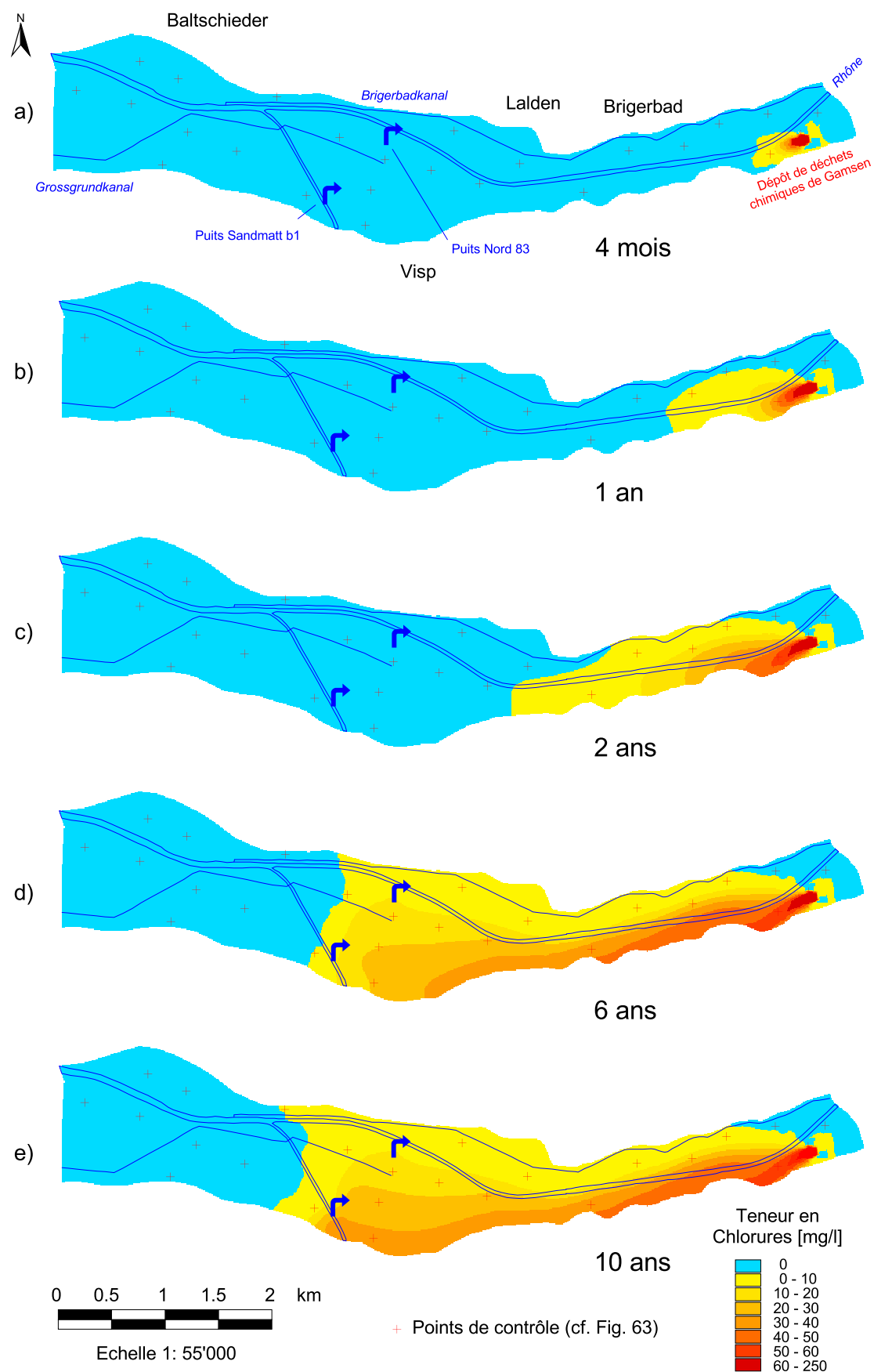


Figure 65a-e : Avancée du front de pollution pendant 10 ans depuis la décharge de Gamsen à la base des graviers supérieurs. Résultats issus d'un calcul 3-D d'un modèle hydrodynamique couplé à un modèle 3-D de transport

6. RÉFÉRENCES

- Ababou R., Saghar B., Wittmeyer G., 1992. *Testing procedures for spatially distributed flow models*. Advances in Water Resources, 15, 181-198.
- Ababou R., Bagtzoglou A.-C., 1993. *Bigflow: a numerical code for simulating flow in variably saturated, heterogeneous geologic media*. Theory and User's Manual, version 1.1, 1993. NUREG/CR-6028, USA.
- Ababou R., Trégarot G., Bouzelboudjen M., 1996. *Variably saturated subsurface flow and perched water tables : Effects of heterogeneity, slope angle, and hydrologic regime*. International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modeling (ModelCare'96), AIHS, Golden, Colorado, USA, 24-26 Sept. 1996, pp. 1-10.
- Barazzuoli P., Bouzelboudjen M., Cucini S., Király L., Menicori P., Salleolini M., 1999. *Olocenic alluvial aquifer of the River Cornia coastal plain (southern Tuscany, Italy) : database design for groundwater management*. Environmental geology 39 (2), 123-143, Springer-Verlag.
- Batelaan O., Wang Z.-M., De Smedt F., 1996. *An adaptative GIS toolbox for hydrological modelling*. Proceeding of HydroGIS 96 : Application of Geographic Information System in Hydrology and Water Resources Management, K. Kovar et H.P. Nachnebel (eds), IAHS, April 16-19, Vienna, Austria : 3-17.
- Bédard Y., Caron C., Maamar Y., Moulin B., Vallière D., 1996. *Adapting data models for the design of spatio-temporal databases*. Computer Environment and Urban Systems, 20 (1) : 19-41.
- Bel Hadj Kacem M.S., 1998. *Modélisation numérique de l'hydrologie pour l'aide à la gestion des bassins versants par l'utilisation conjointe des systèmes d'information géographique et de la méthode des éléments finis*. PhD thesis, Université Laval, Québec, Canada.
- Bouzelboudjen M., Király L., 1988. *Premiers commentaires sur la simulation 3-D pour les trois états: Rhône état naturel, déplacé et final avec ouvrages réalisés*. Rapport inédit., 15 p., 27 fig., novembre 1988, Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel - Service des Routes Nationales Suisses, Sion.
- Bouzelboudjen M., Király L., 1989. *Modélisation tridimensionnelle de la nappe phréatique de la plaine du Rhône à Viège*. Troisièmes Journées Valaisannes des Sciences Naturelles, Suisse, avril 1989. Bulletin Murithienne 107 (1989) p. 69-74.
- Bouzelboudjen M., 1990a. *Étude de la nappe alluviale de la plaine du Rhône à Viège par modèle mathématique tridimensionnelle*. État des travaux. 4 p., 12 fig., 3 ann., Rapport Inédit. février 1990, Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel - Service des Routes Nationales Suisses, Sion.
- Bouzelboudjen M., 1990b. *Influences du dimensionnement des ouvrages de génie civil sur l'écoulement souterrain naturel à Viège (Canton du Valais)*. 10 p., 20 fig., 1 ann., Rapport Inédit décembre. 1990, Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, Suisse - Service des Routes Nationales Suisses, Sion.
- Bouzelboudjen M., 1991. *3-D Modelling of the Rhône Aquifer at Visp (Valais Switzerland)*. In : Computer Methods and Water Ressources. 4th Vol., 2nd Internat.

- Conf. Rabat, + In : Bull. Du Centre d'Hydrogéol. De Neuchâtel. N° 10, p. 83-90, 8 fig.
- Bouzelboudjen M., 1996. *Base de Données et Systèmes d'Information Spatiale*. Cours Université de Neuchâtel. Inédit.
- Bouzelboudjen M., Kimmeier F., 1997a. *Système d'information géographique, méthodes géostatistiques et simulation numérique 3-D des écoulements souterrains en milieu poreux fortement hétérogène*. GeolGIS-CH'97 Atelier sur l'application des SIG en géologie. Service Hydrologique et Géologique National (SHGN), Berne, Suisse, 5 décembre 1997, p. 18-19.
- Bouzelboudjen M., Király L., Kimmeier F., Zwahlen F., 1997b. *Coupes géologiques et hydrogéologiques, 2^{ème} partie : hydrogéologie. Représentation schématique des écoulements souterrains en Suisse*. Planche 8.3 de l'Atlas Hydrologique de la Suisse. Institut de Géographie de l'Université de Berne, Office Fédéral de la Topographie Berne et Service Hydrologique et Géologique National Berne.
- Bouzelboudjen M., Kimmeier F., 1998a. *GIS Vector and Raster Database, Advanced Geostatistics, 3-D Groundwater Flow and Transport Modeling in Strongly Heterogeneous Geologic Media : An Integrated Approach*. The Eighteenth Annual Environmental Systems Research Institute Users Conference. San Diego, California, USA - 27-july 1998.
- Bouzelboudjen M., Király L., 1998b. *Étude de l'influence de la troisième correction du Rhône dans la région Baltschieder-Lalden sur les écoulements souterrains de la nappe alluviale : Premiers résultats de simulations numériques 3-D*. Université de Neuchâtel. Novembre 1998, 8 p., 14 fig., 3 pl. hors-texte. Inédit.
- Bouzelboudjen M., Graf M., 1999. *Analyse Numérique de Données Spatiales Dans les Sciences de l'Environnement (ANDSPAT)*. Cours formation continue. Université de Neuchâtel. Inédit.
- Burrough P.A., McDonell R. A., 1998. *Principles of Geographical Information Systems. Spatial Information Systems and Geostatistics*. Oxford University Press, 333 p.
- Caloz R., Collet C., 1997. *Geographic information systems (GIS) and remote sensing in aquatic botany : methodological aspects*. Aquatic botany, 58 : 209-228.
- Chauvet P., 1992. *Traitement des données à support spatial : la géostatistique et ses usages*. Centre de Géostatistique. École des mines de Paris, Fontainebleau, France, 43 p., 16 pl.
- Chilès J.P., 1977. *Géostatistique des phénomènes non stationnaires*. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Nancy-I, France. 152 p.
- Claramunt C., Thériault M., 1995. *Managing time in GIS – An event-oriented approach. Recent advances on temporal databases*, J. Clifford et A. Tuzhilin (eds), Zürich, Suisse : 23-42
- Clavien F., 1987 : *Routes Nationales Suisses. Route classe N9. Teilstrecke Visp West - Visp Ost Prpket gàmàrae 1 :5'000*. Étude géotechnique préliminaire Rapport géotechnique préliminaire inédit, N° 3.P6 40 31.226. (J.-M. Wicht).

- Clavien F, 1988 : *Schweizerische Nationalstrassen Str Nr N9 Teilstrecke Visp West - Visp Ost Generelles Projekt Hydrogeologische Studie Hydrogeologischer Zwischenbericht*, N° 3 P6 50 31 397 (G. Bianchetti).
- Clavien F., 1990 : *Schweiz. Nationalstrassen. Str. Nr. N9 Abschnitt Gampel - Brig-Glis. Teilstrecke Visp West - Visp Ost. Hydrogeologische Studie. Rapport hydrogéologique 1. Synthèse et traitement* Mads März 1990, N° 3 P6.40.31.579 Beilage 1 (G. Bianchetti).
- Cleveland W. S., 1993. *Visualizing Data*. AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey.
- Collet C., 1992. *Systèmes d'information géographique en mode image*. L. Maystre (eds). Presses polytechniques et universitaire romande, Lausanne.
- Dagan G., 1985. *Stochastic modeling of groundwater flow by unconditional and conditional probabilities, the inverse problem*. Water Resour. Res., 21 (1), p. 65-72.
- Davis John C., 1986. *Statistics and data analysis in Geology* (second edition). J. Wiley & Sons, Inc., New York, 646 p.
- De Marsily G., 1981. *Hydrogéologie quantitative*. Masson, Paris, 215 p.
- Delhomme, J.P., 1976. *Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau*. Thèse de Docteur-Ingénieur. Université Pierre & Marie Curie, laboratoire de géologie dynamique.
- De Smedt F., 1997. *IHSI. IDRISI hydrological simulation interface*, User manual, Laboratory of hydrology, Free University Brussels.
- Diersch H.-J. G. & al., 1999. *Interactive, Graphics-based Finite-Element Simulation System FEFLOW for Modeling Groundwater Flow. Contaminant Mass and Heat Transport Processes*. User's Manual Version 4.8. WASY Institute for Water Ressources Planning and System Research Ltd Berlin.
- Dong A., 1990. *Estimation géostatistique des phénomènes régis par des équations aux dérivées partielles*. Thèse de Docteur en Géostatistique, École des Mines de Paris, Fontainebleau, 262 p.
- Ebener S., Bouzelboudjen M., Wildi W., 1998. *Éléments hydrogéologiques dans l'étude de l'influence de deux décharges sur le système aquifère de la plaine du Rhône (Valais central, Suisse)*. Archs., Sci. Genève, Vol. 51, Fasc. 2, 153 – 170.
- Ebener S., 2000. *Utilisation d'un SIG en mode raster pour la spatialisation du bilan hydrique à l'échelle mensuelle. Application au bassin versant de l'Allondon (France, Suisse)*. Thèse, Université de Genève, 268 p., Terre et Environnement Vol. 20.
- Ebener S., Wildi W. , Bouzelboudjen M., Jaquet J.M., Fortin J.P., 2001. *Contribution of a GIS in the spatial modeling of the hydrologic balance of Allondon watershed (France, Switzerland)* 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal .
- ESRI, 1995. *Understanding GIS. The ArcInfo Method*. Version 7 for Unix and OpenVMS. Environmental Systems Research Institute, California, USA.
- ESRI, 1996a. *Getting to know ArcView*. Environmental Systems Research Institute, California, USA.

- ESRI, 1996b. *The GIS Glossary*. Environmental Systems Research Institute, Inc.
- Fetter C.W., 1994. *Applied Hydrogeology*. Third Edition, Prentice-Hall Inc., London.
- Flamm Ch., 1994. *Géostatistique et statistiques multivariées sur 3 cas d'études de sols contaminés*. Diplôme de Minéralogie présenté le 3 août 1994. Université de Lausanne, Institut de Minéralogie.
- Fröhlich Gugler A., 1997. *Étude de la variabilité spatiale des propriétés hydrogéologiques en milieu poreux hétérogènes : Application à la Vallée du Rhône entre Baltschieder et Gamsen (Valais)*. Travail de diplôme du cycle postgrade interuniversitaire EPFL et UNI-NE en hydrologie et hydrogéologie, spécialisation en hydrogéologie. Avril 1997. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
- Geister M., Burger A., 1986. *Interprétation hydrogéologique des analyses chimiques de la nappe sous la décharge et en aval (période de 1979 à 1986)*. Mandat de LONZA AG, Werkschutz, Visp. Centre d'hydrogéologie, Université Neuchâtel.
- Geister-Frantz M., 1988. *Modèles Gamsen-Viège: Construction et mise en service du modèle hydrodynamique pour la simulation des conditions naturelles (échanges Rhône-nappe)*. Rapport, Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel, Suisse, Inédit.
- Geister-Frantz M, Burger A., 1988. *Pollution de la nappe alluviale par la décharge de Gamsenried. Modèles Gamsen-Viège, Construction et mise en service du modèle hydrodynamique pour la simulation des conditions naturelles (échanges Rhône-nappe)*. N° Rapport : BG88/2. Mandat des : Département des travaux publics, Sion, Routes Nationales N9 et LONZA AG, Abteilung Umweltschutz, Visp Université de Neuchâtel.
- Gelhar L.W., 1993. *Stochastic Subsurface Hydrology*. Prentice Hall, Englewood, Cliffs, NJ.
- Geotest, 1992. Route Nationale 9, Commune de Lalden, Tronçon Viège Ouest - Viège Est. *Essais de Flowmeter Rapport V9215L*. Auteur du projet : Département des travaux publics du Canton du Valais Service des Routes Nationales, Sion. Martigny.
- Geotest, 1997. *Hydrogéologie de la nappe alluviale de la plaine du Rhône (Projet de recherche FNRS VII). Mesures de flowmètre dans la région de Visp (Viège). Rapport V9704*. Centre de Recherche Scientifiques Fondamentales et Appliquées de Sion (CRSFA).
- Geotest, 1998. *Hydrogéologie de la nappe alluviale de la plaine du Rhône (Projet de recherche FNRS VII). Mesures de flowmètre dans la région de Visp (Viège). Rapport V9704.1*. Centre de Recherche Scientifiques Fondamentales et Appliquées de Sion (CRSFA).
- Golay, 1992. *Modélisation des systèmes d'information à référence spatiale et de leurs domaines d'utilisation spécialisés – aspects méthodologiques, organisationnels et technologiques*. PhD thesis N° 1080, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- Isaaks E.H., Srivastava M.R., 1989. *An introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, 561 p.
- Isatis *The Geostatistical Key*, 1997. Geovariances, Paris. Ver 3.1 Unix.

- Jaquet J.M., 1996. *Applications SIG aux sciences de la terre : Introduction*. Polycopié du cours de 3^{ème} cycle, 17-20 juin 1996. Département de Géologie, Université de Genève.
- Kimmeier F., Perrochet P., Király L., Andrews R.-W., 1985. *Simulation par modèle mathématique des écoulements souterrains entre les Alpes et la Forêt Noire*. 169 p., NTB 84-50, Cédra, Baden, Switzerland.
- Kimmeier F., Wacker C., Perrochet P., Hufschmied P., Király L., 1986. *Code verification of the groundwater flow model FEM301. Hydrocoin - Level 1 - Case 2 and Case 6*, 65 p., NTB 86-22, CÉDRA, Baden, Switzerland.
- Kimmeier F., 1997. *Méthodologie d'étude d'un système aquifère dans une vallée alluviale en milieu Alpin: exemple de la vallée du Rhône, Valais central*. Deuxième phase, rapport intermédiaire inédit. Projet Fonds National de la Recherche Scientifiques (FNRS) N° 20-47064.96, CRSFA-CHYN, 59 p., 40 fig. Sion, Suisse.
- Kimmeier F., 1999a. *Méthodologie d'étude d'un système aquifère dans une vallée alluviale en milieu Alpin: exemple de la vallée du Rhône, Valais central*. Rapport final, deuxième phase, inédit. Projet FNRS N° 20-47064.96, CREALP-CHYN, 87 p., 57 fig.
- Kimmeier F., 1999b. *Élaboration d'une carte des infiltrations et exfiltrations pour les hautes eaux 1997 à l'aide d'un SIG (Arc/Info-ArcView) dans le cadre de la 3ème correction du Rhône*. CREALP, inédit.
- Kimmeier F., 2000. *Validation des mesures de potentiel hydraulique des basses eaux 1992 dans la nappe alluviale entre Baltschieder et Gamsen et élaboration d'une carte piézométrique dans le but de modéliser les écoulements souterrains par modèle mathématique tridimensionnel*. CREALP, inédit.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Perrochet P., 2000. *Simulations numériques 2-D et 3-D des écoulements souterrains saturés et non saturés en nappe libre pour les états permanent et transitoire dans la région de Baltschieder-Gamsen*. Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel, 26 p., 37 fig., 8 tab., rapport inédit.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Eisenlohr L., Rossier Y., Zwahlen F., 2001a. *A statistical analysis of hydro-climatic stress on karst aquifer system (Switzerland)*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Eisenlohr L., Rossier Y., 2001b. *Drought risk analysis applied to porous Swiss aquifers*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Ornstein P., Weber I., Rouiller J.-D., 2001c. *Geohydrological parameter identification and groundwater vulnerability to pollution: A Swiss case study*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Ababou R., Ribeiro L., 2001d. *Travel path uncertainty : a case study combining stochastic and deterministic hydraulic models in the Rhône valley, Switzerland*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Király L., 2001e. *3-D groundwater modeling at national scale*. Dans ce volume partie C1.

- Kinzelbach W., 1986. *Groundwater modelling*. Elsevier, 333 p.
- Király L., 1985. FEM301 - *A three Dimensional Model for Groundwater Flow Simulation*. Cédra 84-49.
- Király L., & Bouzelboudjen M., 1988a. *Étude hydrogéologique de la nappe souterraine par modélisation tridimensionnelle dans le secteur Visp West - Lalden. État Rhône naturel*. Rapport inédit, mars 1988, Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel. Inst. de Géologie. Neuchâtel.
- Király L., 1988b. *Large scale 3-D groundwater flow modelling in highly heterogenous geologic medium*. E. Custudio et al. (eds), *Groundwater flow and quality modelling*, p. 765-755.
- Király L., 1998. FEN' code family (Finite Element Neuchâtel) - *Three Dimensional Model for Groundwater Flow and Transport Simulation Codes (VAX-VMS, UNIX & Windows Systems)*. Hydrogeological Centre of Neuchâtel. Unpublished.
- Kitadinis P.K., 1997. *Introduction to Geostatistics, Applications in Hydrogeology*. Stanford University. Cambridge University Press. 249 p.
- Kovar K, & Nachnebel H.P, 1993. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*. IAHS Publication N° 211, 693p.
- Kovar K, & Nachnebel H.P, 1996. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*. IAHS Publication N° 235.
- Maidment D.R., 1996. *Environmental modeling within GIS. GIS and Environmental Modeling with GIS : Progress and Research Issues*, M.F. Goodchild & al (eds), Ford Collins : *GIS World* : 315-324.
- Matheron G., 1963. *Traité de Géostatistique Appliquée*. Edition du B.R.G.M., Paris (Ouvrage de Géostatistique Linéaire, orienté vers les applications minières).
- Matheron G., 1973. *The intrinsic random function and their applications*. *Advances in Applied Probability*, 5 : 439-468.
- Maxwell T. & Costanza R., 1997. *An open geographic modeling environment*. *Simulation*, 68 (3) : 175-185.
- Meijerink Allard M.J., De Brouwer Hans A.M., Mannaerts Chris M., Valenzuela Carlos R., 1994. *Introduction to the Use of Geographic Information Systems for Practical Hydrology*. Published with the support of : The International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), The Netherlands and UNESCO, Division of Water Sciences, France. 243 p. ITC Publication Number 23.
- Mendonça Santos M.L., Guenat C., Bouzelboudjen M., Golay F., 2000. *Three-dimensional GIS cartography applied to the study of the spatial variation of soil horizons in a Swiss floodplain*. *Geoderma* 97, p. 351-366.
- Mizell S.A., 1980. *Stochastic flow analysis of spatial variability in two-dimensional groundwater flow with implications for observation-well-network design*. PhD, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, New Mexico.
- Morel-Seytoux H.J., 1988. *Unsaturated flow in hydrologic modeling* ; NATO ASI Series, Vol. 275, Kluwa Verlag.
- Ornstein, P., 1997. *Jaugeage des canaux*. Rapport inédit CRSFA. Valais, Suisse.
- Ornstein, P., 1999. *Jaugeage des canaux*. Rapport inédit CRSFA. Valais, Suisse.

- Ornstein, P., Kimmeier F., Crestin M., 1999. 3^{ème} correction du Rhône : secteur Gamsen - Baltschieder. *Essais d'infiltration, octobre/novembre 1999*, CREALP, rapport inédit 3 p., 7 fig., 12 tab. 3 ann.
- Oukaci S., 1997a. *Mesures sur le terrain des caractéristiques physico-chimiques à l'aide de la sonde multi-paramètres dans 23 piézomètres*, CREALP, inédit.
- Oukaci S., 1997b. *Utilisation du système d'information géographique, de la géostatistique et de la simulation numérique des écoulements souterrains 2-D par éléments finis dans la caractérisation hydraulique d'un milieu poreux fortement hétérogène : Application au système aquifère de la plaine du Rhône entre Baltschieder et Gamsen. (Décembre 1997)*. Mémoire du cycle postgrade en hydrogéologie - Université de Neuchâtel et École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
- Pannatier Y., 1996. *Statistics and Computing. Variowin, Software for Spatial Data Analysis in 2D*. Springer. 91 p.
- Perrochet P., Burger A., 1989. *Calage du modèle 3-D des écoulements souterrains en régime permanent dans la région de Gamsen*. Dép. des travaux publics Sion, Routes nationales, Université Neuchâtel.
- Pouliot J., 1999. *Définition d'un cadre géosémantique pour le couplage des modèles prévisionnels de comportement et des SIG – Application pour les écosystèmes forestiers*. PhD thesis N°2087, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- Rossier, Y., 1989. *Modélisation de la pollution de la nappe du Rhône par la décharge de Gamsenried (VS)*. Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel, Suisse.
- Rossier, Y., 1990. *Simulation de la pollution de la nappe du Rhône en amont de Viège (Vs) : problèmes et résultats*. Bull. Du Centre d'Hydrogéol. De Neuchâtel. N° 9, p. 13-28, 10 fig.
- Roth C., 1995. *Contribution de la géostatistique à la résolution du problème inverse en hydrogéologie*. Thèse de Docteur en Géostatistique, École des Mines de Paris. Document du BRGM, n° 241, Orléans, 195 p.
- Roth C., Chilès J.-P., 1997. *Modélisation géostatistique des écoulements souterrains : comment prendre en compte les lois physiques*. Hydrogéologie N° 1, pp. 23-32, 8 fig.
- Rouiller J.-D., Ornstein P., Rey J.-M., Kimmeier F., Weber I., Bouzelboudjen M., 1998. *Système d'information Spatiale Orientée vers la Gestion et l'Optimisation des Ressources en Eaux du Canton du Valais*. GeoloGIS-CH'98 Atelier sur l'application des SIG en géologie. Service Hydrologique et Géologique National (SHGN), Berne, Suisse.
- Schmid Odilo, 1999. 3. *Rottenkorrektion, Abschnitt Susten - Brig, Generelles Projekt, Grundlagen. Zustand und Zusammensetzung des Rottendamms, 1. Phase der geologischen-geotechnischen Untersuchung 1996/1997*. I-DB-P13.7, Büro für beratende Geologie Odilo Schmid.
- Scholl M. et al., 1996. *SGBD Géographiques - Spécificités*. 185 p. International Thomson Publishing France. Paris.
- Surfer, 1996. *User's guide*. For windows, version 6.04. Golden software, Inc.

- Teyssiere & Candolfi AG, 1998. 3. Rottenkorrektur. Abschnitt Brig-Susten. Abschnitt Visp. Generelles Projekt. Variante Sohlenabsenkung. Längenprofil 1: 10'000/200.
- Teyssiere & Candolfi AG, 1999. 3. Rottenkorrektur. Jaugeages Grossgrundkanal.
- Tomlin C.D., 1993. *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. Prentice Hall, 249 p.
- Trégarot G., 2000. *Modélisation couplée des écoulements à saturation variable avec hétérogénéités, forçages et interfaces hydrologiques*. Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse (I.N.P.T.), 496 p.
- Van Deursen W.P.A., 1995. *Geographical information systems and dynamic models*. PhD thesis, Utrecht University Netherlands.
- Van Genuchten M. T., 1980. *A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Saturated Soils*. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, p. 892-898.
- Viszok J., 2000. *Subsurface fluid flow simulation with finite element method in the East Pannonian Basin*. Institut F.A. Forel, Thèse, Université de Genève.
- Voss C.I., 1984. *A finite element simulation model for saturated and unsaturated, fluid density dependent groundwater flow with energy transport or chemically reactive single species solute transport*. US Geological Survey. National Center Reston, Virginia, USA.
- Wesseling C.G., Deursen W.P.A., Burrough P.A., 1996. *A spatial modelling language that unifies dynamic environment models and GIS*. Proc. Third International Conference/Workshop on Integrating Geographic Information Systems and Environmental Modeling, Jan. 21-25, 1996, Santa Fe, New Mexico, USA.

Annexe 1 : Références des études traitées dans les requêtes Fonds national N° 21-39357.93 et 2047-064.96. Requérant principal : J.-D. Rouiller; co-requérants : Dr M. Bouzelboudjen, Prof. L. Király, F. Veuthey.

1. Aviolat P., Rey J.-M., 1994. Hydrogéologie de la plaine alluviale du Rhône entre Sierre et Granges (Valais). 72p., 38 fig., 7 tableaux, 9 cartes hors texte. Mémoire Diplôme 3ème cycle Hydrogéologie, Centre d'Hydrogéologie, Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel. Inédit. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
2. Bouzelboudjen M., Kimmeier F., 1997. Système d'information géographique, méthodes géostatistiques et simulation numérique 3-D des écoulements souterrains en milieu poreux fortement hétérogène. GeolGIS-CH'97 Atelier sur l'application des SIG en géologie. Service Hydrologique et Géologique National (SHGN), Berne, Suisse, 5 décembre 1997.
3. Bouzelboudjen M., Kimmeier F., 1998. GIS Vector and Raster Database, Advanced Geostatistics, 3-D Groundwater Flow Modeling in Strongly Heterogeneous Geologic Media : An Integrated Approach. The Eighteenth Annual Environmental Systems Research Institute Users Conference. San Diego, California, USA - 27-july 1998.
4. Ebener S., 1994. Etude hydrogéologique de la plaine du Rhône à Pramont (Valais). Approche tridimensionnelle. 86p., 85 fig., 17 tableaux, 2 annexes. Mémoire Diplôme Géologie, Département de géologie et paléontologie de l'Université de Genève, Centre d'Hydrogéologie, Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel. Inédit.
5. Fröhlich Gugler A., 1997. Etude de la variabilité spatiale des propriétés hydrogéologiques en milieu poreux hétérogènes : Application à la Vallée du Rhône entre Baltschieder et Gamsen (Valais). Travail de diplôme du cycle postgrade interuniversitaire EPFL et UNI-NE en hydrologie et hydrogéologie, spécialisation en hydrogéologie. Avril 1997. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
6. Kimmeier F., 1997. Méthodologie d'étude d'un système aquifère dans une vallée alluviale en milieu Alpin: exemple de la vallée du Rhône, Valais central. Rapport intermédiaire, deuxième phase, inédit. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
7. Kimmeier F. (1999).- Système d'information géographique, approches géostatistiques et simulations tridimensionnelles pour la gestion et la protection des eaux souterraines en milieu alluvial. Thèse en préparation. Université de Neuchâtel. Projet FNRS CREALP-CHYN.
8. Ornstein P., 1995. Méthodologie d'étude d'un système aquifère dans une vallée alluviale en milieu alpin : exemple de la Vallée du Rhône, Valais Central, 13 p., 13 fig., 7 annexes. Rapport intermédiaire, première phase, inédit. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
9. Ornstein, P., 1996. Méthodologie d'étude d'un système aquifère dans une vallée alluviale en milieu Alpin: exemple de la vallée du Rhône, Valais Central. 46 p., 21 fig., 12 tab. 8 annexes. Rapport intermédiaire, première phase, inédit. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
10. Oukaci S., 1997. Utilisation du système d'information géographique, de la géostatistique et de la simulation numérique des écoulements souterrains 2-D par éléments finis dans la caractérisation hydraulique d'un milieu poreux fortement hétérogène : Application au système aquifère de la plaine du Rhône entre Baltschieder et Gamsen. Mémoire du cycle postgrade en hydrogéologie - Université de Neuchâtel et Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 25 p., 50 fig., 12 tab. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
11. Rouiller J.-D., Ornstein P., Rey J.-M., Kimmeier F., Weber I., Bouzelboudjen M., 1998. Système d'information Spatiale Orientée vers la Gestion et l'Optimisation des Ressources en Eaux du Canton du Valais. GeoloGIS-CH'98 Atelier sur l'application des SIG en géologie. Service Hydrologique et Géologique National (SHGN), Berne, Suisse, 27 novembre 1998.
12. Schürch M., 1995. Tranchée couverte de Champsec à Sion (Valais, Suisse) : Hydrogéologie et expérimentations numériques sur modèle mathématique à éléments finis. 71 p., 87 fig., 10 tab., 2 ann.. Mémoire Diplôme 3ème cycle Hydrogéologie, Centre d'Hydrogéologie, Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel. Inédit. Projet FNRS CRSFA-CHYN.
13. Weber I., 1998. SIG et vulnérabilité des aquifères à la pollution : Application dans la région Sierre-Vétroz, Valais central. Mémoire Diplôme 3ème cycle Hydrogéologie, Centre d'Hydrogéologie, Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel. Inédit, décembre 1998. Projet FNRS CRSFA-CHYN.

Annexe 2 : Valeurs des 145 mesures de potentiel hydraulique (hautes-eaux 1997)

Id	x [m]	y [m]	h [m]	Id	x [m]	y [m]	h [m]
11	637'015.00	127'563.00	651.09	201	633'993.86	127'924.07	642.42
14	637'626.00	127'456.00	653.11	203	633'947.25	127'709.89	642.36
15	637'495.85	127'833.96	652.17	207	633'869.32	128'003.77	642.79
18	637'954.00	127'926.00	653.39	208	633'952.00	128'008.00	642.79
21	637'533.00	127'638.00	652.09	209	633'931.65	128'081.66	642.92
24	637'372.27	127'481.27	652.09	210	633'794.55	127'942.74	642.27
25	637'128.43	127'447.55	651.33	211	633'671.52	128'010.26	642.61
26	637'360.96	127'428.26	652.29	213	633'782.44	128'038.36	642.88
27	637'344.51	127'534.81	651.99	215	633'581.33	127'951.86	642.15
29	637'596.00	127'598.00	652.81	219	633'584.85	127'745.46	642.56
31	637'085.71	127'497.96	651.27	221	633'648.57	127'446.09	642.92
32	637'172.57	127'626.91	651.77	223	637'838.53	127'526.05	653.36
36	636'870.70	127'412.55	650.61	224	633'490.38	128'010.47	642.47
39	637'811.00	127'511.00	653.28	227	633'602.03	128'110.91	642.95
40	637'786.00	127'510.00	653.21	232	633'355.68	127'955.09	642.10
42	636'492.16	127'266.68	649.44	233	633'292.07	127'939.00	642.45
43	638'345.00	127'790.00	653.81	240	633'321.55	128'028.46	642.45
45	636'890.22	127'322.62	650.58	244	638'074.00	127'828.00	653.88
47	636'628.32	127'439.65	650.02	252	637'794.00	127'797.00	653.13
49	636'876.00	127'492.00	650.79	257	638'119.40	127'646.68	653.81
50	637'003.00	127'572.00	651.17	258	638'109.86	127'660.67	653.64
51	636'591.61	127'459.79	649.87	265	637'035.46	127'785.00	651.75
52	636'876.82	127'578.30	650.68	266	637'485.08	127'912.27	652.27
55	636'822.71	127'724.77	651.58	267	637'786.20	127'974.02	652.99
58	632'606.94	128'308.60	641.38	268	634'452.50	127'743.62	642.78
61	632'380.51	128'438.40	640.92	283	633'256.44	127'904.42	642.36
63	632'197.81	128'600.49	640.93	285	633'264.57	127'875.38	642.34
66	631'861.95	128'637.14	639.84	288	633'449.31	127'644.79	642.33
68	631'656.56	128'567.03	639.82	289	633'189.94	127'609.37	642.11
69	631'530.65	128'461.06	639.57	290	633'595.12	127'403.90	642.36
70	631'656.00	128'424.64	639.91	291	633'637.16	127'163.59	642.33
71	631'867.34	128'335.86	640.09	293	633'235.53	128'136.42	642.32
72	632'080.63	128'418.27	640.45	294	633'012.75	127'928.26	641.98
73	632'092.51	128'231.76	640.56	297	632'984.34	127'578.62	641.92
74	632'234.95	128'451.51	640.73	298	633'007.51	127'267.07	641.96
76	636'224.23	127'326.27	648.45	300	633'005.00	128'199.00	641.95
79	636'226.45	127'270.36	648.18	301	637'978.09	127'551.95	653.35
82	635'859.82	127'242.75	646.79	302	638'207.74	127'785.89	654.51
86	636'229.89	127'196.74	648.31	303	638'261.52	127'738.23	654.24
94	636'408.55	127'409.31	649.34	304	638'358.41	127'924.01	655.04
98	636'237.61	127'406.63	648.61	306	638'418.31	127'938.03	655.10
100	636'208.10	127'382.17	648.63	307	638'459.87	127'972.98	655.30
103	636'209.16	127'537.52	648.72	308	638'524.70	128'020.46	655.50
104	636'195.09	127'536.27	648.61	309	638'601.44	128'043.48	655.74
110	635'588.92	127'247.05	646.01	313	637'712.88	127'534.67	653.37
112	635'415.14	127'258.04	645.62	315	637'820.37	127'566.64	653.51
116	635'597.35	127'209.31	646.02	325	631'365.78	128'283.31	639.26
118	635'481.97	127'041.18	644.99	326	631'659.00	128'217.00	640.03
122	635'582.59	127'315.15	645.99	332	632'749.11	128'104.09	641.86
127	635'594.22	127'363.48	646.08	339	632'482.73	127'872.33	641.23
129	635'657.05	127'557.92	645.85	340	632'531.39	127'754.32	641.27
131	635'136.91	127'381.41	644.89	341	632'552.40	128'045.29	641.52
134	635'256.12	127'276.45	645.32	349	632'307.26	127'973.30	641.02
135	635'197.27	127'140.30	645.10	350	632'282.34	127'796.39	640.77
144	635'363.86	127'435.61	645.36	353	632'291.49	127'454.94	640.76
151	634'611.92	127'689.25	643.29	355	632'402.60	128'079.59	641.33
153	634'847.00	127'526.00	644.15	356	632'229.45	128'174.27	640.85
154	634'805.00	127'402.00	643.79	358	632'440.00	128'256.00	641.22
162	634'909.49	127'622.56	644.20	367	631'796.00	128'230.00	639.97
163	635'020.21	127'771.68	644.49	368	631'792.00	128'109.00	639.92
171	634'420.00	127'622.00	642.99	371	631'297.27	128'357.96	638.91
172	634'373.00	127'502.00	642.93	383	631'268.91	127'922.99	638.52
174	634'241.00	127'218.00	642.68	384	631'274.42	127'525.74	639.30
175	634'192.90	126'884.76	643.27	388	633'657.00	127'697.00	642.77
178	634'552.24	127'954.59	643.79	389	633'694.00	127'831.00	642.92
180	634'276.69	127'842.37	642.48	390	633'851.00	127'798.00	642.68
181	634'134.31	127'892.19	642.71	391	634'142.00	127'775.00	642.67
187	636'457.00	127'531.00	649.86	392	634'160.00	127'503.00	642.98
188	636'369.00	127'643.00	650.46	393	633'796.00	127'464.00	642.51
192	634'195.00	127'992.00	642.84	407	638'247.62	128'127.10	654.45
193	635'014.00	127'909.00	643.35	408	638'290.91	128'050.18	654.68
194	635'077.00	127'787.00	644.23	409	638'527.36	128'173.92	655.44
196	635'170.00	127'636.00	644.50				

Annexe 3 : Perméabilités, épaisseurs, transmissivités et $\text{Log}_{10}T$ des transmissivités mesurées à 55 forages et au niveau des graviers supérieurs

Code P	X [m]	Y [m]	K [m/s]	Épais. [m]	T [m^2/s]	$\text{Log}_{10}T$
12	637865.50	127452.50	1.20	16.00	19.20	-2.72
14	637626.00	127456.00	1.60	16.50	26.40	-2.58
25	637128.00	127448.00	10.10	15.00	151.50	-1.82
27	637345.00	127535.00	7.60	16.00	121.60	-1.92
36	636871.00	127413.00	23.00	15.00	345.00	-1.46
37	636529.00	127366.00	13.10	9.00	117.90	-1.93
47	636628.00	127440.00	28.00	11.00	308.00	-1.51
49	636876.00	127492.00	76.00	11.00	836.00	-1.08
76	636224.00	127326.00	20.60	16.00	330.00	-1.48
94	636409.00	127409.00	96.00	12.00	1152.00	-0.94
98	636238.00	127407.00	16.50	14.77	244.00	-1.61
101	636208.00	127382.00	10.20	12.00	122.40	-1.91
110	635589.00	127247.00	20.00	16.30	326.00	-1.49
112	635415.00	127258.00	13.40	13.60	183.00	-1.74
115	637895.95	127455.74	4.80	16.00	76.80	-2.11
119	638266.50	127615.95	2.90	13.00	37.70	-2.42
120	638456.53	127748.92	2.20	15.00	33.00	-2.48
121	638382.87	127815.12	6.00	13.00	78.00	-2.11
122	635583.00	127315.00	19.90	9.93	198.00	-1.70
126	638653.92	127799.55	7.20	15.00	108.00	-1.97
130	635272.00	127303.00	15.80	10.25	162.00	-1.79
131	635137.00	127381.00	32.60	15.22	497.00	-1.30
137	635305.00	127369.00	13.10	15.33	201.00	-1.70
149	634872.00	127555.00	34.30	15.26	523.00	-1.28
150	634737.00	127625.00	47.20	16.71	789.00	-1.10
151	634612.00	127689.00	33.80	13.99	473.00	-1.33
164	635015.00	127464.00	43.00	16.35	703.00	-1.15
169	634480.00	127750.00	15.70	15.09	237.00	-1.63
176	634503.00	127809.00	6.70	15.69	105.00	-1.98
179	634374.00	127798.00	31.80	15.43	491.00	-1.31
180	634277.00	127842.00	14.60	15.99	233.00	-1.63
181	634134.00	127892.00	24.70	13.88	343.00	-1.46
201	633994.00	127924.00	22.90	15.21	348.00	-1.46
210	633795.00	127943.00	19.60	15.39	301.00	-1.52
215	633581.00	127952.00	17.90	13.25	237.00	-1.63
232	633356.00	127955.00	36.50	15.95	583.00	-1.23
282	633192.00	127925.00	7.00	16.79	118.00	-1.93
294	633013.00	127928.00	4.10	17.50	71.50	-2.15
301	637978.10	127552.00	4.40	11.50	50.60	-2.30
303	638261.50	127738.20	4.50	15.00	67.50	-2.17
306	638418.31	127938.03	3.20	15.00	48.00	-2.32
307	638459.87	127972.98	1.70	15.00	25.50	-2.59
317	637918.90	127673.20	8.00	11.00	88.00	-2.06
318	637945.00	127616.90	2.20	13.50	29.70	-2.53
327	632702.00	127941.00	20.40	18.52	378.00	-1.42
329	632626.00	127428.00	6.20	8.93	55.40	-2.26
333	637078.00	127497.00	50.00	14.00	700.00	-1.15
336	632497.00	127958.00	26.30	14.75	388.00	-1.41
340	632531.00	127754.00	1.70	14.30	23.70	-2.63
349	632307.00	127973.00	9.40	15.95	150.00	-1.82
356	632229.00	128174.00	18.00	16.54	298.00	-1.53
364	632004.00	128022.00	5.90	13.90	81.40	-2.09
371	631297.00	128358.00	14.00	12.47	175.00	-1.76
375	631488.00	128149.00	10.80	12.02	129.00	-1.89
384	631274.00	127526.00	12.90	15.15	195.00	-1.71

Annexe 4 : Valeurs des 769 mesures de perméabilité effectuées au flowmètre tous les mètres dans 30 forages

Code p	Piezo	Code f	Forage	X	Y	Z terrain	Prof. [m]	Cotes	K [m/s]	K [m/s] * 10 ⁻⁴	Log ₁₀ K * 10 ⁻⁴	Date exécution
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	6.00	649.28	0.00076653	07.67	00.88	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	7.00	648.28	0.00147039	14.70	01.17	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	8.00	647.28	0.00046002	04.60	00.66	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	9.00	646.28	0.00027499	02.75	00.44	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	10.00	645.28	0.00002212	00.22	-00.66	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	11.00	644.28	0.00045717	04.57	00.66	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	12.00	643.28	0.00054052	05.41	00.73	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	13.00	642.28	0.00044757	04.48	00.65	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	14.00	641.28	0.00033832	03.38	00.53	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	15.00	640.28	0.00041596	04.16	00.62	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	16.00	639.28	0.00018167	01.82	00.26	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	17.00	638.28	0.00001191	00.12	-00.92	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	18.00	637.28	0.00052137	05.21	00.72	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	19.00	636.28	0.00012096	01.21	00.08	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	20.00	635.28	0.00004963	00.50	-00.30	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	21.00	634.28	0.00056355	05.64	00.75	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	22.00	633.28	0.00061801	06.18	00.79	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	23.00	632.28	0.00058244	05.82	00.77	26 juin 97
27	A50	114	S57	637345	127535	655.28	24.00	631.28	0.00429973	43.00	01.63	26 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	1.46	650.79	0.00002030	00.20	-00.69	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	14.00	638.25	0.00025400	02.54	00.40	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	14.50	637.75	0.00033800	03.38	00.53	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	15.00	637.25	0.00067600	06.76	00.83	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	15.50	636.75	0.00078900	07.89	00.90	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	16.00	636.25	0.00042300	04.23	00.63	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	16.50	635.75	0.00569000	56.90	01.76	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	17.00	635.25	0.00187000	18.70	01.27	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	17.50	634.75	0.00383000	38.30	01.58	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	18.00	634.25	0.00344000	34.40	01.54	27 juin 97
49	B60	91	S34	636876	127492	652.25	18.50	633.75	0.00314000	31.40	01.50	27 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	3.57	648.97	0.00000097	00.01	-02.01	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	7.50	645.04	0.00000021	00.00	-02.67	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	8.00	644.54	0.00000014	00.00	-02.85	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	8.50	644.04	0.00408123	40.81	01.61	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	9.00	643.54	0.00059499	05.95	00.77	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	9.50	643.04	0.00007323	00.73	-00.14	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	10.00	642.54	0.00017392	01.74	00.24	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	10.50	642.04	0.00016477	01.65	00.22	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	11.00	641.54	0.00084214	08.42	00.93	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	11.50	641.04	0.00164766	16.48	01.22	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	12.00	640.54	0.00110510	11.05	01.04	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	12.50	640.04	0.00023381	02.34	00.37	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	13.00	639.54	0.00049950	04.99	00.70	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	13.50	639.04	0.00043573	04.36	00.64	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	14.00	638.54	0.00004251	00.43	-00.37	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	14.50	638.04	0.00005314	00.53	-00.27	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	15.00	637.54	0.00001063	00.11	-00.97	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	15.50	637.04	0.00006377	00.64	-00.20	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	16.00	636.54	0.00004724	00.47	-00.33	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	16.50	636.04	0.00000590	00.06	-01.23	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	17.00	635.54	0.00012753	01.28	00.11	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	17.50	635.04	0.00017004	01.70	00.23	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	18.00	634.54	0.00037197	03.72	00.57	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	18.50	634.04	0.00004251	00.43	-00.37	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	19.00	633.54	0.00005471	00.55	-00.26	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	19.50	633.04	0.00038778	03.88	00.59	26 juin 97
96	C53	112	S55	636409	127409	652.54	20.00	632.54	0.00030070	03.01	00.48	26 juin 97
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	7.50	643.36	0.00151970	15.20	01.18	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	8.00	642.86	0.00098900	09.89	01.00	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	8.50	642.36	0.00133530	13.35	01.13	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	9.00	641.86	0.00061170	06.12	00.79	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	9.50	641.36	0.00280740	28.07	01.45	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	10.00	640.86	0.00306920	30.69	01.49	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	10.50	640.36	0.00259710	25.97	01.41	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	11.00	639.86	0.00341150	34.12	01.53	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	11.50	639.36	0.00167430	16.74	01.22	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	12.00	638.86	0.00295840	29.58	01.47	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	12.50	638.36	0.00267800	26.78	01.43	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	13.00	637.86	0.00151680	15.17	01.18	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	13.50	637.36	0.00084340	08.43	00.93	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	14.00	636.86	0.00140140	14.01	01.15	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	14.50	636.36	0.00161810	16.18	01.21	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	15.00	635.86	0.00124840	12.48	01.10	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	15.50	635.36	0.00052870	05.29	00.72	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	16.00	634.86	0.00173710	17.37	01.24	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	16.50	634.36	0.00143420	14.34	01.16	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	17.00	633.86	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	17.50	633.36	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	18.00	632.86	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	18.50	632.36	-	-	-	22 oct 86

98	60	88	S31	636238	127407	650.86	19.00	631.86	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	19.50	631.36	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	20.00	630.86	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	20.50	630.36	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	21.00	629.86	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	21.50	629.36	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	22.00	628.86	-	-	-	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	22.50	628.36	0.00042340	04.23	00.63	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	23.00	627.86	0.00046710	04.67	00.67	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	23.50	627.36	0.00031700	03.17	00.50	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	24.00	626.86	0.00031770	03.18	00.50	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	24.50	626.36	0.00021440	02.14	00.33	22 oct 86
98	60	88	S31	636238	127407	650.86	25.00	625.86	0.00296130	29.61	01.47	22 oct 86
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	3.60	648.49	0.00005932	00.59	-00.23	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	8.00	644.09	0.00076405	07.64	00.88	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	9.00	643.09	0.00196709	19.67	01.29	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	10.00	642.09	0.00713678	71.37	01.85	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	11.00	641.09	0.00529549	52.95	01.72	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	12.00	640.09	0.00290768	29.08	01.46	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	13.00	639.09	0.00506439	50.64	01.70	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	14.00	638.09	0.01111848	111.18	02.05	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	15.00	637.09	0.00482189	48.22	01.68	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	16.00	636.09	0.00347029	34.70	01.54	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	17.00	635.09	0.00577970	57.80	01.76	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	18.00	634.09	0.00182362	18.24	01.26	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	19.00	633.09	0.00019411	01.94	00.29	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	20.00	632.09	-	-	-	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	21.00	631.09	-	-	-	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	22.00	630.09	-	-	-	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	23.00	629.09	0.00012846	01.28	00.11	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	24.00	628.09	0.00221158	22.12	01.34	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	25.00	627.09	0.00181746	18.17	01.26	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	26.00	626.09	0.00048468	04.85	00.69	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	27.00	625.09	0.00124377	12.44	01.09	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	28.00	624.09	0.00057369	05.74	00.76	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	29.00	623.09	0.00070353	07.04	00.85	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	30.00	622.09	0.00054600	05.46	00.74	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	31.00	621.09	0.00027044	02.70	00.43	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	32.00	620.09	0.00027300	02.73	00.44	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	33.00	619.09	0.00039925	03.99	00.60	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	34.00	618.09	0.00027556	02.76	00.44	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	35.00	617.09	0.00080362	08.04	00.91	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	36.00	616.09	0.00053831	05.38	00.73	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	37.00	615.09	0.00083717	08.37	00.92	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	38.00	614.09	0.00002100	00.21	-00.68	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	39.00	613.09	0.00027300	02.73	00.44	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	40.00	612.09	0.00028875	02.89	00.46	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	41.00	611.09	0.00005250	00.53	-00.28	26 juin 97
101	C65	95	S38	636208	127382	652.09	42.00	610.09	0.00046300	04.63	00.67	26 juin 97
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	9.50	640.99	0.00009650	00.97	-00.02	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	10.00	640.49	0.00017840	01.78	00.25	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	10.50	639.99	0.00045650	04.57	00.66	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	11.00	639.49	0.00018500	01.85	00.27	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	11.50	638.99	0.00025220	02.52	00.40	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	12.00	638.49	0.00009600	00.96	-00.02	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	12.50	637.99	0.00012230	01.22	00.09	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	13.00	637.49	0.00009610	00.96	-00.02	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	13.50	636.99	0.00005830	00.58	-00.23	24 oct 86
130	1	82	S25	635272	127303	650.49	14.00	636.49	0.00027910	02.79	00.45	24 oct 86
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	5.06	644.73	0.00000984	00.10	-01.01	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	10.50	639.29	0.00001549	00.15	-00.81	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	11.00	638.79	0.00003873	00.39	-00.41	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	11.50	638.29	0.00017431	01.74	00.24	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	12.00	637.79	0.00000387	00.04	-01.41	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	12.50	637.29	0.00082019	08.20	00.91	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	13.00	636.79	0.00092643	09.26	00.97	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	13.50	636.29	0.00074654	07.47	00.87	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	14.00	635.79	0.00012592	01.26	00.10	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	14.50	635.29	0.00065500	06.55	00.82	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	15.00	634.79	0.00034870	03.49	00.54	26 juin 97
131	E05	81	S24	635137	127381	649.79	15.50	634.29	0.00015400	01.54	00.19	26 juin 97
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	8.00	641.44	0.00138900	13.89	01.14	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	8.50	640.94	0.00127400	12.74	01.11	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	9.00	640.44	0.00003340	00.33	-00.48	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	9.50	639.94	0.00219340	21.93	01.34	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	10.00	639.44	0.00228710	22.87	01.36	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	10.50	638.94	0.00070850	07.09	00.85	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	11.00	638.44	0.00026770	02.68	00.43	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	11.50	637.94	0.00026230	02.62	00.42	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	12.00	637.44	0.00025710	02.57	00.41	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	12.50	636.94	0.00025200	02.52	00.40	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	13.00	636.44	0.00024710	02.47	00.39	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	13.50	635.94	0.00024230	02.42	00.38	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	14.00	635.44	0.00160110	16.01	01.20	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	14.50	634.94	0.00196940	19.69	01.29	24 oct 86

133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	15.00	634.44	0.00138300	13.83	01.14	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	15.50	633.94	0.00621200	62.12	01.79	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	16.00	633.44	0.00200390	20.04	01.30	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	16.50	632.94	0.00071140	07.11	00.85	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	17.00	632.44	0.00097030	09.70	00.99	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	17.50	631.94	0.00170450	17.05	01.23	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	18.00	631.44	0.00179560	17.96	01.25	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	18.50	630.94	0.00345910	34.59	01.54	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	19.00	630.44	0.00103890	10.39	01.02	24 oct 86
133	E08	80	S23	635015	127464	649.44	19.50	629.94	0.00214530	21.45	01.33	24 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	10.00	641.91	0.00048740	04.87	00.69	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	10.50	641.41	0.00034060	03.41	00.53	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	11.00	640.91	0.00087720	08.77	00.94	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	11.50	640.41	0.00028840	02.88	00.46	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	12.00	639.91	0.00065800	06.58	00.82	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	12.50	639.41	0.00007390	00.74	-00.13	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	13.00	638.91	0.00031530	03.15	00.50	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	13.50	638.41	0.00044730	04.47	00.65	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	14.00	637.91	-	-	-	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	14.50	637.41	0.00229540	22.95	01.36	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	15.00	636.91	0.00330250	33.03	01.52	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	15.50	636.41	0.00196010	19.60	01.29	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	16.00	635.91	0.00242300	24.23	01.38	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	16.50	635.41	0.00662830	66.28	01.82	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	17.00	634.91	0.00345330	34.53	01.54	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	17.50	634.41	0.00161250	16.13	01.21	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	18.00	633.91	0.00002790	00.28	-00.55	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	18.50	633.41	0.00002860	00.29	-00.54	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	19.00	632.91	0.00012620	01.26	00.10	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	19.50	632.41	0.00031170	03.12	00.49	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	20.00	631.91	0.00095770	09.58	00.98	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	20.50	631.41	0.00116240	11.62	01.07	22 oct 86
137	E50	83	S26	635305	127369	651.91	21.00	630.91	0.00291250	29.13	01.46	22 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	9.50	641.26	0.00214710	21.47	01.33	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	10.00	640.76	0.00117740	11.77	01.07	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	10.50	640.26	0.00204680	20.47	01.31	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	11.00	639.76	0.00390360	39.04	01.59	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	11.50	639.26	0.00269710	26.97	01.43	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	12.00	638.76	0.00106870	10.69	01.03	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	12.50	638.26	0.00300330	30.03	01.48	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	13.00	637.76	0.00206180	20.62	01.31	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	13.50	637.26	0.00171940	17.19	01.24	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	14.00	636.76	0.00209040	20.90	01.32	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	14.50	636.26	0.00173010	17.30	01.24	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	15.00	635.76	0.00200780	20.08	01.30	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	15.50	635.26	0.00160080	16.01	01.20	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	16.00	634.76	0.00093550	09.36	00.97	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	16.50	634.26	0.00081870	08.19	00.91	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	17.00	633.76	0.00131170	13.12	01.12	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	17.50	633.26	0.00099770	09.98	01.00	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	18.00	632.76	0.00024380	02.44	00.39	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	18.50	632.26	0.00387580	38.76	01.59	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	19.00	631.76	0.00195830	19.58	01.29	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	19.50	631.26	0.00128920	12.89	01.11	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	20.00	630.76	0.00331260	33.13	01.52	27 oct 86
150	G05	78	S21	634737	127625	650.76	20.50	630.26	0.00516960	51.70	01.71	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	9.00	640.15	0.00152410	15.24	01.18	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	9.50	639.65	0.00318460	31.85	01.50	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	10.00	639.15	0.00127670	12.77	01.11	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	10.50	638.65	0.00121820	12.18	01.09	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	11.00	638.15	-	-	-	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	11.50	637.65	0.00330600	33.06	01.52	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	12.00	637.15	0.00077590	07.76	00.89	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	12.50	636.65	0.00074000	07.40	00.87	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	13.00	636.15	0.00332510	33.25	01.52	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	13.50	635.65	0.00278430	27.84	01.44	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	14.00	635.15	0.00153750	15.38	01.19	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	14.50	634.65	0.00143010	14.30	01.16	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	15.00	634.15	0.00303790	30.38	01.48	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	15.50	633.65	0.00219330	21.93	01.34	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	16.00	633.15	0.00400310	40.03	01.60	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	16.50	632.65	0.00255890	25.59	01.41	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	17.00	632.15	0.00304440	30.44	01.48	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	17.50	631.65	0.00239150	23.92	01.38	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	18.00	631.15	0.00149900	14.99	01.18	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	18.50	630.65	0.00135080	13.51	01.13	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	19.00	630.15	0.00247820	24.78	01.39	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	19.50	629.65	0.00344610	34.46	01.54	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	20.00	629.15	0.00433300	43.33	01.64	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	20.50	628.65	0.00292060	29.21	01.47	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	21.00	628.15	0.00085750	08.58	00.93	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	21.50	627.65	0.00649360	64.94	01.81	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	22.00	627.15	0.00105310	10.53	01.02	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	22.50	626.65	0.00078570	07.86	00.90	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	23.00	626.15	0.00107590	10.76	01.03	27 oct 86

169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	23.50	625.65	0.00071860	07.19	00.86	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	24.00	625.15	0.00015780	01.58	00.20	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	24.50	624.65	0.00014460	01.45	00.16	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	25.00	624.15	0.00020480	02.05	00.31	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	25.50	623.65	0.00018090	01.81	00.26	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	26.00	623.15	0.00079580	07.96	00.90	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	26.50	622.65	0.00045500	04.55	00.66	27 oct 86
169	H01	75	S18	634480	127750	649.15	27.00	622.15	0.00485330	48.53	01.69	27 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	8.00	640.64	0.00230550	23.06	01.36	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	8.50	640.14	0.00186980	18.70	01.27	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	9.00	639.64	0.00128680	12.87	01.11	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	9.50	639.14	0.00102530	10.25	01.01	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	10.00	638.64	0.00018180	01.82	00.26	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	10.50	638.14	0.00022530	02.25	00.35	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	11.00	637.64	0.00017870	01.79	00.25	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	11.50	637.14	0.00017740	01.77	00.25	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	12.00	636.64	0.00017600	01.76	00.25	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	12.50	636.14	0.00017470	01.75	00.24	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	13.00	635.64	0.00114610	11.46	01.06	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	13.50	635.14	0.00113040	11.30	01.05	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	14.00	634.64	0.00073550	07.36	00.87	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	14.50	634.14	0.00067460	06.75	00.83	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	15.00	633.64	0.00223830	22.38	01.35	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	15.50	633.14	0.00198620	19.86	01.30	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	16.00	632.64	0.00314070	31.41	01.50	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	16.50	632.14	0.00266870	26.69	01.43	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	17.00	631.64	0.00627090	62.71	01.80	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	17.50	631.14	0.00568210	56.82	01.75	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	18.00	630.64	0.00062040	06.20	00.79	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	18.50	630.14	0.00057680	05.77	00.76	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	19.00	629.64	0.00183520	18.35	01.26	23 oct 86
176	H50	76	S19	634503	127809	648.64	19.50	629.14	0.02069990	207.00	02.32	23 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	8.50	640.52	0.00083570	08.36	00.92	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	9.00	640.02	0.00043310	04.33	00.64	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	9.50	639.52	0.00117740	11.77	01.07	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	10.00	639.02	0.00811160	81.12	01.91	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	10.50	638.52	0.00232590	23.26	01.37	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	11.00	638.02	-	-	-	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	11.50	637.52	-	-	-	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	12.00	637.02	0.00025530	02.55	00.41	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	12.50	636.52	0.00118840	11.88	01.07	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	13.00	636.02	0.00145130	14.51	01.16	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	13.50	635.52	0.00091100	09.11	00.96	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	14.00	635.02	0.00055200	05.52	00.74	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	14.50	634.52	0.00048390	04.84	00.68	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	15.00	634.02	0.00046920	04.69	00.67	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	15.50	633.52	0.00042860	04.29	00.63	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	16.00	633.02	0.00108390	10.84	01.03	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	16.50	632.52	0.00253480	25.35	01.40	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	17.00	632.02	0.00295330	29.53	01.47	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	17.50	631.52	0.00120010	12.00	01.08	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	18.00	631.02	0.00170010	17.00	01.23	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	18.50	630.52	0.00102310	10.23	01.01	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	19.00	630.02	0.00176260	17.63	01.25	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	19.50	629.52	0.00122810	12.28	01.09	27 oct 86
179	I01	74	S17	634374	127798	649.02	20.00	629.02	0.00201760	20.18	01.30	27 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	8.50	642.17	0.00098600	09.86	00.99	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	9.00	641.67	0.00099780	09.98	01.00	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	9.50	641.17	0.00037190	03.72	00.57	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	10.00	640.67	0.00038060	03.81	00.58	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	10.50	640.17	0.00003080	00.31	-00.51	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	11.00	639.67	0.00556850	55.69	01.75	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	11.50	639.17	0.00020420	02.04	00.31	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	12.00	638.67	0.00399460	39.95	01.60	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	12.50	638.17	0.00397430	39.74	01.60	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	13.00	637.67	0.00150360	15.04	01.18	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	13.50	637.17	0.00562060	56.21	01.75	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	14.00	636.67	0.00240550	24.06	01.38	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	14.50	636.17	0.00557180	55.72	01.75	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	15.00	635.67	0.00187570	18.76	01.27	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	15.50	635.17	0.00407000	40.70	01.61	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	16.00	634.67	0.00044560	04.46	00.65	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	16.50	634.17	0.00035820	03.58	00.55	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	17.00	633.67	0.00093050	09.31	00.97	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	17.50	633.17	0.00081960	08.20	00.91	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	18.00	632.67	0.00100920	10.09	01.00	28 oct 86
181	K01	72	S15	634134	127892	650.67	18.50	632.17	0.00225710	22.57	01.35	28 oct 86
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	1.90	649.77	0.00014345	01.43	00.16	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	5.00	646.67	0.00011309	01.13	00.05	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	6.00	645.67	0.00141357	14.14	01.15	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	7.00	644.67	0.00642702	64.27	01.81	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	8.00	643.67	0.00150781	15.08	01.18	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	9.00	642.67	0.00192245	19.22	01.28	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	10.00	641.67	0.00054658	05.47	00.74	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	11.00	640.67	0.00065967	06.60	00.82	27 juin 97

187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	12.00	639.67	0.00614431	61.44	01.79	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	13.00	638.67	0.00065967	06.60	00.82	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	14.00	637.67	0.00116855	11.69	01.07	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	15.00	636.67	0.00030156	03.02	00.48	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	16.00	635.67	0.00026952	02.70	00.43	27 juin 97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	17.00	634.67	0.00128442	12.84	01.11	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	18.00	633.67	0.00113923	11.39	01.06	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	19.00	632.67	0.00070783	07.08	00.85	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	20.00	631.67	0.00001885	00.19	-00.72	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	21.00	630.67	0.00001885	00.19	-00.72	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	22.00	629.67	0.00016963	01.70	00.23	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	23.00	628.67	0.00064780	06.48	00.81	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	24.00	627.67	0.00034714	03.47	00.54	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	25.00	626.67	0.00085570	08.56	00.93	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	26.00	625.67	0.00139865	13.99	01.15	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	27.00	624.67	0.00022202	02.22	00.35	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	28.00	623.67	0.00096146	09.61	00.98	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	29.00	622.67	0.00122542	12.25	01.09	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	30.00	621.67	0.00072440	07.24	00.86	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	31.00	620.67	0.00146598	14.66	01.17	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	32.00	619.67	0.00059883	05.99	00.78	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	33.00	618.67	0.00019961	02.00	00.30	27.juin.97
187	KB11	25	KB11	636457	127531	651.67	34.00	617.67	0.00011990	01.20	00.08	27.juin.97
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	5.05	642.26	0.00192000	19.20	01.28	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	6.00	641.31	0.00192000	19.20	01.28	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	7.00	640.31	0.00192000	19.20	01.28	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	8.00	639.31	0.00192000	19.20	01.28	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	9.00	638.31	0.00192000	19.20	01.28	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	10.00	637.31	0.00192000	19.20	01.28	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	11.00	636.31	0.00436000	43.60	01.64	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	12.00	635.31	0.00010000	01.00	00.00	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	13.00	634.31	0.00010000	01.00	00.00	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	14.00	633.31	0.00010000	01.00	00.00	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	15.00	632.31	0.00010000	01.00	00.00	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	16.00	631.31	0.00010000	01.00	00.00	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	17.00	630.31	0.01840000	184.00	02.26	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	18.00	629.31	0.00286000	28.60	01.46	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	19.00	628.31	0.00286000	28.60	01.46	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	20.00	627.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	21.00	626.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	22.00	625.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	23.00	624.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	24.00	623.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	25.00	622.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	26.00	621.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	27.00	620.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	28.00	619.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	29.00	618.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	30.00	617.31	0.00036300	03.63	00.56	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	31.00	616.31	0.00220000	22.00	01.34	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	32.00	615.31	0.00220000	22.00	01.34	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	33.00	614.31	0.00220000	22.00	01.34	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	34.00	613.31	0.00010000	01.00	00.00	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	35.00	612.31	0.00010000	01.00	00.00	08.sept.92
192	KB5	19	KB5	634195	127992	647.31	36.00	611.31	0.00010000	01.00	00.00	08.sept.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	3.43	643.53	0.01170000	117.00	02.07	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	4.00	642.96	0.01170000	117.00	02.07	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	5.00	641.96	0.01170000	117.00	02.07	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	6.00	640.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	7.00	639.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	8.00	638.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	9.00	637.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	10.00	636.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	11.00	635.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	12.00	634.96	0.00175000	17.50	01.24	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	13.00	633.96	0.00175000	17.50	01.24	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	14.00	632.96	0.00175000	17.50	01.24	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	15.00	631.96	0.00175000	17.50	01.24	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	16.00	630.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	17.00	629.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	18.00	628.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	19.00	627.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	20.00	626.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	21.00	625.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	22.00	624.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	23.00	623.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	24.00	622.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	25.00	621.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	26.00	620.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	27.00	619.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	28.00	618.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	29.00	617.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	30.00	616.96	0.00065000	06.50	00.81	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	31.00	615.96	0.00057700	05.77	00.76	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	32.00	614.96	0.00163000	16.30	01.21	19.août.92

193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	33.00	613.96	0.00195000	19.50	01.29	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	34.00	612.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	35.00	611.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	36.00	610.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	37.00	609.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
193	KB6	20	KB6	635014	127909	646.96	38.00	608.96	0.00010000	01.00	00.00	19.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	3.22	644.40	0.00000265	00.03	-01.58	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	4.00	643.62	0.00000248	00.02	-01.61	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	5.00	642.62	0.00000256	00.03	-01.59	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	6.00	641.62	0.00000256	00.03	-01.59	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	7.00	640.62	0.00000256	00.03	-01.59	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	8.00	639.62	0.00004950	00.50	-00.31	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	9.00	638.62	0.00001730	00.17	-00.76	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	10.00	637.62	0.00003740	00.37	-00.43	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	11.00	636.62	0.00013000	01.30	00.11	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	12.00	635.62	0.00009960	01.00	00.00	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	13.00	634.62	0.00007920	00.79	-00.10	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	14.00	633.62	0.00008600	00.86	-00.07	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	15.00	632.62	0.00014400	01.44	00.16	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	16.00	631.62	0.00007350	00.74	-00.13	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	17.00	630.62	0.00005080	00.51	-00.29	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	18.00	629.62	0.00004630	00.46	-00.33	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	19.00	628.62	0.00006380	00.64	-00.20	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	20.00	627.62	0.00005770	00.58	-00.24	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	21.00	626.62	0.00000734	00.07	-01.13	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	22.00	625.62	0.00000623	00.06	-01.21	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	23.00	624.62	0.00002930	00.29	-00.53	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	24.00	623.62	0.00003260	00.33	-00.49	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	25.00	622.62	0.00001500	00.15	-00.82	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	26.00	621.62	0.00011500	01.15	00.06	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	27.00	620.62	0.00004420	00.44	-00.35	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	28.00	619.62	0.00003490	00.35	-00.46	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	29.00	618.62	0.00002970	00.30	-00.53	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	30.00	617.62	0.00009350	00.94	-00.03	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	31.00	616.62	0.00016300	01.63	00.21	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	32.00	615.62	0.00024500	02.45	00.39	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	33.00	614.62	0.00058000	05.80	00.76	20.août.92
194	KB7a	21	KB7	635077	127787	647.62	34.00	613.62	0.00000100	00.01	-02.00	20.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	3.36	644.68	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	4.00	644.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	5.00	643.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	6.00	642.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	7.00	641.04	0.00013200	01.32	00.12	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	8.00	640.04	0.00030100	03.01	00.48	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	9.00	639.04	0.00072500	07.25	00.86	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	10.00	638.04	0.00163000	16.30	01.21	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	11.00	637.04	0.00093800	09.38	00.97	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	12.00	636.04	0.00034300	03.43	00.54	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	13.00	635.04	0.00016300	01.63	00.21	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	14.00	634.04	0.00076700	07.67	00.88	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	15.00	633.04	0.00120000	12.00	01.08	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	16.00	632.04	0.00252000	25.20	01.40	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	17.00	631.04	0.00102000	10.20	01.01	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	18.00	630.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	19.00	629.04	0.00000962	00.10	-01.02	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	20.00	628.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	21.00	627.04	0.00001870	00.19	-00.73	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	22.00	626.04	0.00000161	00.02	-01.79	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	23.00	625.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	24.00	624.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	25.00	623.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	26.00	622.04	0.00067700	06.77	00.83	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	27.00	621.04	0.00117000	11.70	01.07	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	28.00	620.04	0.00078500	07.85	00.89	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	29.00	619.04	0.00038700	03.87	00.59	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	30.00	618.04	0.00040200	04.02	00.60	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	31.00	617.04	0.00000711	00.07	-01.15	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	32.00	616.04	0.00000203	00.02	-01.69	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	33.00	615.04	0.00002470	00.25	-00.61	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	34.00	614.04	0.00004070	00.41	-00.39	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	35.00	613.04	0.00016500	01.65	00.22	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	36.00	612.04	0.00017200	01.72	00.24	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	37.00	611.04	0.00017000	01.70	00.23	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	38.00	610.04	0.00062400	06.24	00.80	19.août.92
196	KB8	22	KB8	635170	127636	648.04	39.00	609.04	0.00000100	00.01	-02.00	19.août.92
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	8.50	639.38	0.00014760	01.48	00.17	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	9.00	638.88	0.00076890	07.69	00.89	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	9.50	638.38	0.00258670	25.87	01.41	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	10.00	637.88	0.00842520	84.25	01.93	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	10.50	637.38	0.00117020	11.70	01.07	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	11.00	636.88	0.00041290	04.13	00.62	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	11.50	636.38	0.00049160	04.92	00.69	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	12.00	635.88	0.00171710	17.17	01.23	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	12.50	635.38	0.00722600	72.26	01.86	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	13.00	634.88	0.00773040	77.30	01.89	28.oct.86

232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	13.50	634.38	0.00322390	32.24	01.51	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	14.00	633.88	0.00072970	07.30	00.86	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	14.50	633.38	0.00143720	14.37	01.16	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	15.00	632.88	0.00318210	31.82	01.50	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	15.50	632.38	0.00124220	12.42	01.09	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	16.00	631.88	0.00032330	03.23	00.51	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	16.50	631.38	0.00034700	03.47	00.54	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	17.00	630.88	0.00020520	02.05	00.31	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	17.50	630.38	0.00048270	04.83	00.68	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	18.00	629.88	0.00046870	04.69	00.67	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	18.50	629.38	0.00023940	02.39	00.38	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	19.00	628.88	0.00018390	01.84	00.26	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	19.50	628.38	0.00010310	01.03	00.01	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	20.00	627.88	0.00079650	07.97	00.90	28.oct.86
232	O01	67	S10	633356	127955	647.88	20.50	627.38	0.00365320	36.53	01.56	28.oct.86
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	5.89	642.47	0.00005193	00.52	-00.28	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	11.00	637.36	0.00110901	11.09	01.04	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	11.50	636.86	0.00445964	44.60	01.65	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	12.00	636.36	0.00148655	14.87	01.17	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	12.50	635.86	0.00181689	18.17	01.26	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	13.00	635.36	0.00051911	05.19	00.72	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	13.50	634.86	0.00306748	30.67	01.49	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	14.00	634.36	0.00115857	11.59	01.06	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	14.50	633.86	0.00052051	05.21	00.72	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	15.00	633.36	0.00020950	02.09	00.32	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	15.50	632.86	0.00009186	00.92	-00.04	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	16.00	632.36	0.00002740	00.27	-00.56	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	16.50	631.86	0.00001450	00.15	-00.84	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	17.00	631.36	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	17.50	630.86	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	18.00	630.36	0.00158894	15.89	01.20	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	18.50	629.86	0.00197248	19.72	01.30	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	19.00	629.36	0.00117801	11.78	01.07	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	19.50	628.86	0.00194997	19.50	01.29	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	20.00	628.36	0.00015619	01.56	00.19	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	20.50	627.86	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
234	O06	103	S46	633292	127939	648.36	21.00	627.36	0.00017684	01.77	00.25	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	4.35	642.44	0.00020940	02.09	00.32	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	8.00	638.79	0.00040255	04.03	00.60	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	9.00	637.79	0.00000373	00.04	-01.43	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	10.00	636.79	0.00314549	31.45	01.50	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	11.00	635.79	0.00245176	24.52	01.39	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	12.00	634.79	0.00135804	13.58	01.13	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	13.00	633.79	0.00030098	03.01	00.48	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	14.00	632.79	0.00022765	02.28	00.36	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	15.00	631.79	0.00017902	01.79	00.25	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	16.00	630.79	0.00036608	03.66	00.56	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	17.00	629.79	0.00009745	00.97	-00.01	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	18.00	628.79	0.00048804	04.88	00.69	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	19.00	627.79	0.00033902	03.39	00.53	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	20.00	626.79	0.00003706	00.37	-00.43	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	21.00	625.79	0.00001863	00.19	-00.73	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	22.00	624.79	0.00006490	00.65	-00.19	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	23.00	623.79	0.00007412	00.74	-00.13	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	24.00	622.79	0.00012059	01.21	00.08	25.juin.97
240	O68	104	S47	633322	128028	646.79	25.00	621.79	0.00010961	01.10	00.04	25.juin.97
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	9.00	636.05	0.00018710	01.87	00.27	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	9.50	635.55	0.00013910	01.39	00.14	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	10.00	635.05	0.00009220	00.92	-00.04	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	10.50	634.55	0.00001840	00.18	-00.74	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	11.00	634.05	0.00276490	27.65	01.44	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	11.50	633.55	0.00002360	00.24	-00.63	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	12.00	633.05	0.00001570	00.16	-00.80	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	12.50	632.55	0.00187390	18.74	01.27	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	13.00	632.05	0.00233850	23.39	01.37	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	13.50	631.55	0.00302140	30.21	01.48	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	14.00	631.05	0.00175060	17.51	01.24	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	14.50	630.55	0.00372340	37.23	01.57	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	15.00	630.05	0.00169720	16.97	01.23	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	15.50	629.55	0.00463590	46.36	01.67	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	16.00	629.05	0.00013980	01.40	00.15	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	16.50	628.55	0.00124900	12.49	01.10	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	17.00	628.05	0.00359520	35.95	01.56	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	17.50	627.55	0.00094650	09.47	00.98	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	18.00	627.05	0.00032480	03.25	00.51	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	18.50	626.55	0.00456520	45.65	01.66	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	19.00	626.05	0.00015680	01.57	00.20	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	19.50	625.55	-	-	-	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	20.00	625.05	-	-	-	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	20.50	624.55	-	-	-	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	21.00	624.05	0.00004580	00.46	-00.34	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	21.50	623.55	0.00004280	00.43	-00.37	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	22.00	623.05	0.00035610	03.56	00.55	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	22.50	622.55	0.00029120	02.91	00.46	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	23.00	622.05	0.00072590	07.26	00.86	28.oct.86

282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	23.50	621.55	0.00072370	07.24	00.86	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	24.00	621.05	0.00033670	03.37	00.53	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	24.50	620.55	0.00019980	02.00	00.30	28.oct.86
282	Q10	66	S9	633192	127925	645.05	25.00	620.05	0.00206760	20.68	01.32	28.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	6.00	637.89	0.00195090	19.51	01.29	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	7.00	636.89	0.00414940	41.49	01.62	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	8.00	635.89	0.00742370	74.24	01.87	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	9.00	634.89	0.00306990	30.70	01.49	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	10.00	633.89	0.00665980	66.60	01.82	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	11.00	632.89	0.00198820	19.88	01.30	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	12.00	631.89	0.00646670	64.67	01.81	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	13.00	630.89	0.00422780	42.28	01.63	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	14.00	629.89	0.00349420	34.94	01.54	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	15.00	628.89	0.00355370	35.54	01.55	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	16.00	627.89	0.00176720	17.67	01.25	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	17.00	626.89	0.00005450	00.55	-00.26	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	18.00	625.89	-	-	-	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	19.00	624.89	-	-	-	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	20.00	623.89	0.00026250	02.63	00.42	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	21.00	622.89	0.00055040	05.50	00.74	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	22.00	621.89	0.00021300	02.13	00.33	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	23.00	620.89	0.00058760	05.88	00.77	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	24.00	619.89	0.00000980	00.10	-01.01	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	25.00	618.89	0.00045900	04.59	00.66	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	26.00	617.89	0.00031720	03.17	00.50	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	27.00	616.89	0.00075850	07.59	00.88	23.oct.86
336	U10	61	S4	632497	127958	643.89	28.00	615.89	0.00229450	22.95	01.36	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	5.00	637.87	0.00352280	35.23	01.55	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	5.50	637.37	0.00287430	28.74	01.46	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	6.00	636.87	0.00176580	17.66	01.25	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	6.50	636.37	0.00799760	79.98	01.90	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	7.00	635.87	0.00487290	48.73	01.69	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	7.50	635.37	0.00308700	30.87	01.49	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	8.00	634.87	0.00156390	15.64	01.19	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	8.50	634.37	0.00144090	14.41	01.16	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	9.00	633.87	0.00303580	30.36	01.48	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	9.50	633.37	0.00257580	25.76	01.41	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	10.00	632.87	0.00240120	24.01	01.38	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	10.50	632.37	0.00205740	20.57	01.31	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	11.00	631.87	0.00507960	50.80	01.71	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	11.50	631.37	0.00337200	33.72	01.53	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	12.00	630.87	0.00258730	25.87	01.41	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	12.50	630.37	0.00191670	19.17	01.28	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	13.00	629.87	0.00354760	35.48	01.55	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	13.50	629.37	0.00203190	20.32	01.31	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	14.00	628.87	0.00162310	16.23	01.21	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	14.50	628.37	0.00099830	09.98	01.00	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	15.00	627.87	0.00077520	07.75	00.89	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	15.50	627.37	0.00053840	05.38	00.73	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	16.00	626.87	0.00055680	05.57	00.75	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	16.50	626.37	0.00038210	03.82	00.58	23.oct.86
349	W10	60	S3	632307	127973	642.87	17.00	625.87	0.00401620	40.16	01.60	23.oct.86
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	2.19	638.53	0.00243052	24.31	01.39	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	6.00	634.72	0.00204779	20.48	01.31	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	7.00	633.72	0.00278534	27.85	01.44	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	8.00	632.72	0.00242723	24.27	01.39	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	9.00	631.72	0.00257534	25.75	01.41	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	10.00	630.72	0.00272210	27.22	01.43	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	11.00	629.72	0.00030829	03.08	00.49	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	12.00	628.72	0.00519520	51.95	01.72	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	13.00	627.72	0.00315117	31.51	01.50	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	14.00	626.72	0.00419358	41.94	01.62	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	15.00	625.72	0.00114647	11.46	01.06	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	16.00	624.72	0.00098900	09.89	01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	17.00	623.72	0.00290024	29.00	01.46	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	18.00	622.72	0.00099499	09.95	01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	19.00	621.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	20.00	620.72	0.00012846	01.28	00.11	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	21.00	619.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	22.00	618.72	0.00011879	01.19	00.07	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	23.00	617.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	24.00	616.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	25.00	615.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	26.00	614.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	27.00	613.72	0.00028362	02.84	00.45	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	28.00	612.72	0.00113726	11.37	01.06	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	29.00	611.72	0.00123027	12.30	01.09	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	30.00	610.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	31.00	609.72	0.00007275	00.73	-00.14	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	32.00	608.72	0.00029698	02.97	00.47	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	33.00	607.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	34.00	606.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	35.00	605.72	0.00010544	01.05	00.02	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	36.00	604.72	0.00007275	00.73	-00.14	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	37.00	603.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97

383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	38.00	602.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	39.00	601.72	0.00004604	00.46	-00.34	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	40.00	600.72	0.00001335	00.13	-00.87	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	41.00	599.72	0.00009347	00.93	-00.03	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	42.00	598.72	0.00001335	00.13	-00.87	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	43.00	597.72	0.00015148	01.51	00.18	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	44.00	596.72	0.00001000	00.10	-01.00	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	45.00	595.72	0.00020627	02.06	00.31	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	46.00	594.72	0.00072599	07.26	00.86	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	47.00	593.72	0.00025883	02.59	00.41	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	48.00	592.72	0.00034130	03.41	00.53	25.juin.97
383	Z37	98	S41	631269	127923	640.72	49.00	591.72	0.00031283	03.13	00.50	25.juin.97
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	4.82	643.18	0.00023856	02.39	00.38	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	9.00	639.00	0.00018117	01.81	00.26	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	10.00	638.00	0.00001812	00.18	-00.74	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	11.00	637.00	0.00000906	00.09	-01.04	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	12.00	636.00	0.00002718	00.27	-00.57	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	13.00	635.00	0.00017211	01.72	00.24	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	14.00	634.00	0.00024458	02.45	00.39	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	15.00	633.00	0.00040763	04.08	00.61	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	16.00	632.00	0.00009964	01.00	00.00	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	17.00	631.00	0.00028081	02.81	00.45	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	18.00	630.00	0.00041669	04.17	00.62	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	19.00	629.00	0.00089236	08.92	00.95	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	20.00	628.00	0.00034707	03.47	00.54	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	21.00	627.00	0.00055741	05.57	00.75	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	22.00	626.00	0.00034707	03.47	00.54	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	23.00	625.00	0.00030500	03.05	00.48	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	24.00	624.00	0.00018931	01.89	00.28	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	25.00	623.00	0.00010517	01.05	00.02	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	26.00	622.00	0.00030500	03.05	00.48	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	27.00	621.00	0.00023299	02.33	00.37	07.avr.98
411	411	1005	FR5	633780	128052	648.00	28.00	620.00	0.00070656	07.07	00.85	07.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	7.00	639.00	0.00285120	28.51	01.46	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	8.00	638.00	0.00311520	31.15	01.49	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	9.00	637.00	0.00239400	23.94	01.38	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	10.00	636.00	0.00254800	25.48	01.41	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	11.00	635.00	0.00188066	18.81	01.27	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	12.00	634.00	0.00269750	26.98	01.43	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	13.00	633.00	0.00046926	04.69	00.67	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	14.00	632.00	0.00138105	13.81	01.14	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	15.00	631.00	0.00405008	40.50	01.61	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	16.00	630.00	0.00160328	16.03	01.21	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	17.00	629.00	0.00134605	13.46	01.13	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	18.00	628.00	0.00000989	00.10	-01.00	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	19.00	627.00	0.00105811	10.58	01.02	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	20.00	626.00	0.00269100	26.91	01.43	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	21.00	625.00	0.00202240	20.22	01.31	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	22.00	624.00	0.00007688	00.77	-00.11	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	23.00	623.00	0.00079056	07.91	00.90	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	24.00	622.00	0.00111581	11.16	01.05	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	25.00	621.00	0.00008239	00.82	-00.08	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	26.00	620.00	0.00145386	14.54	01.16	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	27.00	619.00	0.00082858	08.29	00.92	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	28.00	618.00	0.00041488	04.15	00.62	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	29.00	617.00	0.00052954	05.30	00.72	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	30.00	616.00	0.00069738	06.97	00.84	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	31.00	615.00	0.00112172	11.22	01.05	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	32.00	614.00	0.00074584	07.46	00.87	06.avr.98
415	415	1006	FR6	633640	127173	646.00	33.00	613.00	0.00019148	01.91	00.28	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	1.91	639.09	0.00028900	02.89	00.46	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	6.00	635.00	0.00015392	01.54	00.19	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	7.00	634.00	0.00076818	07.68	00.89	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	8.00	633.00	0.00013673	01.37	00.14	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	9.00	632.00	0.00069734	06.97	00.84	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	10.00	631.00	0.00041750	04.18	00.62	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	11.00	630.00	0.00052452	05.25	00.72	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	12.00	629.00	0.00050676	05.07	00.70	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	13.00	628.00	0.00057218	05.72	00.76	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	14.00	627.00	0.00043802	04.38	00.64	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	15.00	626.00	0.00004608	00.46	-00.34	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	16.00	625.00	0.00005855	00.59	-00.23	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	17.00	624.00	0.00044604	04.46	00.65	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	18.00	623.00	0.00083304	08.33	00.92	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	19.00	622.00	0.00043518	04.35	00.64	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	20.00	621.00	0.00001248	00.12	-00.90	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	21.00	620.00	0.00002298	00.23	-00.64	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	22.00	619.00	0.00033018	03.30	00.52	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	23.00	618.00	0.00040601	04.06	00.61	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	24.00	617.00	0.00032318	03.23	00.51	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	25.00	616.00	0.00040018	04.00	00.60	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	26.00	615.00	0.00048418	04.84	00.69	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	27.00	614.00	0.00028351	02.84	00.45	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	28.00	613.00	0.00117837	11.78	01.07	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	29.00	612.00	0.00110136	11.01	01.04	06.avr.98

419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	30.00	611.00	0.00024034	02.40	00.38	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	31.00	610.00	0.00014700	01.47	00.17	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	32.00	609.00	0.00123670	12.37	01.09	06.avr.98
419	419	1008	FR8	632089	127640	641.00	33.00	608.00	0.00165671	16.57	01.22	06.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	4.70	639.30	0.00069100	06.91	00.84	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	8.00	636.00	0.00167000	16.70	01.22	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	9.00	635.00	0.00088700	08.87	00.95	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	10.00	634.00	0.00234000	23.40	01.37	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	11.00	633.00	0.00086500	08.65	00.94	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	12.00	632.00	0.00088600	08.86	00.95	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	13.00	631.00	0.00154000	15.40	01.19	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	14.00	630.00	0.00227000	22.70	01.36	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	15.00	629.00	0.00030700	03.07	00.49	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	16.00	628.00	0.00051700	05.17	00.71	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	17.00	627.00	0.00063200	06.32	00.80	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	18.00	626.00	0.00001190	00.12	-00.92	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	19.00	625.00	0.00031500	03.15	00.50	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	20.00	624.00	0.00015000	01.50	00.18	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	21.00	623.00	0.00012000	01.20	00.08	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	22.00	622.00	0.00003730	00.37	-00.43	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	23.00	621.00	0.00028400	02.84	00.45	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	24.00	620.00	0.00063900	06.39	00.81	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	25.00	619.00	0.00088500	08.85	00.95	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	26.00	618.00	0.00134000	13.40	01.13	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	27.00	617.00	0.00115000	11.50	01.06	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	28.00	616.00	0.00111000	11.10	01.05	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	29.00	615.00	0.00024300	02.43	00.39	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	30.00	614.00	0.00012300	01.23	00.09	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	31.00	613.00	0.00040300	04.03	00.61	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	32.00	612.00	0.00001920	00.19	-00.72	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	33.00	611.00	0.00055700	05.57	00.75	07.avr.98
423	423	1011	FR11	633635	127485	644.00	34.00	610.00	0.00034400	03.44	00.54	07.avr.98

Annexe 5: Analyses chimiques des eaux souterraines au niveau des graviers supérieurs (hautes-eaux 1987)

N° Piezo	X	Y	T° [C°]	K ₂₀ [µS/cm]	SO ₄ ⁻ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	Dt [°F]	O ₂ [mg/l]
A01	637'372.27	127'481.27	10.60	580.00	33.00	3.60	10.80	0.70
A02	637'128.43	127'447.55	8.40	200.00	19.00	2.30	1.30	1.10
A10	637'360.96	127'428.26	15.50	780.00	86.00	12.80	43.70	7.00
A51	637'596.00	127'598.00	11.90	300.00	239.00	241.00	15.90	1.10
A52	637'596.00	127'598.00	11.70	950.00	228.00	75.00	23.20	1.40
A60	637'413.00	127'598.00	9.40	990.00	55.00	127.00	39.50	2.10
A65	637'172.57	127'626.91	12.10	810.00	10.00	53.00	42.80	1.70
A70	637'386.77	127'798.08	10.90	410.00	27.00	35.20	18.50	1.10
A71	637'386.77	127'798.08	11.90	610.00	180.00	93.00	26.50	1.20
A85	637'074.00	127'765.00	15.60	640.00	231.00	15.30	30.80	5.20
B01	636'870.70	127'412.55	8.10	140.00	16.00	0.40	6.90	1.90
B05	636'528.56	127'365.77	10.20	290.00	56.00	7.60	8.70	1.70
B10	636'676.10	127'323.81	9.30	430.00	26.00	28.50	2.00	2.40
B20	636'890.22	127'322.62	10.90	1070.00	152.00	23.70	50.00	0.90
B60	636'876.00	127'492.00	8.90	840.00	198.00	57.00	13.00	2.20
B65	637'003.00	127'572.00	10.70	840.00	86.00	14.10	48.00	2.50
B67	636'591.61	127'459.79	-	-	34.00	9.40	18.90	-
B70	636'876.82	127'578.30	11.70	-	167.00	17.70	24.70	1.20
B75	636'656.23	127'582.05	10.30	780.00	195.00	19.00	15.70	1.30
B76	636'656.23	127'582.05	10.30	830.00	243.00	13.40	25.40	1.30
C01	636'224.23	127'326.27	8.40	220.00	39.00	1.40	12.10	1.60
C02	636'224.23	127'326.27	7.60	570.00	-	-	-	2.30
C10	636'226.45	127'270.36	9.50	430.00	10.00	8.00	24.30	2.00
C15	635'859.82	127'242.75	9.70	640.00	53.00	12.10	39.80	1.70
C20	636'238.17	127'194.88	14.30	930.00	122.00	27.70	47.60	3.50
C70	636'209.16	127'537.52	11.70	390.00	86.00	2.30	21.70	3.20
D01	635'588.92	127'247.05	7.10	220.00	25.00	2.30	12.30	2.10
D02	635'588.92	127'247.05	6.90	380.00	-	-	-	1.00
D04	635'415.14	127'258.04	6.50	300.00	56.00	5.50	13.70	1.60
D05	635'415.14	127'258.04	6.50	350.00	-	-	-	1.50
D10	635'597.35	127'209.31	8.20	380.00	58.00	12.10	18.00	1.20
D20	635'481.97	127'041.18	15.30	640.00	27.00	18.00	33.10	1.70
D50	635'582.59	127'315.15	8.40	260.00	27.00	0.80	14.80	3.90
D70	635'632.90	127'462.18	12.90	730.00	98.00	8.40	41.60	2.10
E01	635'271.93	127'303.23	7.10	320.00	39.00	1.90	17.30	3.00
E05	635'136.91	127'381.41	6.30	140.00	13.00	0.10	7.80	6.50
E06	635'136.91	127'381.41	6.20	240.00	-	-	-	1.40
E10	635'256.12	127'276.45	8.30	470.00	71.00	21.60	19.10	1.50
E20	635'197.27	127'140.30	7.90	620.00	10.00	5.10	33.60	2.10
E60	635'363.86	127'435.61	8.80	580.00	47.00	3.60	36.20	1.60
E80	635'485.14	127'796.04	12.30	1060.00	35.00	6.40	68.50	1.20
G01	634'871.58	127'555.13	5.80	170.00	17.00	0.30	9.70	6.40
G07	634'611.92	127'689.25	9.50	220.00	-	-	-	3.10
G08	634'611.92	127'689.25	9.50	350.00	6.20	6.50	15.20	1.40
G10	634'847.00	127'526.00	11.20	370.00	61.00	3.30	17.90	1.80
G20	634'805.00	127'402.00	10.00	410.00	57.00	7.70	20.30	2.20
G60	634'909.49	127'622.56	10.70	490.00	52.00	1.40	29.50	2.00
G70	635'020.21	127'771.68	12.90	1060.00	29.00	1.70	60.10	0.50
G85	634'906.00	127'904.00	15.00	480.00	135.00	11.00	22.60	6.70
H20	634'416.00	127'621.00	8.40	470.00	32.00	25.40	24.00	1.70

H30	634'373.00	127'502.00	15.00	630.00	69.00	27.00	31.20	1.40
H32	634'369.00	127'483.00	-	-	20.00	2.70	6.60	-
H40	634'241.00	127'218.00	12.00	1420.00	131.00	138.00	44.50	0.50
L01	633'993.86	127'924.07	9.40	210.00	34.00	1.70	11.80	3.30
L02	633'993.86	127'924.07	9.40	300.00	-	-	-	1.80
L20	633'947.25	127'709.89	9.20	810.00	125.00	30.50	46.70	0.60
L40	633'840.78	127'125.32	8.00	220.00	27.00	2.00	12.60	3.60
L45	633'811.00	127'077.00	-	110.00	23.00	0.50	6.10	-
L70	633'931.65	128'081.66	13.90	1200.00	184.00	36.30	69.50	0.90
M01	633'794.55	127'942.74	10.30	270.00	31.00	2.00	14.80	1.60
N01	633'581.33	127'951.86	8.50	130.00	10.00	0.30	8.80	4.70
N02	633'581.31	127'951.82	8.50	250.00	-	-	-	1.60
N20	633'584.85	127'745.46	14.00	450.00	47.00	10.60	25.70	1.80
N60	633'600.03	128'039.99	12.80	300.00	58.00	9.40	16.10	0.30
N70	633'602.03	128'110.91	11.50	830.00	38.00	5.40	52.90	0.80
O01	633'355.68	127'955.10	11.70	580.00	96.00	4.70	35.60	1.50
O10	633'389.07	127'915.21	11.30	700.00	103.00	4.00	40.50	0.60
O20	633'481.98	127'752.59	10.10	340.00	17.00	6.30	18.70	0.30
O65	633'289.60	128'032.99	9.40	440.00	57.00	6.20	23.70	4.20
O66	633'289.00	128'040.00	4.50	70.00	-	-	-	13.40
O70	633'364.35	128'084.68	11.60	890.00	192.00	6.00	56.80	0.20
Q20	633'264.57	127'875.38	8.50	220.00	-	38.00	11.70	1.10
Q25	633'191.48	127'829.74	9.90	400.00	36.00	3.80	22.90	0.90
Q30	633'449.31	127'644.79	8.70	210.00	26.00	1.50	12.00	0.90
Q35	633'189.94	127'609.37	10.10	480.00	43.00	4.90	28.30	0.90
Q40	633'637.16	127'163.59	10.30	470.00	49.00	4.60	27.60	2.10
Q60	633'151.90	128'046.11	13.60	230.00	40.00	29.40	11.90	1.90
R10	633'012.75	127'928.26	9.40	550.00	-	4.70	-	1.50
R20	633'005.80	127'889.82	9.40	390.00	40.00	61.40	23.20	1.50
R30	632'984.34	127'578.62	11.00	490.00	59.00	7.00	28.60	1.00
R40	633'007.51	127'267.07	11.20	300.00	21.00	0.50	15.90	2.60
R60	632'983.00	128'097.00	16.50	250.00	35.00	3.20	13.21	0.90
R70	633'005.00	128'199.00	12.50	280.00	10.00	7.80	15.60	0.60
T11	632'702.17	127'940.65	7.90	210.00	40.00	0.70	11.60	1.70
U20	632'482.73	127'872.33	9.00	420.00	78.00	7.30	22.70	2.00
U30	632'531.39	127'754.32	13.80	610.00	60.00	6.50	34.40	1.40
W20	632'282.34	127'796.39	-	270.00	45.00	2.90	14.80	-
W22	632'097.00	127'681.00	-	570.00	49.00	112.00	16.30	-
W25	632'087.00	127'668.00	-	470.00	39.00	5.60	27.90	-
W40	632'291.49	127'454.94	-	700.00	121.00	45.30	39.00	-
W50	632'354.00	128'071.00	-	70.00	13.00	0.80	3.80	-
W60	632'402.60	128'079.59	12.20	520.00	12.00	2.40	31.50	0.50
W70	632'450.11	128'245.48	10.90	460.00	10.00	2.40	26.40	0.30
X20	632'003.57	128'022.04	-	310.00	41.00	1.70	18.00	-
X60	632'065.00	128'342.00	11.30	370.00	11.00	3.20	21.20	0.40
Y10	631'796.00	128'230.00	-	190.00	24.00	0.90	10.40	-
Z20	631'488.00	128'149.00	-	290.00	-	-	-	-

Annexe 6 : : Valeurs des conductivités hydrauliques en m/s pour les variantes 00 à 10 du modèle 3-D^{ème} (3 corr. du Rhône)

Variante	Lithologie	Conductivité horizontale Kx, Ky [m/s]	Conductivité verticale Kz [m/s]
00	Ls	10-4	10-4
01a	Gs	10-4	10-4
01b	Li	10-4	10-4
	Gi	10-4	10-4
02a	Ls	10-4	10-4
02b	Gs	10-3	10-3
	Li	10-4	10-4
	Gi	10-3	10-3
03a1	Ls	10-5	10-5
03b1	Gs	10-3	10-3
	Li	10-5	10-5
	Gi	10-3	10-3
03a2	Ls	10-5	10-6
03b2	Gs	10-3	10-3
	Li	10-5	10-6
	Gi	10-3	10-3
03a3	Ls	10-5	10-7
03b3	Gs	10-3	10-3
	Li	10-5	10-7
	Gi	10-3	10-3
04a	Ls	10-4	10-4
04b	Gs	hétérogène: 3.9x10-3 à 4.2x10-4	10-4
	Li	10-4	10-4
	Gi	10-3	10-3
05a	Ls	10-5	10-5
05b	Gs	hétérogène: 3.9x10-3 à 4.2x10-4	10-5
	Li	10-5	10-5
	Gi	10-3	10-3
06a	Ls	hétérogène: 6.9x10-4 à 3x10-7	10-5
06b	Gs	hétérogène: 3.9x10-3 à 4.2x10-4	10-6
	Li	10-5	10-6
	Gi	10-3	10-3
07a	CR1MD	10-5	10-5
07b	Ls	hétérogène: 6.9x10-4 à 3x10-7	10-6
	Gs	hétérogène: 3.9x10-3 à 4.2x10-4	10-3
	Li	10-5	10-6
	Gi	10-3	10-3
08a	CR1M	10-5	10-5
08b	Ls	hétérogène: 6.9x10-4 à 3x10-7	10-6
	Gs	hétérogène: 3.9x10-3 à 4.2x10-4	10-3
	Li	10-5	10-6
	Gi	10-3	10-3
09a	CR1M	10-5	10-6
09b	Ls	hétérogène: 6.9x10-4 à 3x10-7	10-3
	Gs	hétérogène: 3.9x10-3 à 4.2x10-4	10-6
	Li	10-5	10-6
	Gi	10-3	10-3
10a	CR1M	10-5	10-7
10b	Ls	hétérogène: 6.9x10-4 à 3x10-7	10-6
	Gs	hétérogène: 3.9x10-3 à 4.2x10-4	10-3
	Li	10-5	10-6
	Gi	10-3	10-3

CR1MD = Couche de colmatage du Rhône de 1 m d'épaisseur fonctionnant comme un drain

CR1M = Couche de colmatage du Rhône de 1 m d'épaisseur fonctionnant comme une barrière hydraulique

Ls = Limons supérieurs

Gs = Gravieres supérieurs

Li = Limons intermédiaires

Gi = Gravieres inférieurs

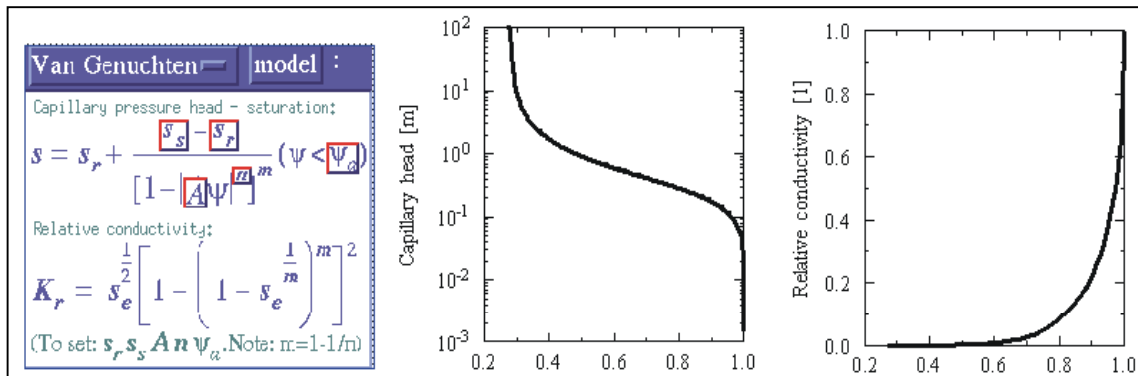
vert = Variante avec puits de la Lonza (Sandmatt B1 et Lonza 83)

rouge = Modification par rapport à la variante précédente

Paramètres hydrauliques pour le milieu saturé

Paramètre	Variante				
	00R	01R	02R	03R	04R
K limons [m/s]	10-3	10-5	10-5	10-5	10-5
K graviers [m/s]	10-3	10-3	10-3	10-3	10-3
K parois moulées [m/s]	10-3	10-5/10-3	10-8	10-8	10-8
Compressibilité [1/m]	10-4	10-4	10-4	10-4	10-4

Paramètres hydrauliques pour le milieu non-saturé (Feflow 4.8, Diersch, 1999) Modèle de Van Genuchten (1980)



Paramètres	Limons	Graviers
Porosité maximale [1]	0.3	0.3
Saturation maximale S_s [1]	1	1
Saturation résiduelle S_r [1]	0.03	0.001
Coefficient d'ajustage A [1/m]	5	10
Exposant d'ajustage n [1]	1.55	2
Pression d'air d'entrée P_{sia} [m]	0	0

Annexe 7 : Paramètres hydrauliques utilisés pour les milieux saturé et non saturé pour les profils MQ1 et MQ2 étendus

3-D Groundwater Flow Modeling in Heterogeneous Geologic Media : Integrated Approach Using Spatial and Temporal Database, Geostatistics and GIS

Francesco Kimmeier

SHORT TABLE OF CONTENTS

I. INTRODUCTION GENERALE

II. GIS DATABASE AS SUPPORT TO GROUNDWATER PROBLEM RESOLUTION

II.1 TRACES/VIEW - TRAÇAGE DES EAUX SOUTERRAINES : APPLICATION SIG EN MILIEU KARSTIQUE JURASSIEN (SUISSE)

II.2 GEOHYDROLOGICAL PARAMETERS IDENTIFICATION AND GROUNDWATER VULNERABILITY TO POLLUTION: A SWISS CASE STUDY

III. GROUNDWATER MODELING AT DIFFERENT SCALE USING FINITE ELEMENTS METHOD AND STOCHASTIC MODELING FOR UNCERTAINTY ESTIMATION

III.1 3-D GROUNDWATER MODELING AT REGIONAL SCALE

III.2 BASE DE DONNEES, SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE, GEO-STATISTIQUE ET MODELISATION 3-D DES EAUX SOUTERRAINES A L'ECHELLE LOCALE DANS LA REGION DE VISP (SUISSE)

III.3 TRAVEL PATH UNCERTAINTY : A CASE STUDY COMBINING STOCHASTIC AND DETERMINISTIC HYDRODYNAMIC MODELS IN THE RHÔNE VALLEY, SWITZERLAND

IV. CONCLUSIONS GENERALES ET TRAVAUX FUTURS

KIMMEIER'S SHORT CURRICULUM VITAE AND LIST OF PUBLICATIONS

Travel path uncertainty : a case study combining stochastic and deterministic hydrodynamic models in the Rhône valley, Switzerland

Francesco Kimmeier¹, Mahmoud Bouzelboudjen¹, Rachid Ababou², Luis Ribeiro³

¹ CHYN - Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, Emile-Argand 11, 2007 Neuchâtel, Suisse

² IMFT - Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Allée C. Soula, 31400 Toulouse, France

³ CVRM-Instituto Superior Técnico, av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

ABSTRACT

In the framework of waste storage in geological formations at shallow or greater depths and accidental pollution, the numerical simulation of groundwater flow and contaminant transport represents an important instrument to predict and quantify the pollution as a function of time and space. The numerical simulation problem, and the required hydrogeologic data, are often approached in a deterministic fashion. However, deterministic models do not allow to evaluate the uncertainty of results. Furthermore, the hydrogeologic data and hydrodynamic properties required to implement the flow-transport model are generally very scant, so that an essential part of the simulation effort needs to be devoted to building the different spatially distributed data through spatial interpolation, extrapolation, smoothing, etc. In this paper, deterministic (classic finite element hydrodynamic model) and stochastic approaches (geostatistics: kriging and conditional simulations) are used for evaluating groundwater flow patterns and pollutant trajectories for a site-specific application (Rhône valley aquifer in Switzerland, area of 6.5 km²). The stochastic approach, based on kriging and multiple conditional simulations, leads to a quantification of uncertainty of flow-transport simulations, which are due to the underlying uncertainty of hydrogeologic properties and their spatial distribution. The available data used in this case study are : 55 transmissivity, 791 permeability and 145 hydraulic potential values. In spite of the relative wealth of available data, our study shows that the uncertainty of pollutant migration pathlines and travel distances is relatively important. The distance traveled by a pollutant particle during 30 months varies between 3150 m and 4800 m over five different but equally plausible scenarios (conditional simulations). The uncertainty is about 42% relative to the average travel distance, or 55% relative to the smallest travel distance mentioned above.

Keywords : Kriging, conditional simulation, travel path uncertainty, hydrodynamic modeling.

1. INTRODUCTION

In the area of environmental and subsurface pollution, hydrogeologists and engineers are mainly concerned with the problem of predicting pollutant migration

and identifying pollution sources, which is an essential prerequisite for the development of efficient planning tools (scenarios) and remediation strategies (management). To address these challenges, scientists must first analyse all the available data in order to estimate, in particular, the hydrodynamic parameters of the geological formations which affect groundwater flow and migration of dissolved chemical species migration. However, these hydrogeologic parameters are extremely variable in space, and difficult to measure accurately at many points. For example, local values of hydraulic permeability in an aquifer are often not known or only very roughly (say within one order of magnitude). In general, therefore, a precise estimation of spatially distributed parameters like hydraulic permeability is indeed very difficult to obtain [Schafmeister and Peckdeger, 1992].

The spatially distributed estimation problem can be attacked by geostatistical methods [Cressie, 1993; Chilès & Delfiner, 1999] which are able to determine "the best" possible estimation considering the available information, and also, to estimate the confidence intervals associated with this estimation [Matheron 1970; Delhomme 1979; Chilès and Delfiner 1999]. In particular, geostatistical methods based on kriging and random field simulations [Chauvet 1992; Ababou & al. 1994] can be used to estimate the uncertainty of the parameters via root-means-square errors. Furthermore, they can be used to generate several equally plausible replicates of the parameters taking both their spatial distribution and their uncertainty into account. Consequently, these methods are very useful for developing optimal strategies for the management of water resources [Ribeiro and Muge, 1989], optimizing and reducing the cost of observation networks [Rouhani 1990; Kitanidis 1997; Jaquet & al., 2000], and designing the protection of groundwater catchments [Vassolo & al., 1998].

This paper illustrates this type of approach for a specific site located in the Rhône valley, Valais, Switzerland (Annex 1). The aquifers of the Rhône valley in Switzerland are of great economic importance. The groundwaters connected to the Rhône river can easily be reached and are therefore exploitable at modest costs. However, the situation of these aquifers located in narrow valleys with intense human activity (industries, agriculture, railways, roads and highways) makes them especially vulnerable in terms of water quality (industrial and/or agricultural pollution) as well as quantity (local or regional disorders).

2. MATERIALS AND METHODS

Since 1995, the swiss canton of Valais has decided to compile datasets from a number of local studies (water supply, hydro-electricity, and geotechnical studies) into a regional, integrated hydrogeological framework. The management of contaminated sites in Switzerland – and in the canton of Valais in particular has now become a major concern in the area of water resource protection. Indeed, a new legislation (OEaux 1998) now requires the delineation of the zone of influence of all water catchments of public interest that are vulnerable to pollution.

Our study area is located in a 6.5 km² area of the Rhône valley, approximately 8 km long and 0.8 km wide, located near the town of Visp on the alluvial plain of the Rhône Valais (Fig. 1). The area is a very vulnerable zone due to the presence of the Lonza industry (a chemical fertilizer factory) situated near the town of Visp which includes in particular a chemical waste repository (Fig. 1). The groundwater flow in the aquifer is strongly conditioned by the surface flow in the river (Rhône) and in the canals (Brigerbadkanal and Grossgrundkanal). The valley deposits consist of

quaternary sediments of glacial (recessional and lateral moraine), lacustrine, and fluvial origins. Rhône valley gravel alluvium forms the main aquifer of the region. The distribution of the different lithological formations to model is shown in Fig. 1 in the right inset, representing the vertical cross-section AB along the valley. From the top to the bottom the different formations are : shallow silts with an average thickness of 10 m (absent in some places), an upper gravel unit with an average thickness of 16 m (10 to 19 m), middle silts, which are never more 20 m thick (and are absent in some places) and overlying a lower gravel formation (average thickness 20 m).

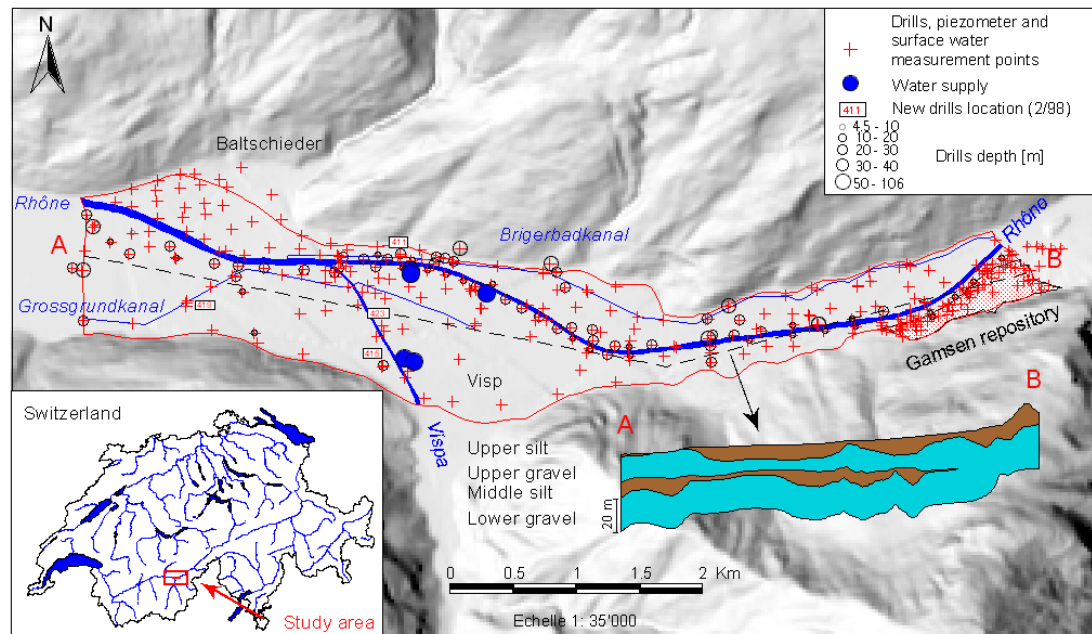


Figure 1 : Digital Elevation Model (DEM) of the Rhône valley between Gamsen and Baltschieder, Valais, Switzerland. The symbols show the positions of 144 drill points, 386 piezometers, and 23 surface water measurement points. The left inset shows the situation of the study area on a hydrographic map of Switzerland. The right inset displays the lithology of a vertical cross-section (AB) along the valley.

The dataset used in this study is relatively important in terms of number and quality of data. In particular it includes :

- 145 measurements of hydraulic potential H (m) in the upper partially confined aquifer, from 145 piezometers that are more or less evenly distributed in both the axial and transverse directions of the valley;
- 55 values of transmissivity T (m^2/s) located mainly along the Rhône river; this implies that the spatial distribution of transmissivity is effectively known only along the 1-D axis of the valley (parallel to the river) and not across the valley. The preferential orientation is due to the fact that the drilling location were related to the proposed position of a highway parallel to the river.

In this work, a structural analysis (basic statistics and variography) of both hydrodynamic variables H and T discussed above was first conducted. Geostatistical techniques (kriging) were then applied to obtain an optimal estimation of aquifer properties, and stochastic conditional simulations were conducted to generate multiple replicates of aquifer properties, groundwater flow patterns, and pollutant migration pathlines. A "classical" deterministic model of groundwater flow (finite element method) was used to simulate groundwater flow for a given spatial distribution of

transmissivities. The combination of deterministic and stochastic hydrodynamic modeling allows a better characterisation of the spatial heterogeneity associated with the uncertainty of groundwater flow parameters given the available dataset.

It should be emphasized that the Rhône valley aquifers had only hitherto been studied, using deterministic models only. These models were used for assessing the future impact of the planned highway [Bouzelboudjen and Király, 1989], the impact of a potential pollution from the Gamsen repository depicted in Fig. 1 [Rossier, 1990], and the required correction of the Rhône riverbed [Kimmeier & al., 2000].

Fig. 1 shows the spatial database used within the framework of this study. The locations of the 144 boreholes, 386 piezometers and 23 surface water measurement points are presented. The boreholes are represented with symbols proportional to their depth. On the Fig. 2 and 5 we can see the 55 measurements of transmissivity and 145 of hydraulic potential.

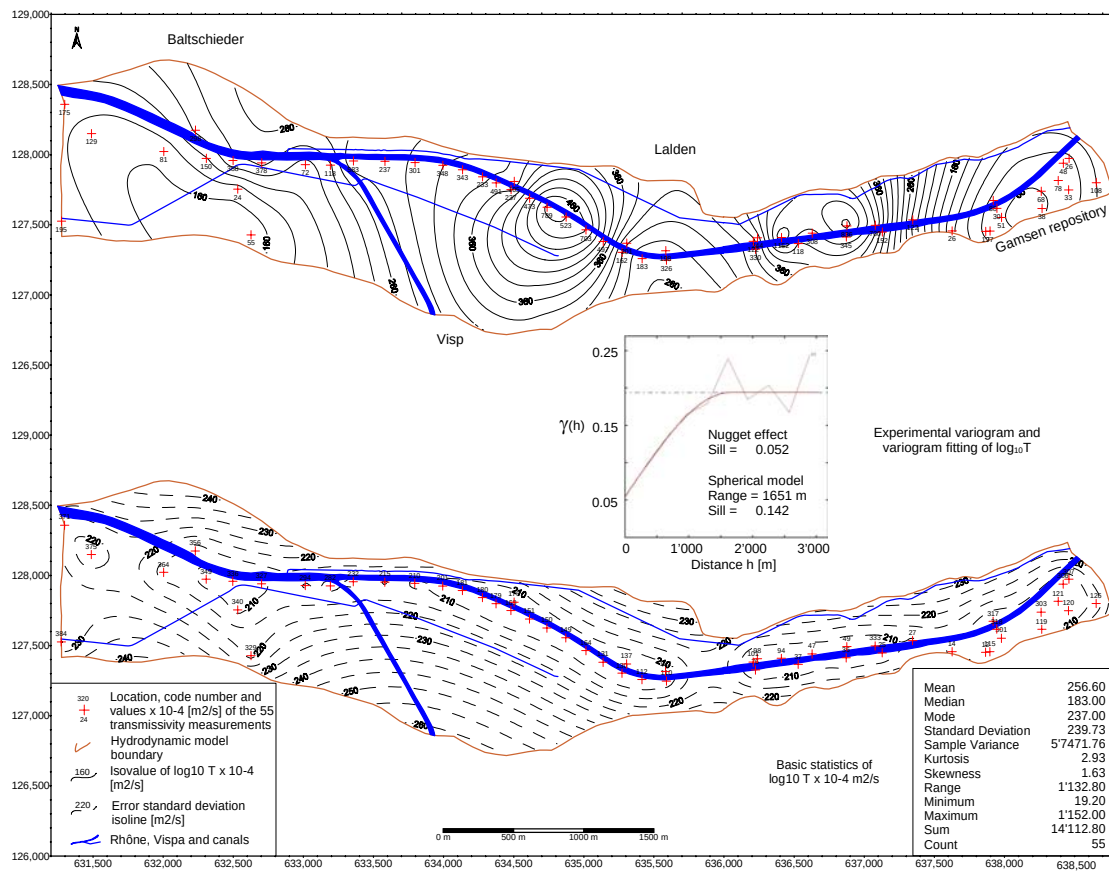


Figure 2 : Kriging maps of log-transmissivity field $\log_{10}T$ in the Rhône valley study area. The contour map of estimated (kriged) log-transmissivity is displayed above, and the contour map of root-mean-square estimation error $\varepsilon_{\log T}$ is shown below. The numbers indicate isovalues of $\log_{10}T$ (above) or $\varepsilon_{\log T}$ (below), with T given in $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ units.

2.1 The geostatistical approach

To calculate the hydraulic potential (H) fields and velocity fields by means of a hydrodynamic model, preliminary knowledge of the transmissivity (T) field is necessary. The direct knowledge of this field can be only partial. To reconstruct the T and H fields we used a probabilistic approach developed by Matheron [1970] and applied to the water sciences by Delhomme [1979]. The term "regionalized" was

proposed by Matheron [1970] to qualify a phenomenon developing in the space (and/or in the time) and showing a certain structure. We treated regionalized variables by using the probabilistic theory of the random functions and interprets the regionalized variable as a "realization of the random function" [Delhomme, 1979]. The work of interrogation of the data, then the modelling of their structural properties, establishes under the name of variographic analysis the inescapable phase of any concrete geostatistical study [Chauvet, 1992].

In the probabilistic models, the simplest tool to measure a estimator quality is the variance. One makes the hypothesis that for a vector h , the increase $Z(x + h) - Z(x)$ has an expected value and a variance independent at the point x , it is the intrinsic hypothesis :

$$E[Z(x + h) - Z(x)] = 0 \quad (1)$$

$$Var[Z(x + h) - Z(x)] = 2\gamma(h) \quad (2)$$

The function $\gamma(h)$ is called semi-variogram. The semi-variogram is calculated by :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [(z(x_i + h) - z(x_i))^2] \quad (3)$$

$z(x_i)$ are the data, x_i the points for which the data are available at the same moment in x_i and $x_i + h$ and $N(h)$ is the number of couples of points distant from h . In any geostatistical study the hypothesis of stationarity and ergodicity should be verified to allow correct estimations [Chauvet, 1992]. Having fitted a model to the experimental variogram , an estimation of our variable can be made at all points of a regular grid by the method of the standard kriging [Geostatistics, 1998].

There are other estimation methods taking into account the non-stationarity of the phenomenon (universal kriging, Intrinsic Random Function of order k : IRF- k), [Chauvet, 1992].

Simulations represent other methods of estimation which reconstruct the real variability of the variable and allow to calculate probability maps [Chilès and Delfiner, 1999]. If $Z(x)$ is the studied regionalized variable, which we consider as a realization of a IRF- k , and which is known only at n points x , one calls conditional simulation of $Z(x)$ any realization $T(x)$ of the same IRF- k that passes by the data at points x . A conditional simulation is thus characterized by both following properties : it has the same generalized covariance as the phenomenon considered, and it passes through the experimental points.

Although the conditional simulations are not good estimators of the real field (the best estimator being the kriging) they are possible variants of the real field presenting the same degree of variability, respecting what one knows of the real field. They allow to surround the possible fluctuations in the phenomenon [Tompson and al., 1989] better than do the kriging (which smooths the reality) and the standard deviation of kriging (which does not give indication on the spatial structure of the error of estimation). They remain however connected to the kriging : if one builds a great number of conditional simulations, the average of their values at a point will restore the estimated value by kriging, and their variance of corresponding estimation.

2.2 The 2-D groundwater modeling approach

Finite element numerical models are particularly well suited to simulate groundwater flow in heterogeneous media. The 2-D saturated, constant density, steady state groundwater flow is represented by equation 4 :

$$\text{div}\left(-\overline{\overline{T}}.\vec{\text{grad}} h\right)+q=0 \quad (4)$$

where $\overline{\overline{T}}$ is the hydraulic transmissivity tensor [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$], h is the hydraulic head [m], and q represents the general source/sink term [$\text{m}^3/\text{s}.\text{m}^2$] (infiltration, well discharge, etc.).

For this study the finite-element simulation system Feflow [Diersch, 1999] was used to model groundwater flow and transport processes for the calculation of the 2-D flow system, velocity field, trajectories and travel distances in steady state flow.

The necessary data for the calculation are the geometry of elements, the transmissivity for every element and boundary conditions.

3. APPLICATION AND RESULTS

3.1 Transmissivity field reconstruction by kriging and conditional simulations

Both kriging and conditional simulations were used to study the influence of the spatial variability of transmissivity on the groundwater flow. Based on the 55 values of transmissivity of the upper gravels, the following statistics are obtained : $25.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ for the average, $1.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ for the minimum, and $115.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ for the maximum. The logarithm of the transmissivity was used to calculate the experimental omnidirectionnel variogram (no detectable anisotropy) presenting an nugget effect (sill = 0.05). A spherical model (range = 1651 m, sill = 0.14) was fitted on the experimental model (Fig. 2) at the maximal variance (0.19).

First, the 55 values of transmissivity were regionalized on a grid of 25 x 25 m by using the method of the standard kriging with Isatis software [Geostatistics, 1998] allowing the mapping of the estimated variable and the error of estimation.

Secondly, conditional simulations were realized, by the method of Turning bands (1000 bands) [Delhomme, 1979], to generate five likely fields of log-transmissivity $\log_{10}T$ [$10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$] on a grid of 25 x 25 m (Fig. 3). Comparison of the results of the conditional simulations reveals that the five histograms and experimental variograms are similar (Fig. 4). Moreover the average and the standard deviation of every simulation is comparable to the average and to the standard deviation of the 55 transmissivity values.

3.2 Hydraulic potential field reconstruction by kriging

In order to impose to the hydrodynamic finite element model the hydraulic potential at the boundaries (upstream, downstream, and hydrographic system in connection with the aquifer [Bouzelboudjen, Király, 1989], Fig. 1 and 6) the variable hydraulic potential was regionalized by kriging (Fig. 5). The basic statistics for the

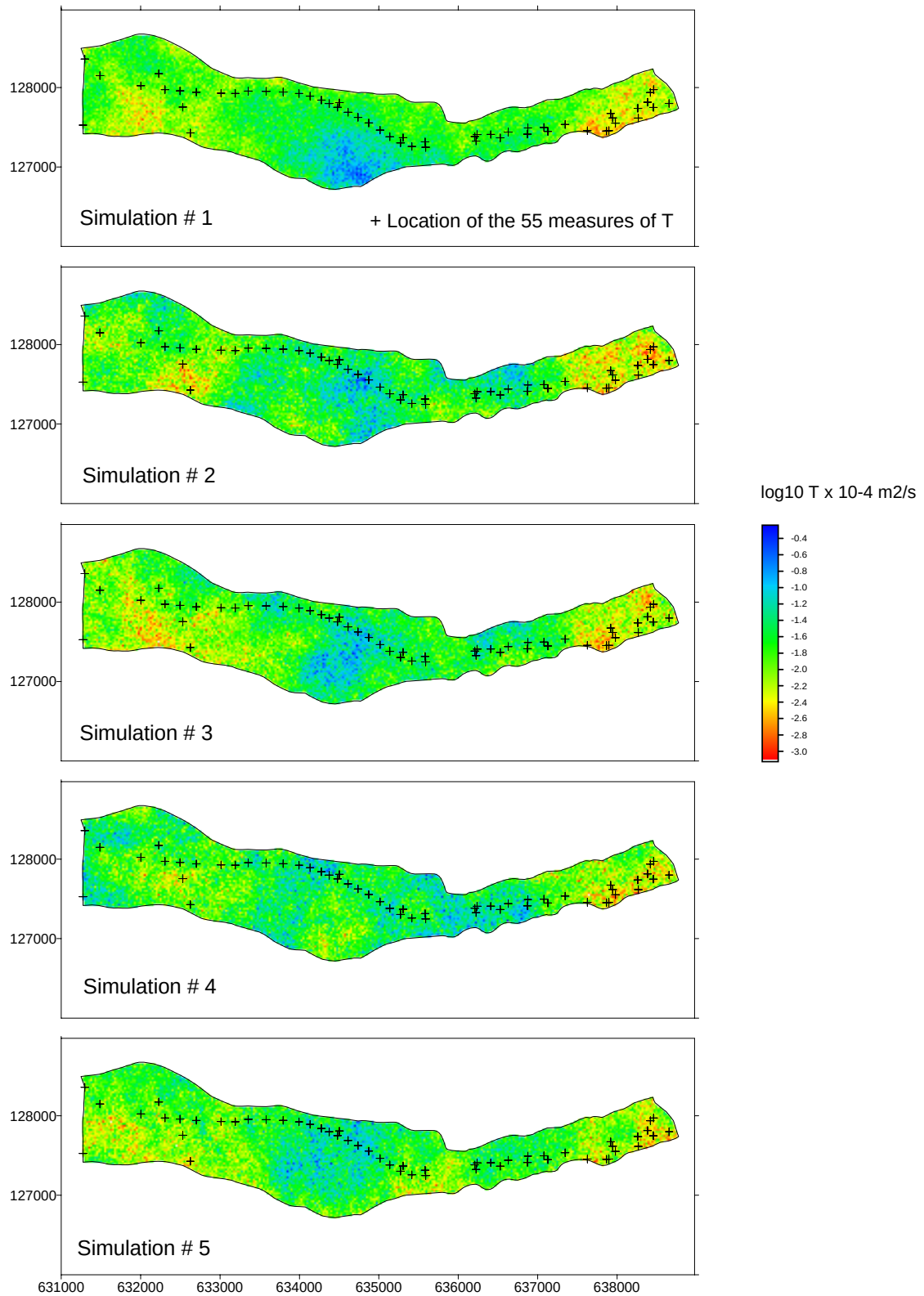


Figure 3 : Color maps of 5 replicates of the log-transmissivity field $\log_{10} T$ [$10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$] in the upper gravel aquifer, obtained by conditional simulations with the Turning Bands method. The conditional simulation grid is 25 m x 25 m. The crosses indicate the location of the data.

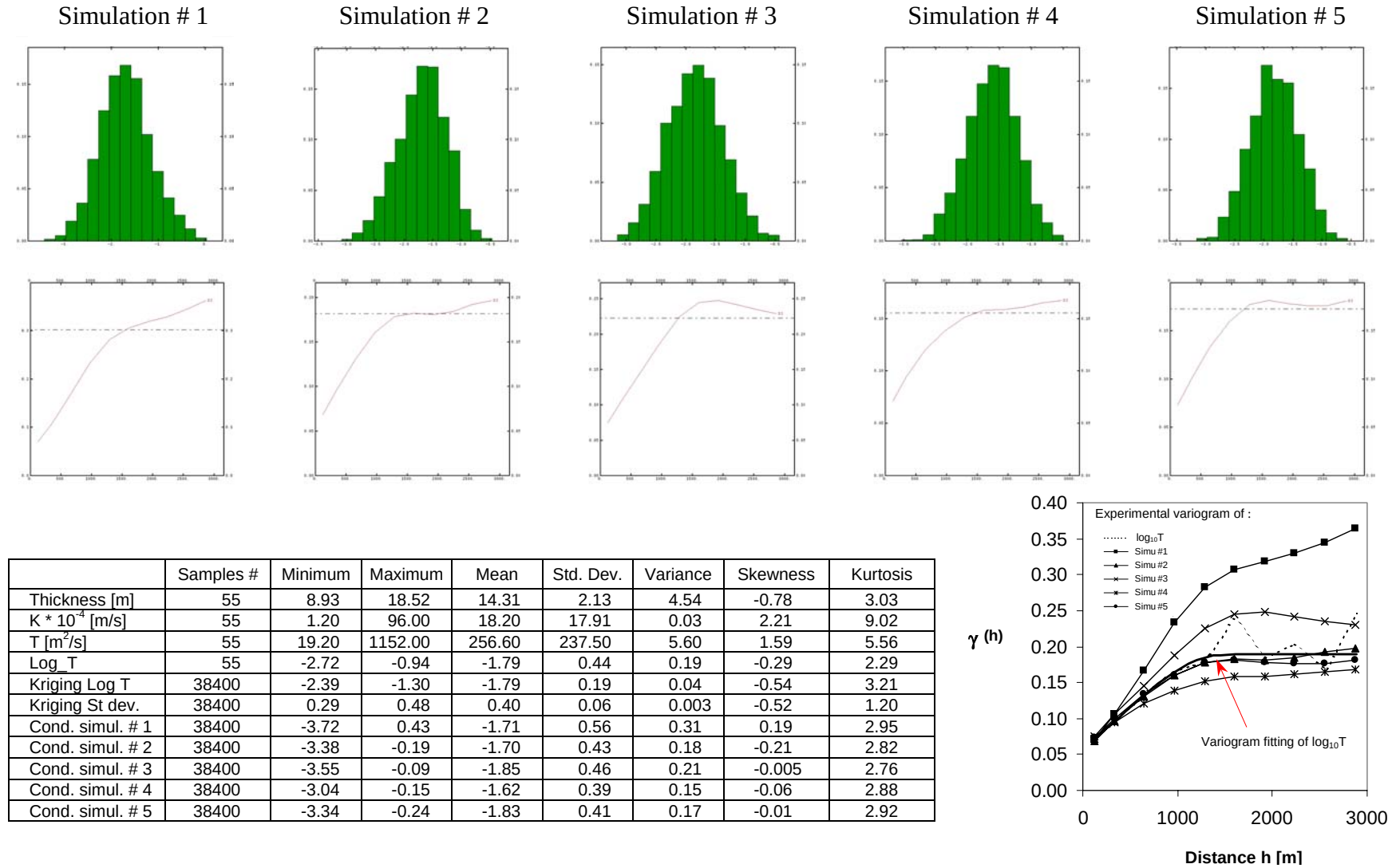


Figure 4 : Single-point and two-point statistics of the 5 simulated log-transmissivity field replicates : $\log_{10}T$ histograms (top), experimental $\log_{10}T$ variograms (middle), single-point moments of T and $\log_{10}T$ (table at bottom left), and superimposed experimental variograms of the 5 $\log_{10}T$ replicates (bottom right). Variogram distances "h" are given in meters.

145 values of hydraulic potential are : 646.1 m for the average, 638.5 m for the minimum and 655.7 m for the maximum. The hydraulic potential variogram presents non-stationary spatial behavior characterized by a parabolic increase. It does not stabilise at great distance reflecting the presence of a drift (Fig. 5). The recognition of structures is indirect and is made automatically in two steps [Geostatistics, 1998]. The first step consists in determining the degree of the drift by least-squares method. The second step consists in adjusting models of covariance generalized by iterative regression and selection of the optimal model. The hydraulic potentials were regionalized on a grid of 25 x 25 m using the method of the Isatis standard kriging. The moving neighborhood method of kriging allows an interpolation which takes into account the local variations of the hydraulic potential.

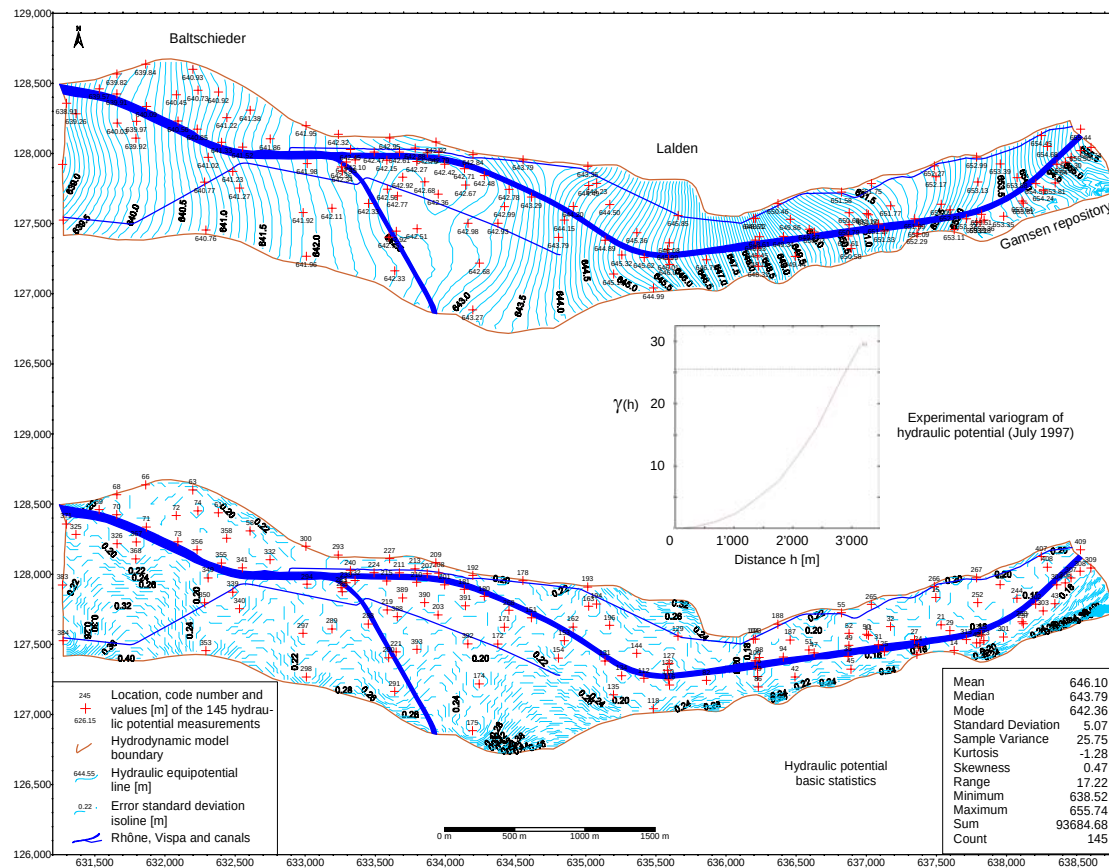


Figure 5 : Kriging contour maps of hydraulic potentials H (high water July 1997) in the upper gravel aquifer of the Rhône valley study area. The map of estimated (kriged) potential H is shown above, and the root-mean-square estimation error ε_H is shown below. The numbers indicate isovalues of estimated H (above) and of error ε_H (below) in meters. The histogram and variogram of hydraulic potentials are also depicted (insets).

3.3 Analyze of hydrodynamic model results

Fig. 6 shows the 2-D network of triangular finite elements for the mathematical hydrodynamic model as well as the nodes where the hydraulic potential were imposed along the Rhône river, along canals, and at the upstream and downstream boundaries (values issued of the map of estimated hydraulic potential by geostatistics, Fig. 5). The lateral boundaries are considered as no flow boundaries. After transformation of $\log_{10}T$ to T , the various fields of transmissivity were assigned at the elements of the hydrodynamic model to obtain calculated hydraulic potential and velocity fields.

Fig. 6 also shows the results of one calculation of the distribution of calculated hydraulic potential by hydrodynamic model (simulation #1). It is interesting to compare the fields of hydraulic potential obtained by both methods (geostatistics and hydrodynamic models, Fig. 5 and 6). They show a similar distribution in their general presentation. The only problem not taken into account in the geostatistical simulations is the boundary conditions.

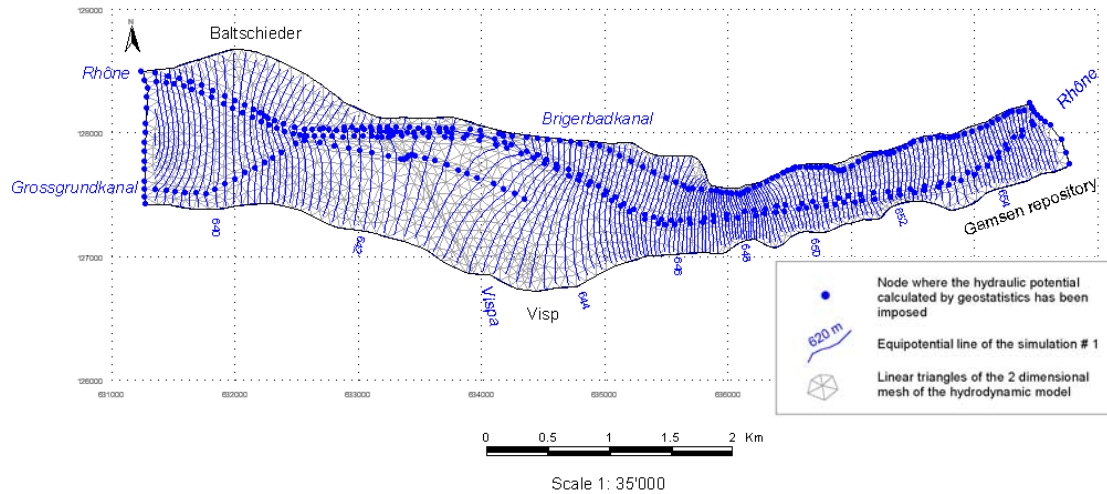


Figure 6 : Two-dimensional contour map of the calculated hydraulic potentials H obtained from groundwater flow simulation #1. The potential contours are superimposed on the 2D triangular mesh of the hydrodynamic model. The full circle symbols indicate upstream-downstream boundary conditions and "internal" river conditions (imposed hydraulic potentials).

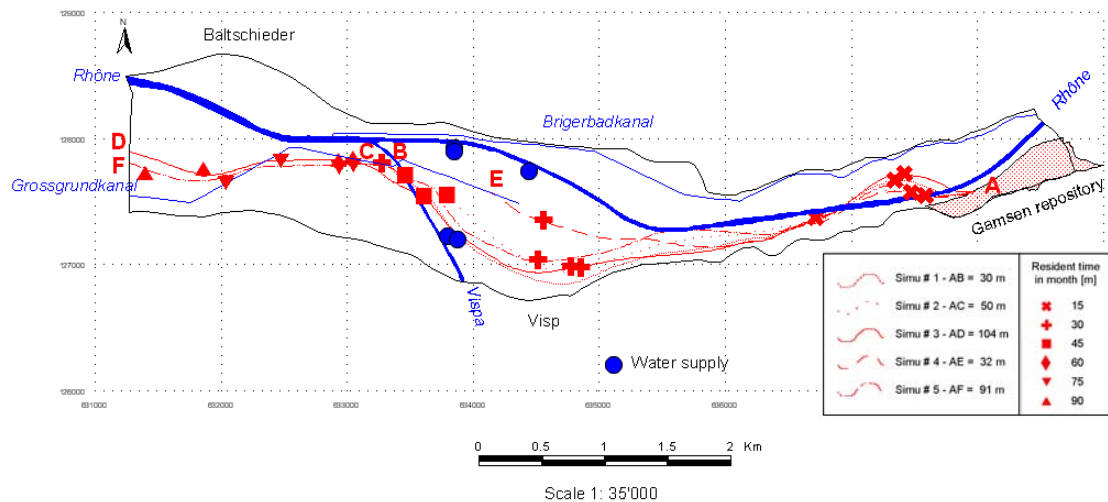


Figure 7 : Visualization of 5 tracer pathlines issuing from a single point source (A). Travel distances at 15-months intervals are also indicated along each pathline, using a distinct symbol for each pathline. The 5 pathlines correspond to 5 groundwater flow patterns calculated with the 5 conditional replicates of log-transmissivity.

Fig. 7 synthetizes the influence of the spatial variability of the transmissivity on the groundwater flows systems. It shows five tracer pathlines issuing from a single point source (A). Points B, C, D, E and F represent discharge zones. Travel distances at 15-months intervals are also indicated along each pathline, using a distinct symbol

for each pathline. The five pathlines correspond to five groundwater flow patterns calculated with the five conditional replicates of log-transmissivity.

Trajectory dispersal is apparent from the data. The distance traveled by a pollutant particle over 30 months varies between 3150 m and 4800 m over five different but equally plausible scenarios (conditional simulations). The uncertainty is about 42% relative to the average travel distance, or 55% relative to the smallest travel distance mentioned above. This result is important for groundwater catchment protection (see Fig. 7, location of water supply).

4. CONCLUSIONS

As main result of this study, we show that the uncertainty of the results in terms of pollutant migration can be relatively important and that the probabilistic approach is a good means to estimate this uncertainty. Our immediate purpose in this preliminary study was not to conduct a complete probabilistic analysis of the possible trajectories, but only to assess roughly the importance of uncertainties in predictions of pollutant migration, given the available data. Conversely, these uncertainties measure, in a sense, the information content of our dataset in terms of pollutant transport. With this in mind, we constructed and analyzed only five simulations – rather than the hundreds or thousands that would be required for a full Monte-Carlo analysis of the pollution migration problem. In spite of this limitation, our study clearly shows what type of results can be obtained with the probabilistic approach. For instance, it was found that the distance traveled by a pollutant particle during 30 months varies between 3150 m and 4800 m over the five different (but equally plausible) conditional simulations. The

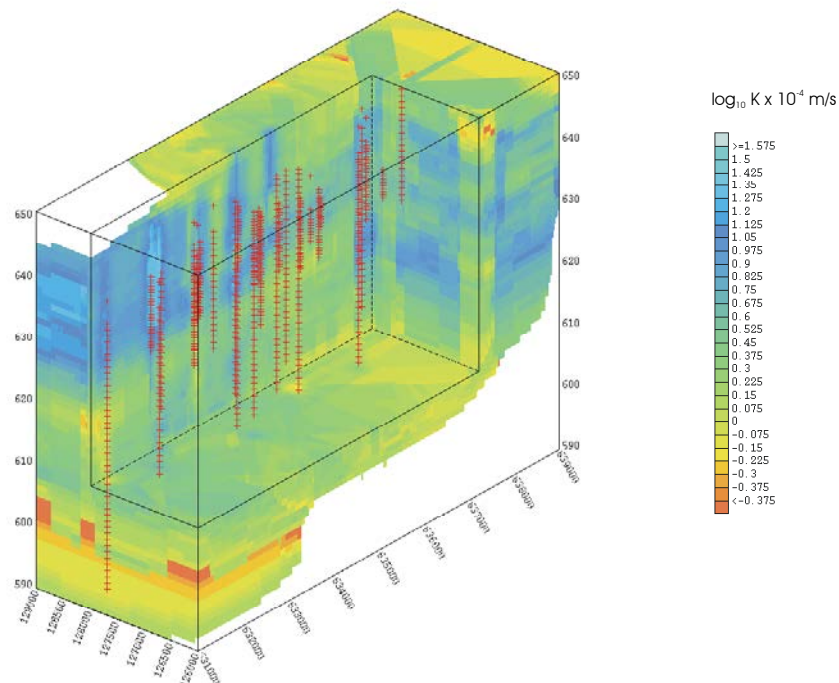


Figure 8 : 3-D color display of estimated log-permeability distribution obtained from flowmeter measurements within the Visp area, Valais, Switzerland (Rhône valley). The color shading indicates values of $\log_{10} K \times 10^{-4} \text{ m/s}$ estimated by standard kriging with an omnidirectional variogram (*Isatis 3*). The (x, y, z) estimation grid is 25m x 25m x 1m. The crosses indicate the (x, y, z) positions of the 791 values of flowmeter measurements.

uncertainty amongst the five different transport scenarios is therefore about 42% relative to the average travel distance, or 55% relative to the smallest travel distance. It should be emphasized that the probabilistic approach is particularly relevant in the case at hand, as it answers the new swiss requirements of water catchment protection (see introduction). Our conclusion is that an extensive analysis of uncertainty and risk is feasible in this probabilistic framework, and that such an analysis should accompany any serious study on pollution migration and remediation. Another important point is that our probabilistic approach is geostatistically-based, that is, it uses spatial statistics. It is therefore well adapted to the formulation of optimal estimation (kriging) and uncertainty analysis of multidimensional, spatially distributed groundwater pollution problems.

5. FUTURE WORK

The methods mentionned above can be extended to conduct a joint estimation of hydraulic heads H and aquifer transmissivities T by exploiting the spatial cross-correlation between T and H (co-kriging). This technique should further improve the estimation of T via (T, H) correlations, since H data (piezometers) are more easily acquired than transmissivity or permeability data (well tests, borehole flowmeter tests, etc). However, the co-kriging technique can be implemented only if one knows "in advance" the (T, H) cross-correlation function between T . Several authors propose geostatistical co-kriging approaches based on stochastic models of the (T, H) spatial correlation structure, on more or less physical grounds [Mizell 1980; Dagan 1985; Gelhar 1993; Dong 1990; Roth 1997]. In some of these works, the groundwater flow is used to obtain the (T, H) correlation structure. The resulting co-kriging estimation scheme is then equivalent to solving an inverse groundwater flow problem (with probabilistic regularization). In future, we intend to treat the pollution problem in 3-D (by combination of 2D and 3D permeability data measured on different scales; taking

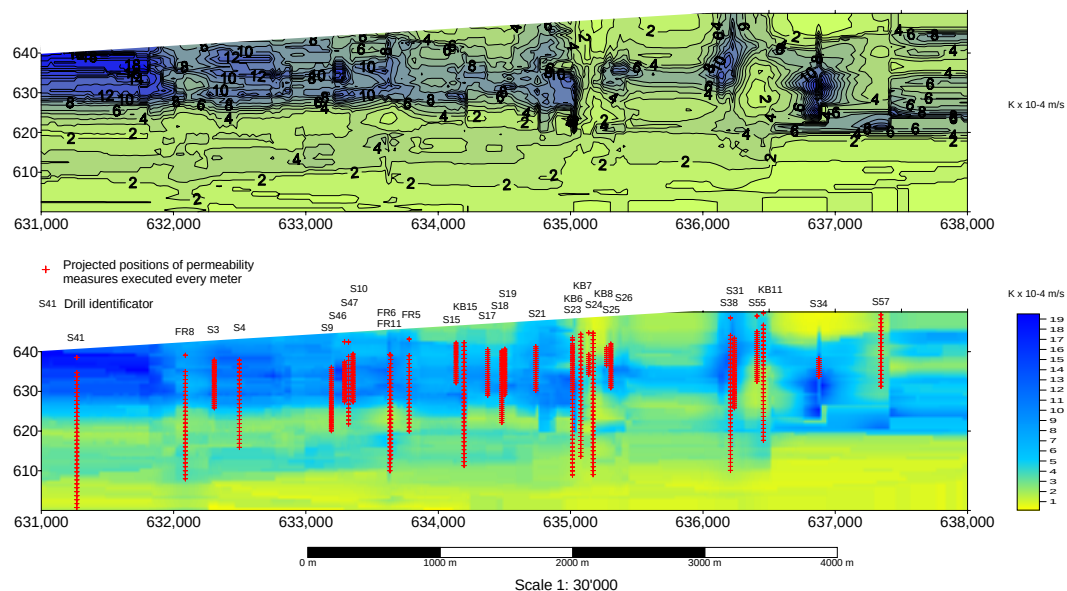


Figure 9 : Visualization of a 2-D vertical cross-section of permeability $K(x, z)$, extracted and transformed from the kriged 3D log-permeability field $K(x, y, z)$. The top view shows iso-value contours of $K \times 10^{-4} \text{ m/s}$, while the bottom view displays a color-coded map of the same. This cross-sectional permeability map is to be compared with the lithologic profile of figure 1.

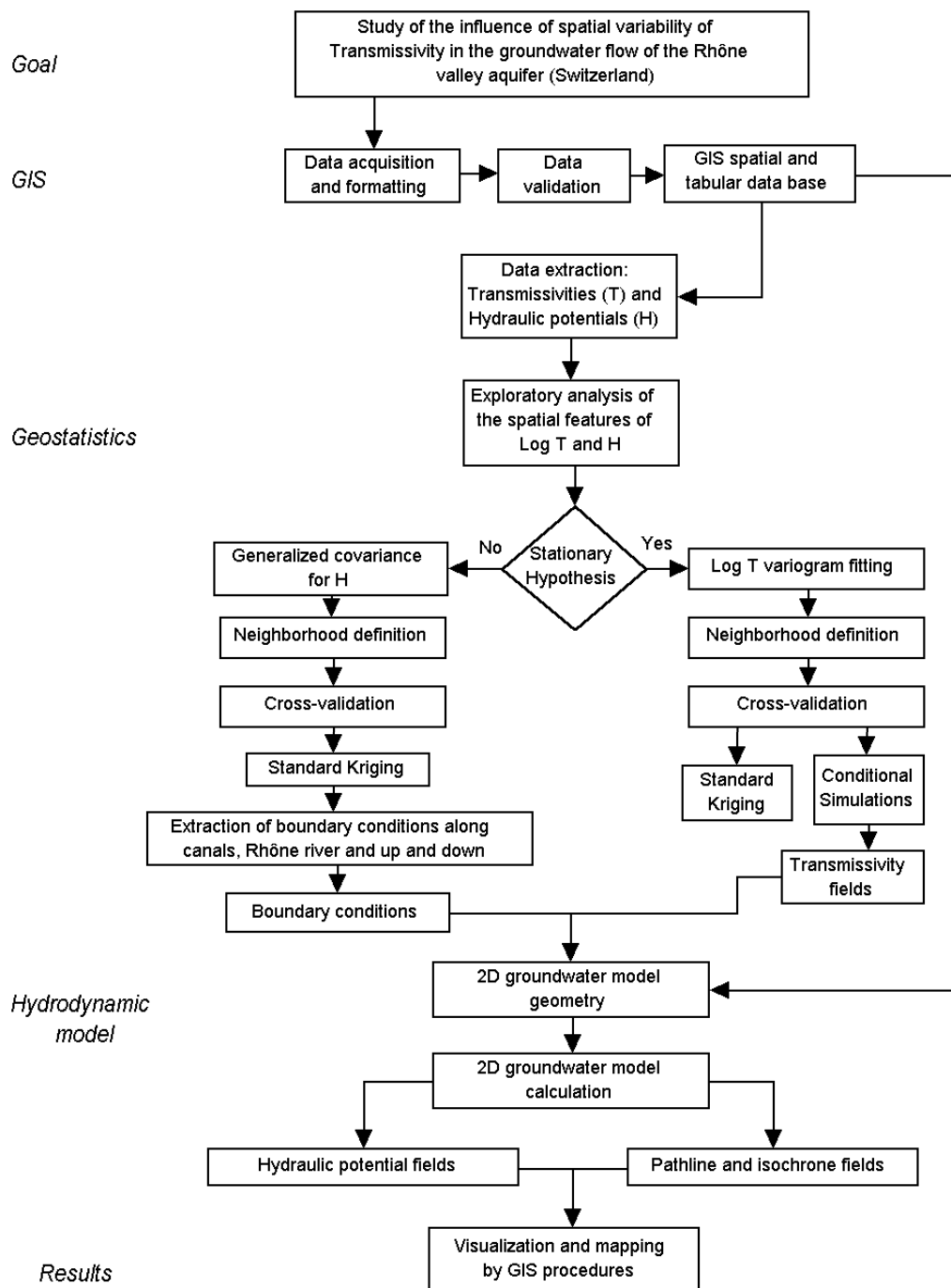
into account K-H correlation) by generating 3D geostatistical simulations of the permeability field $K(x,y,z)$ based on 791 values obtained by flowmeter measurements at every meter depth increment (z_i) in 30 different drillings (x_i, y_i). Figure 8 shows a 3D block diagram representing the log-permeability ($\log_{10}K$) distribution estimated by standard kriging. Figure 9 shows a cross-section of the kriged permeabilities extracted from the 3D block diagram of Fig. 8. This permeability cross-section (Fig. 9) can be used as a hydro-lithologic model, to be substituted to the classical lithologic model shown earlier in Fig.1.

Acknowledgments : This study was funded by the Swiss National Foundation for Scientific Research (research project N° 21-39357.93 and 20-47064.96)

6. REFERENCES

- Ababou R., Amvrossios C., Bagtzoglou E., Wood F., 1994. *On the Condition Number of Covariance Matrices in Kriging Estimation and Simulation of Random Fields*. Mathematical Geology, Vol. 26, p. 99-133.
- Bouzelboudjen M., Király L., 1989. *Modélisation tridimensionnelle de la nappe phréatique de la plaine du Rhône à Viège*. Troisièmes Journées Valaisannes des Sciences Naturelles, Suisse, avril 1989. Bulletin Murithienne 107, p. 69-74.
- Chauvet P., 1992. *Traitement des données à support spatial : la géostatistique et ses usages*. Centre de Géostatistique, Ecole des mines de Paris, Fontainebleau, France, 43 p.
- Chilès J.P. & Delfiner P., 1999. *Geostatistics : modelling spatial uncertainty*. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, 695 p.
- Cressie N., 1993. *Statistics for spatial data*, Wiley, New York.
- Dagan G., 1985. *Stochastic modeling of groundwater flow by unconditional and conditional probabilities, the inverse problem*. Water Resour. Res., 21 (1), p. 65-72.
- Delhomme, J.P., 1979. *Spatial Variability and Uncertainty in Grounwater Flow Parameters : A geostatistical Approach*. Water Resources Research 15 (2), p. 269-280.
- Diersch H.-J. G. & al., 1999. *Interactive, graphics-based finite-element simulation system Feflow for modeling groundwater flow, contaminant mass and heat transport processes*. User's manual version 4.8, WASY Institute for water resources planning and system research Ltd Berlin.
- Dong A., 1990. *Estimation géostatistique des phénomènes régis par des équations aux dérivées partielles*. Thèse de Docteur en Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, 262 p.
- Gelhar L.W., 1993. *Stochastic subsurface hydrology*. Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ.
- Geostatistics, 1998. Isatis 3, The Geostatistical key. User's Guide, Avon, France.

- Jaquet O., Ornstein P., Rey M., Rouiller J.-D., Bouzelboudjen M., 2000. *Optimisation géostatistique de réseaux de mesures piézométriques : le cas de la nappe alluviale dans la vallée alpine du Rhône, Suisse*. Bull. d'Hydrogéol. de Neuchâtel No 18 : p. 77-98, Editions Peter Lang, Berne.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Perrochet P., 2000. *Simulations numériques 2-D et 3-D des écoulements souterrains saturés et non saturés en nappe libre pour les états permanent et transitoire dans la région de Baltschieder-Gamsen*. Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel, 26 p., 37 fig., 8 tab., rapport inédit.
- Kitanidis P.-K., 1997. *Introduction To Geostatistics. Applications in Hydrogeology*. Cambridge University Press, 249 p.
- Matheron G., 1970. *La théorie des variables régionalisées et ses applications*. Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fascicule 5, 211 p.
- Mizell S.A., 1980. *Stochastic flow analysis of spatial variability in two-dimensional groundwater flow with implications for observation-well-network design*. PhD, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, New Mexico.
- Ribeiro L.T., Muge F.H., 1989. *A Geostatistical Approach to the Modelling of a Piezometric Field*. M. Armstrong (ed.), Geostatistics, Vol. 2, p. 651-660. Kluwer Academic Publisher.
- Rossier, Y., 1990. *Simulation de la pollution de la nappe du Rhône en amont de Viège (Vs) : problèmes et résultats*. Bull. d'Hydrogéol. N° 9, p. 13-8. , Editions Peter Lang, Berne.
- Roth C., de Fouquet C., Chilès J.-P., Matheron G., 1997. *Geostatistics applied to hydrogeology's inverse problem : taking boundary conditions into account*. In E.Y. Baafi et N.A. Schofield, Geostatistics Wollongong '96, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, vol. 2, p. 1085-1097.
- Rouhani S., Geogakakos A.P., Kitanidis P.K., Loaiciga H.A., Olea R.A., Yates S.R., 1990. *Geostatistics in geohydrology : Part I. Basic concepts*, ASCE J. of Hydraulic Engineering, 116 (5), p. 612-632.
- Rouhani S., Geogakakos A.P., Kitanidis P.K., Loaiciga H.A., Olea R.A., Yates S.R., 1990. *Geostatistics in geohydrology : Part II. Applications*, ASCE J. of Hydraulic Engineering, 116 (5), p. 633-658.
- Schafmeister M.-TH, Pekdeger A., 1992. *Spatial structure of hydraulic conductivity in various porous media - problems and experiences*. Soares Amilcar (eds.), Geostatistics Troia'92. Vol. 2, p. 734-744.
- Tompson, A.F.B., Ababou R., and Gelhar L. W., 1989. *Implementation of the three-dimensional turning bands random field generator*, Water Resources Res., 25 (10), p. 227-243.
- Vassolo S., Kinzelbach W., Schäfer W., 1998. *Determination of a well head protection zone by stochastic inverse modelling*. J. Hydrology Vol. 206, p. 268-280.
- Corresponding author** : Francesco Kimmeier, Institut de Géologie, Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, 11 rue Emile-Argand, 2007 Neuchâtel.
Tél : +4132/718.26.30 - Fax : +4132/718.26.03
E-mail : francesco.kimmeier@unine.ch



Annex 1 : Flow chart of the study

3-D Groundwater Flow Modeling in Heterogeneous Geologic Media : Integrated Approach Using Spatial and Temporal Database, Geostatistics and GIS

Francesco Kimmeier

SHORT TABLE OF CONTENTS

I. INTRODUCTION GENERALE

II. GIS DATABASE AS SUPPORT TO GROUNDWATER PROBLEM RESOLUTION

II.1 TRACES/VIEW - TRAÇAGE DES EAUX SOUTERRAINES : APPLICATION SIG EN MILIEU KARSTIQUE JURASSIEN (SUISSE)

II.2 GEOHYDROLOGICAL PARAMETERS IDENTIFICATION AND GROUNDWATER VULNERABILITY TO POLLUTION: A SWISS CASE STUDY

III. GROUNDWATER MODELING AT DIFFERENT SCALE USING FINITE ELEMENTS METHOD AND STOCHASTIC MODELING FOR UNCERTAINTY ESTIMATION

III.1 3-D GROUNDWATER MODELING AT REGIONAL SCALE

III.2 BASE DE DONNEES, SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE, GEO-STATISTIQUE ET MODELISATION 3-D DES EAUX SOUTERRAINES A L'ECHELLE LOCALE DANS LA REGION DE VISP (SUISSE)

III.3 TRAVEL PATH UNCERTAINTY : A CASE STUDY COMBINING STOCHASTIC AND DETERMINISTIC HYDRODYNAMIC MODELS IN THE RHÔNE VALLEY, SWITZERLAND

IV. CONCLUSIONS GENERALES ET TRAVAUX FUTURS

KIMMEIER'S SHORT CURRICULUM VITAE AND LIST OF PUBLICATIONS

Conclusions générales

Ce travail a permis de présenter, à travers plusieurs articles, l'évolution des méthodes et des techniques numériques, les plus récentes essentiellement, dans l'organisation des données hydrogéologiques spatiales et temporelles, la reconstruction des divers champs structuraux et hydrodynamiques jusqu'au traitement et représentation des résultats des simulations numériques tridimensionnelles des écoulements souterrains, par la méthode des éléments finis. Les approches que nous avons utilisées sont globales ou empiriques, déterministes ou stochastiques. La combinaison des techniques des systèmes d'information géographique, de géostatistique, et de simulation numérique déterministe des écoulements souterrains, représente un apport original et indéniable. Nous donnons ci-après les principaux résultats des recherches effectuées.

1. Développement d'une application interactive par SIG pour la gestion des essais de traçage dans le Jura karstique neuchâtelois

Les essais de traçage prenant du temps et étant coûteux, l'application TracES/View combinant le Système d'Information Géographique (SIG) ArcView, couplé avec la base de données MS Access, permet la consultation, l'analyse et l'optimisation de la planification de nouveaux essais de traçage. Cette application offre à des non-spécialistes en SIG d'accéder facilement aux éléments de la base de données des essais de traçage d'une manière graphique intuitive et interactive à l'écran. Utilisée conjointement avec d'autres cartes thématiques numériques (topographie, surfaces structurales des formations géologiques, extension des aquifères, perméabilités, utilisation du sol, etc.), elle peut fournir un outil puissant d'aide à la décision pour la gestion et la protection des ressources en eaux souterraines [Bouzelboudjen & al., 2001].

2. Application pour l'étude de la vulnérabilité à la pollution des aquifères en milieu poreux par approche SIG

La réalisation de cette étude a montré l'importance des outils SIG, tant pour le calcul et la représentation de la première carte piézométrique entre Brig et le lac Léman, que pour l'élaboration de cartes de vulnérabilité [Kimmeier & al., 2001c]. Les techniques géostatistiques ont été aussi intensivement employées. L'étude de la crue exceptionnelle du Rhône, à la fin du mois de septembre 1993, a permis de mettre en évidence son influence directe sur les eaux souterraines. En outre, les mesures et les analyses physico-chimiques indiquent que l'infiltration de la rivière crée, essentiellement en rive gauche, un effet de dilution des eaux de l'aquifère alluvial. La comparaison de la teneur en NO_3^- des eaux souterraines, établi pour les années 1985 et 1995 pour étudier son évolution, a montré que, globalement et à l'exception de quelques points atypiques, la teneur en nitrates dans les eaux souterraines est faible ($< 30 \text{ mg/l}$ pour 90 % des échantillons), dans une région où l'agriculture est présente d'une manière significative. La pollution par percolation à travers la zone non-saturée reste faible probablement en raison des précipitations qui, dans cette région, sont peu

importantes (environ 570 mm/an). On remarque que l'évolution de la teneur en NO_3^- se dégrade au cours du temps. Le nombre de points où le contenu est $> 50 \text{ mg/l}$ a doublé en l'espace de dix ans, passant de 3 % à 6 %.

L'étude de la vulnérabilité à la pollution par approche SIG (cartographie algébrique), pour l'aquifère situé entre Sierre et Vétroz, a montré des différences significatives entre les quatre méthodes employées. Comme principaux résultats les méthodes intégrées DRASTIC et SINTACS sont concentrées entre la vulnérabilité Modérée et Haute alors que les méthodes intrinsèques NLFB et GOD sont concentrées entre la vulnérabilité Très Basse et Modérée. Les méthodes intrinsèques ont tendance à minimiser la vulnérabilité. Finalement, pour des travaux futurs nous projetons de prendre en compte l'hydrodynamique de l'aquifère dans l'étude de sa vulnérabilité à la pollution. On incorporera comme nouveaux facteurs d'autres variables comme la vitesse de Darcy ou la dispersivité. Ces variables seront issues des résultats de modèles numériques hydrodynamiques et de transport (voir article «Travel path uncertainty : a case study combining stochastic and deterministic hydrodynamic models in the Rhône valley, Switzerland» [Kimmeier & al., 2001d]).

En conclusion, les résultats de cette approche empirique de la cartographie de la vulnérabilité à la pollution des aquifères devront être interprétés avec grande prudence. En effet, dans un but d'étude de synthèse et de reconnaissance de la vulnérabilité à petite échelle (1 : 50'000 à 1 : 200'000 par exemple) l'approche est valable (Margat & Albinet, 1971). Par contre, il est difficile de tirer des conclusions réalistes, pour des problèmes de protection des aquifères à grande échelle (1 : 10'000 à 1 : 1'000). Enfin, nous avons montré, à travers l'exemple de l'aquifère alluvionnaire de la plaine du Rhône (Sierre-Vétroz, Valais, Suisse), région pour laquelle nous avons développé toute une application SIG (bases de données spatio-temporelles importantes) et appliqué les méthodes standards (DRASTIC, etc.), que les résultats des cartes de vulnérabilité n'étaient pas satisfaisants. Ces cartes de vulnérabilités (à paramètres géologiques et hydrogéologiques «statiques») n'ont pas pu être «validées» par exemple avec les cartes de distribution des nitrates à notre disposition. Si l'exercice que nous avons choisi volontairement en milieu poreux et «riche» en données et en connaissances est difficile à réaliser, il nous paraît très dangereux de mettre en œuvre ce type d'approche en milieu fortement hétérogène, fissuré et/ou karstique.

3. Modélisation des écoulements souterrains 3-D par éléments finis à l'échelle régionale (1 : 200'000)

Dans les grands bassins hydrogéologiques, on trouve plusieurs aquifères superposés, séparés par des formations géologiques relativement peu perméables. La délimitation des systèmes d'écoulement est nettement plus difficile dans les systèmes aquifères hétérogènes [Bouzelboudjen & al., 1997]. Les vecteurs flux donnent des indications précieuses sur le cheminement de l'eau souterraine et sur les échanges hydrauliques entre les différentes formations géologiques. Les relations hydrauliques entre deux aquifères superposés peuvent varier de place en place : en un endroit l'aquifère supérieur peut «alimenter» l'aquifère inférieur, tandis qu'en un autre endroit, c'est l'inverse qui se produit. Le champ des écoulements souterrains sera déterminé par la structure du bassin (la distribution spatiale de la perméabilité des roches), par la position des régions d'infiltration et par la position des régions d'exutoire (conditions aux limites). Le but de ce travail montre de manière «schématique» les écoulements

souterrains sous le Plateau suisse entre le massif de l'Aar et celui de la Forêt Noire (au nord de la Suisse). Les coupes hydrogéologiques présentées illustrent le champ des écoulements souterrains tridimensionnels dans un volume de terrain de grande dimension (surface du modèle d'environ 30'000 km²). Elles représentent une des nombreuses variantes de calcul du modèle mathématique réalisé.

Tous les calculs ont été effectués en régime permanent, c'est-à-dire que les conditions imposées ne varient pas au cours du temps. Les résultats sont comparés aux valeurs observées disponibles. Il est intéressant de relever que les résultats du modèle ont pu être contrôlés, dans une certaine mesure, par des forages profonds. Plus particulièrement, les écoulements ascendants dans le voisinage des exutoires régionaux ont été effectivement mis en évidence par les mesures de potentiels hydrauliques effectuées à plusieurs profondeurs dans ces forages (7 forages de profondeur variant de 1'000 à 2'000 m). La validation des débits simulés des exutoires au niveau du réseau hydrographique a pu être effectuée en les comparant aux débits minimum d'étiage des principales stations de jaugeage (8 stations). Les analyses physico-chimiques et isotopiques des eaux souterraines ont permis de confirmer les relations entre les aquifères principaux, notamment les écoulements ascendants depuis le Cristallin ainsi que d'identifier l'origine des eaux (température, minéralisation, isotope C-14).

A partir de ces résultats 3-D, on a choisi de représenter les écoulements profonds et les relations entre les aquifères les plus importants du massif de l'Aar à la Forêt Noire (Malm, Muschelkalk et Cristallin supérieur). La représentation tridimensionnelle montre les zones d'affleurement des différentes formations, à la surface du terrain, ainsi que la position des zones d'alimentation (valeurs élevées du potentiel hydraulique) et des zones d'exutoire (valeurs basses du potentiel hydraulique situées dans les vallées représentées par le réseau hydrographique).

4. Modélisation des écoulements souterrains 2-D et 3-D par éléments finis à l'échelle locale (1 : 5'000 et 1 : 1'000)

Le modèle mathématique 3-D à éléments finis couvre une surface de 6.5 km². En comparaison avec le modèle 3-D régional, on dispose pour le modèle 3-D local d'une masse d'informations conséquentes (144 forages, 386 piézomètre, etc.). Alors que la caractérisation des perméabilités dans le modèle régional a été effectuée principalement par une approche classique géologique (transformation de la lithologie en classes de perméabilité), le modèle 3-D local à Visp a bénéficié de nombreuses données (essais de pompage, flowmètres, etc.) permettant la re-construction des champs de perméabilité, de transmissivité, de potentiel hydraulique, etc., par des méthodes géostatistiques.

Dans ce chapitre est décrit la méthodologie de la construction de ce type de modèle en précisant l'importance d'une approche intégrée (bases de données, SIG, statistiques, géostatistique, modélisation et validation des résultats). La construction du modèle hydrogéologique 3-D décrit la géométrie des aquifères et aquitards, leurs lithologies, leurs caractéristiques hydrodynamiques (perméabilité, coefficient d'emmagasinement, etc.) ainsi que les paramètres hydrochimiques. Les informations de base ainsi que les cartes thématiques dérivées sont stockées à plusieurs niveaux. On a utilisé ArcInfo, ArcView comme Systèmes d'Information Géographique et MS Access comme système de gestion de bases de données. En plus de l'article «Travel path uncertainty : a case study combining stochastic and deterministic

hydrodynamic models in the Rhône valley, Switzerland» cité plus haut [Kimmeier & al., 2001d] qui montre la problématique de l'approche stochastique, dans la reconstruction des champs de perméabilité, deux applications, à but pratique, sont présentées à la fin de ce chapitre.

La première concerne l'influence de la troisième correction du Rhône sur les eaux souterraines. Cette étude a nécessité le développement de 2 modèles coupes à partir d'un premier modèle 3-D. On a simulé une crue exceptionnelle (crue d'un jour et 6 jours de décrue) afin d'évaluer son impact sur les digues du Rhône protégées ou non par des parois moulées. Les écoulements ont été simulés en régime transitoire et en milieu variablement saturé. Comme résultat principal, on constate que la profondeur des parois moulées joue un rôle important dans les débits qui transitent par le fond du lit du Rhône.

La deuxième application montre une autre utilisation possible du modèle 3-D, développé dans la région de Visp. Il s'agit d'une étude qualitative, montrant les résultats de la propagation fictive de polluants (en l'occurrence les chlorures comme traceur naturel) dans les eaux souterraines, provenant de la décharge industrielle de Gamsen, par modélisation 3-D. La simulation du transport 3-D, en régime transitoire sur dix ans, avec un pas de temps de 12 heures, a permis d'analyser la propagation du front de pollution. Il est détectable aux puits de la Lonza (distants d'environ 5 km du point d'injection situé dans la décharge) après 6 an. On constate que le Rhône joue un rôle de drain et que la direction générale des écoulements, se situant dans le sens de la vallée, empêchent la pollution de se répandre en forte concentration en rive droite.

5. Modélisation des écoulements souterrains 2-D par éléments finis à l'échelle locale (Visp, 1 : 5'000) et quantification de l'incertitude des résultats

Comme résultat principal de cette étude [Kimmeier & al., 2001d], nous montrons que l'incertitude des résultats, en termes de migration de polluants, peut être relativement importante et que l'approche probabiliste est un bon moyen d'évaluer cette incertitude. Notre but immédiat dans cette étude préliminaire n'était pas d'effectuer une analyse probabiliste complète des trajectoires possibles, mais seulement d'évaluer grossièrement l'importance des incertitudes dans les prédictions de migration de polluant, étant donné les données disponibles. On a construit et analysé un nombre réduit de simulations - plutôt que les centaines ou les milliers qui seraient exigées pour une complète analyse de Monte-Carlo du problème de migration de polluants. Malgré cette limitation, notre étude montre clairement quel type de résultats peut être obtenu avec l'approche probabiliste. L'approche probabiliste est donc bien adaptée à la formulation de l'estimation optimale (krigeage) et à l'analyse multidimensionnelle de l'incertitude, liée à des problèmes de pollution d'eau souterraine.

Travaux futurs

Dans cette thèse, en abordant la problématique de l'identification, de la caractérisation et de la détermination du mode de fonctionnement des systèmes aquifères, à différentes échelles, on pensait que cela serait nettement plus facile pour un milieu poreux à grande échelle 1 : 5'000, dans une zone réduite de 6.5 km² (Visp). On s'aperçoit, qu'en dépit des données «suffisamment» nombreuses, la **re-construction des différents champs hydrogéologiques 3-D s'est avérée plus difficile que prévu. Ce travail a constitué en fait l'objectif majeur dans cette démarche** et a nécessité le recours à des techniques numériques les plus récentes.

Les méthodes géostatistiques utilisées dans ce travail, principalement pour la nappe alluviale de la plaine du Rhône (krigeage et simulations conditionnelles), peuvent être étendues, pour conduire une évaluation commune des potentiels hydrauliques H et des transmissivités T de l'aquifère en exploitant les corrélations spatiales entre ces deux variables (co-krigeage). Cette technique devrait donc améliorer l'évaluation de T en connaissant les corrélations (T, H). Les données de H (piézométrie) sont plus facilement acquises que les données de transmissivité ou de perméabilité (tests de puits, essais au flowmètre, etc.). Cependant, la technique du co-krigeage peut être mise en œuvre seulement si on connaît «d'avance» la fonction d'auto-corrélation entre (T, H). Plusieurs auteurs proposent des approches géostatistiques de co-krigeage, basées sur les modèles stochastiques de la structure de corrélation spatiale de (T, H), sur des bases «plus ou moins physiques». Dans certains de ces travaux, les écoulements souterrains sont employés pour obtenir la structure de corrélation de (T, H). Le schéma d'estimation, résultant du co-krigeage, est alors équivalent à la résolution d'un problème inverse en hydrogéologie.

Dans l'avenir, le problème de pollution fictive, dans la région de Visp, sera traité en 3-D, en combinant des données de perméabilité 2D et 3D, mesurées à plusieurs échelles différentes. Des simulations géostatistiques 3-D, du champ des perméabilités, seront effectuées en prenant en compte la corrélation K-H. Ces traitements, dans la reconstruction des champs de K, T et H, permettront le développement de modèles hydrodynamiques et l'élaboration de cartes de vulnérabilité plus réalistes.

Les Systèmes d'Information Géographique, que nous avons utilisés, offrent les fonctions d'acquisition de données sous forme numériques, de validation, de gestion, de traitement et d'analyse spatiale, thématique et multithématique [Burrough, 1998, Maidment 1996, Barazzuoli & al, 1999]. Ils nous ont aussi permis la représentation de ces données sous forme de cartes, tableaux et images. Enfin, ils offrent la possibilité de couplage avec les logiciels de simulation. La simulation dynamique des processus, dans les sciences de l'environnement dont la composante spatiale est prépondérante, se base de plus en plus sur les SIG [Maxwell & Costanza, 1997 ; Pouliot, 1999 ; Maidment, 1996]. Le couplage des SIG et des modèles, dans les sciences de l'environnement, est encore en plein essor comme le montrent les nombreuses conférences consacrées à ce sujet [Kovar & Nachtnebel 1993, 1996]. De nombreuses applications, liées à la problématique de la notion de couplage des SIG et de la modélisation des ressources en eau, ont été abordées ces dernières années [Van Deursen, 1995 ; De Smedt F., 1997 ; Batelaan & al., 1996 ; Bel Hadj Kacem, 1998 ; Wesseling & al., 1996 ; Bouzelboudjen & Kimmeier, 1998]. De notre côté, nous avons effectué un couplage «faible». En effet, le transfert des résultats des SIG, de la

géostatistique et de la simulation numérique des écoulements. a été réalisé à l'aide d'interfaces informatiques spécifiques.

Enfin pour terminer, il faut reconnaître qu'il est aujourd'hui difficile de concevoir des études en hydrogéologie, à forte composante spatiale, sans l'apport des Systèmes d'Information Géographique [Engelen & Kloosterman, 1996].

6. Références

- Albinet M, 1970. *Carte de vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraines de la France à l'échelle 1 : 1'000'000*. D.A.T.A.R., secrétariat permanent pour l'étude des problèmes d'eau. B.R.G.M., direction du service géologique national.
- Barazzuoli P., Bouzelboudjen M., Cucini S., Király L., Menicori P., Salleolini M., 1999. *Olocenic alluvial aquifer of the River Cornia coastal plain (southern Tuscany, Italy) : database design for groundwater management*. Environmental geology 39 (2), 123-143, Springer-Verlag.
- Batelaan O., Wang Z.-M., De Smedt F., 1996. *An adaptative GIS toolbox for hydrological modelling*. Proceeding of HydroGIS 96 : Application of Geographic Information System in Hydrology and Water Resources Management, K. Kovar et H.P. Nachnebel (eds), IAHS, April 16-19, Vienna, Austria : 3-17.
- Bel Hadj Kacem M.S., 1998. *Modélisation numérique de l'hydrologie pour l'aide à la gestion des bassins versants par l'utilisation conjointe des systèmes d'information géographique et de la méthode des éléments finis*. PhD thesis, Université Laval, Québec, Canada.
- Bouzelboudjen M., Kimmeier F., 1998. *GIS Vector and Raster Database, Advanced Geostatistics and 3-D Groundwater Flow Modelling in Strongly Heterogeneous Geologic Media : An Integrated Approach*. The Eighteenth Annual ESRI User Conference. San Diego, California USA, 27-31 July 1998.
- Bouzelboudjen M., Király L., Kimmeier F., Zwahlen F. 1997. *Représentation schématique des écoulements souterrains en Suisse. Profils hydrogéologiques issus de modèles mathématiques 3-D à éléments finis*. Planche 8.3 de l'Atlas Hydrologique de la Suisse. Institut de Géographie de l'Université de Berne, Office Fédéral de la Topographie et service Hydrologique et Géologique National, Berne, Suisse.
- Bouzelboudjen M., Ornstein P., Kimmeier F., 2001. *TracES/View - Traçage des Eaux Souterraines: Application SIG en milieu karstique jurassien (Suisse)*. 7ème Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire et Milieu Fissuré, Besançon, France, 14 p., 5 fig., 4 ann., pp. 59-73.
- Burrough P.A., McDonell R. A., 1998. *Principles of Geographical Information Systems. Spatial Information Systems and Geostatistics*. Oxford University Press, 333 p.
- De Smedt F., 1997. *IHSI. IDRISI hydrological simulation interface*, User manual, Laboratory of hydrology, Free University Brussels.
- Engelen G. B., and Kloosterman F. H., 1996. *Hydrological Systems Analysis, Methods and Applications*. TNO Institute of Applied Geoscience, Delft, The Netherlands. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. 149 p.

- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Ababou R., Ribeiro L., 2001d. *Travel path uncertainty : a case study combining stochastic and deterministic hydraulic models in the Rhône valley, Switzerland*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal, 15 p., 9 fig., 1 ann.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Eisenlohr L., Rossier Y., 2001b. *Drought risk analysis applied to porous Swiss aquifers*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal, 11 p., 6 fig., 6 tab.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Eisenlohr L., Rossier Y., Zwahlen F., 2001a. *A statistical analysis of hydro-climatic stress on karst aquifer system (Switzerland)*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal, 13 p., 8 fig., 9 tab.
- Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Ornstein P., Weber I., Rouiller J.-D., 2001c. *Geohydrological parameter identification and groundwater vulnerability to pollution: A Swiss case study*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal, 16 p., 12 fig., 1 tab., 1 ann.
- Kovar K., & Nachnebel H.P, 1993. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*. IAHS Publication N° 211, 693p.
- Kovar K., & Nachnebel H. P, 1996. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*. IAHS Publication N° 235.
- Maidment D. R., 1996. *Environmental modeling within GIS*. GIS and Environmental Modeling with GIS : Progress and Research Issues, M. F. Goodchild & al (eds), Ford Collins : GIS World, pp. 315-324.
- Maxwell T. & Costanza R., 1997. *An open geographic modeling environment*. Simulation, 68 (3), pp. 175-185.
- Pouliot J., 1999. *Définition d'un cadre géosémantique pour le couplage des modèles prévisionnels de comportement et des SIG – Application pour les écosystèmes forestiers*. Ph.D. thesis N° 2087, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- Van Deursen W.P.A., 1995. *Geographical information systems and dynamic models*. PhD thesis, Utrecht University Netherlands.

3-D Groundwater Flow Modeling in Heterogeneous Geologic Media : Integrated Approach Using Spatial and Temporal Database, Geostatistics and GIS

Francesco Kimmeier

SHORT TABLE OF CONTENTS

- I. INTRODUCTION GENERALE**
- II. GIS DATABASE AS SUPPORT TO GROUNDWATER PROBLEM RESOLUTION**
 - II.1 TRACES/VIEW - TRAÇAGE DES EAUX SOUTERRAINES : APPLICATION SIG EN MILIEU KARSTIQUE JURASSIEN (SUISSE)
 - II.2 GEOHYDROLOGICAL PARAMETERS IDENTIFICATION AND GROUNDWATER VULNERABILITY TO POLLUTION: A SWISS CASE STUDY
- III. GROUNDWATER MODELING AT DIFFERENT SCALE USING FINITE ELEMENTS METHOD AND STOCHASTIC MODELING FOR UNCERTAINTY ESTIMATION**
 - III.1 3-D GROUNDWATER MODELING AT REGIONAL SCALE
 - III.2 BASE DE DONNEES, SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE, GEO-STATISTIQUE ET MODELISATION 3-D DES EAUX SOUTERRAINES A L'ECHELLE LOCALE DANS LA REGION DE VISP (SUISSE)
 - III.3 TRAVEL PATH UNCERTAINTY : A CASE STUDY COMBINING STOCHASTIC AND DETERMINISTIC HYDRODYNAMIC MODELS IN THE RHÔNE VALLEY, SWITZERLAND
- IV. CONCLUSIONS GENERALES ET TRAVAUX FUTURS**

KIMMEIER'S SHORT CURRICULUM VITAE AND LIST OF PUBLICATIONS

SHORT CURRICULUM VITAE AND FRANCESCO KIMMEIER'S LIST OF PUBLICATIONS

Geologist, graduated from the University of Lausanne (1977), Switzerland
M. Sc. in Hydrogeology at the Neuchâtel University (1980), Switzerland

University of Neuchâtel, Faculty of Sciences
Geology Institute - Centre of Hydrogeology

Emile-Argand 11,
CH-2007 Neuchâtel (Switzerland)
Tel. +41 32 718 26 30
Fax. +41 32 718 26 03
e-mail : francesco.kimmeier@unine.ch

His current research interests are involved in developing an integrated approach for solving hydrogeological problems. Applications of his work concern in particular the characterization of large-scale three-dimensional flow and contaminant plume migration in natural heterogeneous, stratified and fractured geologic formations. He uses a combination of vector and raster database Geographic Information System (GIS) tools, advanced geostatistics and numerical approaches to study 3-D heterogeneous subsurface flow systems. The aim is to compare stochastic and deterministic results with the field observations data. He is a co-author of a book entitled "Impact of Climatic Changes on the behaviour of aquifer systems" [1998] and have also contributed to the hydrological Swiss Atlas [1997]. In early eighties he contributed as a co-author of two important technical reports for the NAGRA [1985, 1986] concerning 3-D groundwater modeling. Hydrogeologic conceptual models have been developed to describe the ground-water flow regime in the crystalline rocks of northern Switzerland. The purpose of these models has been to characterize the regional and local groundwater flow systems and to define the groundwater travel paths and velocities from potential waste disposal areas to the biosphere.

Professional Chronology : Scientist Collaborator at Hydrogeological Centre, University of Neuchâtel, Switzerland (1981-1986) ; Hydrogeologist at Service du Lac et des Cours d'Eau, State of Geneva (1992-1993) ; Scientist Collaborator at Hydrogeological Centre, University of Neuchâtel, Switzerland (1993-1996) ; Researcher (1996-2001).

Memberships : Swiss Geological Society (SGS), Swiss Association of Geologist (CHGEOL), Swiss Society of Hydrogeologist (SSH), International Association of Hydrogeologists (IAH), Geographical Information System Group at University of Neuchâtel (SIGNE).

Neuchâtel (Switzerland), September 2001

FRANCESCO KIMMEIER'S LIST OF PUBLICATIONS

PUBLISHED WORKS

- Bouzelboudjen M., Király L., Kimmeier F., Zwahlen F. 1997. *Représentation schématique des écoulements souterrains en Suisse. Profils hydrogéologiques issus de modèles mathématiques 3-D à éléments finis*. Planche 8.3 de l'Atlas Hydrologique de la Suisse. Institut de Géographie de l'Université de Berne, Office Fédéral de la Topographie et Service Hydrologique et Géologique National, Berne, Suisse.
- Bouzelboudjen M., Kimmeier F., Rossier Y., Eisenlohr L., Király L., Zwahlen F., 1998. *Impact des changements climatiques sur le comportement des systèmes aquifères*. Projet Fonds National de la recherche Scientifique Suisse (PNR 31, Berne), 136 p., 46 fig., 24 tab. V/d|f Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Suisse.
- Kimmeier F., Perrochet P., Andrews R., Király L., 1985. *Simulation par modèle mathématique des écoulements souterrains entre les Alpes et la Forêt Noire*. 169 p., NTB 84-50, NAGRA, Baden, Switzerland.
- Kimmeier F., Wacker C., Perrochet P., Hufschmied P., Király L., 1986. *Code verification of the groundwater flow model FEM301*. Hydrocoin - Level 1 - Case 2 and Case 6, 65 p., NTB 86-22, NAGRA, Baden, Switzerland.

PUBLISHED ARTICLES

- Andrews R.-W., Kimmeier F., Perrochet P., Király L., 1986. *Validation of hydrogeologic models to describe groundwater flow in the Crystalline basement of Northern Switzerland*. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 50, 1985, pp.107-114. Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. Scientific Basis for Nuclear Waste Management IX, Editor Lars O. Werme.
- Bouzelboudjen M., Kimmeier F. & al., 1996. *Impact des changements climatiques sur le comportement des systèmes aquifères*. Programme national de recherche PNR 31, Changements climatiques et catastrophes naturelles, Info 10.
- Bouzelboudjen M., Kimmeier F., 1997. *Système d'information géographique, méthodes géostatistiques et simulation numérique 3-D des écoulements souterrains en milieu poreux fortement hétérogène*. GeoloGIS-CH'97 Atelier sur l'application des SIG en géologie. Service Hydrologique et Géologique National (SHGN), Berne, Suisse, 5 décembre 1997, pp. 18-19.
- Bouzelboudjen M., Kimmeier F., 1998. *GIS Vector and Raster Database, Advanced Geostatistics and 3-D Groundwater Flow Modelling in Strongly Heterogeneous Geologic Media : An Integrated Approach*. The Eighteenth Annual ESRI User Conference. San Diego, California USA, 27-31 July 1998.
- Bouzelboudjen M., Ornstein P., Kimmeier F., 2001. *TracES/View - Traçage des Eaux Souterraines: Application SIG en milieu karstique jurassien (Suisse)*. 7ème

Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire et Milieu Fissuré, Besançon, France, 14 p., 5 fig., 4 ann., pp. 59-73.

Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Eisenlohr L., Rossier Y., Zwahlen F., 2001. *A statistical analysis of hydro-climatic stress on karst aquifer system (Switzerland)*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal, 13 p., 8 fig., 9 tab.

Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Eisenlohr L., Rossier Y., 2001. *Drought risk analysis applied to porous Swiss aquifers*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal, 11 p., 6 fig., 6 tab.

Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Ornstein P., Weber I., Rouiller J.-D., 2001. *Geohydrological parameter identification and groundwater vulnerability to pollution: A Swiss case study*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal, 16 p., 12 fig., 1 tab., 1 ann.

Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Ababou R., Ribeiro L., 2001. *Travel path uncertainty : a case study combining stochastic and deterministic hydraulic models in the Rhône valley, Switzerland*. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources At Risk, Lisbon, Portugal, 15 p., 9 fig., 1 ann.

Rouiller J.-D., Ornstein P., Rey J.-M., Kimmeier F., Weber I., Bouzelboudjen M., 1998. *Systèmes d'information Spatiale Orientés vers la Gestion et l'Optimisation des Ressources en Eaux du Canton du Valais*. GeoloGIS-CH'98. Atelier sur l'application des SIG en géologie. Service Hydrologique et Géologique National (SHGN), Berne, Suisse, 27 novembre 1998, pp. 18-19.

REPORTS

Grasso A., Kimmeier F., 1996. *Etude de la variation du chimisme de quelques sources*. Rapport interne, CHYN, 16 p., 14 fig.

Kimmeier F., 1980. *Etude du rôle de l'alimentation artificielle du Leisee sur les glissements de terrain de Sunegga*. Rapport pour la commune de Zermatt, Bureau Odillo Schmid.

Kimmeier F., 1981. *Quelques commentaires sur l'influence de failles sur les systèmes d'écoulements*. Cédra (Société coopérative nationale pour l'entreposage de déchets radiocatifs), rapport interne.

Kimmeier F., Wacker C., 1986. *FEM 301 User's guide*. Motor Colombus, Baden. Publication interne.

Kimmeier F., 1993. *Débits d'étiage des cours d'eau genevois*. Document de synthèse. Rapport interne du Service du lac et des cours d'eau, Département des travaux publics. Notes LCE-HYD 93.3 et LCE-HYD 93.4

Kimmeier F., 1993. *Présentation d'une méthode d'estimation de courbes des débits classés à partir de débits jaugés périodiques. Comparaisons des courbes de*

débits classés du début du siècle et des courbes de débits classés de la fin du siècle de quelques cours d'eau genevois. Notes LCE-HYD 93.5.

Kimmeier F., 1994. *Impact des changements climatiques sur le comportement des systèmes aquifères de la source des Avants, de Grandchamp et du Bouveret sup.* Projet Fonds national de la recherche scientifique suisse : PNR 31, requête N° 4031-033148.

Kimmeier F., 1995. *Etude climatique dans la région du Locle.* Etude réalisée à la demande du Prof. André Burger ayant servi de base à la rédaction du sous-chapitre «A propos des variations climatiques» des pp. 196-200 du livre «La vallée du Locle - Oasis jurassienne», A. Burger et J.-P. Schaer (Editions Gilles Attinger, 1996).

Kimmeier F., 1997. *Méthodologie d'étude d'un système aquifère dans une vallée alluviale en milieu Alpin: exemple de la vallée du Rhône, Valais central.* Rapport intermédiaire, première phase, inédit. Projet FNRS N° 20-47064.96, CRSFA-CHYN, 59 p., 40 fig.

Kimmeier F., 1999. *Méthodologie d'étude d'un système aquifère dans une vallée alluviale en milieu Alpin: exemple de la vallée du Rhône, Valais central.* Rapport final, deuxième phase, inédit. Projet FNRS N° 20-47064.96, CREALP-CHYN, 87 p., 57 fig.

Kimmeier F., Bouzelboudjen M., Perrochet P., 2000. *Simulations numériques 2-D et 3-D des écoulements souterrains saturés et non saturés en nappe libre pour les états permanent et transitoire dans la région de Baltschieder-Gamsen.* 1) Simulation des écoulements en conditions de basses eaux. 2) Etude de l'effet du colmatage du Rhône. 3) Etude de l'impact de parois moulées dans les berges du Rhône lors d'une crue exceptionnelle. CHYN, 26 p., 37 fig., 8 tab., 1 ann.

Kimmeier F., 2000. *Projet de revitalisation de l'Aire du Pont du Centenaire à la frontière. Premiers résultats des simulations numériques 3-D des écoulements souterrains avec calcul de la surface de la nappe libre de l'aquifère graveleux de la plaine de l'Aire entre le pont de Certoux et le Pont de Murlaz.* 1) Simulation des écoulements avec cours de l'Aire actuel en conditions de basses eaux août 2000, 2) Simulation des écoulements avec une variante du futur cours de l'Aire en conditions de basses eaux et hautes eaux. CHYN, 5 p., 5 fig., 1 tab., 1 ann.

MASTERS AND PH.D. WORKS

Genoud M., Kimmeier F., Landry Y., 1981. *Ressources et potentiel en eau de la région de Chalain.* Certificat d'études approfondies en hydrogéologie (3^{ème} cycle). Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel.

Kimmeier F., Mandelbaum P., Marrel M., Paleck P., Thélin P., 1976. *Détermination du toit des calcaires à l'aide de sondages Schlumberger profonds dans la région d'Estavayer-le-Lac.* Diplôme de Géophysique, Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne.

Kimmeier F., 1977. *Etude de la rive droite du Vispertal entre Visp et Staldenried*.
Diplôme de Géologie et de Minéralogie, Institut de Géologie et de Minéralogie
de l'Université de Lausanne.

Kimmeier F., 2001. *3-D Groundwater Flow Modeling in Heterogenous Geologic
Media: Integrated Approach Using Spatial and Temporal Database,
Geostatistic and GIS*. Ph.D. Thesis. Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel.

Neuchâtel (Switzerland), September 2001
