UNIVERSITE DU QUEBEC

THESE

présentée

à

L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (EAU)

comme exigence partielle

de la

maîtrise ès Sciences (Eau)

par

François Roberge et Denis Tremblay

B. Sc B. Sp. Sc.

"Contribution à la rationalisation des réseaux piézométriques: application à la région de Saint-Jean-Vianney."

Décembre 1976

INTRODUCTION

L'étude scientifique d'un phénomène naturel doit s'appuyer sur une quantité suffisante de mesures fiables. De ce fait, l'obtention des données est un problème de première importance qui nécessite souvent l'implantation et l'opération d'un réseau de stations de mesures en vue d'obtenir un maximum d'information à un coût minimal. Un réseau de mesures (stations) pour la connaissance d'un phénomène naturel doit fournir un échantillon représentatif de la variabilité spatiale et temporelle de toute quantité physique et permet de contrôler la fiabilité de ces mesures.

L'implantation de tels réseaux nécessite donc un plan d'ensemble, une étude planifiée pour résoudre les problèmes soulevés par l'obtention de données valables. Enfin, les études basées uniquement sur des données existantes sont souvent entravées par des problèmes de traitement dus à un manque de données pertinentes (quantité imposante et/ou qualité douteuse).

Ces différentes questions soulevées par la recherche d'une information complète et par le traitement de cette information relèvent directement de la rationalisation des réseaux de mesures à l'échelle locale, régionale et nationale. Le choix et la justification des points de mesures devient donc un facteur important dans l'étude d'un phénomène naturel, c'est un problème très vaste et sa complexité demande qu'on s'y arrête longuement.

OBJET DE L'ETUDE

Ce mémoire a pour but de compléter l'étude hydrogéologique de la région de St-Jean-Vianney, à partir des données recueillies à la suite des trois études entreprises après le glissement de terrain de mai 1971. Signalons qu'il s'agit d'un cas bien particulier, suite à un sinistre important. Et c'est dans le but de mieux connaître et de prévenir de telles éventualités que ces études ont été entreprises. Cependant, limitées dans le temps, les trois études ont été effectuées sans plan d'ensemble et sans planification à long terme. On est donc en présence d'un réseau de piézomètres très dense qui conduit à une masse de données hétérogènes, non contrôlées et non-traitées.

Les principaux objectifs de notre étude sont:

- d'effectuer une revue des principes et aspects de la rationalisation;
- de proposer une méthodologie rationnelle d'implantation d'un réseau piézométrique.

Plus particulièrement en ce qui concerne la région de St-Jean-Vianney, nous utiliserons deux méthodes d'approche différentes:

1. l'approche analytique, couramment utilisée par les hydrogéologues pour l'étude de cas semblables, avec pour objectifs:

   - la connaissance de l'écoulement des eaux souterraines du bassin;

- l'étude de comportement des nappes;
- la détermination de l'influence des nappes sur la stabilité régionale (glissements);
- l'établissement d'un réseau de surveillance à partir des stations existantes en s'appuyant sur les résultats obtenus par cette approche.

2. l'approche statistique à l'aide de l'analyse factorielle des correspondances déjà expérimentées par plusieurs auteurs (CANCEIL, 1973, ROUX, 1971, etc.) ayant comme objectifs:
   - la mise en évidence des principales caractéristiques de l'échantillon;
   - l'utilisation de méthodes récentes de traitements de données en tant qu'outils de rationalisation;
   - l'établissement d'un réseau de surveillance à partir des stations existantes en s'appuyant sur les résultats obtenus par cette approche.

Enfin, il sera intéressant de comparer les résultats obtenus par les deux approches, principalement au niveau des stations retenues pour l'établissement du réseau de surveillance.

PLAN DE L'ETUDE

Pour atteindre les objectifs énumérés précédemment, notre mémoire se divise en deux parties principales:

Dans une première partie, après un rappel général des notions concernant l'information fournie par un réseau piézométrique, nous effectuerons une court rappel bibliographique portant sur les principes de la rationalisation et nous en arrivons à la proposition d'un schéma de rationalisation pour l'implantation d'un réseau piézométrique. Cette proposition regroupe les idées provenant de plusieurs auteurs et son originalité réside surtout dans son aspect synthétique. L'approche proposée se veut souple et générale.

Dans la seconde partie du mémoire, nous nous attardons plus particulièrement au cas de St-Jean Vianney. Nous décrivons tout d'abord la situation physique de la région de St-Jean Vianney et effectuons un bref résumé des études déjà effectuées à cet endroit. De plus, parmi le grand nombre de données hétérogènes, nous avons, à l'aide de méthodes de pré-traitement, choisi les données sur lesquelles portera notre étude.

Enfin, nous appliquerons l'approche analytique et statistique aux données retenues et nous effectuerons une comparaison de ces deux approches.

Approche analytique

L'approche analytique est essentiellement basée sur l'étude de

coupes de terrain, de cartes d'amplitudes du niveau piézométrique et d'études géologiques qui amèneront des regroupements de piézomètres selon leur situation géographique, le type d'aquifère concerné et la nature des fluctuations de la nappe phréatique. Puis, à l'aide de ces regroupements, on procédera à l'élimination des piézomètres superflus (c'est-à-dire donnant une information redondante) pour constituer un réseau de surveillance.

Approche statistique

Cette approche diffère de la première en ce sens qu'elle n'utilise que la valeur numérique des données disponibles sans autre hypothèse. L'analyse factorielle des correspondances met en évidence de manière objective les principales caractéristiques de l'échantillon étudié et c'est à l'utilisateur que revient d'en tirer les conclusions pratiques concernant le problème étudié (la piézométrie dans notre cas). Ainsi, à l'aide de cette méthode, on procédera à des regroupements et à des classifications des piézomètres. Dans chaque groupe, on choisira les piézomètres les plus importants et les plus représentatifs pour former un réseau de surveillance permettant d'obtenir l'information au meilleur coût.

Comparaison

La comparaison des deux approches s'effectuera au point de vue méthodologique (avantages et désavantages des deux approches) et d'un point de vue pratique en comparant le groupe de piézomètres retenu dans chaque approche. De ces deux groupes, on tirera finalement un réseau final qui fera l'objet d'une proposition en vue de poursuivre les mesures à St-Jean Vianney. Enfin, on montrera comment les méthodes statis-

tiques d'analyse multivariate peuvent être utilisées dans le cadre de la rationalisation d'un réseau.

Nous désirons remercier sincèrement, messieurs Bernard Bobée et Henri St-Martin pour leurs conseils judicieux et leur appui constant lors de l'élaboration et de l'écriture de la thèse. Le rapport humain et professionnel fut grandement apprécié.

Nous devons souligner de plus, l'apport de monsieur Roland Robitaille, concernant les aspects statistiques et informatiques de ce travail.

Enfin, nous remercions tout le service de l'édition, sous la direction de monsieur Magella Cantin, pour l'énorme travail accompli.

TABLE DES MATIERES

	PAGE
REMERCIEMENTS	i
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES CARTES	viii
INTRODUCTION	1
OBJET DE L'ETUDE	2
PLAN DE L'ETUDE	4
1. La rationalisation et les réseaux piézométriques	7
1.1 Rappel de notions générales	8
1.2 Revue de la littérature	11
2. Proposition d'un schéma de rationalisation	17
2.1 Principes de la rationalisation	17
2.2 Objectifs et types de réseaux	19
2.2.1 Choix des classifications	20
2.2.2 Classification des objectifs	21
2.2.3 Classification des réseaux	21
2.3 Description des objectifs	23
3. Cas de St-Jean Vianney	32
3.1 Historique des études	32
3.1.1 Etude géologique	32
3.1.2 Etude géotechnique	34
3.1.3 Etude hydrogéologique	34
3.1.4 Travaux correctifs	35
3.2 Caractéristiques physique de la région	37
3.2.1 Géologie	37
3.2.2 Climatologie	40
3.2.3 Végétation	43
3.2.4 Morphologie	45
3.2.5 Hydrographie	46
3.2.6 Topographie du socle rocheux	48

TABLE DES MATIERES (SUITE)

		PAGE
3.2.7	Pente moyenne	50
3.2.8	Hydrogéologie	51
3.2.9	Piézomètres	55
3.3	Discussion des données	62
3.4	Tests de validation des données	66
4.	Approche analytique	71
4.1	Objectifs visés	71
4.2	Méthodologie utilisée	72
4.3	Unités hydrostratigraphiques	73
4.3.1	Unité des tills ou graviers fluvio-glaciaires	74
4.3.2	Unité des sables et argile remaniés (colluvions)	76
4.3.3	Comparaison des nappes	76
4.4	Etudes des fluctuations piézométriques	77
4.4.1	Unité des tills ou graviers fluvio-glaciaires	83
4.4.2	Unité des sables et argile remaniés (colluvions)	83
4.4.3	Unité de l'argile marine	83
4.5	Amplitudes des fluctuations piézométriques dans la nappe de surface	89
4.5.1	Zonalité se dégageant de la carte des amplitudes	95
4.6	Ecoulement en coupe	97
4.6.1	Coupe A-A' (figure 4.9) Stratigraphie et schéma d'écoulement	97
4.6.2	Coupe B-B' (figure 4.10) Stratigraphie et schéma d'écoulement	102
4.6.3	Coupe C-C' (figure 4.11) Stratigraphie et schéma d'écoulement	106
4.6.4	Coupe D-D' (figure 4.12) Stratigraphie et schéma d'écoulement	106
4.6.5	Coupe E-E' (figure 4.13) Stratigraphie et schéma d'écoulement	113
4.7	Rationalisation	117
4.7.1	Unité des tills ou graviers fluvio-glaciaires	117
4.7.2	Unité des sables et argile remaniés (colluvions)	118
4.7.3	Fluctuations des piézomètres dans l'argile	119
4.8	Conclusions	121
4.8.1	Résumé	122

TABLE DES MATIERES (SUITE)

		PAGE
5.	Approche statistique	124
5.1	L'analyse factorielle des correspondances	125
5.1.1	Les données	125
5.1.2	La méthode générale	129
5.1.3	L'analyse des correspondances	133
5.2	Possibilités de la méthode	145
6.	Traitements statistiques et interprétation	150
6.1	Préparation des données en vue de l'analyse factorielle des correspondances	151
6.2	Traitements	153
6.2.1	Données utilisées pour le traitement par l'analyse factorielle des correspondances	153
6.2.2	Notion employée	155
6.2.3	Graphiques de sorties utilisés pour l'interprétation des résultats	155
6.2.4	Analyses effectuées	160
6.3	Interprétation	161
6.3.1	Résumé de l'approche	161
6.3.2	Premiers essais	163
6.3.3	Etude des dates	167
6.3.4	Etude des piézomètres	181
6.3.5	Proposition d'un réseau de mesures à St-Jean-Vianney	205
7.	Comparaison entre l'approche analytique et statistique	215
7.1	Conclusions similaires	215
7.2	Complémentarité des deux approches	216
7.3	Avantages de l'approche statistique	216
7.4	Choix du groupe final des piézomètres à conserver	217
CONCLUSION		219
RECOMMANDATIONS		222
BIBLIOGRAPHIE		227

LISTE DES TABLEAUX

		PAGE
2.1	Schéma de rationalisation	28
2.2	Facteurs influençant les nappes: classement par période de temps	31
3.1	Température moyenne à St-Jean-Vianney	44
3.2	Débits enregistrés aux stations durant l'été 1971	49
4.1	Piézomètres installés à St-Jean-Vianney	79
4.2	Unité des tills ou graviers fluvio-glaciaires	84
4.3	Fluctuations des piézomètres situés dans les sables et argile remaniés (colluvions)	86
4.4	Unité des sables et argile remaniés (colluvions)	87
4.5	Nappe située dans la poche de sable	88
4.6	Piézomètres implantés dans l'argile marine	90
6.1	Liste de tous les piézomètres	156
6.2	Liste des dates (étude avec 32 mesures)	157
6.3	Liste des dates (étude avec 36 mesures)	158
6.4	Liste des dates (étude avec 67 mesures)	159
6.5	Liste des piézomètres (35) - étude sur 18 mois	175
6.6	Liste des piézomètres (48) - étude sur 12 mois	176
6.7	Etude des oppositions - Axe - 1	186
6.8	Etude des oppositions - Axe - 2	191
6.9	Etude des oppositions - Axe - 3	195
6.10	Cartographie des facteurs. Nappe de surface: < 80.0'	199
6.11	Cartographie des facteurs. Nappe intermédiaire: 150' > x > 80'	200
6.12	Cartographie des facteurs. Nappe profonde: > 150'	201
6.13	Facteurs des piézomètres de surface	203
6.14	Identification des zones en surface	206
7.1	Piézomètres à conserver	220

LISTE DES FIGURES

		PAGE
3.1	Stratigraphie originelle de St-Jean-Vianney	41
3.2	Stratigraphie actuelle de St-Jean-Vienney	42
3.3	Bassin versant (pente moyenne)	52
3.4	Socle rocheux (pente moyenne)	53
3.5	Une méthode d'installation d'un piézomètre	56
3.6	Capteur de pression	58
3.7	Coupe montrant un piézomètre Gloetzl installé	60
3.8	Coupe montrant un limnigraphe installé	61
4.1	Taux de précipitation en 1972 pour les stations de Saint-Coeur-de-Marie et de Saint-Jean-Vianney	78
4.4	Piézomètre situé dans l'unité des tills ou gravier fluvio-glaciaire	85
4.6	Piézomètre situé dans l'argile (tableau 4.6, groupe no 2)	91
4.7	Piézomètre situé dans l'argile (tableau 4.6, groupe no 3)	92
4.8	Piézomètre situé dans l'argile marine (tableau 4.6, groupe no 3)	92
4.9	Stratigraphie de la coupe A - A	99
4.9.1	Stratigraphie de la coupe A - A équipotentielle au 20/3/72	100
4.9.2	Stratigraphie de la coupe A - A équipotentielle au 10/9/73	101
4.10	Stratigraphie de la coupe B - B	103
4.10.1	Stratigraphie de la coupe B - B équipotentielle au 20/3/72	104
4.10.2	Stratigraphie de la coupe B - B équipotentielle au 10/9/73	105
4.11	Stratigraphie de la coupe C - C	107
4.11.1	Stratigraphie de la coupe C - C équipotentielle au 20/3/72	108
4.11.2	Stratigraphie de la coupe C - C équipotentielle au 10/9/72	109
4.12	Stratigraphie de la coupe D - D	110
4.12.1	Stratigraphie de la coupe D - D équipotentielle au 20/3/72	111
4.12.2	Stratigraphie de la coupe D - D équipotentielle au 10/9/73	112

LISTE DES FIGURES (SUITE)

		PAGE
4.13	Stratigraphie de la coupe E - E	114
4.13.1	Stratigraphie de la coupe E - E équipotentielle au 20/3/72	115
4.13.2	Stratigraphie de la coupe E - E équipotentielle au 10/9/73	116
6.1	Plan 1-2; 132 piézomètres, 32 dates. Données brutes	166
6.2	Plan 1-2; 130 piézomètres, 32 dates. Données brutes-min.	169
6.3	Plan 1-2; 125 piézomètres, 32 dates. Données brutes	170
6.4	Plan 1-2; 48 piézomètres, 32 dates. Données brutes	174
6.5	Plan 1-2; 35 piézomètres, 67 dates. Données brutes	177
6.6	Plan 1-3; 130 piézomètres, 32 dates. Données brutes-min.	179
6.7	Plan 2-3; 130 piézomètres, 32 dates. Données brutes-min.	180
6.8	Plan 1-2; 125 piézomètres, 32 dates. Données brutes-min.	185
6.9	Graphiques types. Allure générale du comportement piézomètre dans le temps	187
6.10	Plan 1-3; 125 piézomètres, 32 dates. Données brutes	193
6.11	Plan 2-3; 125 piézomètres, 32 dates. Données brutes	194
6.12	Cartographie des facteurs en surface	202
7.1	Localisation des forages	221

LISTE DES CARTES

		PAGE
3.1	Localisation de la région étudiée	33
3.2	Localisation des trous de sondage	36
4.1	Courbes isopièzes au 20 mars 1972 - Unité des tills ou gravier fluvio-glacière	75
4.2	Courbes isopièzes au 20 mars 1972	93
4.3	Courbes isopièzes au 19 avril 1972	94
4.4	Amplitude de la nappe de surface	96
4.5	Localisation des trous de sondage - Localisation des coupes	98

CHAPITRE 1

LA RATIONALISATION ET LES RESEAUX PIEZOMETRIQUES

INTRODUCTION

Au Québec, on a longtemps négligé l'importance de l'eau souterraine et de ce fait, nos connaissances en ce domaine (tant quantité que qualité) se trouvent dispersées et incomplètes. Cette situation s'explique aisément par l'abondance des eaux de surface que l'on trouve au Québec. Cependant, on estime qu'actuellement 25 pourcent des municipalités du Québec (soit 430,000) personnes) utilisent uniquement l'eau souterraine pour leurs besoins (ST-MARTIN, H., GRISEL, H., 1974). La vulnérabilité des eaux de surface à la pollution qui augmente avec l'accroissement de la population nous conduit à rechercher d'autres sources d'eau pour usage domestique ou industriel et ce, à un coût minimal.

Ainsi, sachant que l'eau souterraine est abondante, qu'elle possède une composition chimique constante dans le temps et une bonne qualité bactériologique en plus d'avoir une température relativement basse, cette ressource est appelée à jouer un rôle de plus en plus important dans l'approvisionnement en eau des villes et des industries.

C'est pourquoi une bonne connaissance de cette ressource est nécessaire au même titre que l'eau de surface. Cette connaissance peut être obtenue à l'aide d'un réseau de mesures d'eaux souterraines. Cependant, l'implantation d'un tel réseau sur une grande échelle (au Qué-

bec par exemple) nécessite un plan d'ensemble, une approche méthodique et structurée. On ne peut, compte tenu des problèmes particuliers soulevés par les différents usages et les priorités de chaque région (bassins et sous-bassins), procéder à une implantation non planifiée.

On voit donc l'importance de la RATIONALISATION d'un tel réseau. C'est pourquoi notre effort portera d'abord sur cet aspect des études hydrogéologiques qu'est la rationalisation d'un réseau piézométrique.

1.1 Rappel de notions générales

Piézomètre

Un piezomètre est essentiellement un dispositif constitué d'un tuyau, enfoncé dans le sol à la verticale, dont l'une des extrémités ouverte est située dans la formation souterraine saturée et l'autre est ouverte à la surface. Cette installation permet de mesurer une hauteur d'eau (à l'intérieur du tuyau) qui correspond au potentiel d'eau souterraine dans cette formation (unité stratigraphique).

Energie mécanique contenue dans une unité de masse liquide:

$\phi = gz + \frac{p - Po}{P} = gz$ (liquide se déplaçant à faible vitesse)

P = densité (force) $(temps)^2$ $(longueur)^{-4}$

g = accélération due à la gravité (longueur) $(temps)^{-2}$

z = élévation au-dessus du plan de référence (longueur)

gz = energie potentielle gravitationnelle

p = pression du liquide (force) $(longueur)^{-2}$

Po = pression au plan de référence

(COOLEY, R.L., 1972)

Il existe plusieurs sortes de piezomètres (ouvert, Gloetz, limnigraphe, etc...) dont l'utilité peut varier selon l'objectif visé. Nous les étudierons en détail plus loin, mais la mesure se résume toujours à une hauteur d'eau (potentiel).

Une mesure de niveau piezométrique n'est utile que si elle est comparée à d'autres mesures dans le temps ou dans l'espace. Ainsi, plusieurs mesures prises au même temps en divers points du même aquifère permettent de définir une surface piezométrique et conduisent à la construction de courbes isopiezométriques (isopièzes). Perpendiculairement à ces courbes, on peut tracer des lignes de courant correspondant à des filets liquides. Enfin, la différence de niveau (gradient) entre deux piezomètres voisins situés sur le même filet liquide permet de déterminer le sens (direction) de l'écoulement par le calcul du gradient hydraulique.

De plus, les différences de niveaux piezométriques observées dans le temps en un point donné permettent le calcul de la variation des réserves qui est directement reliée à l'alimentation et à la décharge de la nappe.

Aquifère et écoulement

On peut définir un aquifère comme une unité lithologique (ou une combinaison d'unités) qui possède une certaine capacité d'emmagasiner et de transmettre l'eau.

De façon générale, un bassin (un ou plusieurs aquifères adjacents) se divise en trois zones principales. La zone de recharge est

caractérisée par des mouvements d'eau descendants (le potentiel décroît avec la profondeur), la zone de décharge (vidange) par un mouvement d'eau ascendant (le potentiel augmente avec la profondeur) et entre ces deux zones se situe la partie intermédiaire où l'écoulement est latéral et où les lignes de courant sont parallèles; donc le potentiel énergétique ne varie pas avec la profondeur.

Un aquifère peut donc couvrir de grandes surfaces et ainsi être soumis à différents types d'écoulement. L'écoulement dans le sol est du type local, intermédiaire ou régional. Les systèmes locaux ont leur zone de recharge dans les parties élevées du bassin et leur zone de décharge dans les parties basses adjacentes. Les conditions climatiques influencent beaucoup ce type d'écoulement. Dans les systèmes intermédiaires, les zones de recharge et de décharge ne sont pas adjacentes l'une à l'autre et il peut exister plusieurs obstacles topographiques entre les deux. Dans ce genre d'écoulement, les effets du climat se font moins sentir et la nappe répond plus lentement aux différents stimuli. La zone de recharge d'un système régional se situe à la ligne de partage des eaux superficielles du bassin et la vallée principale constitue la zone de vidange du système (au niveau des principales rivières du bassin). Contrairement aux systèmes locaux et intermédiaires, le système régional varie peu et sa réponse à un stimuli est très atténuée par sa grande superficie. De fait, l'eau y séjourne longtemps et l'écoulement est lent. Ces différents systèmes d'écoulement peuvent expliquer le transfert d'eau possible d'un sous-bassin à un autre.

En résumé, un piezomètre est un capteur de pression dont les mesures ne sont utiles que si elles s'insèrent dans un réseau piézo-

métrique. Les informations ainsi recueillies sont intimement liées à la connaissance des aquifères, de leurs différentes zones, des types d'écoulement, de la topographie, etc... Une étude physique (géologique) du milieu et un réseau bien distribué permettent donc une compréhension du phénomène. De plus, l'interpolation dans le temps et dans l'espace à partir des données recueillies permet une certaine prévision des variables piézométriques.

1.2 Rappel bibliographique

La rationalisation

La rationalisation est essentiellement la définition d'une méthodologie d'approche pour l'obtention de données nécessaires afin de résoudre un problème identifié. Plusieurs auteurs se sont penchés sur cette question et suivant les objectif visés, le sens de l'expression "rationalisation d'un réseau de mesure" prend un sens légèrement différent. Cependant, de façon générale, tous s'accordent autour d'une même idée qui est assez bien résumée par VILLENEUVE et Al (1972). Essentiellement, un réseau de mesure a pour but de fournir l'information nécessaire à la solution de problèmes de nature économique et scientifique et la rationalisation consiste à rechercher les moyens à mettre en oeuvre pour obtenir l'information à un coût minimal.

De façon générale, ceci a trait aux réseaux hydrométriques, météorologiques et hydrogéologiques. En ce qui concerne ce mémoire, nous tenterons d'élaborer une méthodologie d'approche générale face à une rationalisation d'un réseau piézométrique (hydrogéologique). Plusieurs applications effectuées au Québec, particulièrement en ce qui concerne les réseaux hydrométriques, ou dans d'autres pays, pour les réseaux piézométriques, sont considérées dans les paragraphes subséquents.

Les réseaux piezométriques

L'implantation d'un réseau piezométrique doit se faire selon des règles précises. Une mauvaise planification d'un tel réseau conduit rapidement à une non-rentabilité économique ou à une information redondante ou inutile. Or ces règles dépendent elles-mêmes des buts visés par l'utilisateur. Il nous faut donc bien définir les objectifs que vise l'implantation d'un réseau piezométrique et ainsi établir une base sur laquelle on pourra élaborer la rationalisation des points de mesure.

Les objectifs

On peut définir un réseau de plusieurs manières, une revue de la littérature faite par VILLENEUVE et Al (1972) donne plusieurs définitions et la conclusion qu'on en tire est "que les réseaux doivent échantillonner la variabilité dans le temps et dans l'espace des caractéristiques mesurées et de l'influence de l'homme. Cet échantillonnage est fait pour répondre à certains objectifs avec un niveau de précision donné". Jusqu'à présent, au Québec, l'implantation de piezomètres s'est faite sans planification particulière et seulement lorsque le besoin s'est fait sentir pour des objectifs locaux et précis (études spécialisées, etc.). Or, la rationalisation implique la définition d'un plan d'ensemble répondant à des objectifs généraux, et ensuite on pourra déterminer des objectifs plus précis en réponse à des usages particuliers. C'est donc à partir d'une hiérarchisation des objectifs que l'on pourra définir les différents types de réseaux requis. Ainsi, selon MARGAT (1972), les demandes d'informations définissant les buts pratiques des réseaux peuvent se regrouper en quatre (4) catégories:

- Evaluation et gestion des ressources en eaux souterraines
- Détermination des paramètres des aquifères
- Contrainte hydrogéotechnique
- Contentieux

De plus, toujours selon MARGAT, le nombre de piezomètres à prévoir pour le contrôle des variations de réserves est, dans chaque région, fonction de la diversité des conditions hydrogéologiques, du degré de "dissection" en systèmes aquifères indépendants et de l'intérêt du contrôle des variations de réserves. Dans cette conception, chaque piezomètre permanent s'inscrit comme un témoin sur lequel viennent se greffer des piezomètres temporaires installés dans des systèmes similaires. Dans le cas de piezomètres destinés à définir le régime actuel des fluctuations avant une quelconque intervention, la disposition des puits dépend alors du nombre et de la répartition des points pouvant être soumis à l'influence de cette intervention et aussi de l'importance des intérêts en jeu.

Selon MANDEL (1965), le premier trou de forage servant à mesurer un niveau doit être également la première composante d'un futur système d'observations dont les buts, fixés à l'avance, sont tels que:

- la détermination du sens d'écoulement
- l'évaluation de la recharge naturelle
- la détermination des régions de contacts avec les corps minéralisés
- des puits indicateurs de la minéralisation de l'eau
- la supervision et l'aménagement de réserves exploitables.

Comme on le voit, ces objectifs sont moins généraux que ceux

énumérés par MARGAT (1972) et en terme de rationalisation, ces buts deviendraient plutôt des sous-objectifs pour répondre à un problème plus précis ou local. De plus, signalons que MANDEL (1965) considère l'espacement des puits comme un problème relié à la grandeur de la région à couvrir, à la complexité hydro-géologique, au but du travail poursuivi et enfin aux limitations financières.

L'objectif général du contrôle piezometrique devient, pour FORKASIEWIEZ et MARGAT (1969), "la connaissance de l'évolution passée des niveaux nécessaires pour détecter et mesurer ce qui pourrait être tenu pour une anomalie et pour projeter sur son prolongement dans l'avenir, les influences prévisibles de toute intervention envisagée". De là, les auteurs tirent des sous-objectifs tels que:

- la connaissance des variations de réserves
- la surveillance de l'influence de captage important
- la définition du régime naturel avant une intervention quelconque pouvant modifier le régime.

Ainsi, pour chaque sous-objectif ci-haut mentionné, il conviendrait de déterminer un réseau qui, selon sa densité, pourra répondre aux besoins envisagés. L'implantation des piezomètres doit suivre des règles subordonnées au but que l'on veut assigner au réseau général.

CANCEIL (1973) distingue différents objectifs dans le cas de l'étude des variations des nappes influencées ou non. Mais il détermine également les objectifs plus généraux:

- évaluation et gestion de l'eau souterraine

- détermination des paramètres des aquifères
- évaluation hydrogéotechnique
- problèmes juridiques

Il considère, de plus, qu'il ne peut exister de réseau piezométrique polyvalent adapté aux divers usages. Car la densité des puits, leur disposition et la fréquence des mesures varient selon l'objectif visé.

Aux Etats-Unis, c'est le Geological Survey qui a été chargé d'établir un réseau national d'information sur l'eau souterraine. (DAVIS 1965). Chaque état a été classifié selon une échelle des travaux à effectuer: reconnaissance, connaissance générale, étude intensive et surveillance. A chacune de ces grandes classes viennent se greffer des objectifs plus particuliers:

CLASSE	OBJECTIFS
Reconnaissance	- Approche préliminaire - Identification des problèmes
Connaissance générale (General investigation)	- Développement modéré sans problèmes locaux particuliers - Information pour une planification urbaine et industrielle et pour l'irrigation
Etude intensive	- Développement intensif - Données précises concernant la qualité
Surveillance	- Réponses aux questions touchant le statut de la ressource eau - Problèmes de développement

De cette façon, on a cherché à utiliser les données et les stations déjà existantes. On a posé les questions, déterminé les objectifs et si les stations déjà existantes pouvaient répondre aux critères sélectionnés, elles étaient incorporées dans le réseau national.

De plus, pour mieux répartir le travail avec ou sans piezomètre dans toutes les régions, on a procédé à l'étude de l'hétérogénéité de l'environnement basée sur la porosité des terrains. Cette évaluation est une aide précieuse lors de la rationalisation et l'hydrogéologue peut s'en servir comme guide lorsque vient le moment d'implanter de nouveaux piézomètres dans une région.

CHAPITRE 2

PROPOSITION D'UN SCHEMA DE RATIONALISATION

INTRODUCTION

Comme on a pu le constater dans cette brève revue de la littérature, l'approche globale est sensiblement la même chez presque tous les auteurs, en ce qui concerne les principes généraux et les objectifs majeurs de la rationalisation. Cependant, plusieurs différences apparaissent au niveau de la hiérarchisation des sous-objectifs et des moyens à utiliser pour les rencontrer; mais en général, ces idées sont complémentaires et non contradictoires. Donc, c'est un peu en résumant les idées émises par ces auteurs que nous proposons un schéma de rationalisation.

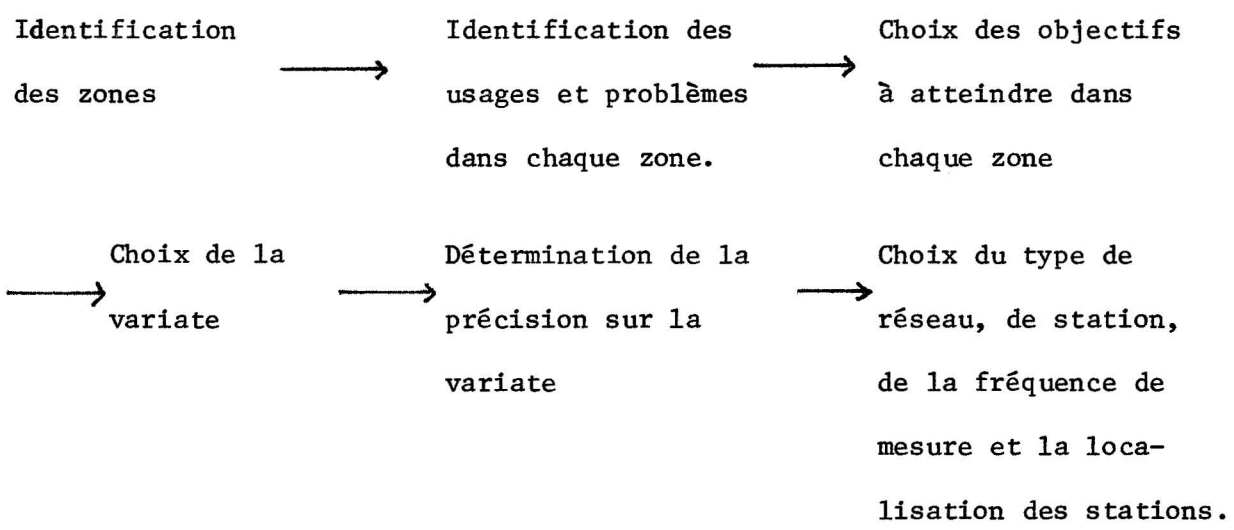
2.1 Principes de la rationalisation

Ce schéma de rationalisation repose sur une logique qu'il est nécessaire de décrire pour en comprendre les principes.

- La première étape consiste à identifier les différentes zones ou régions que l'on désire étudier. Cette classification peut être d'ordre géographique, géologique, économique, social, politique ou d'une combinaison de ces facteurs.
- En second lieu, on doit identifier les différents usages possibles de la ressource à l'intérieur de chaque région et sous-région de même que les problèmes qui en résultent.

- Ensuite, pour résoudre ces problèmes et répondre aux usages, on formule le problème en termes d'objectifs, de buts à atteindre. Ces buts peuvent être assez larges ou très précis, dépendant de l'étude envisagée et du phénomène à connaître.
- Les objectifs fixés nous permettent de déterminer la variate à utiliser pour y répondre. En d'autres termes, il nous faut déterminer ce que l'on doit mesurer, de quelle manière l'échantillonner sur le terrain et quel paramètre sera utilisé à partir de ces données pour l'étude envisagée.
- Enfin, on devra déterminer la précision désirée sur la variate pour atteindre les objectifs qui nous permettront de résoudre les problèmes soulevés par les usages. Et c'est à partir de cette précision que l'on pourra décider du type de réseau à implanter, du type de stations à utiliser (leur localisation) et de la fréquence de mesure à adopter aux différentes stations compte tenu de la variate mesurée.

On a donc, plus schématiquement:



2.2 Objectifs et types de réseaux

Le schéma que nous proposons ici tient compte essentiellement d'une classification des objectifs d'une part et d'une classification des réseaux piezométriques d'autre part. Ceci dans le but de faciliter la tâche de l'hydrogéologue qui devra faire le lien entre les objectifs et les moyens à prendre pour les atteindre. Il faut cependant préciser que le choix final concernant les données nécessaires (type de réseau, de station et la fréquence de mesure) dépend surtout du choix de la variate et de la précision requise sur cette variate. Comme cette précision est directement liée aux objectifs à atteindre, le cadre que nous proposons s'avérera très utile en tant que guide pour l'élaboration d'une méthodologie d'approche face à l'étude d'un phénomène hydrogéologique.

Nous proposons un tel quide parce que, à notre connaissance, personne ne s'y est arrêté au Québec. En fait, la base de ce guide repose sur le choix des objectifs. Ces derniers déterminés, la suite des études requises dépend de plusieurs facteurs:

- l'existence ou non d'information sur l'hydrogéologie de la région;
- la superficie de la région;
- le genre de problèmes à résoudre;
- la précision désirée sur les données;
- la disponibilité de moyens adéquats de traiter les données;
- le budget envisagé, etc...

Par exemple, il est fort possible que dans certains cas on n'ait aucun nouveau piezomètre à implanter ou que l'on soit obligé de procéder

un peu à tâtons dans une certaine région, quitte à réduire ou modifier le réseau initial et ainsi de suite... (structure dynamique, ajustement permanent).

2.2.1 Choix des classifications

En ce qui a rapport aux objectifs généraux, c'est sur la classification de VILLENEUVE et al. (1972) que nous baserons notre étude. Puis, concernant les sous-objectifs et les études requises, nous proposons une classification qui se veut souple mais précise. Sans viser la perfection, nous croyons que cette classification est assez générale et flexible pour répondre à un grand nombre de problèmes qui se posent à l'hydrogéologue lorsqu'il s'agit d'implanter un réseau ou de justifier le maintien de certaines stations de mesures. Enfin, on s'aperçoit que les moyens à utiliser pour résoudre les problèmes sont difficiles à déterminer de façon claire et nette (type de réseau, type de piezomètre, densité du réseau, fréquence des mesures, etc...) et souvent, ils sont tout simplement impossibles à définir dans un contexte général, chaque cas devant être traité séparément. Cependant, on se doit de définir un cadre assez précis pour restreindre les efforts inutiles et bien distinguer au départ les données dont l'obtention est nécessaire pour atteindre un objectif défini. Ce cadre doit aussi être assez général pour permettre certains ajustements selon le cas étudié et pour s'adapter à la plupart des situations rencontrées en pratique. Pour atteindre ce but, nous croyons que la classification des types de réseaux mise de l'avant par FORKASIEWICZ et MARGAT (1967) et MARGAT (1972) est, par sa netteté et sa simplicité, très utile. Il s'agit d'une hiérarchisation des réseaux prizométriques (primaire, secondaire et tertiaire) que nous détaillerons

plus loin.

2.2.2 Classification des objectifs

Parmi tous les objectifs possibles que l'on peut se fixer lors d'une étude de rationalisation, nous pouvons distinguer 5 grandes classes:

- Connaissance générale
- Planification et Aménagement
- Exploitation et gestion
- Modification du régime d'écoulement et de l'environnement hydrogéologique
- Etude scientifique et problèmes particuliers.

Cette classification est du type "imbriqué" puisqu'elle va du général au particulier. En d'autres termes, la connaissance générale est le premier jalon d'une étude plus poussée qui aurait comme objectif la planification et l'aménagement d'un territoire et ainsi de suite. En fait, les études requises pour atteindre un objectif plus général le sont, implicitement, pour les objectifs plus spécialisés.

2.2.3 Classification des réseaux

De la même façon, les différents réseaux piezométriques peuvent se regrouper en 3 classes selon leur densité et leur fréquence de mesure, etc...

1. Réseau primaire

Ce type de réseau est caractérisé par sa faible densité spatiale

une grande fréquence de mesures et une continuité dans le temps. L'emplacement des piezomètres est choisi en fonction des grandes régions géologiques homogènes (type de sol, transmissivité, etc...) et des bassins versants les plus importants. Evidemment, tout ceci est relatif à l'échelle envisagée; pour fixer les idées, disons qu'un réseau primaire s'identifie à un pays ou, à tout le moins, à une province. Nous insisterons cependant sur la fréquence des relevés. En effet, un réseau primaire sert de base pour toute autre étude envisagée dans quelques régions que ce soit. De plus, les données recueillies à l'aide d'un tel réseau ont pour but de connaître la variabilité temporelle en un nombre minimum de points et en vue d'une extension possible de ces données dans le temps ou l'espace. Il faudrait donc opter pour un enregistrement (en continu si possible) du niveau d'eau et insister sur la permanence des stations qui pourront être considérées comme stations-repères en vue d'études ultérieures (réseau peu dense et permanent). Ce type de réseau nous permettrait d'étudier par exemple un système d'écoulement régional. Cet ensemble de stations forme la base du réseau d'observation.

2. Réseau secondaire

Le but d'un tel réseau est l'obtention de données supplémentaires dans une région donnée en vue d'une étude beaucoup plus précise qu'un simple inventaire ou qu'un besoin de connaissances. Ce type de réseau, qui s'articule autour du réseau primaire, se distingue par une densité spatiale moyenne. Par exemple si l'on désire étudier l'écoulement intermédiaire et obtenir plus d'information sur les nappes d'une région, on choisit des points supplémentaires à l'intérieur des mailles du réseau primaire pour ainsi améliorer la couverture spatiale du phénomène.

Le choix des fréquences de relevés de ces mouveaux puits sont laissés à l'hydrogéologue qui se basera sur l'information fournie par le réseau primaire (possibilité d'extension des données) et sur les objectifs visés. Ces stations devront être conservées aussi longtemps que nécessaire pour la solution du problème que l'on veut résoudre.

3. Réseau tertiaire

Ce type de réseau se caractérise surtout par sa forte densité spatiale. La fréquence des relevés dépend des buts de l'étude envisagée. Un tel réseau sert surtout pour une étude très localisée en vue de résoudre un problème précis. Son opération est généralement limitée dans le temps et les informations ainsi obtenues peuvent servir de références pour l'implantation ou la justification de puits dans un réseau primaire ou secondaire. L'implantation des stations à l'intérieur d'un réseau tertiaire ne suit pas nécessairement un maillage bien géométrique, mais est plutôt fonction du type de sols rencontrés, du drainage, et de l'endroit où l'on se retrouve à l'intérieur d'un même bassin. Nous verrons maintenant comment ces types de réseaux s'insèrent dans les classes d'objectifs définies plus haut.

2.3 Description des objectifs

Connaissance générale

Dans le but d'établir un inventaire global des ressources en eau souterraine, cet objectif est essentiel à toute étude ultérieure. La connaissance générale englobe:

- les études de l'écoulement régional

- la définition des régimes d'écoulement
- la délimitation des nappes
- l'étude des conditions extrêmes (état des nappes à l'étiage et aux crues).

De plus, à l'aide des données acquises dans le cadre de cet objectif global, il sera possible d'identifier certains problèmes régionaux relatifs à l'utilisation de la ressource. En général, concernant les données nécessaires, le réseau primaire tel que nous l'avons défini plus haut serait un moyen efficace pour atteindre l'objectif de connaissance générale, bien que le choix final repose sur la précision de la variate à étudier. En effet, dans ce genre d'étude assez générale, une bonne information en peu de points est souvent préférable à peu de données en plusieurs points. Ceci nous permettra d'ailleurs d'effectuer des études d'extension de données, impossibles autrement. Evidemment, nous serons amenés à faire des études cartographiques (géologique et hydrogéologique) pour compléter notre connaissance générale du phénomène.

Planification et aménagement

On peut subdiviser cette classe en deux principaux objectifs:

- la planification et l'aménagement de la ressource en vue de l'alimentation (consommation, irrigation, etc...)
- la protection de cette ressource (connaissance de la qualité, pollution, etc.)

Pour l'alimentation, les usages potentiels étant déterminés, c'est la réponse à ces usages qui guide le choix de nos objectifs. Par-

mi ceux-ci, signalons les principaux:

- l'évaluation de la recharge naturelle des nappes
- l'étude des conditions aux limites
- l'étude des schémas d'écoulement
- le contrôle des variations des réserves (minima, maxima).

Ces sous-objectifs commandent certaines études au nombre desquelles on peut citer:

- la connaissance de l'écoulement intermédiaire
- la cartographie des nappes (isopieze des maxima et minima)
- l'évaluation du taux de recharge des nappes
- la détermination des paramètres hydrodynamiques des nappes (essai de pompage)
- la réponse des nappes aux stimulis naturels (pluie, fonte, etc.)

Enfin, concernant la qualité de l'eau souterraine, les principaux sous-objectifs rencontrés sont:

- la détermination des zones de contact de l'eau avec les corps minéralisés (zones de contact eau-douce, eau-salée)
- la détermination des sources possibles de contamination des nappes (dépotoirs, industrie chimique, mines, etc...)

En plus d'une bonne cartographie de la région, on verra à installer un réseau de contrôle et de surveillance pour prévenir une pollution possible. Une étude physico-chimique de l'eau donne de précieux renseignements en ce sens et permet, de plus, de retracer le chemin parcouru par l'eau souterraine (connaissance des schémas d'écoulement).

En général, un réseau secondaire et de bonnes données météorologiques sont nécessaires pour rencontrer les objectifs de la planification et de l'aménagement. On doit signaler ici que la coordination d'un réseau quantité-qualité est souvent ardue mais nécessaire pour atteindre les objectifs.

Exploitation et gestion

C'est surtout dans le cas d'étude de rentabilité (économique ou autre) que l'on rencontre cet objectif. On pourrait le définir comme "l'opération de puits ou de tout autre système pour en retirer le maximum de bénéfice". On se retrouve donc devant un problème plus précis et c'est surtout l'étude de l'écoulement local de même qu'une évaluation détaillée de la demande en fonction de la disponibilité de la ressource qui nous préoccupera. L'application de modèle n'est pas à négliger et suivant l'intensité de l'utilisation que l'on veut en faire et la précision désirée sur la variate mesurée, on pourra envisager un réseau secondaire ou tertiaire.

Modification du régime d'écoulement et de l'environnement hydrogéologique

Lorsque, dans une région ou une localité, on veut prévoir le développement économique, industriel, urbain ou démographique, certains nouveaux problèmes surgissent. Ainsi, pour résoudre ces problèmes, on est souvent amenés à envisager certains travaux concernant l'hydrologie et l'hydrogéologie. Dans ce cas, il est important de prévoir et d'évaluer les interactions possibles entre l'environnement hydrogéologique et les activités humaines (travaux tels que captage, drainage, barrage,

etc.) On envisage donc une étude localisée et souvent, c'est l'implantation d'un réseau tertiaire qui permettra de répondre aux problèmes posés. Des études précises en ce sens permettent d'éviter plusieurs complications futures tant au point de vue juridique qu'économique.

Etudes scientifiques et problèmes particuliers

Ce genre d'objectif se rencontre lors d'études très spécialisées et généralement locales. Les buts poursuivis peuvent être aussi divers que complexes. En général, il s'agit de déterminer ou de prévoir l'influence de l'eau souterraine dans un cas particulier, par exemple, un glissement de terrain, un phénomène d'érosion, etc... Pour l'étude de tels cas, on utilisera un réseau tertiaire ainsi que toutes les méthodes de mesure jugées pertinentes (nid de piezomètres, application de modèles, études en coupe du terrain, etc...)

Enfin, notons que le cadre de l'étude (cas particulier de St-Jean Vianney) qui suit est précisément un exemple entrant dans cette classe d'objectifs. En effet, les études entreprises à St-Jean Vianney à la suite du glissement de terrain de 1971 avaient pour but de déterminer les causes qui ont pu produire cette catastrophe. Et un de ces objectifs était la connaissance précise de la nappe et son influence possible sur le glissement. Nous nous trouvons maintenant en présence d'un réseau tertiaire extrêmement dense et présumé surabondant. Il s'agira donc de résumer et de décrire le phénomène tel qu'on le connaît et de restructurer le réseau au mieux pour en faire un réseau de surveillance. Le tableau 2.1 résume les objectifs de la rationalisation tels que nous les avons définis.

TABLEAU 2.1: Schéma de rationalisation

OBJECTIFS	DEF. SOUS-OBJECTIFS	DONNEES NECESSAIRES	ETUDES REQUISES
Connaissance générale	- inventaire - régime d'écoulement	RESEAU PRIMAIRE	- étude de l'écoulement régional - cartographie: géologique hydrogéologique - délimitation des nappes - conditions extrêmes
Planification et aménagement - Alimentation (consommation et irrigation) - Qualité de l'eau souterraine (pollution)	- réponse aux usages - contrôle des variations des réserves (max. et min.) - évaluation de la recharge naturelle - conditions aux limites - schémas d'écoulement - détermination de zones de contact avec corps minéralisés - détermination de sources possibles de contamination des nappes	RESEAU SECONDAIRE METEO (pluie, T^{o}, évap.) RESEAU SECONDAIRE PHYSICO-CHIMIE	- étude de l'écoulement intermédiaire - cartes isopiezes des max. et min. - essais de pompage - taux de rabattement de la nappe - taux de recharge - réponse aux stimuli (pluie, fonte) - cartographie précise - réseau de contrôle et surveillance - analyse de résistivité, éléments mineurs, majeurs

TABLEAU 2.1: Schéma de rationalisation (suite)

OBJECTIFS	DEF. SOUS-OBJECTIFS	DONNEES NECESSAIRES	ETUDES REQUISES
Exploitation et gestion	"Opération de puits ou de tout autre système pour en tirer le maximum de bénéfices"	RESEAU SECONDAIRE ou TERTIAIRE (tel que requis)	- étude détaillée de la demande en fonction de la disponibilité - étude de l'écoulement local - application de modèles
Modification du régime d'écoulement et de l'environnement hydrogéologique	Evaluer et prévoir les interactions entre l'environnement hydrogéologique et les activités humaines (captage, drainage et autres travaux)	RESEAU TERTIAIRE	- étude de l'écoulement local selon les travaux envisagés
Etude scientifique et problèmes particuliers	Déterminer et prévoir l'influence de l'eau souterraine pour un cas particulier (glissement de terrain, érosion, etc.)	RESEAU TERTIAIRE DONNEES SUR TOUS les paramètres caractérisant le milieu hydrogéologique nid de piezomètres	- suivant les buts de l'étude poursuivie - application de modèles - étude très précise et très locale

Enfin, ajoutons que pour ce qui est du choix de la densité spatiale et temporelle des réseaux (fréquence des mesures), non seulement ce choix est-il intimement lié à la géographie et à la géologie de la région, de même qu'au nombre de points (ou zones) déterminés pour leur importance dans l'étude envisagée, mais il est aussi fortement soumis à la détermination de la variate et de sa précision pour les buts de l'étude. Comme aide supplémentaire, nous présentons au tableau 2.2 un résumé des facteurs qui influencent les nappes selon la période de temps considérée (MARGAT, 1972). Ce résumé pourra éventuellement guider l'hydrogéologue dans le choix de la "variate critique" à mesurer et pour la détermination de la précision de cette variate.

TABLEAU 2.2: Facteurs influençant les nappes: classement par période de temps

FACTEURS	INFLUENCE INTERANNUELLE	INFLUENCE ANNUELLE (SAISON)	INFLUENCE MENSUELLE	INFLUENCE (HEBDO-JOURNALIERE - HORAIRE
CLIMATIQUE	variation climatique de longue période régime interannuel des précipitations	régime annuel des précipitations & évapo. température cycle végétatif		précipitation journalière variation barométrique (nappe captive) évapo (diurne/nocturne) température (fonde des neiges)
HYDROLOGIE DE SURFACE	régime interannuel des cours d'eau	régime annuel marée d'équinoxe	marée mensuelles et bimensuelles	crues instantanées marée
GEOLOGIQUE	évolution korstique érosion colmatage des cours d'eau (perméabilité porosité)			séisme glissement de terrain marées terrestres
HUMAIN	exploitation intensive des eaux souterraines évolution de l'agriculture - urbanisation	exploitation des eaux souterraines alimentation artificielle irrigation, drainage variation de niveau dans les réservoirs et rivières (barrages)		exploitation des eaux souterraines irrigation lachure de barrage exploitation de carrière (dynamite)

CHAPITRE 3

CAS DE ST-JEAN VIANNEY

INTRODUCTION

St-Jean Vianney est situé dans la région du Saguenay-Lac St-Jean. Cette partie du comté de Dubuc s'étend le long de la rive Nord du Saguenay et est borné par le barrage Shipshaw à l'ouest, la ville de Chicoutimi-Nord à l'est et la rivière Shipshaw ainsi que la paroisse de St-Honoré au nord (carte 3.1)

C'est le 3 mai 1971 que s'est produit un glissement de terrain qui a enseveli une partie du village de St-Jean Vianney. Suite à cet événement, plusieurs études furent entreprises qui conduisirent à recueillir un grand nombre de données. Le présent mémoire vise à exploiter au mieux l'ensemble des données disponibles.

3.1 Historique des études

A la suite du glissement de mai 1971, le Gouvernement du Québec a mis sur pied une mission technique dont le mandat consistait à recommander et planifier les études requises afin de rechercher les causes du glissement et évaluer la stabilité des terrains dans cette région.

3.1.1 Etude géologique

Un relevé géologique détaillé des dépôts meubles et de la roche

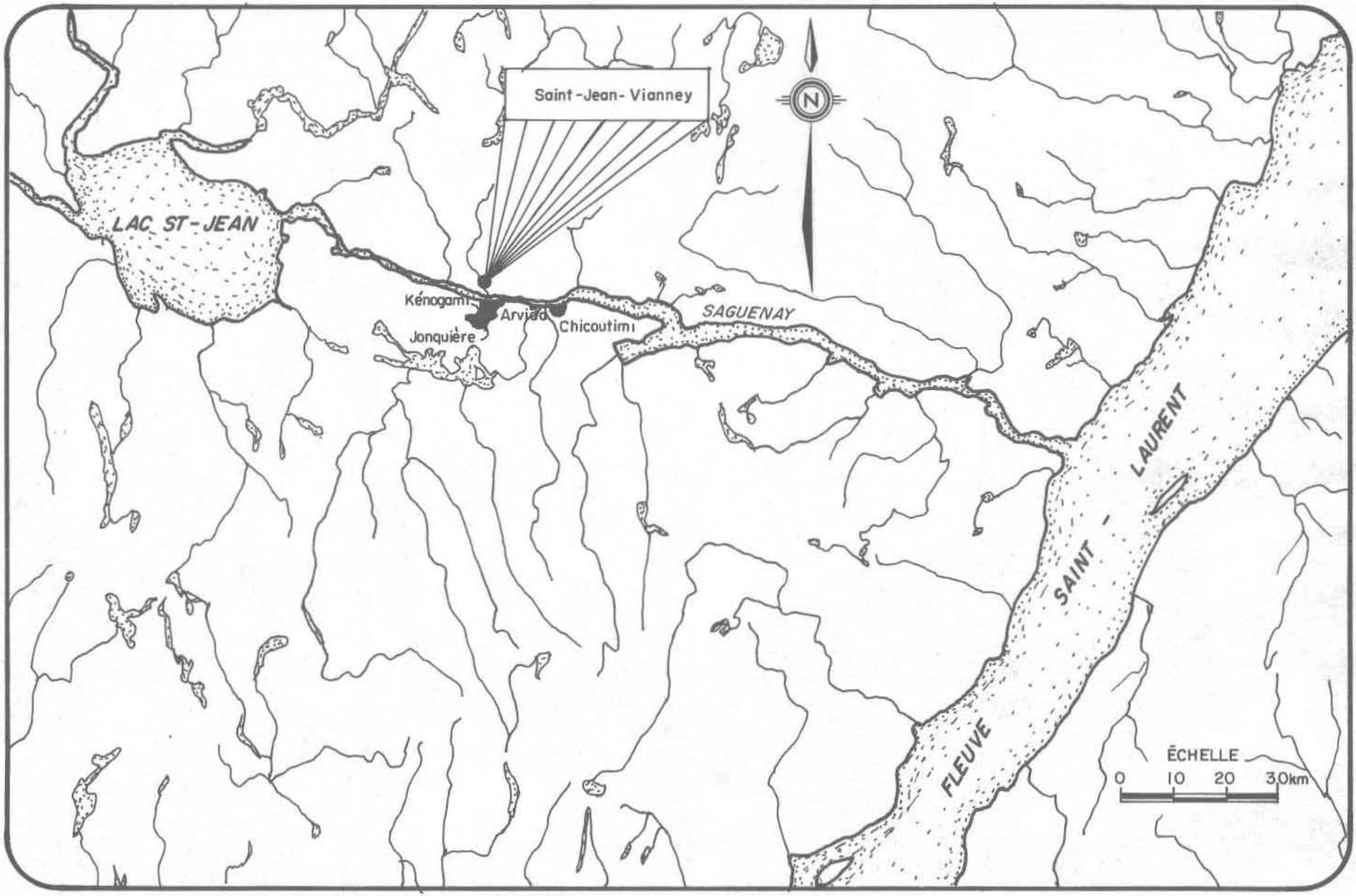


Figure 3.1, Localisation de Saint Jean - Vianney au Québec.

en place a été effectué par Lasalle (1973). Cette étude a permis de déterminer que les dépôts de cette région sont en majorité formés d'argile et de sables. Les résultats de ce relevé sont disponibles au Ministère des Richesses Naturelles (Service de la Documentation, No 28451).

3.1.2 Etude géotechnique

Cette dernière avait pour but de fournir des informations sur les propriétés des sols ainsi qu'une évaluation des conditions de stabilité des terrains. Les forages effectués ont été concentrés aux abords du cratère et des berges du ruisseau Petit Bras. "Le programme d'étude comportait des mesures in situ de la résistance de l'argile au moyen de scissomètres, des prélèvements d'échantillons non remaniés et l'installation de piezomètres afin de permettre la mesure des pressions d'inflitration d'eau dans le sol". (Larochelle, 1973)

Les forages ont été exécutés en deux phases:

a) la première phase comportait les forages identifiés par les lettres A à G (carte 3.2) qui sont situées en bordure du cratère formé par le glissement:

b) suite aux conclusions de l'étude hydrogéologique, une deuxième phase a été effectuée. Elle comportait les forages K, M, N, P, Q, R, S, V. situés sur le côté nord du cratère.

3.1.3 Etude hydrogéologique

Cette étude avait pour objectifs:

1) d'établir le bilan hydrogéologique de la rivière Petit Bras;

2) de délimiter les aquifères;

3) de déterminer les réseaux d'infiltration;

4) d'évaluer les variations de niveau piezométrique dans ces réseaux en fonction du temps.

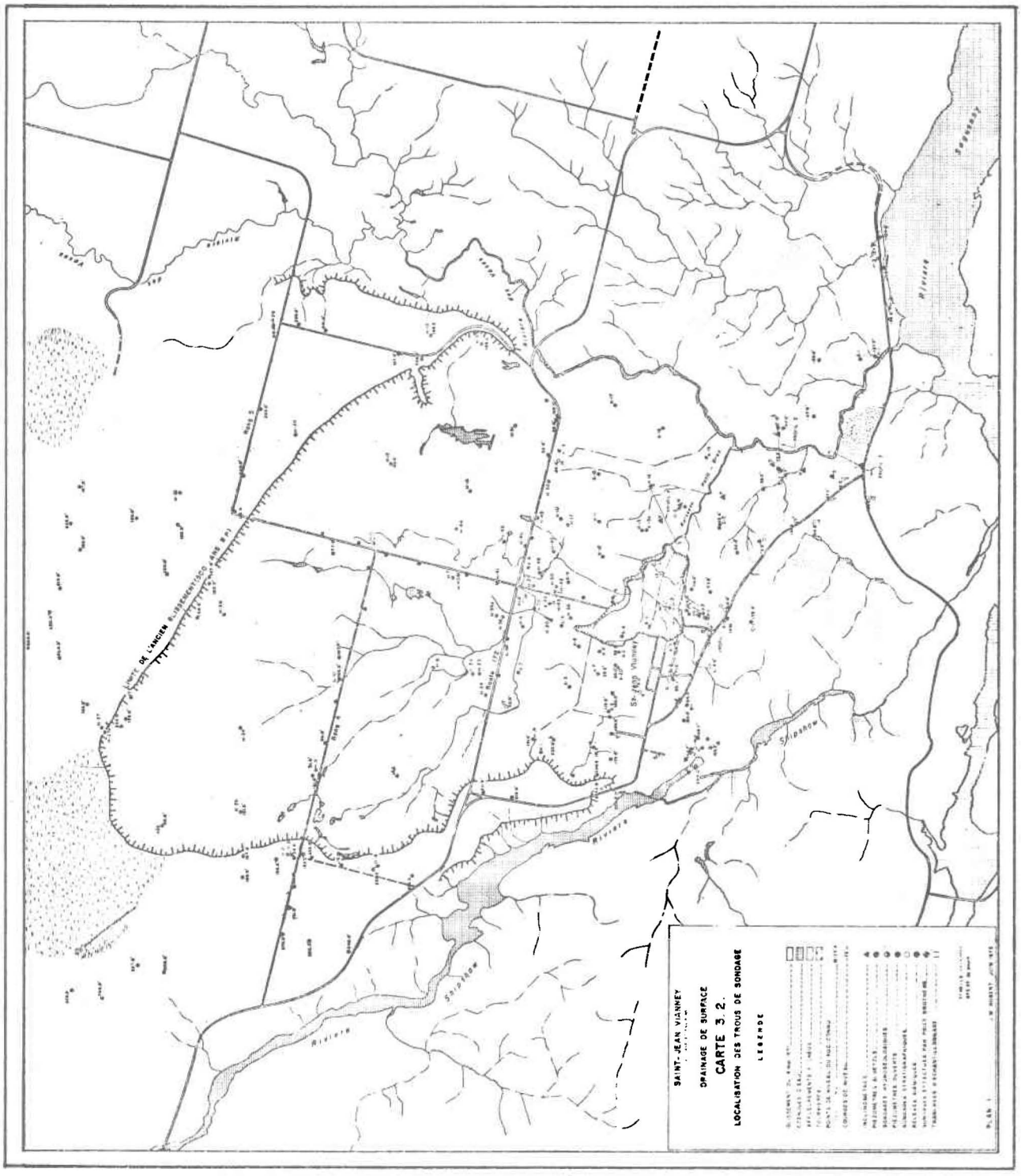
Cinquante-cinq forages, identifiés par la lettre H, (carte 3.2) ont été implantés sur un territoire d'environ cinq (5) milles carrés. Des limnigraphes à maximum et à minimum ont été installés dans 30 des 55 forages afin de permettre de suivre les variations des niveaux piézométriques dans les aquifères. Plusieurs analyses chimiques et granulométriques ont été effectuées ainsi que 3 essais de pompages d'une durée de 24 à 48 heures (Larochelle, 1973).

3.1.4 Travaux correctifs

Suite aux recommandations de ces diverses études, des travaux correctifs ont été entrepris en vue d'empêcher l'érosion des berges et du lit du ruisseau Petit Bras. A cet endroit, le Service d'aménagement hydraulique du M.R.N. a suggéré la pose de gabions qui ont servi à construire des murs et des seuils afin d'empêcher l'érosion.

Les berges du cratère ont été abaissées pour empêcher que des éboulis et des petits glissements ne puissent détruire les gabions.

De plus, une tranchée a été excavée d'ouest en est le long de la route régional 172 pour rabattre la nappe phréatique, empêchant ainsi le débordement vers le cratère et pour faciliter l'écoulement de l'eau vers le lit de la rivière Petit Bras (Kadula, 1972).


SAINT-JEAN VIANNEY
DRAINAGE DE SURFACE
CARTE 3.2.
LOCALISATION DES TROUS DE SONDAGE
LEGENDE
LIMITE DE L'ANCIEN ARRONDISSEMENT
Rivière
Saguenay

3.2 Caractéristiques physiques de la région

3.2.1 Géologie

Glacier du Wisconsin

Il y a 10,000 ans, les glaciers du Wisconsin recouvraient cette région qui fut déprimée sous le poids du glacier. Par suite du réchauffement de l'atmosphère, il y eut retrait de la glace et envahissement par la mer.

Un bras de la mer Champlain que l'on a appelé mer Laflamme recouvrit alors la région qui nous intéresse. Il est important de noter qu'à cette époque, la surface du sol était d'environ 550' au-dessous de son niveau actuel, ce qui fait que le site du village de St-Jean Vianney, lequel se trouve actuellement à 275' au-dessus du niveau de la mer, était avant l'époque d'accumulation des dépôts meubles à 275' au-dessous de la mer.

Donc des sédiments d'origine marine recouvrent maintenant le till et les graviers fluvio-glaciaires.

Sédimentation

Dans la région de St-Jean Vianney, on retrouve des sédiments déposés en eau profonde tels que les silts et les argiles. Le processus de décantation a été accéléré par une flocculation intense favorisée par le milieu marin.

La présence de conditions de turbulence variable explique le fait que l'on retrouve des stratifications (minces lits de silts et de sable) dans la couche d'argile (Larochelle, 1973).

A mesure que le glacier a retraité, la surface de la mer et la surface de déposition se sont rapprochées suite à des mouvements causés par le relâchement des pressions du glacier. Les derniers sédiments à se déposer furent des matériaux plus grossiers (sable et gravier) qui forment aujourd'hui l'unité stratigraphique appelée: sable des hautes terrasses.

Géologie des dépôts meubles

Socle rocheux

La roche en place est en grande partie d'âge Précombrienne et appartient à la province métamorphique du Grenville. Le socle est composé essentiellement d'anarthosite à laquelle sont associés des gabbros, des dioritès et des syénites.

Il existe également des variétés de roche métasédimentaire telle que des gneiss à Sillimanite, des Quartzites, des Pyroxenites et des Migmatites.

On retrouve dans la partie Nord-est des calcaires et des shales de l'Ordovicien Supérieur.

Till de fond

C'est le sédiment le plus ancien. Lors du retrait du glacier, ce dernier a laissé derrière lui une moraine de fond.

Dans la région de St-Jean Vianney, cette unité n'est pas continue et son épaisseur n'a que quelques pieds. Selon les analyses granulométriques effectuées sur des échantillons de ce till, on a déterminé

les proportions suivantes:

sable:	50 à 80%
argile et silt:	1 à 20%
gravier:	trace (Kadula, 1972)

Sédiments fluvio-glaciaires

Les affleurements de ces sédiments sont assez rares; car ils ont été recouverts par les argiles de la Mer Laflamme. La plupart des sondages ont recoupé cette formation dont l'épaisseur varie de quelques pieds à 92 pieds dans la région des Terres Rompues près de la rivière Saguenay.

Argile

Les dépôts d'argile marine de cette région atteignent une puissance maximum de 260 pieds. Ces argiles qui sont de véritable farine de roche produite à partir de l'érosion de la roche Précambrienne, contiennent également quelques minéraux argileux provenant d'autres sols ou extraits de la roche d'âge Ordovicienne.

Dans cette argile on a remarqué une stratification, produite par l'alternance des lits silteux et argileux, expliquée par une variation dans les conditions de sédimentation. On note également la présence de dykes de matériaux plus grossiers qui recoupent cette stratification.

Les analyses physico-chimiques de l'eau contenue dans l'aquifère fluvio-glaciaire n'ont pas permis de déceler la présence d'eau salée. Ceci implique le lessivage des sels contenus dans l'argile et ce processus est à la base de la formation des argiles sensibles. Lorsque ce

phénomène a lieu, il n'y a pas de changement apparent dans l'argile, mais cette dernière possède une structure cristalline bien spécifique maintenue fortement par des liens ioniques et lorsqu'il y a lessivage, ceci se traduit par la disparition d'un ion détruisant ainsi des liens et rendant la structure très fragile et susceptible de s'écrouler aux moindres chocs (CRAWFORD, 1967).

Des travaux antérieurs ont démontré que l'argile, déposée dans une eau ayant une concentration de 35 gr/l, et soumise par la suite à un lessivage qui a pour effet de diminuer la teneur en sel de l'eau interstitielle subit une diminution de sa limite liquide et voit ainsi augmenter sa sensibilité au remaniement. On a déterminé que les teneurs en sel de l'eau interstitielle des argiles de St-Jean Vianney étaient inférieures à 1 gr/litre (Larochelle, 1973).

Colluvions

On désigne par ce terme tous les matériaux qui ont été récemment arrachés du sol en place pour ensuite être transportés et déposés plus loin. Le cratère de l'ancien glissement est recouvert de ce type de matériaux.

La figure 3.1 montre la stratigraphie originelle. La figure 3.2 indique la stratigraphie existante actuellement.

3.2.2 Climatologie

Précipitation

Gagnon et Ferland (1974), dans le Climat Méridional du Québec, montrent

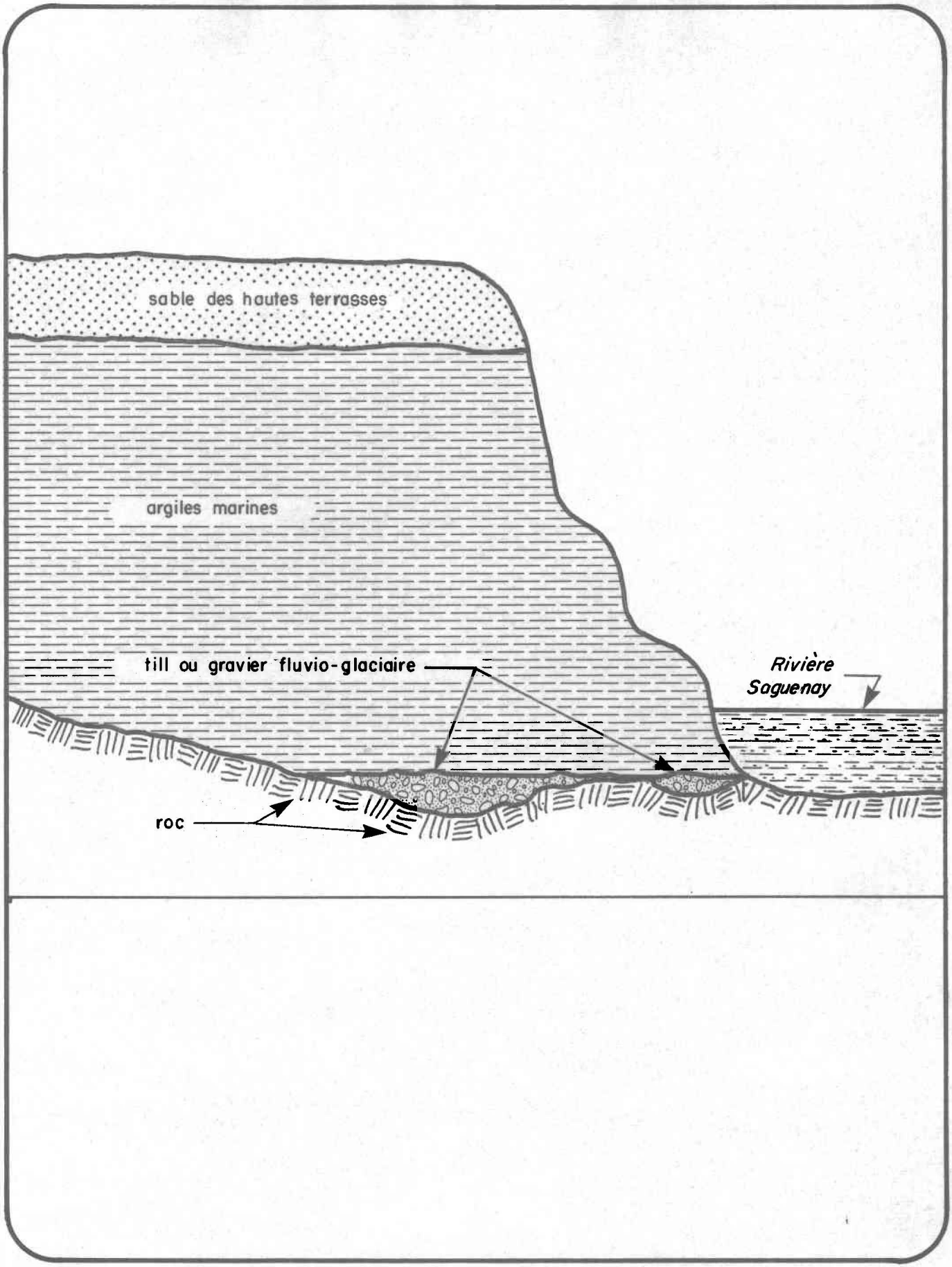


Fig. 3.1 . Stratigraphie originelle de Saint-Jean-Vianney (Lasalle, P., 1973).

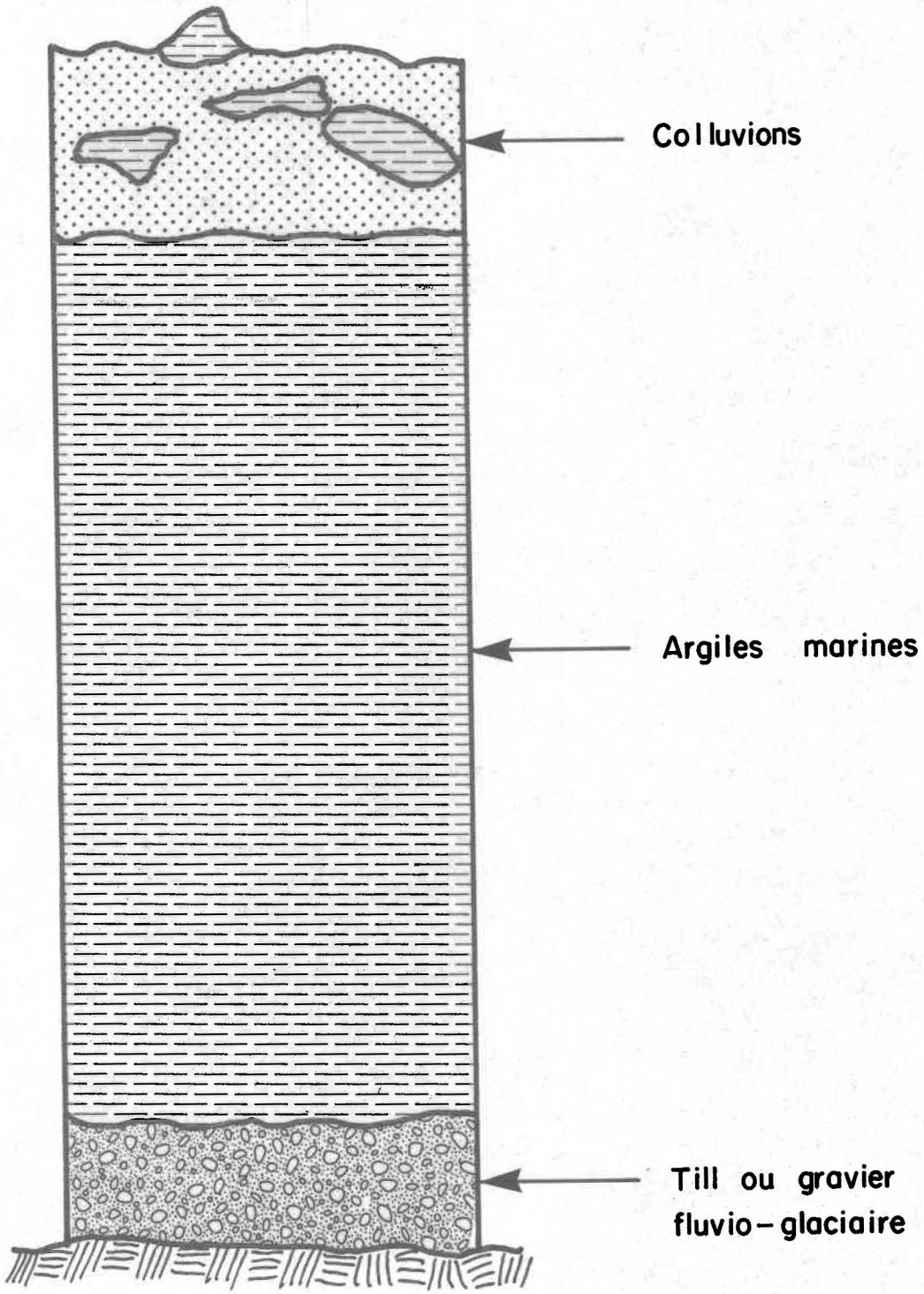


Fig. 3. 2 . Stratigraphie actuelle de Saint-Jean-Vianney.

que la précipitation totale moyenne annuelle s'élève à 88.0 po., tandis que la chute de neige est d'environ 100.0 po., donc une fraction nivale (% de la précipitation totale tombant sous forme de neige) d'environ 28%.

Insolation

La durée annuelle de l'insolation est de 1,650 hres, tandis que le pourcentage annuel moyen de l'insolation est d'environ 38%.

Température

Les données concernant les températures proviennent du M.R.N., Direction générale des eaux. On a pu ainsi déterminer que la température moyenne annuelle dans la région est d'environ 35°F. Par ailleurs, les températures moyennes (max. et mini. en janvier et juillet) sont indiquées au tableau 3.1

Durant cette période on a déterminé que la température maximum absolue a été de 100°F, que le minimum absolu a été de -45°F.

La dernière gelée du printemps a une probabilité de 50% de se produire avant le 20 mai. La première gelée d'automne a 50% de chances d'arriver avant le 25 septembre.

On détermine ainsi la longueur d'une saison sans gel a une moyenne de 120 jours.

3.2.3 Végétation

Cette région des Basses Terres du Haut Saguenay fait partie de la forêt Laurentienne et est le domaine de la sapinière à érable rouge

TABLEAU 3.1. Température moyenne à Saint-Jean Vianney.

T^{o} (1931-1960) (^{o}F)	JANVIER	JUILLET
T^{o} moyenne	$2.5^{o}F$	$65^{o}F$
T^{o} maximum (quotidienne)	15^{o}	$75^{o}F$
T^{o} minimum (quotidienne)	$-5^{o}F$	$53^{o}F$

(sapin, peuplier, érable rouge, pin gris).

Au nord de la région on remarque une vaste tourbière qui se draine dans le cratère de l'ancien glissement. Environ le tiers de la région est occupé par l'agriculture et l'élevage tandis que le reste de la surface est boisé (Jurdant, M., 1972).

3.2.4 Morphologie

Caractères généraux

Du point de vue physiographique, la région appartient à l'unité des Basses Terres du Haut-Saguenay.

Elle est caractérisée par une terrasse dont l'altitude ne dépasse guère 500'. Dans l'ancien cratère, le long d'un axe (N-O, S-E) on rencontre le relief suivant: au Nord de l'ancien cratère on retrouve les hautes terrasses qui se situent à une altitude d'environ 400'. Immédiatement après (direction S-E), on a le cratère de l'ancien glissement s'abaissant de 360' à 240' sur une distance d'environ 2 milles. Tout au fond du nouveau cratère, l'altitude est de 160', tandis qu'elle n'est plus que de 25 ' près de la rivière Saguenay (Fig. 3.1).

Dans l'ancien glissement, on remarque la présence de colluvions (blocs d'argiles et de sables transportés sur de petites distances et déposés pêle-mêle) qui impriment une topographie du type planche à laver.

Terrasses

Lors du retrait progressif de la mer, les derniers sédiments à se déposer furent du sable qui forme présentement les hautes terrasses.

On retrouve ces escarpements au niveau 500 pieds. Il existe un autre escarpement juste avant d'arriver au Saguenay soit au niveau 250 pieds.

Ravinement

Lors de l'abaissement du niveau de base par suite du soulèvement post-glaciaire, le réseau de drainage s'est développé favorisant ainsi l'érosion et le ravinement (Ex: ruisseau Petit Bras).

De plus, lorsque le ravinement a atteint l'argile, il s'est produit des glissements de terrain qui ont accéléré le rabattement du relief.

Coulée antérieure

La région qui nous intéresse se trouve située à l'intérieur d'une ancienne coulée dont la description apparaît au rapport HG et GT.

Des études plus poussées ont permis de déterminer que cette coulée s'est produite en deux étapes, il y a environ 300 à 500 ans (Larochelle, 1973).

3.2.5 Hydrographie

En regardant la carte (3) on remarque que le réseau de drainage est du type dentritique. Il est bien développé surtout dans la partie du bassin qui est situé au nord du cratère formé par le glissement de mai 1971. Ce type de réseau est caractéristique des terrains de faible perméabilité. De plus, on remarque 12 petits lacs situés dans la partie nord du bassin. Plusieurs de ces lacs ne semblent pas avoir d'exutoire, ce qui laisse supposer que la nappe phréatique émerge à ces endroits.

Donc, dans la partie nord du bassin, comprise entre la limite de l'ancien cratère et la route régionale 172, la nappe n'est qu'à quelques pieds de la surface.

Ruisseau Petit Bras

Ce dernier draine la partie nord du territoire étudié comprise entre la route régionale et la bordure de l'ancien glissement. Au cours des années, ce ruisseau, qui s'écoule suivant une direction (N-O, S-E), s'est creusé dans l'argile un lit très profond (100' et plus) aux pentes abruptes.

Ce ruisseau draine tout le territoire à l'étude. C'est ce chemin qu'a emprunté la coulée de boues qui s'est produite en mai 1971.

Rivière des Vases

Elle coule suivant une direction (N-E, S-O) et capte le ruisseau Petit Bras à environ 1 mille de son embouchure avec la rivière Saguenay.

Cette rivière est située en bordure du terrain qui nous intéresse. On y rencontre a plusieurs endroits des affleurements rocheux.

Drainage artificiel

Beaucoup de travaux de drainage ont été effectués par les cultivateurs pour assécher leurs terres. On observe que ce drainage a pour effet en période de crue, d'augmenter les débits, les vitesses d'écoulements et l'érosion des ruisseaux.

Suite aux recommandations des études effectuées après le glissement de mai 1971, un drain fut creusé parallèlement à la route régionale de façon à abaisser la nappe au nord de la route.

Débit de la rivière des Vases et Petit Bras

Le service de l'hydrologie du M.R.N. du Québec a fait l'installation de stations dans la région. La première portant le numéro 064601 donnait le débit de la rivière des Vases et était situé à 2.4 milles de l'embouchure.

La seconde portait le numéro 064602 donnait le débit de la rivière Petit Bras et était situé à 1.5 mille de la rivière des Vases. Si on compare les précipitaitons et les débits des rivières aux stations on remarque que la station #64601 réagit beaucoup plus que la station #64602 aux diverses pluies (Tableau 3.2). Ce qui veut dire que la pluie qui tombe sur le bassin de drainage de la rivière des Vases ruisselle en grande partie directement dans la rivière et n'est pas retenue par le sol. Tandis que pour le bassin du ruisseau Petit Bras, la majeure partie de la pluie est retenue par le sol et alimente la nappe phréatique.

3.2.6 Topographie du socle rocheux

Une carte topographique du socle rocheux a été établie à l'aide des résultats des divers forages, des mesures sismiques et de la présence des affleurements. Les lignes de contour indiquent la présence d'une vallée taillée dans le roc et cachée sous une épaisseur de 260' de dépôts meubles. Cette vallée révèle l'existence probable d'une ancienne rivière pré-glaciaire. De chaque côté de cette vallée on remarque des

TABLEAU 3.2

Débits enregistrés aux stations durant l'été 1971.

	Précipitation en po. St-Jean Vianney			# 64601 (stations débits)			#64602 ($pi^3/0$)		
Jours	Juin (71)	Juillet (71)	Août (71)	Juin (71)	Juillet (71)	Août (71)	Juin (71)	Juillet (71)	Août (71)
1		.15			10.6	7.4		10.3	4.7
2					9.1	6.4		8.7	5.4
3		1.24	.75		5.0	8.0		7.8	8.3
4		.02	T		23.0	17.5		13.7	7.2
5		.42	T		22.4	13.1		10.9	5.1
6		.04	.10		20.5	9.9		10.5	5.8
7			T		14.2	8.3		9.6	7.1
8		.41	.71		9.2	6.9		8.4	5.7
9		.01	.06		29.4	38.9		17.5	13.1
10			.10		19.8	35.3		11.8	15.0
11			.09		11.5	37.1		9.2	17.9
12			.27		7.4	31.3		8.1	9.9
13		.13			6.7	40.4		8.9	9.9
14			.34		7.7	40.2		9.8	9.7
15		.07	.01		6.1	44.8		9.6	10.3
16		.42	.02	10.3	5.0	31.9		8.2	9.6
17		.08		9.0	10.6	22.5		7.5	10.4
18		.23	T	8.2	16.1	16.8		5.0	8.9
19	.10	.38	.64	7.2	25.4	13.2		5.2	10.8
20	.07		.04	11.2	28.5	29.9		6.0	18.0
21			.55	19.4	24.1	41.3	9.1	5.3	15.3
22			.14	15.4	16.7	35.6	7.9	6.1	13.8
23	.36		1.68	10.5	13.6	84.1	7.4	7.6	16.6
24		.10	.30	13.0	28.6	385.0	9.1	6.6	23.3
25				15.5	20.8	232.0	8.5	5.2	15.7
26		.23	T	10.3	11.1	98.5	7.9	6.3	11.4
27	.02		.03	7.2	12.1	66.1	7.5	9.3	10.6
28	.01		.25	5.3	9.8	54.2	7.4	4.4	11.3
29		.17	.30	5.0	7.6	76.1	7.7	4.7	11.7
30	.38		.14	4.8	10.9	63.0	7.9	5.5	11.6
31		.08			8.3	53.0		5.4	10.2

affleurements rocheux (partie nord de la Rivière des Vases, le long de la rivière Shipshaw). Le glissement de terrain s'est produit au centre de cette vallée. Notons que les zones d'instabilité sont souvent associées à la présence de vallées cachées sous les dépôts argileux.

3.2.7 Pente moyenne

Les pentes des différentes surfaces d'un bassin versant influencent considérablement le temps de parcours du ruissellement direct. Bien que les pentes varient considérablement sur un bassin versant, on caractérise souvent ce facteur par une valeur moyenne qui théoriquement est donnée par la formule suivante:

$$S = \frac{1}{A} \quad \Sigma \ (s \times dA) \quad \text{(LINSLEY et al., 1949)}$$

où "s" est la plus grande pente de l'aire dA

S la pente moyenne du bassin.

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la pente moyenne. En ce qui nous concerne, on s'est servi de la méthode: "d'échantillonnage des pentes perpendiculaires aux lignes de contour" (LINSLEY et al., 1949) pour déterminer la pente moyenne du bassin versant de St-Jean Vianney ainsi que celle de la vallée cachée sous les sédiments.

Echantillonnage des pentes perpendicualires aux lignes de contours (LINSLEY et al., 1949)

Cette méthode consiste à mesurer la pente perpendiculairement aux lignes de contours en plusieurs points du bassin. Ces points peuvent être déterminés en juxtaposant un quadrillage à une carte topographique du bassin. Linsley (1949) suggère un minimum de cinquante points

pour obtenir un estimé suffisamment précis de la pente moyenne.

Pente moyenne du bassin Versant

Cette pente moyenne a été calculée sur une carte à l'échelle de 1:25,000 avec 55 points de mesure pour une précision de .0125 pi/pi on obtient la fig.: 3.3

pente médiane: 0.043 pi/pi

pente moyenne: 0.111

Pente moyenne du socle rocheux

Cette pente a été calculée sur une carte à l'échelle de 1:10,000 avec 392 points d'échantillonnage pour une précision de .03 pi/pi. On obtient sur la figure 3.4:

pente médiane: 0.049

pente moyenne: .155

3.2.8 Hydrogéologie

On considère comme "aquifère" toute unité stratigraphique pouvant transmettre et emmagasiner une certaine quantité d'eau utilisable i.e. qu'il soit poreux et perméable.

L'examen de la stratigraphie des forages ainsi que les résultats de l'étude hydrogéologique révèlent deux unités stratigraphiques pouvant être des aquifères importants dans la région qui nous intéresse.

Gravier fluvio-glaciaire

C'est l'unité stratigraphique qui recouvre le till de fond. Son épaisseur varie de quelques pouces à 50 pieds dans la région des

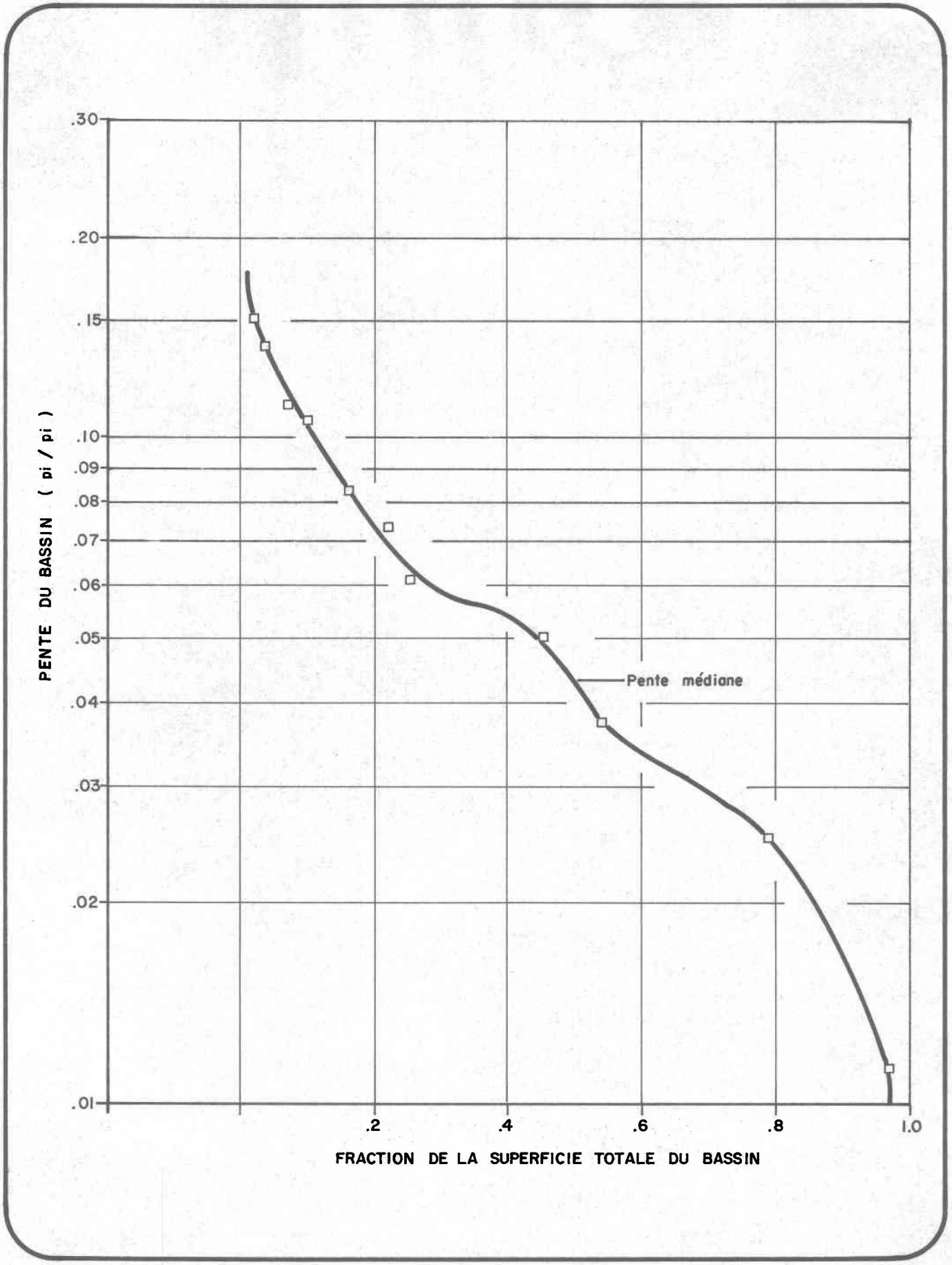


Fig . 3.3 . Bassin versant (pente moyenne) .

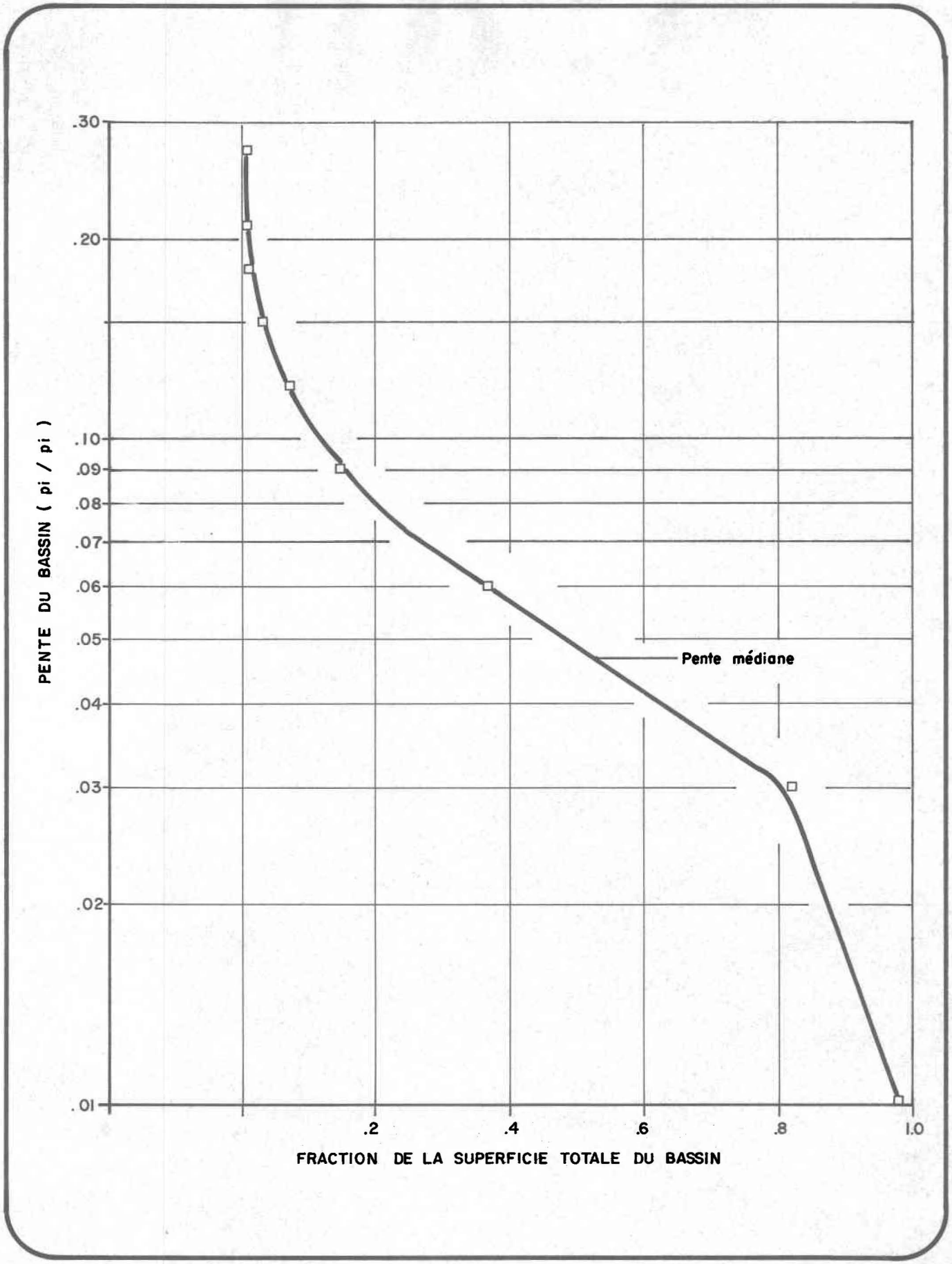


Fig. 3. 4 . Socle rocheux (pente moyenne) .

Terres Rompues, mais en général elle a une puissance moyenne de quatre pieds. On remarque une importante quantité de silt et d'argile dans la composition granulométrique de ce sédiment.

Sables des Hautes-Terrasses

Cette unité représente l'autre formation aquifère importante. Lorsqu'il n'est pas remanié, ce sable qui est situé à la limite de l'ancien glissement est assez grossier, uniforme, et dépourvu de particules fixes. Il possède alors une transmissivité de l'ordre de 10^4 g.p.j./pi (Kadula, 1972).

Dans la zone de l'ancien glissement, ce sable a été remanié et atteint de grandes épaisseurs. Il forme parfois des cônes d'alluvions ou des ilôts de sable retenus dans une matrice argileuse. De plus, il contient un pourcentage élevé de silt et d'argile, ce qui explique que sa transmissivité est moins élevée (10^2 g.p.j./pi.) (Raport HG, 1972).

Les argiles ne peuvent être considérés comme étant un aquifère à cause de la très faible vitesse de circulation de l'eau à l'intérieur. ($K = 10^{-5}$ cm/s). Donc les piezomètres installés dans l'argile ne peuvent servir qu'à mesurer des gradients de pressions et déterminer la direction et le sens de l'écoulement.

Limites des aquifères

Les graviers fluvio-glaciaires se retrouvent à la base de la colonne stratigraphique de cette région. Bien qu'on ne les retrouve pas de façon continue dans la région, il est probable "qu'une communication hydraulique existe dans les dépressions" (Kadula, 1972). De plus, cet

aquifère ne se limite probablement pas uniquement à ce bassin mais se retrouve également ailleurs dans la région du Saguenay. De ce fait, la recharge de cette nappe peut être située très loin du site étudié et l'on serait en présence d'un aquifère représentatif d'un niveau d'écoulement plutôt régional que local.

Le sable remanié des Hautes Terrasses représente l'autre aquifère et est entièrement situé dans les limites de l'ancien glissement. Sa zone de recharge est située au Nord et est constituée par les tourbières et les sources qui jaillissent à la base de la limite Nord de l'ancien cratère. Cet aquifère est de plus alimenté directement par les pluies tombant à sa surface.

3.2.9 Piezomètres

Lors des diverses études, on a fait l'implantation de piezomètres. Lors des diverses campagnes de forages, il y a eu l'implantation de plusieurs types de piezomètres; ici nous considérons successivement et décrivons brièvement le fonctionnement des types utilisés.

Piezomètres ouverts

Ce type de piezomètre est constitué d'un tube de plastique ("Carlon") d'environ $\frac{1}{2}$" de diamètre, de longueur variable et dont l'une des extrémités est ouverte à la surface tandis que l'autre se termine par une crépine qui est en contact avec l'aquifère (Voir fig. 3.5).

La mesure se fait à l'aide d'un cable électrique que l'on descend dans le tube. Lorsque l'extrémité du cable touche la surface de l'eau,

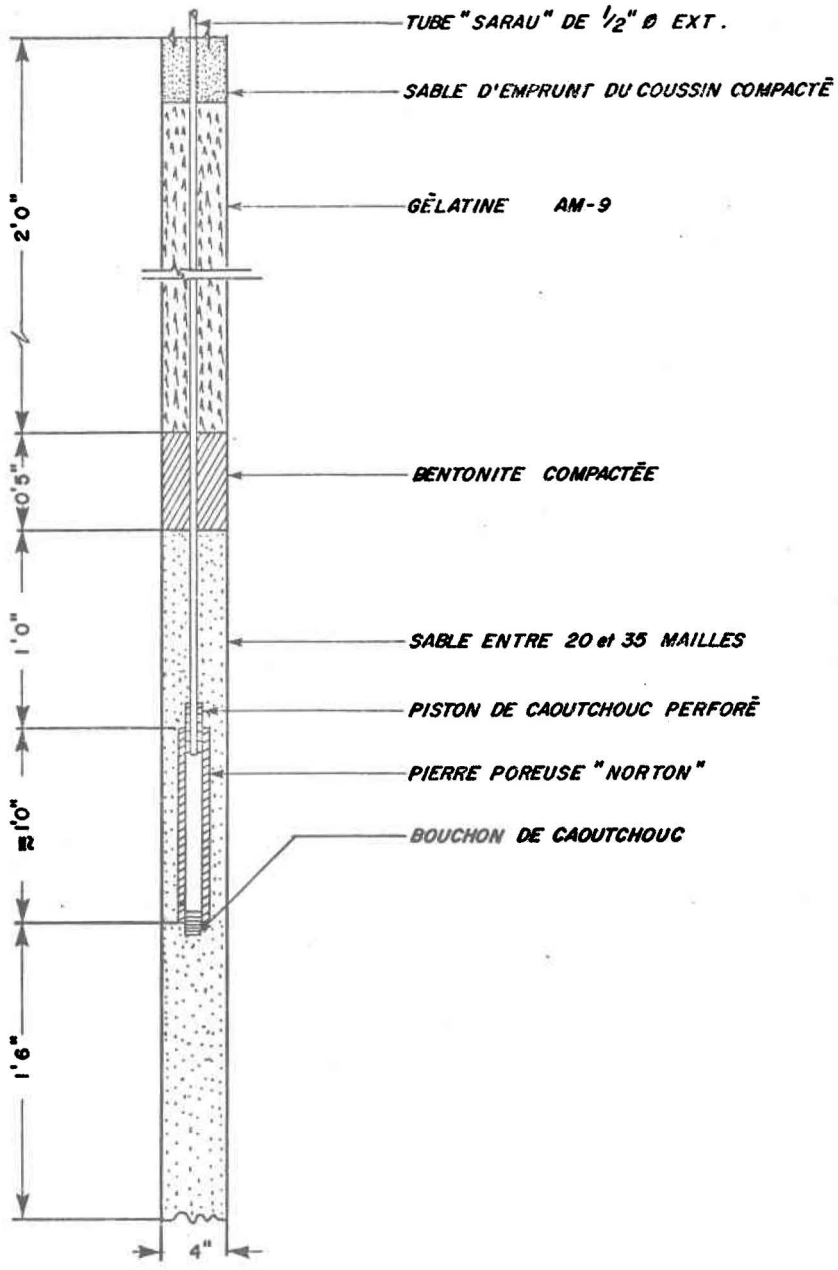


Fig. 3.5. Une méthode d'installation d'un piézomètre .

il se produit un contact électrique qui déclanche alors un signal. En mesurant la longueur du fil à l'intérieur du tube, on a ainsi la profondeur du niveau de l'eau. Quelques piezomètres de ce type ne possèdent pas de crépine, l'extrémité du tube est alors perforée sur une certaine longueur.

On les retrouve dans les forages numérotés de A à G. En général on a implanté 3 piezomètres à différentes profondeurs, dans chaque forage. Un tel dispositif appelé "nid de piezomètre" permet de mesurer des gradients hydrauliques ainsi que de déterminer les schémas d'écoulement.

Piezomètres Gloetzl

Ce sont des piezomètres contenus dans les forages identifiés par les lettres K, M, N, P, Q, R, S, V. On compte en moyenne 3 piezomètres par trou de forage.

L'ensemble est constitué de deux tubes de plastique, et dont une extrémité est reliée à une cellule appelée capteur de pression (fig. 3.6). Cette cellule de petite dimension permet de mesurer la pression statique de l'eau tout en exigeant une faible quantité d'eau.

L'eau contenue dans le sol passe à travers une pierre poreuse formant un réservoir rempli d'huile conduisant à un diaphragme. La pression de l'eau actionne le diaphragme composé d'un piston actionné par un ressort. La pression maintient le diaphragme à plat contre une plaque percée de deux petits trous communiquant par des tubes de nylon avec la surface. La lecture est faite en envoyant du gaz par l'un des trous de manière à équilibrer la poussée du diaghragme; l'autre tube sert à évacuer le gaz.

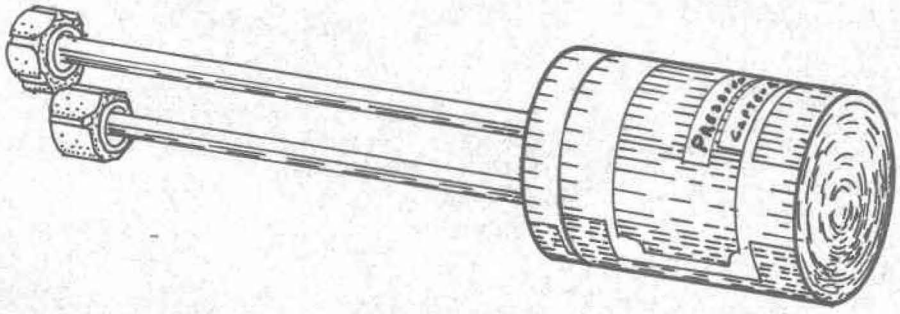


Fig. 3.6 . Capteur de pression .

En multipliant le résultat obtenu par la valeur de 1 atmosphère, on obtient ainsi la hauteur de la colonne d'eau correspondant dans un tube piezométrique.

L'installation qui se fait lors d'un forage est montrée à la fig. 3.7.

Limnigraphes

Ce sont les appareils qui ont été installés lors de l'étude hydrogéologique. Ils sont constitués d'un tube d'environ 6" de diamètre enfoncé dans le sol dont l'une des extrémités est ouverte à la surface tandis que l'autre communique avec une crépine.

Le système de mesure est constitué d'un cadran gradué de 1 à 12 unités dans le sens des aiguilles d'une montre et d'un système de flotteurs qui entraîne 3 aiguilles: une rouge, qui indique la hauteur maximale atteinte par le niveau de l'eau dans le tube entre deux lectures; une bleue qui indique le niveau minimum et une noire qui nous donne le niveau de la nappe au moment de la lecture. C'est cette dernière qui entraîne les deux autres. Les crépines ont des longueurs allant de 1 à 10' suivant l'épaisseur de l'aquifère rencontré. Ils sont identifiés par la lettre H (fig. 3.8).

Localisation

Les piezomètres ouverts sont en général situés dans les environs immédiats du cratère et du ruisseau Petit Bras. Les Gloetzl sont situés au nord du cratère dans la région de la route Harvey ainsi que sur la rive Nord du ruisseau Petit Bras. Les limnigraphes sont ceux qui sont

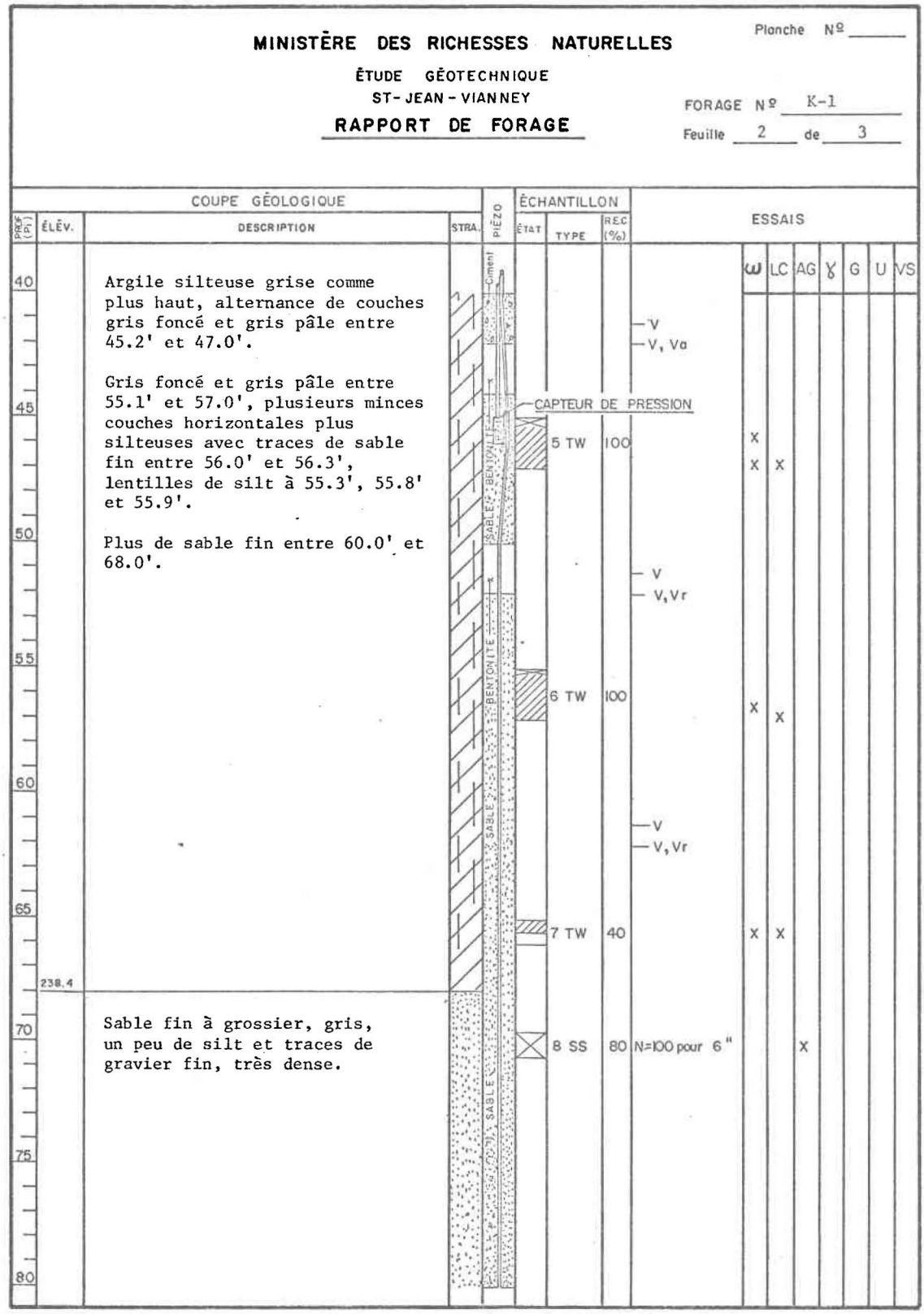


Figure 3.7. Coupe montrant un piézomètre Gloetzl installé.

STRATIGRAPHIE DU FORAGE

PÉRIODE DU FORAGE:	6 juin 1971 2 juillet 1971	FOREUSE:	À PERCUSSION	ÉLÉVATION:	du terrain :	264.60'
					de la crépine	179.68'

Profondeur en pieds	GÉOLOGIE	NOTES	Description géologique des couches interceptées	Niveau de l'eau prof.	Niveau de l'eau élév.
5			sable gris, moyen-gros, avec des cailloux de 1" de diamètre		
10			sable gris, moyen, un peu argileux	92.3	253.
15		E	sable gris, un peu argileux	le 20 sept 1971	
20			argile grise, un peu sablonneuse		
25					
30		E			
35					
40		E			
45		E	sable gris, fin-moyen		
50		E			
55		E			
60		E			
65		E			
70		E			
75		E	sable gris, fin		
80		E E			
85	CR	179.68'			
90		174.60'	sable gris, très fin		
95		E	argile grise, un peu sablonneuse		
		R			
			argile grise		
150					

(E) Echantillon prélevé pour les analyses granulométriques

(R) Remplissage de la pierre concassée

(CR) Crépine, diamètre de 6", longueur de 2', ouvertures de 0.001"

Note: le puits se termine dans l'argile.

Figure 3.8. Coupe montrant un limnigraphe installé.

le plus dispersés; on les retrouve entre la bordure du nouveau cratère et la limite de l'ancien glissement. Il en existe également quelques-uns à l'embouchure de la rivière des Vases près du Saguenay.

3.3 Discussion des données

Dans l'étude d'un phénomène physique, l'obtention des données est un des premiers problèmes à résoudre. En effet, après avoir déterminé la ou les variables à mesurer et choisi les moyens pour prendre ces mesures on doit établir un plan d'échantillonnage à partir de certains critères de base qui devront nous assurer de l'homogénéité, de la validité et de la représentativité de notre échantillon:

Parmi les principaux éléments que l'on doit prendre en compte, citons:

- la connaissance de la variabilité et le degré de précision requis qui permettent de préciser le plan d'échantillonnage (densité spatiale et temporelle)
- l'information désirée à un coût minimum (contrainte de budget).

Dans l'étude qui nous occupe ici, nous disposons d'une masse considérable de données acquises à la suite du glissement de terrain à St-Jean Vianney en mai 1971, soit 184 piezomètres couvrant une région de 5 mi.^{2}. La période de mesure s'étend du 1er juillet 1971 au 25 septembre 1973, soit 817 jours pour une moyenne d'environ 100 mesures par piezomètre. On remarque que la période d'étude est relativement courte (variabilité temporelle). Cependant, nous pouvons supposer que la forte densité de piezomètres donnera une bonne information de la variabilité spatiale, et nous pouvons de plus nous attendre à une redondance de l'informa-

tion étant donné la faible taille de la région à étudier.

Nous verrons plus loin que d'une part l'information spatiale est suffisante (il y a effectivement redondance) mais que d'autre part, l'information temporelle est insuffisante. Ceci est principalement dû à une mauvaise coordination des études, à un manque de rationalisation et aussi au fait que les études ont été menées après le glissement, soit pendant une période de transition du niveau des nappes après bouleversement.

Ce nombre de données recueillies est impressionnant; il y a lieu de se questionner sur la qualité des données, c'est-à-dire sur la validité et l'homogénéité de nos échantillons.

On sait que ces données sont le résultat de 3 campagnes d'implantation, chaque étude étant faite parallèlement aux deux autres et selon des objectifs précis mais différents. De plus, à chaque campagne, on a implanté un réseau totalement nouveau, indépendamment des trous déjà existants, et on a utilisé un type de piezomètre différent des 2 autres campagnes. Ainsi, on a 3 façons différentes pour mesurer la hauteur d'eau:

1) corde à mesurer (ouvert)
2) transformation à partir d'une mesure de pression (Gloetzl, capteur de pression)
3) transformation à partir d'une lecture de niveau (limnigraphe, min. - max.)

Le calcul d'erreur n'est pas le même pour chaque piezomètre et la précision atteinte se calcule difficilement. De plus, les sources d'erreur sont très nombreuses. En effet, il y a la simple erreur de mesure sur l'appareil utilisé, ce type d'erreur peut être considéré comme

constant sur un même réseau. Il y a l'erreur de calcul dans la transformation des données lues, on s'est vite aperçu que ce type d'erreur revenait très fréquemment et souvent dans des proportions alarmantes (plusieurs pieds). Et comme il nous est très difficile de vérifier les 7000 ou 8000 données calculées de cette façon (ceci impliquerait la vérification de 7000 ou 8000 multiplications de données dispersées sur quelques centaines de fiches) nous devons admettre la présence de mesures très imprécises dans notre échantillon.

Plusieurs données aberrantes ont été corrigées cependant, nous verrons plus loin les méthodes employées pour repérer et corriger ces erreurs. Enfin, il y a les erreurs de transcription qui, même soumises à une vérification très serrée, subsistent toujours.

En ce qui concerne le contrôle de la qualité des données, certains détails concernant la masse de données brutes que nous avons obtenue, doivent être soulignés. Les données aberrantes avaient été conservées et la fiabilité de l'information fournie par les piezomètres n'a pas été contrôlée. Par exemple, un piezomètre peut demeurer bouché ou gelé pendant quelque temps (semaines ou mois) avant que l'on s'en aperçoive; ou bien on ne s'inquiète pas outre mesure d'un saut brusque de 10, 20 ou 30 pieds d'un piezomètre en l'espace de quelques jours (3 ou 4). On ne trouve aucune indication, aucune note concernant ces anomalies, même sur les graphiques où cela saute pourtant aux yeux. On doit aussi tenir compte de la stabilisation du piezomètre dans les jours qui suivent son installation, mais certains ne semblent l'atteindre que quelques semaines, voire quelques mois après le début de leur mise en opération.

Signalons enfin quelques points qui ont été négligés lors des études sur le terrain. Les relevés piezométriques ont été faits à des intervalles différents pour chaque "groupe" de piezomètres (4 groupes en tout, les piezomètres du type Gloetz étant divisés en 2 sous-groupes) et sans aucune synchronisation dans le temps (fréquence régulière et mesures simultanées), ce qui rend très ardue, sinon impossible, l'analyse simultanée de tous les piezomètres de la région. Enfin, les précipitations ont été mesurées pendant 2 été seulement (5 à 6 mois en tout) sur les 2½ ans que durèrent les études. On n'a aucun relevé d'évapotranspiration (T^{o}, ensoleillement, etc.) et on ne dispose pas non plus de la température en hiver (pour les périodes de fonte). La seule information disponible et transposable provient d'une station de météorologie située à environ 30 milles (Ste-Coeur de Marie).

Cette multitude de facteurs laisse prévoir une grande perte d'information malgré l'abondance des données brutes. De plus, le comportement erratique de plusieurs piezomètres nous incite à porter une attention toute spéciale aux travaux qui ont été effectués dans la région à la suite du glissement de terrain. En effet, du remblaiement a été effectué autour de l'ouverture créée par le glissement, on y a même perdu quelques piezomètres (ensevelis). De plus, de grands espaces ont été drainés de janvier à juin 1972, période qui correspond au plus grand nombre de relevés des piezomètres. Enfin, on s'imagine assez facilement le bouleversement et la grande instabilité des aquifères après un tel glissement de terrain, et la période sur laquelle l'analyse des données est effectuée suit immédiatement ce glissement.

En résumé, beaucoup de questions se posent au sujet de l'homogénéité et de la validité des données et les réponses sont peu satisfaisantes.

Notre but dans cette étude est cependant d'en tirer le meilleur parti et d'en arriver à des recommandations concernant l'étude de la variabilité spatiale et temporelle du niveau piezométrique à St-Jean Vianney. De plus, le grand nombre de piezomètres ne pourra sans doute pas compenser la durée trop courte de la période d'étude. En effet, pour atteindre un nouvel équilibre hydrogéologique, il aurait fallu poursuivre l'étude pendant plusieurs années. On pourrait cependant réduire de beaucoup le nombre de piezomètres car étudier l'évolution des nappes nécessite beaucoup de mesures dans le temps et moins dans l'espace.

Enfin, notons que le manque de coordination, l'inexistance de rationalisation et le manque d'analyse et de traitement des données entraînent plusieurs inconvénients qui compliquent le traitement de l'information recueillie et peuvent empêcher d'atteindre les objectifs visés par l'étude.

Ainsi, malgré les efforts de cueillette des données et le grand nombre de données, les inconvénients mentionnés ci-haut entraînent une information relativement faible pour un coût élevé. Ceci justifie l'importance de faire des plans d'échantillonnage adéquats pour obtenir la meilleure information au moindre coût et met en évidence l'importance de la rationalisation.

3.4 Tests de validation des données

But

Face au problème soulevé dans le paragraphe précédent par l'homogénéité et la validité des données, notre but, avant d'effectuer tout traitement et analyse de données, est de tenter de corriger les erreurs

de calcul, les erreurs de transcription et les données présentant des anomalies flagrantes. La meilleure façon de procéder serait sans doute une revision complète de toutes les données disponibles, une à une. Faute de temps et devant le grand nombre de données, nous avons opté pour une analyse plus globale et plus rapide qui, sans nous permettre de repérer toutes les anomalies, permet d'éliminer les plus évidentes et dans certains cas de corriger certaines erreurs. Ce pré-traitement comporte plusieurs méthodes complémentaires que nous décrivons ici.

Méthodes employées

Nous disposons de la liste complète des piezomètres sous une forme accessible par ordinateur (cartes perforées) comprenant la totalité des mesures et les dates des relevés. A l'origine, les données n'étaient disponibles que sur des feuilles manuscrites; nous avons alors procédé à un tri manuel de ces données pour ensuite les perforer sur cartes.

1ère méthode

But de la méthode: détection des amplitudes anormales

Moyen utilisé: calcul de l'amplitude maximale de chaque piezomètre.

Description: les amplitudes maximales supérieures à une certaine valeur (15-20 pieds dans notre cas) peuvent être l'indication d'une ou plusieurs erreurs déjà mentionnées plus haut. Les piezomètres ainsi repérés seront donc sujets à une attention spéciale.

2e méthode

But de la méthode: détection des comportements erratiques

Moyen utilisé: repérage de la valeur minimum et maximum de la liste complète des mesures d'un piezomètre et les dates correspondantes.

Description: les piezomètres dont la valeur maximum (correspondant à une hauteur d'eau maximum dans le sol) est atteinte en période d'étiage (en hiver ou à certaines périodes de l'été) méritent certainement une attention spéciale. De même pour les piezomètres qui atteignent leur minimum en période de crue (au printemps, à la fonte des neiges).

3e méthode

But de la méthode: détection des points anormaux ou aberrants.

Moyen utilisé: sortie du graphique des fluctuations de chaque piezomètre dans le temps.

Description: en plus de visualiser l'allure générale des piezomètres, ces graphiques nous permettent de retracer rapidement les "sauts" brusques et les points aberrants qui méritent une attention particulière.

4e méthode

But de la méthode: visualiser l'ensemble des études dans le temps (la fréquence des mesures, les temps morts, etc.)

Moyen utilisé: la liste complète des jours du début à la fin des mesures avec, pour chaque date, la liste des piezomètres mesurés ce jour-là.

Description: cette méthode nous sera d'une grande utilité pour déterminer une ou plusieurs périodes d'études dans les analyses ultérieures (par exemple pour l'analyse factorielle).

Les anomalies identifiées à l'aide de ces méthodes doivent être corrigées lorsque nous sommes en présence d'une erreur bien identifiée (erreur de mesure, de transformation, etc.). Dans le cas contraire, on doit chercher une explication au phénomène. Ainsi, d'après le type de sol dans lequel le piezomètre est implanté ou le type de nappe à laquelle on a affaire, il est parfois possible de trouver une raison physique à certains phénomènes qui peuvent paraître anormaux. De plus, une intervention humaine (drainage, captage, etc.) ou une grande instabilité des nappes suite à un événement naturel majeur (glissement de terrain, tremblement de terre, etc.) peuvent être la cause directe d'une ou plusieurs anomalies dansles fluctuations piezométriques. Dans ce dernier cas et lorsque l'anomalie demeure inexpliquée ou insuffisamment expliquée (par exemple: possibilité de gel l'hiver, piezomètre bouché à un certain moment, dépôts divers dans les tubes, etc.) il est préférable de retirer le ou les piezomètres ainsi affectés pour les analyses futures. Conserver ces piezomètres risquerait de masquer certains phénomènes et de biaiser sérieusement notre étude; connaissant les raisons du retrait de ces piezomètres, il nous sera plus facile d'interpréter l'ensemble des résultats à la fin de l'étude.

A l'aide de ces méthodes, nous avons corrigé un nombre considérable de mesures aberrantes et avons dû éliminer 14 piezomètres: ceux ayant moins de 15 mesures et ceux jugés défectueux ou anormaux.

CHAPITRE 4

APPROCHE ANALYTIQUE

INTRODUCTION

Comme cela a déjà été spécifié dans les pages précédentes, cette approche est basée sur les techniques classiques utilisées par les hydrogéologues.

St-Jean Vianney se trouve situé dans une région où les nombreuses études déjà effectuées ont fourni une masse d'information concernant la stratigraphie et les mesures de potentiel. Bien que les objectifs des diverses études soient différents, les renseignements qu'elles ont fournis seront utiles lors de notre travail.

4.1 Objectifs visés

Cette partie du mémoire a pour but de compléter l'étude hydrogéologique effectuée par Kadula (1972). Donc, à partir des données recueillies lors des études mentionnées ci-haut, nous viserons donc principalement:

1) à connaître le comportement de la nappe par l'entremise des cartes isopièzes faites en période de crue et d'étiage (carte des amplitudes), ainsi que par des cartes isopièzes faites au début et à la fin de la période d'observation;
2) à connaître le schéma d'écoulement de l'eau à travers le sol, donc à déterminer le gradient de potentiel à l'intérieur des différen-

tes couches géologiques. La variation du potentiel dans l'argile influence à la fois les contraintes actuelles et l'évolution de ces contraintes dans le temps (Eden; 1969). Cette connaissance nous sera apportée par des coupes verticales passant par les nids de piézomètres;

3) à connaître les piézomètres qui réagissent de la même façon (mêmes genres de fluctuations et mêmes tendances générales);

4) à faire le choix de stations représentatives de façon à pouvoir établir un réseau de surveillance de la région et ainsi déterminer la fréquence optimum de prises de mesure. De plus, ce réseau devra pouvoir s'incorporer à un réseau régional de piézomètres qui a pour objectif principal la connaissance de l'hydrogéologie de la région.

4.2 Méthodologie utilisée

La méthode utilisée pour arriver à notre rationalisation va comporter quatre phases d'étude:

- Premièrement, il s'agira de regrouper sous forme d'unité hydrostratigraphique les différents dépôts meubles que l'on retrouve actuellement et de regrouper les piézomètres qui y sont implantés.
- Un examen du régime d'évolution des piézomètres sera effectué afin de regrouper ceux qui ont les mêmes réactions et les mêmes tendances. Ce regroupement se fera selon l'unité hydrostratigraphique à laquelle appartient chaque instrument.
- Les réactions de la nappe de surface seront étudiées de façon à pouvoir déterminer son amplitude.
- L'étude de l'écoulement sur des coupes faites à l'aide des forages

et des piézomètres que l'on retrouve dans chacune des unités étudiées. Ceci va nous permettre de localiser les différentes régions qui peuvent influencer les pressions hydrostatiques et, par le fait même, la stabilité régionale.

Le choix des stations qui seront proposées pour faire partie du réseau de surveillance devra se faire à partir des renseignements tirés de ces études.

4.3 Unités hydrostratigraphiques

Description

La stratigraphie que l'on retrouve actuellement est montrée à la figure 3.2. On peut y distinguer les trois types de dépôts meubles qui vont servir à déterminer nos unités hydrostratigraphiques.

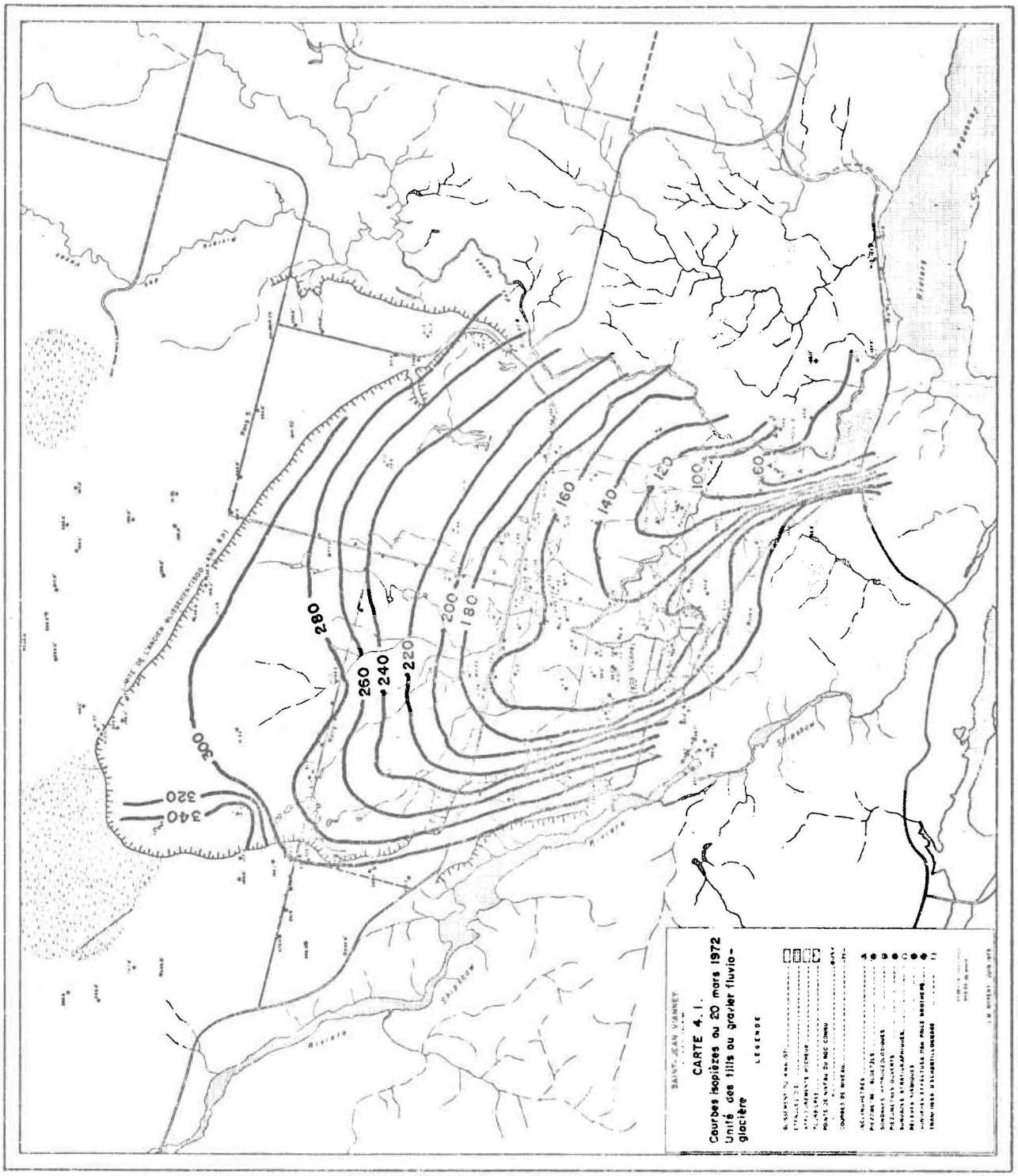
- On retrouve à la base de la stratigraphie (figure 3.2) l'unité correspondant au till ou gravier fluvio-glaciaire. Elle est caractérisée par sa discontinuité et par la variabilité de son épaisseur qui peuvent influencer les débits et les caractéristiques de cette aquifère.
- La seconde unité est constituée par l'argile marine stratifiée de minces lits silteux. Les instruments implantés dans cette couche vont nous donner des informations sur le transfert des préssions hydrostatiques et sur la région où elles s'exercent.
- La dernière unité que l'on retrouve dans les colluvions (sable des hautes terrasses et argile remaniés) de la surface est surtout caractérisée par l'hétérogénéité des sédiments formant ce dépôt. Ayant affaire à des sédiments hétérogènes pouvant créer des discon-

tinuités dans la nappe de surface. On peut donc retrouver au niveau local des nappes isolées de l'ensemble régional et ayant leurs propres caractéristiques; c'est le cas de dépôts sablonneux isolés dans une matrice d'argile.

Le sable non remanié de haute terrasse que l'on retrouve en bordure de la cicatrice laissée par l'ancien cratère est situé à l'extérieur de la zone étudiée et ne sera donc pas considéré dans cette étude.

4.3.1 Unité des tills ou graviers fluvio-glaciaires

L'écoulement dans cette unité située entre l'argile et le socle rocheux va donc être très influencé par la topographie du roc. Les piézomètres qui sont implantés dans cette nappe montrent des conditions de nappes captives sauf quelques-uns (4) qui sont situés sur le flanc de la vallée souterraine et qui indiquent des conditions de nappe libre. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que l'eau s'écoulerait en nappe libre sur le flanc de la vallée et, en arrivant à un certain niveau, l'aquifère devient saturé, puis en charge et on a alors des conditions de nappe captive. Ceci peut être dû au fait qu'il y ait variation dans l'épaisseur de l'aquifère. Si on trace la carte (4.1) en courbes isopièzes pour la région en se basant sur 22 piézomètres installés dans cet aquifère, on constate une étroite ressemblance avec la carte topographique du roc. La direction générale de l'écoulement se fait suivant l'axe de la vallée avec une réalimentation sur les flancs. Cette nappe est typique d'une nappe radiale convergente. Dans la région du glissement de mai 1971, on note un plus grand espacement des lignes isopièzes (Carte 4.1), ce qui signifierait une augmentation de la perméabilité dans ce secteur (en admettant que le flux reste le même, i.e. pas de vidange dans cette zone).


SAINT-JEAN VIANNEY
CARTE 4.1.
Courbes isopièzes au 20 mars 1972
Unité des tills ou gravier fluvio-glacière
LEGENDE
280
260
240
220
200
180
160
140
120
100
60
300
320
340

Le gradient hydraulique moyen parallèlement à l'axe de la vallée est d'environ soixante-sept (67') pieds par mille et transversalement d'environ cent quarante (140') par mille.

4.3.2 Unité des sables et argile remaniés (Colluvions)

Dans les nappes libres, la couche aquifère est limitée à son toit par la surface piézométrique. Dans le cas qui nous intéresse, cette nappe libre est située dans la zone remaniée par l'ancien glissement. Cette nappe a été très bien décrite lors de l'étude hydrogéologique (Kadula, 1972). En résumé, la surface piézométrique ressemble étroitement à la topographie de surface. Elle est alimentée par les précipitations et par les sources drainant les sables des hautes terrasses localisées au nord de l'ancien cratère.

Cette nappe phréatique est typique d'une nappe radiale convergente. Les filets liquides convergent dans la direction de l'écoulement et dans le sens du glissement du 4 mai 1971.

Un resserrement des courbes isopièzes a été détecté dans la région du récent glissement par Kadula J., 1972. Ce dernier a pu détecter la présence d'argile créant ainsi un obstacle à l'écoulement libre des eaux dans l'unité des sables et argile remaniés.

Le gradient hydraulique moyen dans l'axe de la vallée est de soixante (60') pieds par mille, tandis que transversalement il est d'environ cent dix (110') pieds par mille.

4.3.3 Comparaison des nappes

Si l'on compare les zones de décharge des deux nappes, on remarque

que la nappe des sables et argile remaniés se draine dans la cratère du nouveau glissement ainsi que dans le ruisseau situé parallèlement au sud de la route Harvey entre la bordure nord du cratère et la route régionale, tandis que la nappe des tills et graviers fluvio-glaciaires traverse toute la vallée pour aller se drainer directement dans le Saguenay.

Mais ce qui frappe le plus, c'est leur grande similitude. Les deux nappes ont exactement la même forme et les mêmes directions d'écoulement.

Ces faits confirment le contrôle structural exercé par la vallée rocheuse sur le drainage souterrain, sur le drainage de surface, sur la topographie de surface ainsi que sur la forme de la nappe et les directions de l'écoulement souterrain

Les taux de précipitation en 1972 pour les stations de St-Jean Vianney et de St-Coeur-de-Marie sont indiqués à la figure 4.1.

4.4 Etude des fluctuations piézométriques

Le fait de posséder des lectures de 147 piézomètres (tableau 4.1) qui s'étendent sur une période de 800 jours nous permet de comparer leurs fluctuations ainsi que leur tendance générale.

Cette comparaison va se faire au niveau des unités hydrostratigraphiques; les piézomètres qui sont installés dans chacune des unités vont être comparés l'un à l'autre de manière à pouvoir regrouper ceux qui réagissent de la même façon.

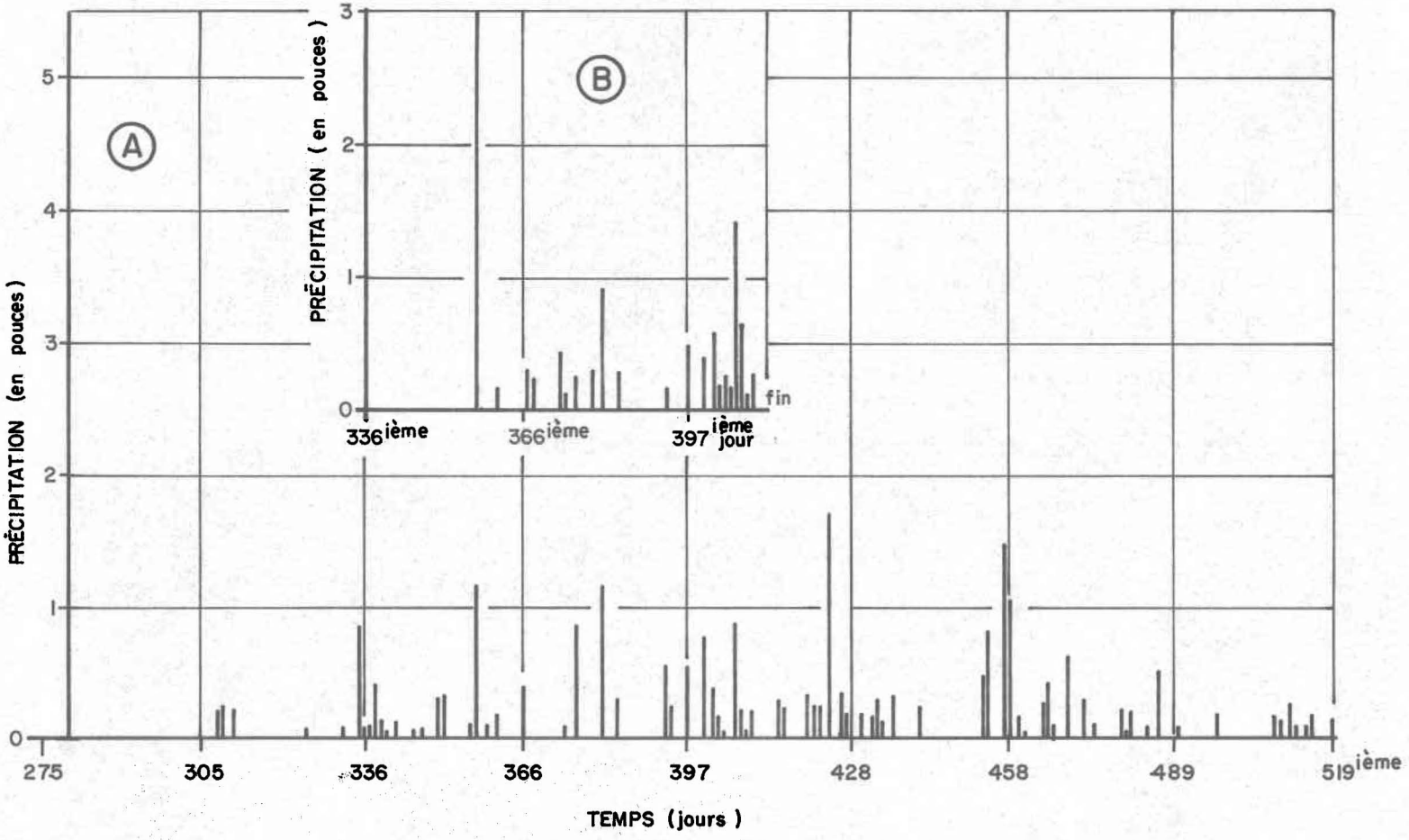


Figure 4.1. Taux de précipitation en 1972 pour les stations de Saint-Coeur-de-Marie et de Saint-Jean-Vianney.

TABLEAU 4.1 Piézomètres installés à St-Jean Vianney

Piézomètre	Profil	Sol type	Altitude sol
A-1-2	58 '	AR.S.	360.0 '
A-2-1	140 '	AR.S.	255.8 '
2	63 '	AR.S.	
3	10.0 '	SA.	
A-3-2	75.0 '	AR.S.	242.48'
3	50.0 '	SA.	
A-4-1	145.5 '	ROC	173.57'
2	98.0 '	AR.S.	
3	50.0	AR.S.	
B-1-1	169.0 '	AR.S.	256.42'
2	97.0 '	AR.S.	
3 3	55.5 '	SA.	
B-2-1	171.0 '	AR.S.	244.87'
2	85.0 '	AR.S.	
3	40.0 '	SA.	
B-3-1	166.60'	AR.S.	242.03'
2	96.5 '	AR.S.	
3	52.7 '	S.Si.	
C-1-1	140.50'	SA.	321.71'
2	68.50'	AR.S.	
3	36.00'	AR.S.	
C-2-1	137.00'	S.Si.	285.50'
C-3-1	118.50'	SA.	265.10'
2	67.50'	AR.S.	

Piézomètre	Profil	Sol type	Altitude sol
C-4-1	129.60'	AR.S.	235.44'
2	94.50'	AR.S.	
3	60.50'	AR.S.	
4	25.50'	SA.	
C-5-1	126.00'	SA.	168.63'
2	42.00'	AR.S.	
C-6-1	215.00'	SA.	237.29'
2	107.00'	AR.S.	
D-1-1	89.00'	AR.S.	252.98'
2	43.50'	AR.S.	
D-2-1	175.00'	AR.S.	212.27'
2	107.00'	AR.S.	
3	60.00'	AR.S.	
D-3-1	170.50'	AR.S.	207.06'
2	119.50'	AR.S.	
E-1-1	175.50'	Tilt	169.80'
2	136.50'	AR.S.	
3	90.50'	AR.S.	
E-2-1	155.50'	AR.S.	175.07'
2	121.00'	AR.S.	
F-1-1	107.08'	SA.	175.69'
2	56.50'	AR.S.	

TABLEAU 4.1 (suite)

Piézomètre	Profil	Sol type	Altitude sol
G-1-1	148.50'	Silt.SA.	71.36'
2	87.50'	Silt.A	
K-1-1	46.00'	AR.S.	306.40'
K-2-1	48.00'	SA.	247.30'
2	135.00'	AR.S.	
3	198.00'	SA.	
K-3-1	48.00'	SA.	247.30'
2	100.00'	AR.S.	
3	180.00'	SA.	
K-4-1	65.00'	SA.	237.30'
2	150.00'	AR.S.	
3	169.00'	SA.S.	
K-6-2	73.00'	SA.	243.20'
3	199.00'	AR.S.	
K-7-1	30.00'	SA.	247.60'
2	119.00'	AR.S.	
3	189.00'	AR.S.	
K-8-1	59.00'	SA.	240.60'
2	125.00'	AR.S.	
3	191.00'	AR.S.	
K-9-1	59.00'	AR.S.	240.30'
2	130.00'	AR.S.	
3	191.00'	AR.S.	

Piézomètre	Profil	Sol type	Altitude sol
K-10-1	74.00'	AR.S.	242.10'
2	145.00'	AR.S.	
3	227.00'	AR.S.	
K-11-1	65.00'	AR.S.	232.60'
2	135.00'	AR.S.	
3	187.00'	AR.S.	
K-12-1	68.00'	AR.S.	236.10'
2	140.00'	AR.S.	
3	208.00'	AR.S.	
K-13-1	65.00'	AR.S.	228.10'
2	136.00'	AR.S.	
3	194.00'	AR.S.	
K-14-1	64.00'	AR.S.	256.50'
2	134.00'	AR.S.	
3	198.00'	AR.S.	
K-15-1	63.00'	AR.S.	235.70'
2	135.00'	AR.S.	
3	199.00'	AR.S.	
K-16-1	60.00'	AR.S.	223.60'
2	130.00'	AR.S.	
3	193.00'	AR.S.	
K-17-1	42.00'	AR.S.	266.60'
2	73.00'	AR.S.	
K-18-1	30.00'	AR.S.	233.90'
2	92.00'	AR.S.	

TABLEAU 4.1 (suite)

Piézomètre	Profil	Sol type	Altitude sol
K-19-1	61.00'	AR.S.	211.90'
3	196.00'	AR.S.	
K-20-1	50.00'	SA.	245.70'
2	84.00'	AR.S.	
K-21-1	35.00'	SA.	241.80'
2	70.00'	SA.	
3	98.00'	AR.S.	
H-1	145.00'	GR.	29.25'
H-2	118.92'	SA.	26.01'
H-3	143.08'	SA.	24.36'
H-4	67.41'	SA.	244.03'
H-5	10.67'	SA.	318.37'
H-6	85.00'	SA.	248.50'
H-7	69.50'	SA.	254.23'
H-8	240.00'	SA.AR.	381.48'
H-9	251.00'	SA.	334.62'
H-10	181.00'	SA.	288.22'

Piézomètre	Profil	Sol type	Altitude sol
H-11	84.92'	SA.	264.60'
H-12	194.67	SA.GR.	288.20'
H-13	40.25'	SA.q	374.32'
H-14	56.92'	AR.	371.13'
H-15	36.00'	AR.	380.36'
H-16	55.00'	SA.	250.48'
H-18	23.00'	SA.	374.90'
H-19	67.50'	SA.	259.30'
H-20	32.00'	SA.	241.00'
H-21	32.48'	SA.	381.48'
H-22	21.50'	SA.	247.32'
H-23	70.86'	SA.	247.26'
H-24	70.00'	AR.	247.23'
H-25	237.00'	SA.	361.76'
H-26	266.00'	SA.	368.08'

TABLEAU 4.1 (suite)

Piézomètre	Profil	Sol type	Altitude sol
H-27	29.00'	AR.	393.08'
H-29	30.25'	SA.	385.15'
H-30	60.74'	SA.	393.50'
H-31	38.00'	AR.	339.76'
H-32	43.75'	SA.	256.93'
H-33	140.32'	SA.	314.90'
H-34	16.25'	SA.	321.79'
H-35	45.50'	SA.	394.88'
H-36	31.00'	SA.	243.99'
H-38	80.00	SA.	238.11'
H-40	55.00'	SA.	244.16'
H-41	40.50'	SA.	241.66'
H-43	75.00'	SA.	239.80'
H-44	86.00'	SA.	248.14
H-45	59.92'	SA.	239.61'

Piézomètre	Profil	Sol type	Altitude sol
H-46	48.50'	SA.	240.91'
H-47	26.00'	SA.	216.94'
H-48	25.50'	SA.	218.51'
H-49	36.00'	SA.	239.89'
H-50	51.00'	SA.	239.50'

4.4.1 Unité des tills ou graviers fluvio-glaciaires

Les piézomètres contenus dans cette unité peuvent être divisés en quatre groupes différents tels qu'indiqués au tableau 4.2.

Ce qui frappe de prime abord, c'est la différence qui semble exister entre les groupes 1 et 2 ainsi qu'entre 3 et 4.

Ces différences peuvent être dues principalement au fait que l'on n'ait pas un aquifère d'épaisseur et de granulométrie uniforme, ce qui entraîne des variations dans les caractéristiques de la nappe.

4.4.2 Unité des sables et argile remaniés (Colluvions)

Les instruments qui ont été implantés dans cette unité sont énumérés au tableau 4.3. On remarque également que la profondeur de la crépine par rapport à la surface varie de 10.0' à 60.0', ce qui donne de bonnes indications sur la variabilité de l'épaisseur de cette unité.

On a divisé en deux séries les piézomètres que l'on rencontre dans cette unité soit ceux distribués un peu partout dans la vallée formée par l'ancien glissement (tableau 4.4) et ceux qui sont implantés dans une poche de sable isolée dans l'argile (tableau 4.5).

Les piézomètres regroupés au tableau 4.5 sont tous situés dans une zone bien spécifique encadrée par la route Harvey, la route régionale et le récent cratère . Donc son influence sur la stabilité régionale a une très grande importance.

4.4.3 Unité de l'argile marine

Dans cette unité, les mesures données par les instruments se ré-

TABLEAU 4.2 Unité des tills ou graviers fluvio-glaciaires

Groupe no.	Piézomètres	Remarques
1	C-1-1, C-2-2 C-3-1, F-1-1	- Conditions de nappe libre. - Situé sur le flanc de la vallée rocheuse. - Figure 4.2
2	H-1, H-2, H-3, H-8, H-9, H-33, K-3-3, E-1-1, C-5-1, H-12, H H-25, H-26	- Conditions de nappe captive. - Tous le même genre de fluctuations. - Figure 4.3
3	C-6-1, K-4-3, K-2-3	- Tendance générale à monter continuellement.
4	D-2-1, H-10	- Tendance générale à la baisse très marquée - Figure 4.4

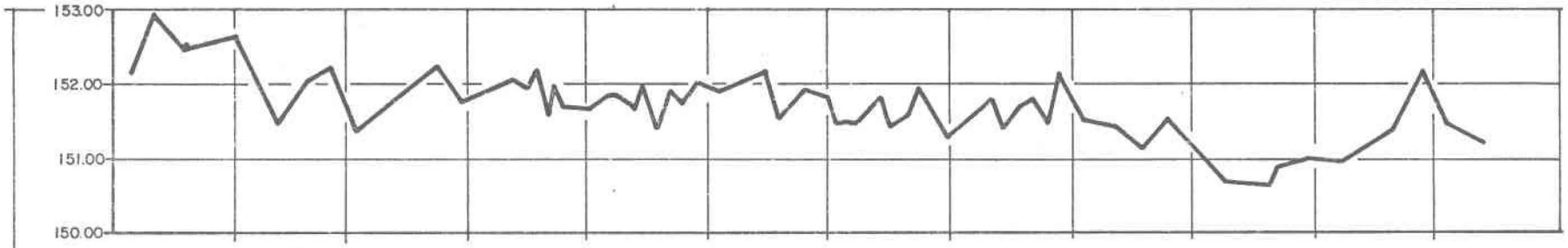


Figure 4.2. Piézomètre situé dans l'unité des tills ou gravier fluvio-glaciaire (tableau 4.2, groupe no 1).

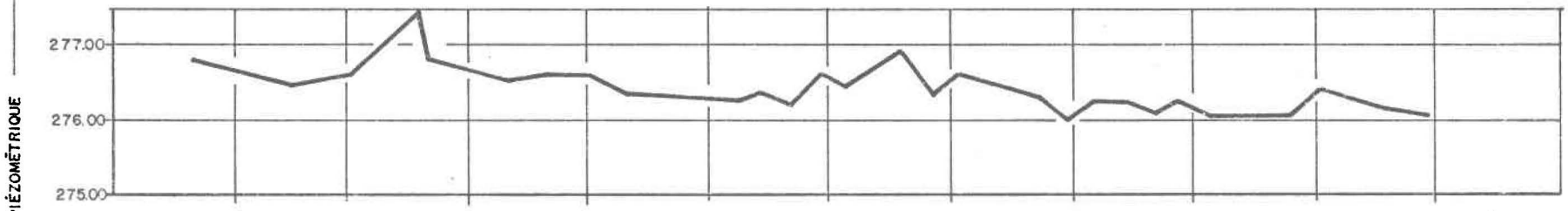


Figure 4.3. Piézomètre situé dans l'unité des tills ou gravier fluvio-glaciaire (tableau 4.2, groupe no 2).

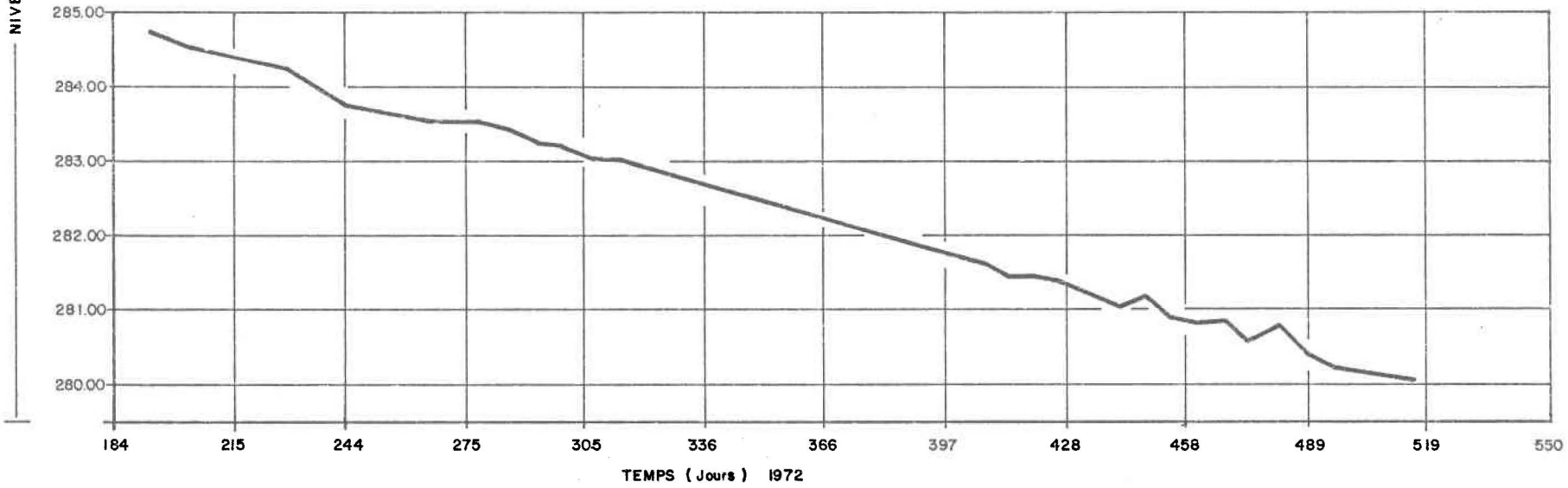


Figure 4.4. Piézomètre situé dans l'unité des tills ou gravier fluvio-glaciaire (tableau 4.2, groupe no 3).

TABLEAU 4.3 Fluctuations des piézomètres situés dans les sables et argile remaniés (Colluvions)

Piézomètre	Surface du sol Elevation (pi)	Profondeur crépine (pi)	Niveau piézométrique (20/3/72)	Niveau piézométrique (10/9/73)	Fluctuations
A-2-3	255.80	10.00	249.90	252.90	3.00
A-3-3	242.48	50.00	205.38	217.48	12.10
B-1-3	256.42	55.50	246.20	248.17	1.97
B-2-3	244.87	40.00	236.29	234.62	1.67
C-4-4	235.44	25.50	216.24	219.24	3.00
K-3-1	247.30	48.00	242.30	245.05	2.75
K-7-1	247.60	30.00	238.94	242.02	3.08
K-8-1	240.60	59.00	217.68	218.48	0.80
K-20-1	245.10	50.00	217.02	220.08	3.06
H-5	318.37	10.67	313.51	313.11	- 0.40
H-11	264.60	84.92	256.17	254.77	- 1.40
H-18	374.90	23.00	358.18	356.31	- 1.87
H-20	241.00	32.00	226.29	232.39	6.10
H-21	381.48	32.48	361.04	360.04	- 1.00
H-22	247.32	21.50	244.07	243.87	- 0.20
H-27	393.08	30.25	371.40	371.30	- 0.10
H-29	385.15	30.25	362.90	363.30	0.40
H-30	393.50	60.74	351.79	351.79	0.00
H-35	394.88	45.50	380.40	380.40	0.00
H-36	243.99	31.00	240.18	239.98	- 0.20
H-40	244.16	55.00	238.56	240.75	2.19
H-41	241.66	40.50	228.16	229.83	1.67
H-45	239.61	59.92	227.56	229.03	1.47
H-46	240.91	48.50	227.29	225.99	- 1.30
H-47	216.94	26.00	204.77	208.19	3.42
H-48	218.51	25.50	211.42	209.86	- 1.56
H-49	239.89	36.00	234.88	235.35	0.47
K-21-1	241.80	35.00	232.06	237.30	5.24
B-3-3	242.03	52.70	227.63	229.83	2.20

TABLEAU 4.4 Unité des sables et argiles remaniés (Colluvions)

Groupe no.	Piézomètres	Remarques
1	H-5, H-21, H-36, H-11, H-22, H-46, H-18, H-27, H-48	- Amplitude anormale. - Tous la même réaction soit hausse en janvier et baisse au printemps. - Figure 4.5.
2	H-35, H-30, H-29	- Mêmes fluctuations que le groupe 1 mais la baisse se fait beaucoup plus tard, soit après le 300ième jour.
3	K-7-1, H-41, K-8-1, H-45 H-40, H-47, H-49, B-3-3	- Même genre de fluctuations ainsi que même tendance générale. - Hausse observée le printemps.
4	A-2-3, B-1-3, A-3-3, B-2-3, K-3-1, C-4-4, K-20-1, K-21-1	- Même tendance que le groupe 3. - Beaucoup plus sensibles aux pluies. - Saut brusque de 11.0' pour A-3-3.
	H-20	- Au jour 278 monte 10.0' jusqu'au jour 251 où 1'on a une descente de 11.0'.

TABLEAU 4.5 Nappe située dans la poche de sable

Groupe no.	Piézomètres	Remarques
1	H-4, H-23, H-6, H-24, H-7, H-43	- On note qu'ils sont très hauts en hiver, légère montée en janvier. - Descente de quelques pieds (5) au printemps.
2	K-2-1, K-6-2, K-21-2	- Tendance générale à la baisse en hiver pour atteindre le niveau le plus bas à la fin de l'hiver, phénomène marqué surtout dans le cas de K-6-2. - Remontée du printemps par la suite. - Fluctuations semblables.
3	H-50, H-38	- Même réaction. - Très faible fluctuation. - Peut s'apparenter au groupe 2.
	K-4-1	- Montée continuelle.

fèrent à des pressions hydrauliques; donc, par le fait même, deux piézomètres situés à quelques pieds l'un de l'autre peuvent avoir des fluctuations différentes étant donné que l'on se retrouve dans un milieu imperméable.

Ces piézomètres ont surtout été implantés sur le pourtour du cratère formé par le glissement de mai 1971 ainsi que le long des vallées creusées par la rivière des Vases et du ruisseau Petit-Bras.

Dans ce milieu, les piézomètres ont été regroupés selon le fait qu'il y ait augmentation ou diminution constante de la pression (tableau 4.6). Cette montée ou cette descente peut être due à un rééquilibre des pressions qui s'est effectué à la suite du glissement de terrain. Comme l'on est en milieu relativement imperméable, cette réaction est très lente.

Le groupe 3 du tableau 4.5 renferme les piézomètres qui semblent réagir de façon différente l'un de l'autre, en raison du manque de lien hydraulique.

4.5 Amplitudes des fluctuations piézométriques dans la nappe de surface

Les courbes isopièzes ont été tracées pour le 20/3/72 (carte 4.2) et pour le 19/4/72 (carte 4.3), ce qui devrait correspondre à la période d'étiage (fin de l'hiver) et au printemps en période de crue.

On remarque qu'il existe très peu de différence entre les courbes isopièzes en période de crue et d'étiage. Le gradient hydraulique, à prime abord, ne semble pas se différencier quelle que soit la période.

Ces deux cartes (4.2 et 4.3) ont servi à la confection d'une troi-

TABLEAU 4.6 Piézomètres implantés dans l'argile marine

Groupe no.	Piézomètres	Remarques
1	C-1-2, K-11-2, C-4-3, K-14-2, B-1-2, K-15-2, K-11-3, B-3-1	- Ces piézomètres sont en descente continuelle.
2	K-4-2, K-9-1, K-16-1, K-10-1, K-12-1, K-13-1, K-14-1, C-6-2, K-6-3, K-21-3, D-3-1, A-4-3, K-12-2, K-13-2, K-10-2, K-10-3, K-13-3, K-16-3, K-15-3, K-20-2, A-4-2, C-5-2, K-17-1.	- Ils ont une tendance générale à monter continuellement. - Figure 4.6
3	A-1-2, A-2-2, C-1-3, C-3-2, A-3-2, B-2-2, B-3-2, A-2-1, B-1-1, B-2-1, C-4-1, D-1-2, D-1-1, D-2-2, D-2-3, D-3-2, E-1-2, E-1-3, E-2-1, E-2-2, F-1-2, G-1-1, G-1-2, K-1-1, K-2-2, K-3-2, K-15-1, K-16-2, K-8-2, K-9-2, K-7-2, K-7-3, K-17-2, K-18-1, K-18-2, K-19-1, K-19-3, K-8-3, K-9-3, K-12-3	- Ces piézomètres semblent réagir indépendamment l'un de l'autre. - Toutefois, on remarque que certains (Ex.: K-12-3, K-18-1) montent pour ensuite, à partir d'un certain temps (Ex.: jour 535) rester stables. - Figures: 4.7 - 4.8

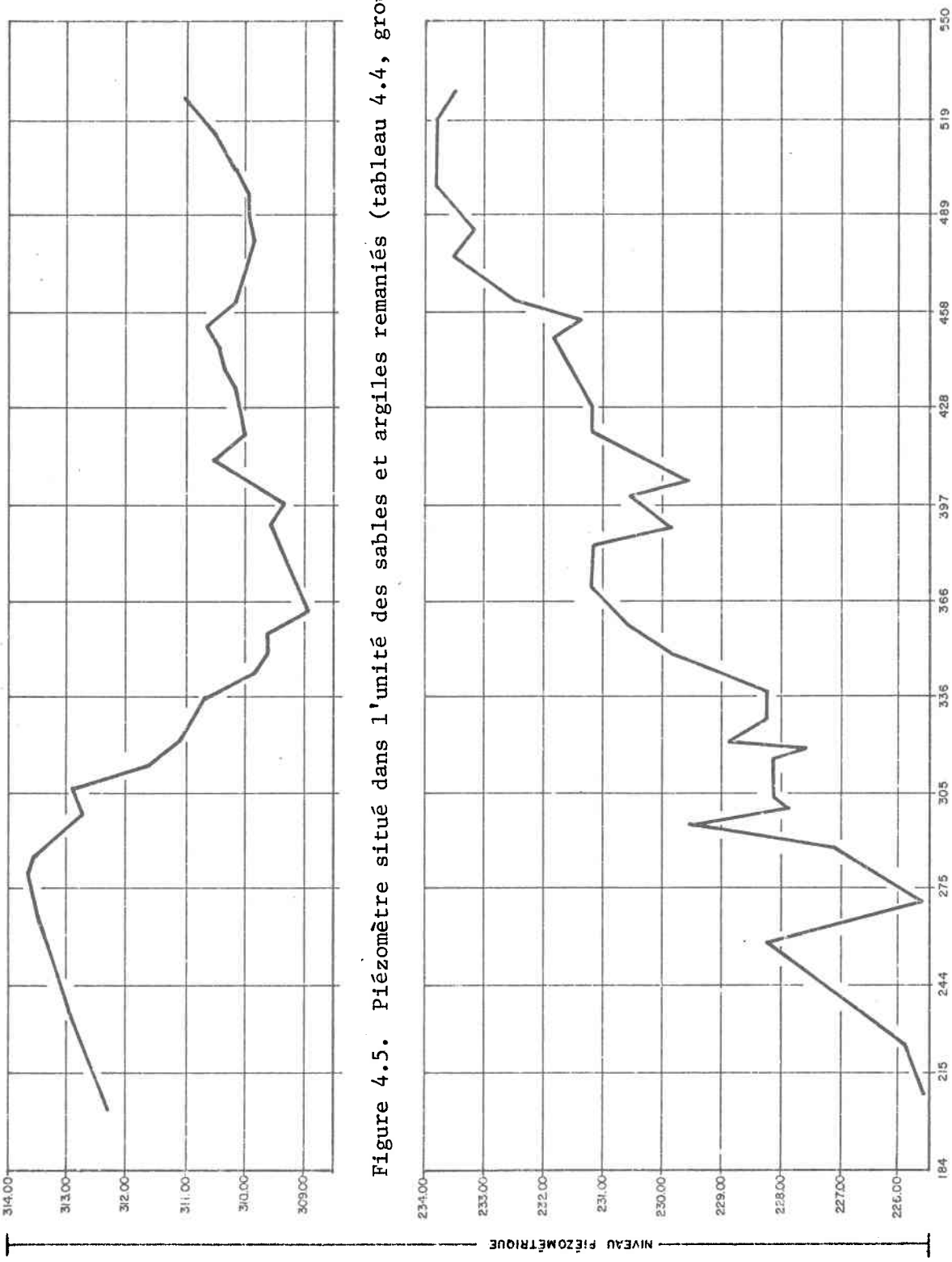


Figure 4.5. Piézomètre situé dans l'unité des sables et argiles remaniés (tableau 4.4, groupe no 1).

Figure 4.6. Piézomètre situé dans l'argile (tableau 4.6, groupe no 2).

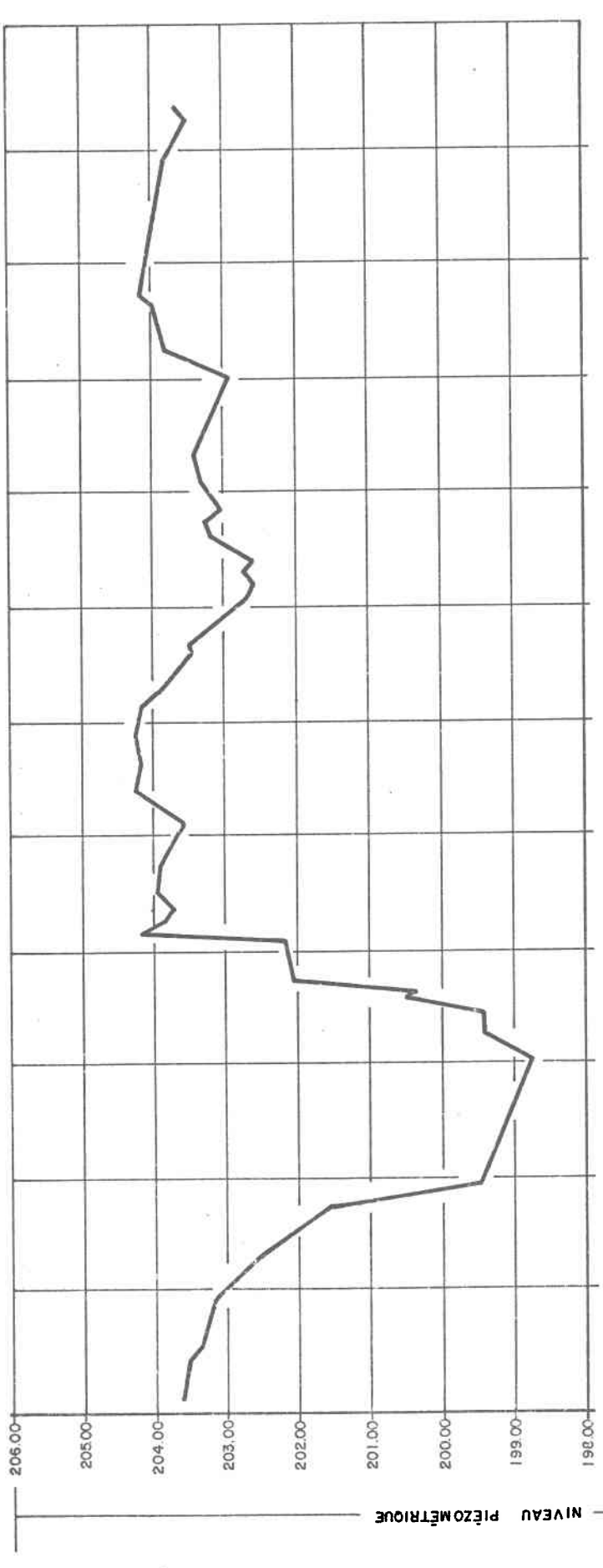


Figure 4.7. Piézomètre situé dans l'argile (tableau 4.6, groupe no 3).

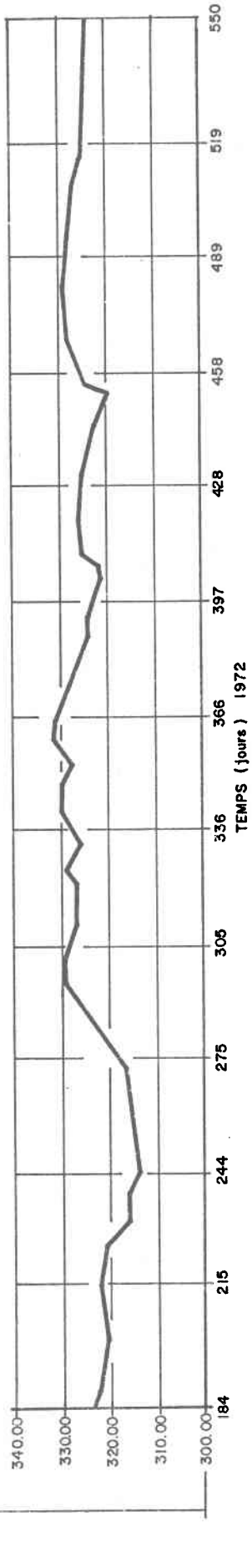
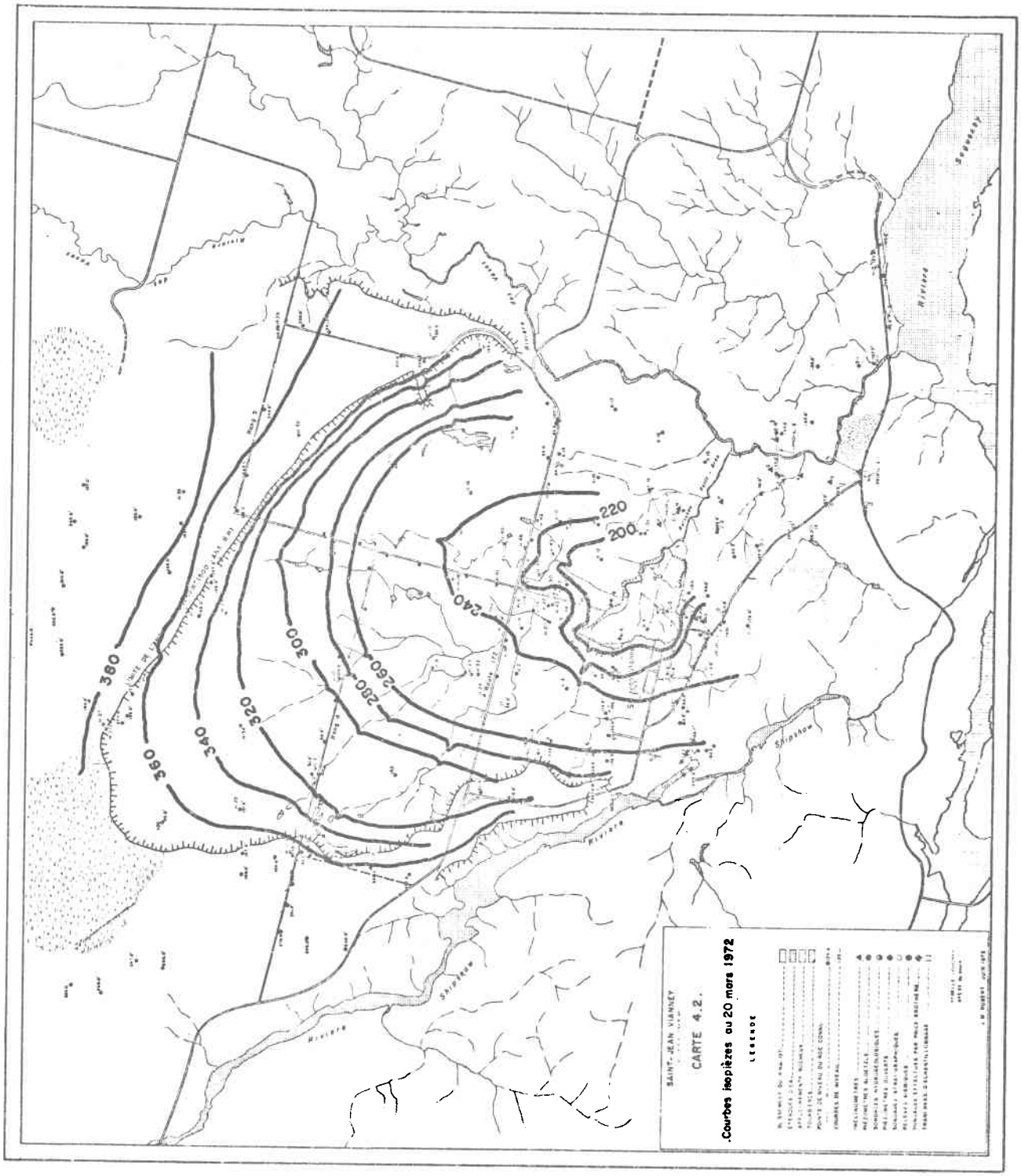
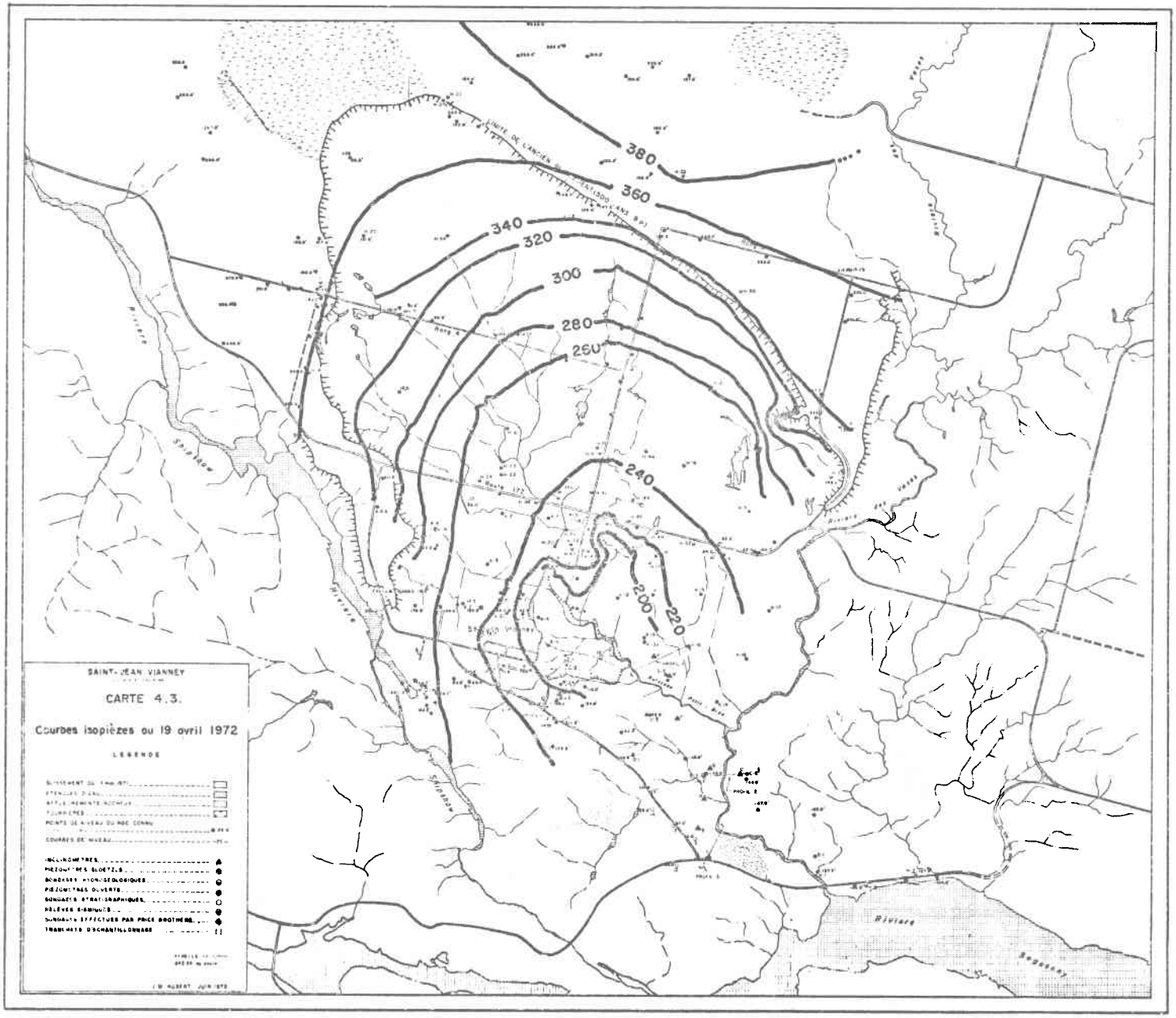


Figure 4.8. Piézomètre situé dans l'argile marine (tableau 4.6, groupe 3).


SAINT-JEAN VIANNEY
CARTE 4.2.
.Courbes isopièzes au 20 mars 1972
LEGENDE
220
200
240
300
260
280
320
340
360
380
Rivière
Shipshaw


380
360
340
320
300
280
260
240
220
200
SAINT-JEAN VIANNEY
CARTE 4.3.
Courbes isopièzes au 19 avril 1972
LEGENDE
Riviere
Riviere
Riviere
Riviere
Riviere
Riviere

sième carte (4.4) ayant pour objet d'indiquer les variations maximums de la nappe. Ce dernier document (carte 4.4) donne habituellement des renseignements sur les variations de stockage dans la nappe et, par conséquent, sur l'importance de la recharge due à la fonte de la neige.

4.5.1 Zonalités se dégageant de la carte des amplitudes

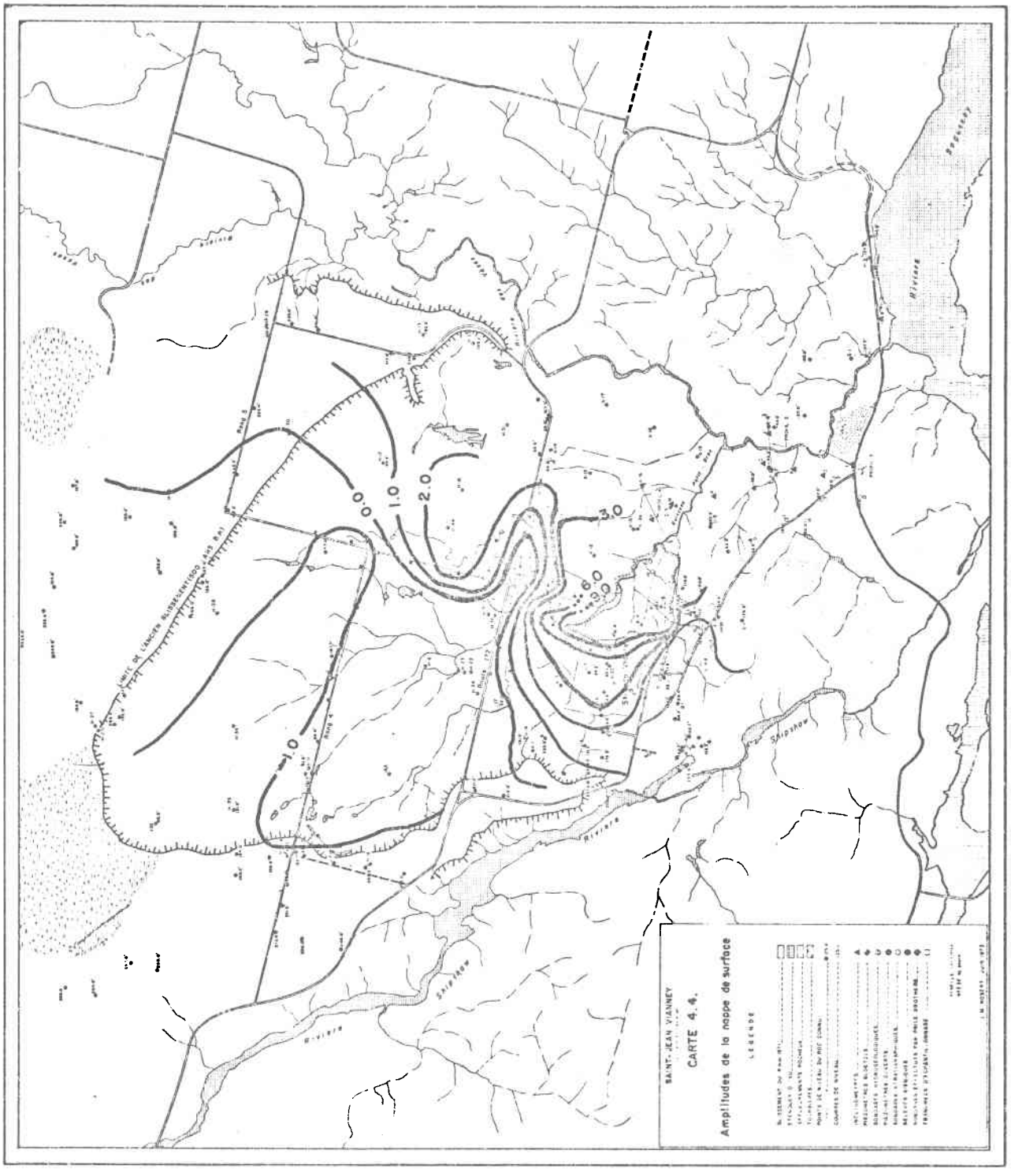
L'examen de la carte des amplitudes (4.4) et du tableau (4.3 et 4.4) comprenant les piézomètres installées dans l'unité des sables remaniés, nous permet de distinguer deux zones distinctes.

La première qui regroupe les piézomètres A-2-3, A-3-3, C-4-4, K-20-1, H-20 et H-47 est caractérisée par le fait qu'on y retrouve les amplitudes les plus fortes (3' à 6'). Ces piézomètres sont situés pour la plupart dans la zone de décharge qui entoure le cratère.

La seconde est composée des piézomètres H-5, H-11, H-18, H-21, H-22, H-27, H-36, H-46, H-48, qui ont tous une amplitude négative. Cette zone peut se diviser en deux parties: la première est formée par les piézomètres H-22, H-36, H-46, H-48, qui sont situés le long de la route régionale dans une zone où du drainage de surface a été effectué afin d'abaisser le niveau de la nappe phréatique.

On a en effet creusé une tranchée afin d'abaisser de quelques pieds la nappe de surface. Ces travaux peuvent expliquer le décroissance des réserves lors de la recharge. Dans cette zone, la grandeur des amplitudes est d'environ -0.30 pied.

A mesure que l'on remonte vers la cicatrice de l'ancien cratère, cette amplitude négative est plus prononcée (-1.0'), formant ainsi la se-


SAINT-JEAN VIANNEY
CARTE 4.4.
Amplitudes de la nappe de surface
LEGENDE
1.0
2.0
3.0
6.0
9.0
Rivière
Saidrow

conde partie de cette zone.

De plus, les piézomètres situés dans cette seconde zone ont tous la même anomalie indiquée par une montée de quelques pieds (0.5 à 2.) en janvier pour ensuite être très stable et pour enfin descendre de quelques pieds (1.0' à 3.0') vers la fin d'avril au moment de la recharge printanière.

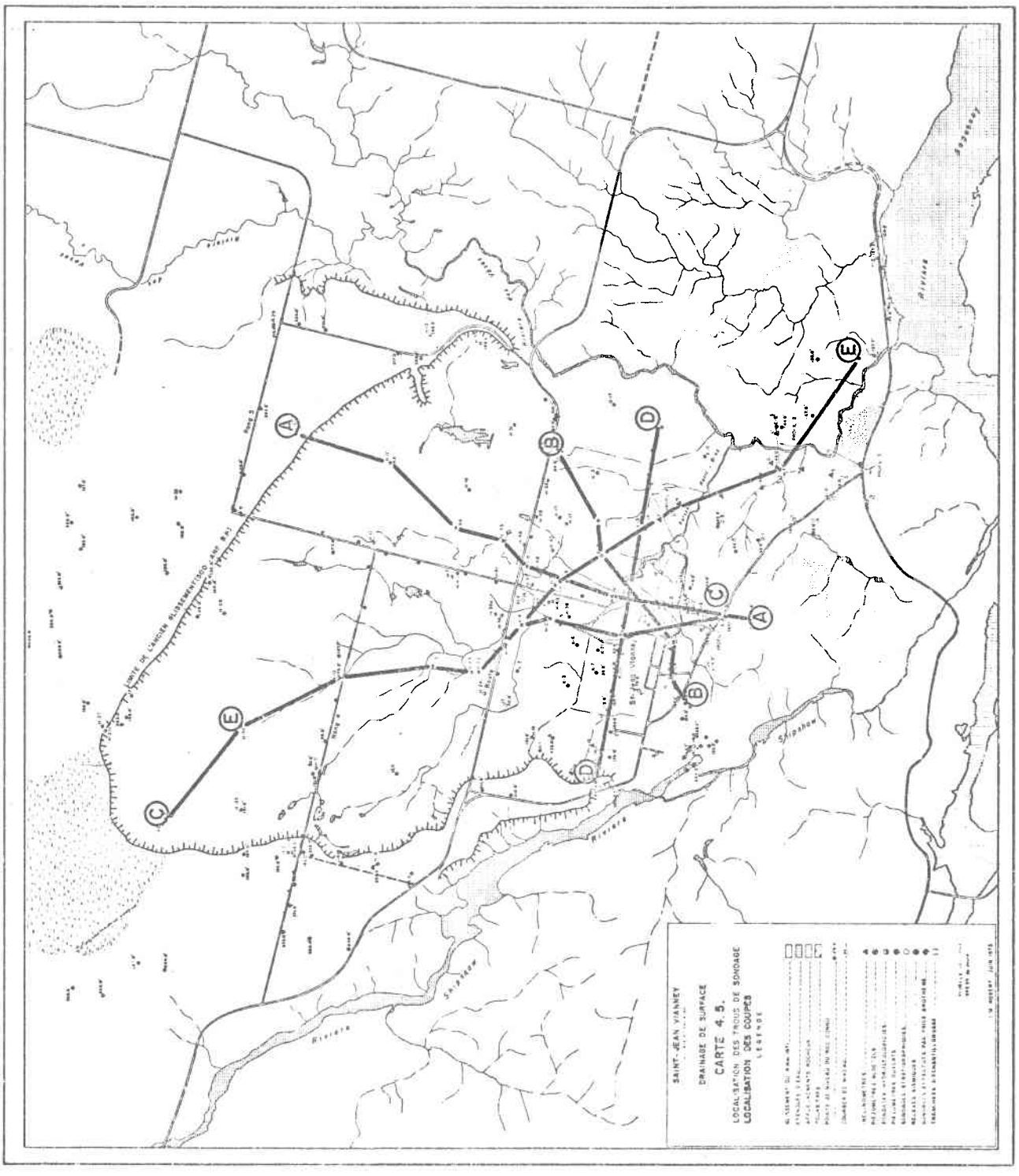
Cette baisse peut être expliquée par l'abaissement de la nappe qui a été mentionné auparavant et la faible recharge peut être due au fait qu'il y a un drainage de surface important dans cette région et la quantité qui passe à la nappe reste assez faible.

4.6 Ecoulement en coupe

Etant donné le grand nombre d'informations que l'on possédait, il fut possible de tracer des coupes verticales parallèlement au filet liquide. Ces coupes vont ainsi nous permettre de déterminer les lignes équipotentielles et de déterminer ainsi les schémas d'écoulement. On pourra alors déterminer quelle portion du bassin se draine dans le cratère et, par le fait même, dans la rivière Petit-Bras et quelle partie se draine dans l'aquifère présent à la surface du roc, donc dans le Saguenay. Les emplacements des coupes sont indiqués sur la carte 4.5 (localisation en plan des coupes).

4.6.1 Coupe A-A' (figure 4.9) Stratigraphie et schéma d'écoulement

Cette coupe passe par les forages suivants: H-30, H-12, H-44, H-45, K-8, H-48, K-9, C-6, C-5, C-4, C-3, C-2, C-1. Les potentiels ont été mesurés au jour 20/3/72 et au jour 10/9/73 de façon à pouvoir suivre l'évo-


SAINT-JEAN VIANNEY
DRAINAGE DE SURFACE
CARTE 4.5.
LOCALISATION DES TROUS DE SONDAGE
LOCALISATION DES COUPES
LÉGENDE
A
B
C
D
E
Rivière

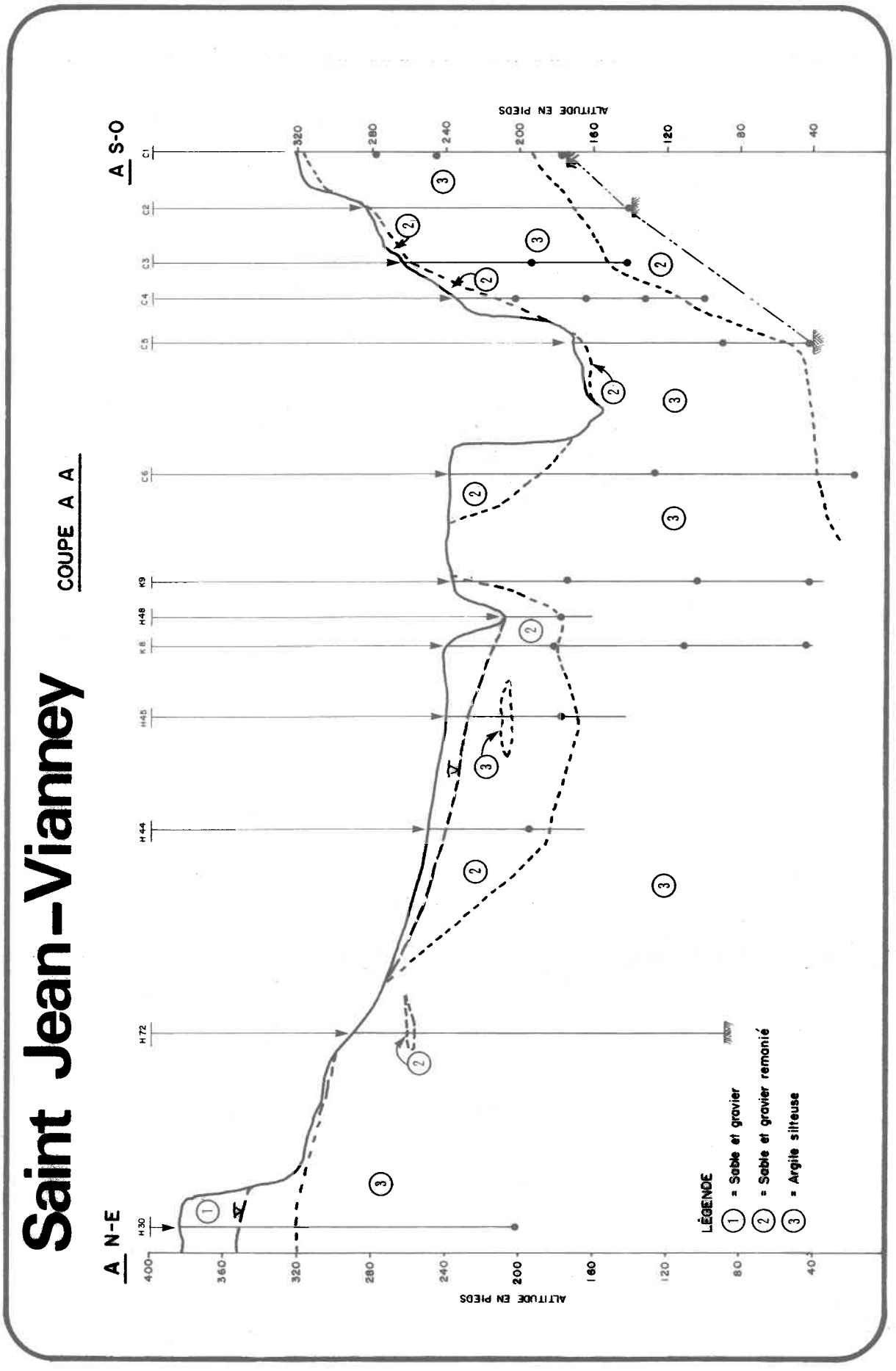


Figure 4.9. Stratigraphie de la coupe A - A.

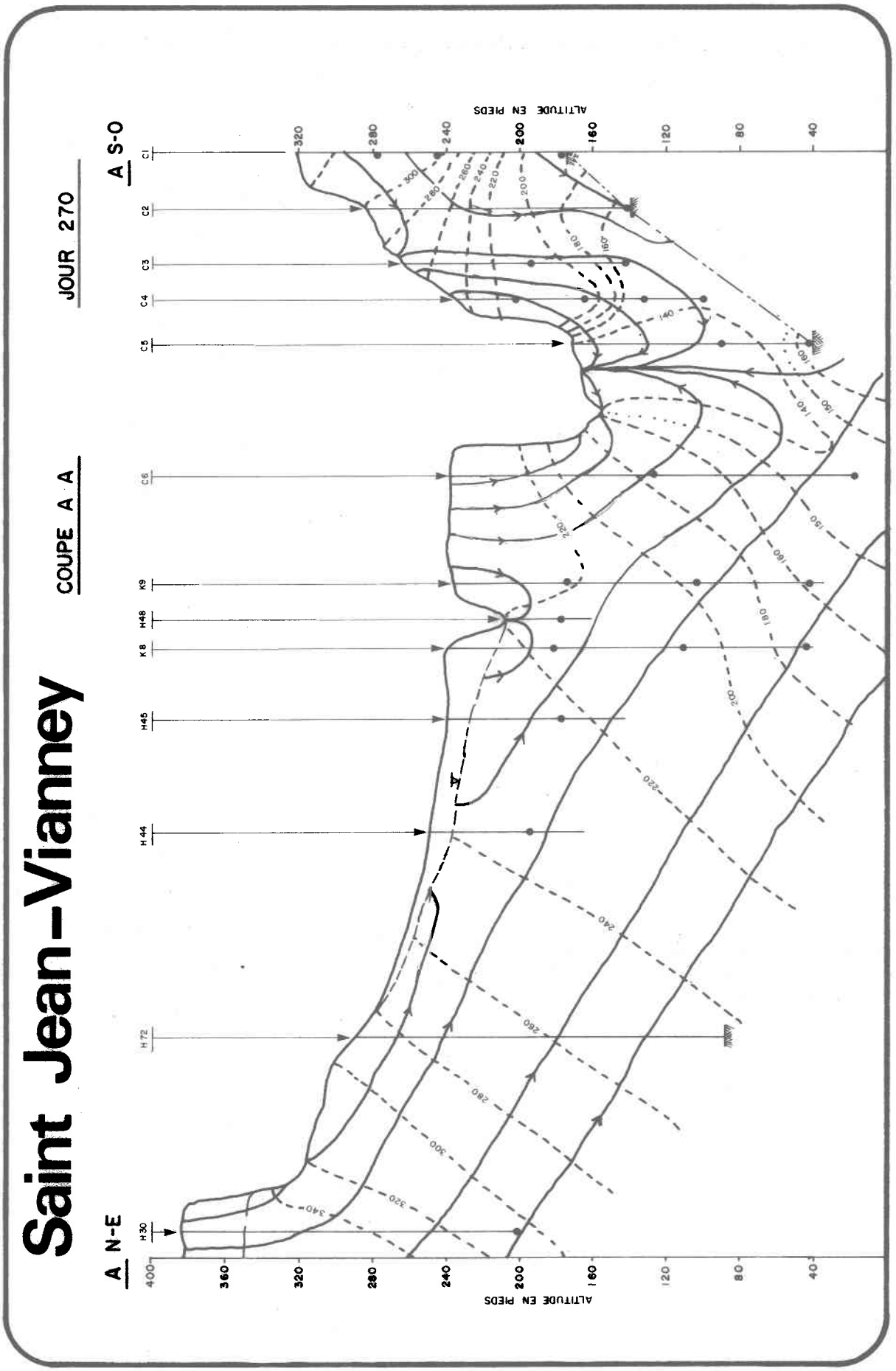


Figure 4.9.1. Stratigraphie de la coupe A - A équipotentielle au 20/3/72.

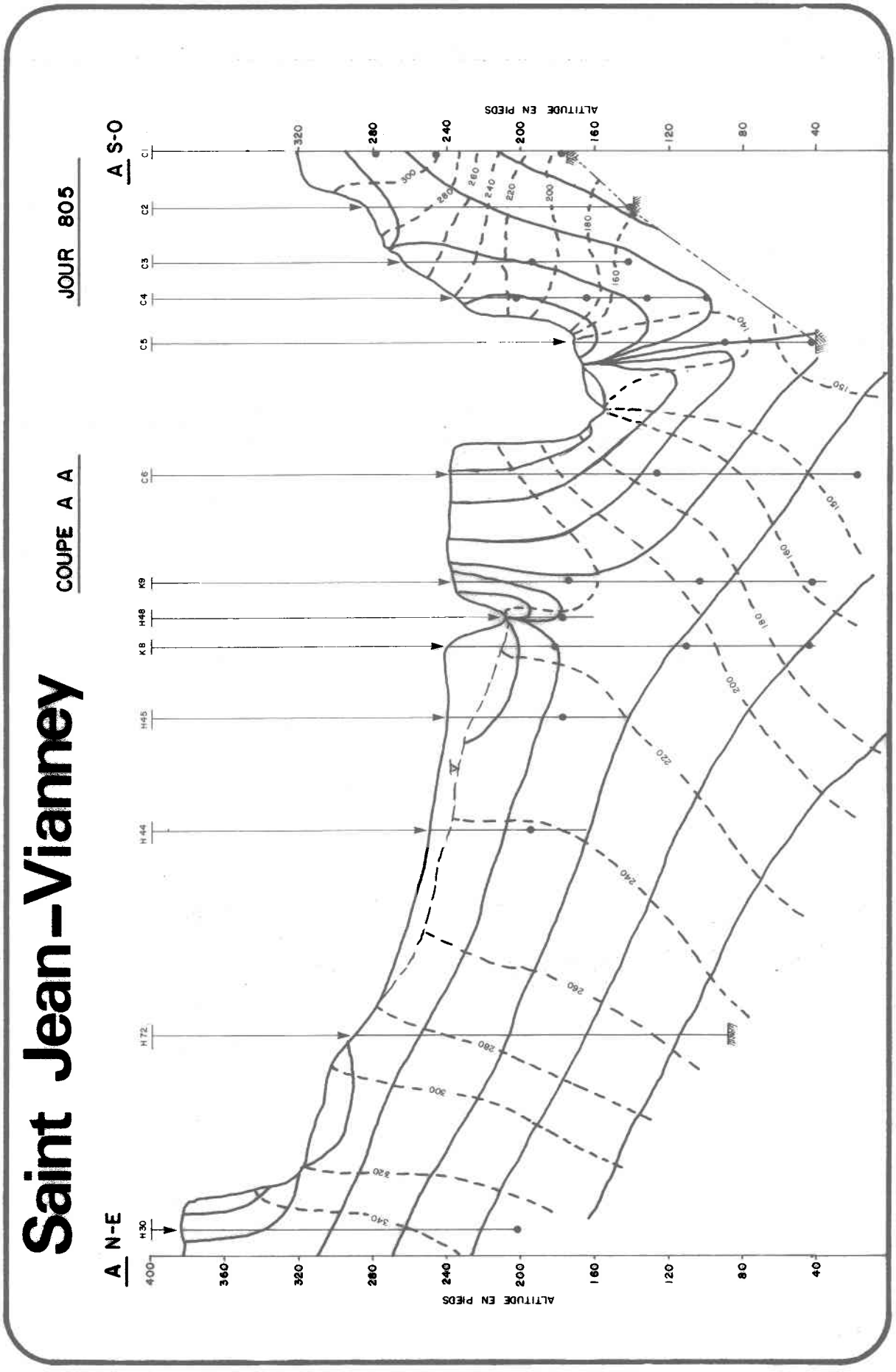


Figure 4.9.2. Stratigraphie de la coupe A - A équipotentielle au 10/9/73.

lution des gradients. On remarque que l'écoulement se fait des forages H-30 vers C-6, donc du nord du bassin vers le cratère, ainsi que des forages C-1 vers C-5, c'est-à-dire le long du flanc de la vallée rocheuse vers le centre de cette dernière.

Une partie du terrain est drainée par le fond du récent cratère tandis que l'autre partie se draine vers le centre de la vallée cachée.

Si l'on compare la coupe faite au jour 20/9/72 et au jour 10/9/73, on remarque qu'à la fin de la période d'observation, la superficie de la zone drainée vers la partie la plus basse du récent cratère a légèrement diminué e. Ceci peut être expliqué par le fait que, lors du glissement, il y ait eu un brusque relâchement des contraintes et des pressions et que le terrain évolue vers un nouvel équilibre.

4.6.2 Coupe B-B' (Fig. 4.10) Stratigraphie et schéma d'écoulement

Cette coupe passe par les forages suivants: B-1, B-2, B-3, K-11, K-12, K-14. Ceci donne une direction générale E-O et recoupe le présent cratère et la vallée de St-Jean Vianney perpendiculairement à son axe central.

Le cratère formé par le glissement de mai 1971 ne draine qu'une faible partie du terrain, tel qu'illustré par cette coupe stratigraphique. Le restant est drainé vers le centre de la vallée centrale. La stratigraphie a donc une influence très grande sur le schéma d'écoulement, étant donné l'alternance de couches perméables et imperméables.

Si on compare les coupes du 20/3/72 et du 10/9/73, on peut percevoir qu'il y a eu entre ces deux dates un certain redressement des lignes

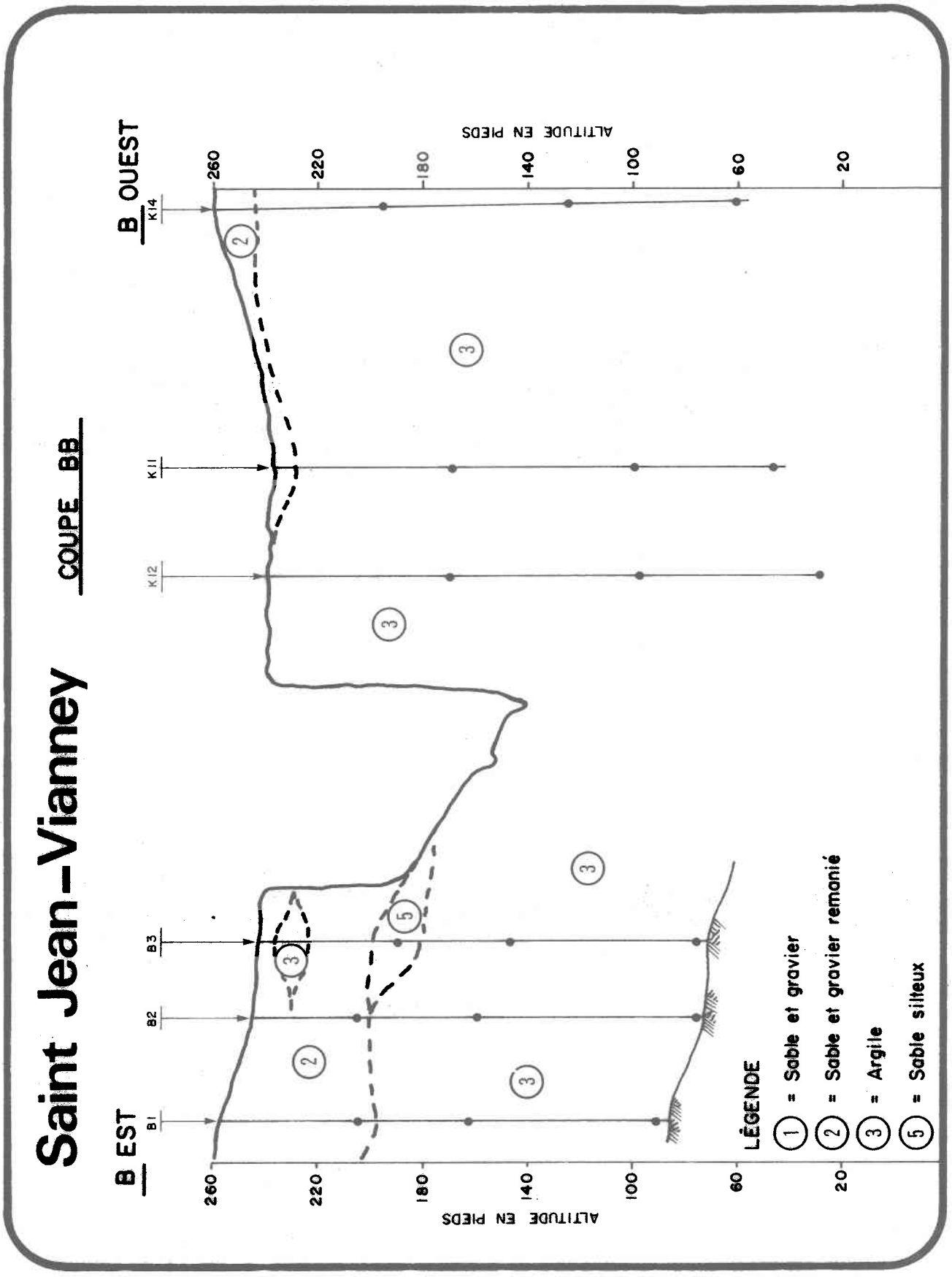


Figure 4.10. Stratigraphie de la coupe B - B.

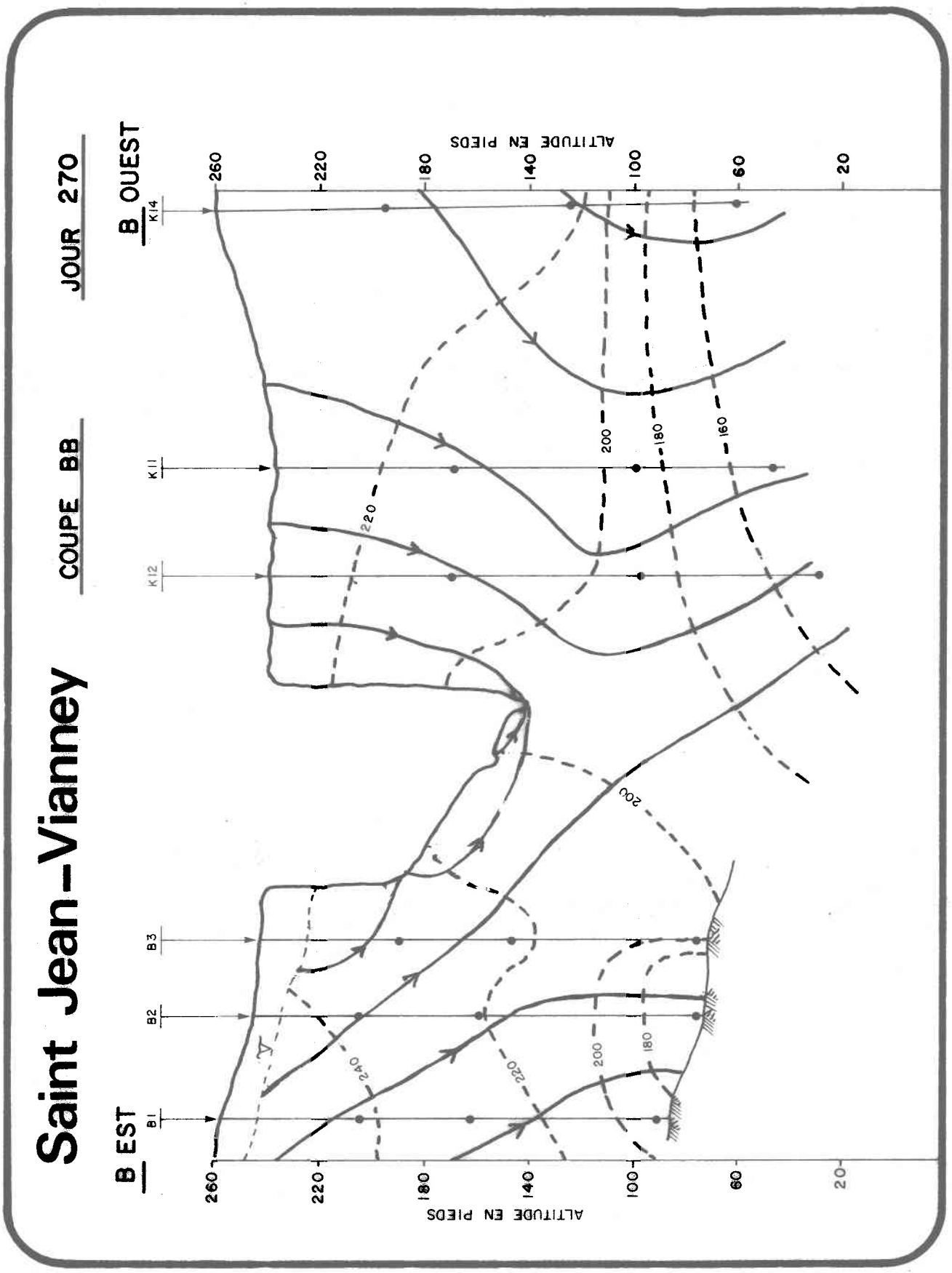


Figure 4.10.1. Stratigraphie de la coupe B - B équipotentielle au 20/3/72.

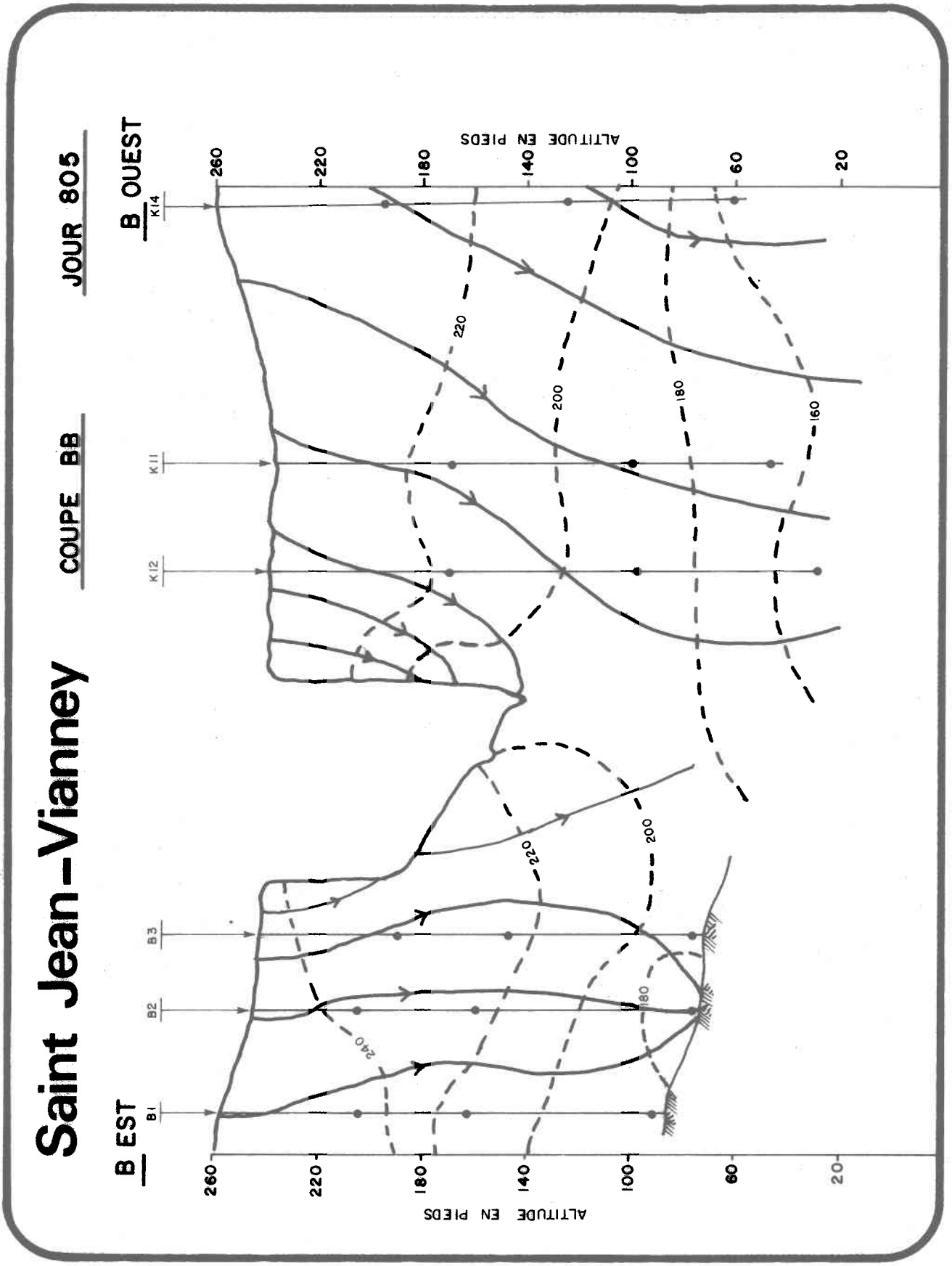


Figure 4.10.2. Stratigraphie de la coupe B - B équipotentielle au 10/9/73.

de courant surtout dans la partie supérieure du terrain. Cet effet peut être expliqué par la recherche d'un nouvel équilibre des nappes. La partie située au niveau du roc du forage B-2 capte les filets liquides; cette zone est d'ailleurs beaucoup plus visible au 10/9/73.

4.6.3 Coupe C-C' (Fig. 4.11) Stratigraphie et schéma d'écoulement

Cette dernière passe par les forages H-26, H-34, H-10, H-6, H-22, H-23, H-4, K-4, H-20, A-4, C-1 et C-2, et a une orientation Sud-Est — Nord-Ouest située dans la partie nord du bassin.

En examinant les lignes de courant, on remarque que la nappe est drainée de chaque côté du profil vers le centre de la vallée où est situé la cratère. Comme là le profil ne recoupe qu'une très petite partie située au nord du cratère formé par le glissement, la partie drainée est très faible.

En examinant les schémas d'écoulement, on peut diviser le profil en deux zones, soit la partie supérieure qui draine une partie de la nappe tandis que le reste est drainé par l'aquifère situé en profondeur. Ceci nous montre encore l'influence de la stratigraphie sur les schémas d'écoulement.

L'évolution des lignes de courant dans le temps semble nous indiquer qu'il n'y a pas de changement notable; mais le manque de données au jour 805 nous empêche de conclure avec certitude.

4.6.4 Coupe D-D' (Fig. 4.12) Stratigraphie et schéma d'écoulement

Cette coupe qui passe par les forages A-1, A-2, A-3, A-4, K-13, K-16, K-18 à une direction générale Est-Nord-Est— Ouest-Sud-Ouest.

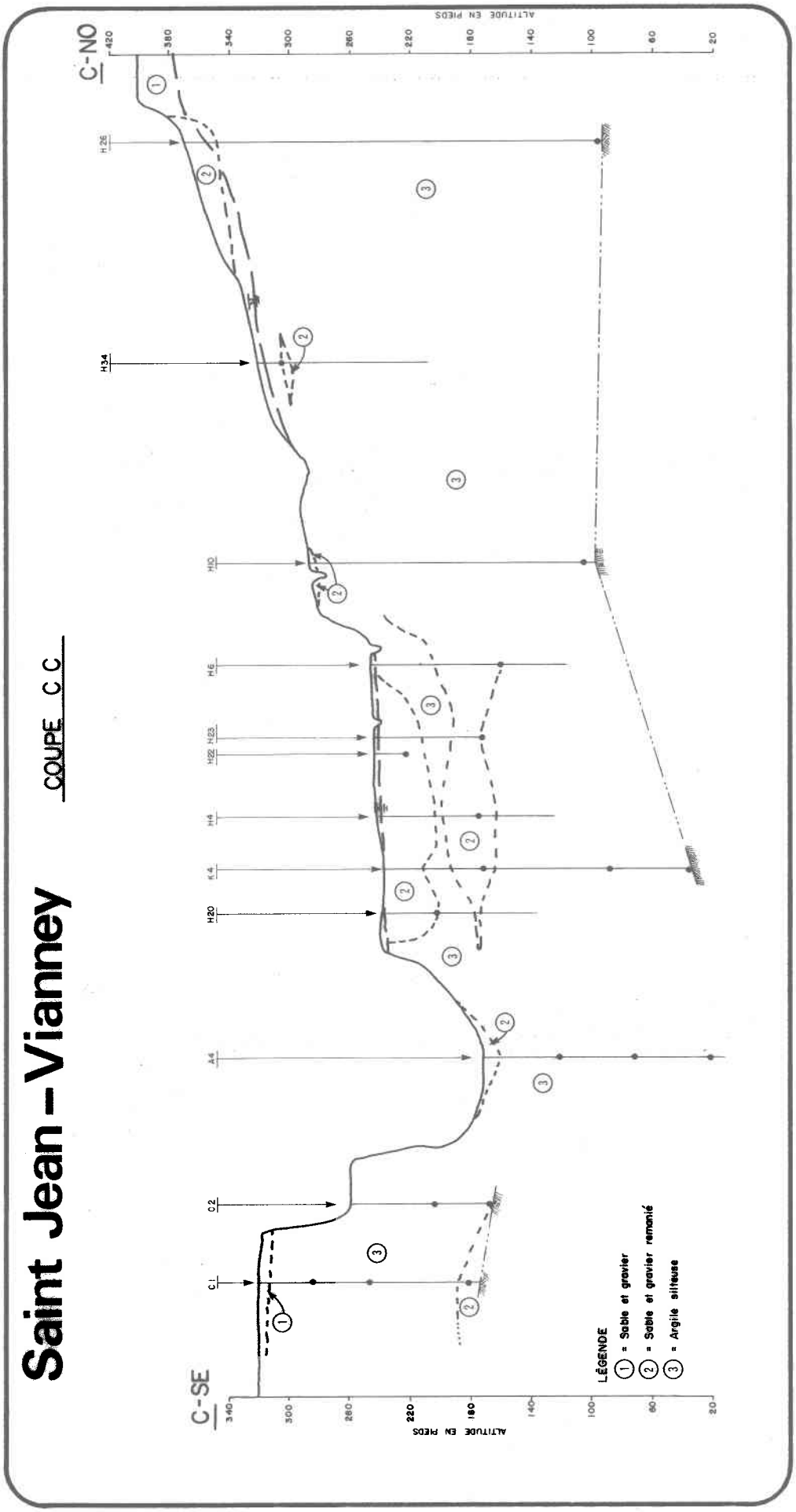


Figure 4.11. Stratigraphie de la coupe C - C.

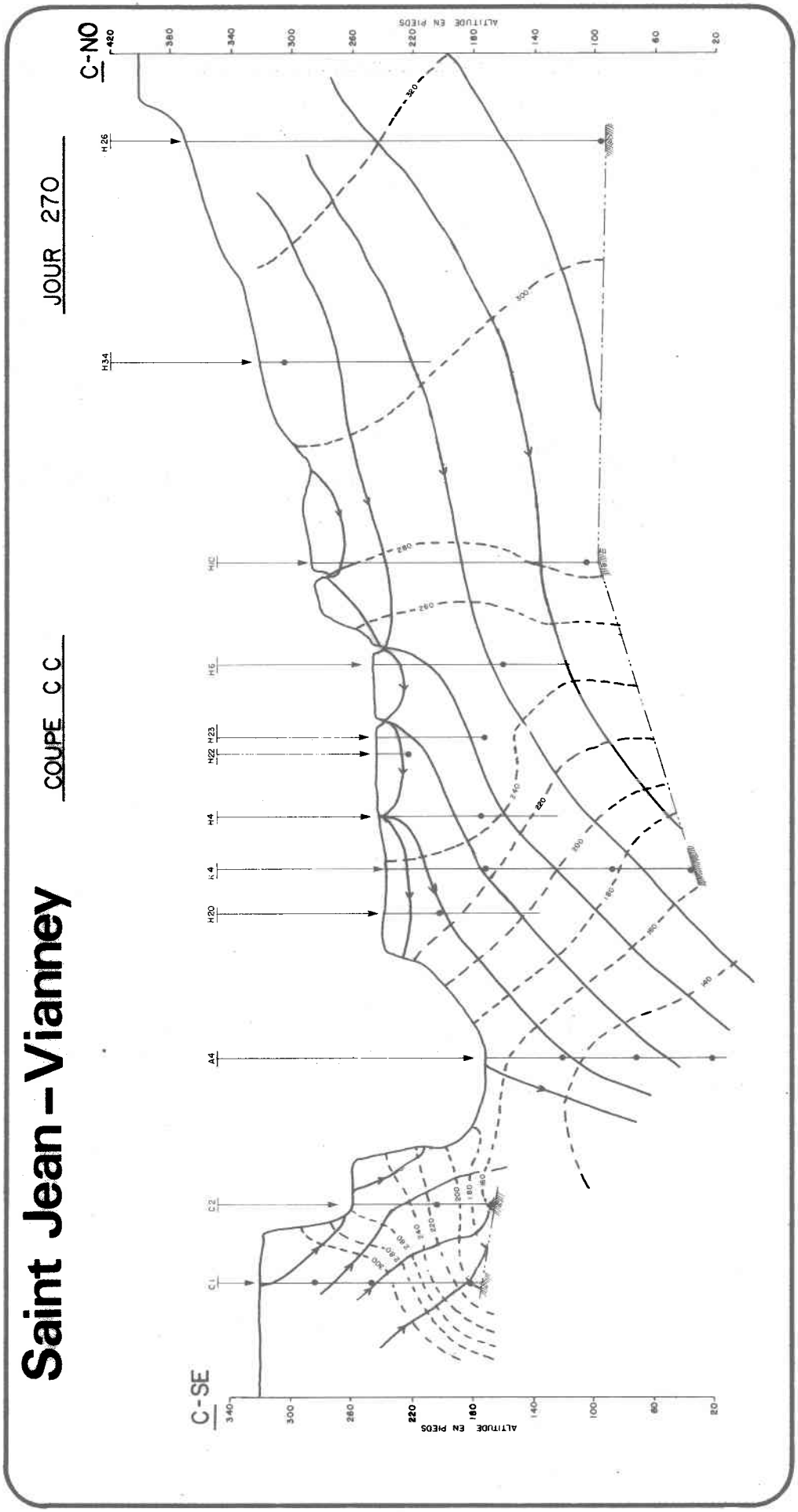


Figure 4.11.1. Stratigraphie de la coupe C - C équipotentielle au 20/3/72.

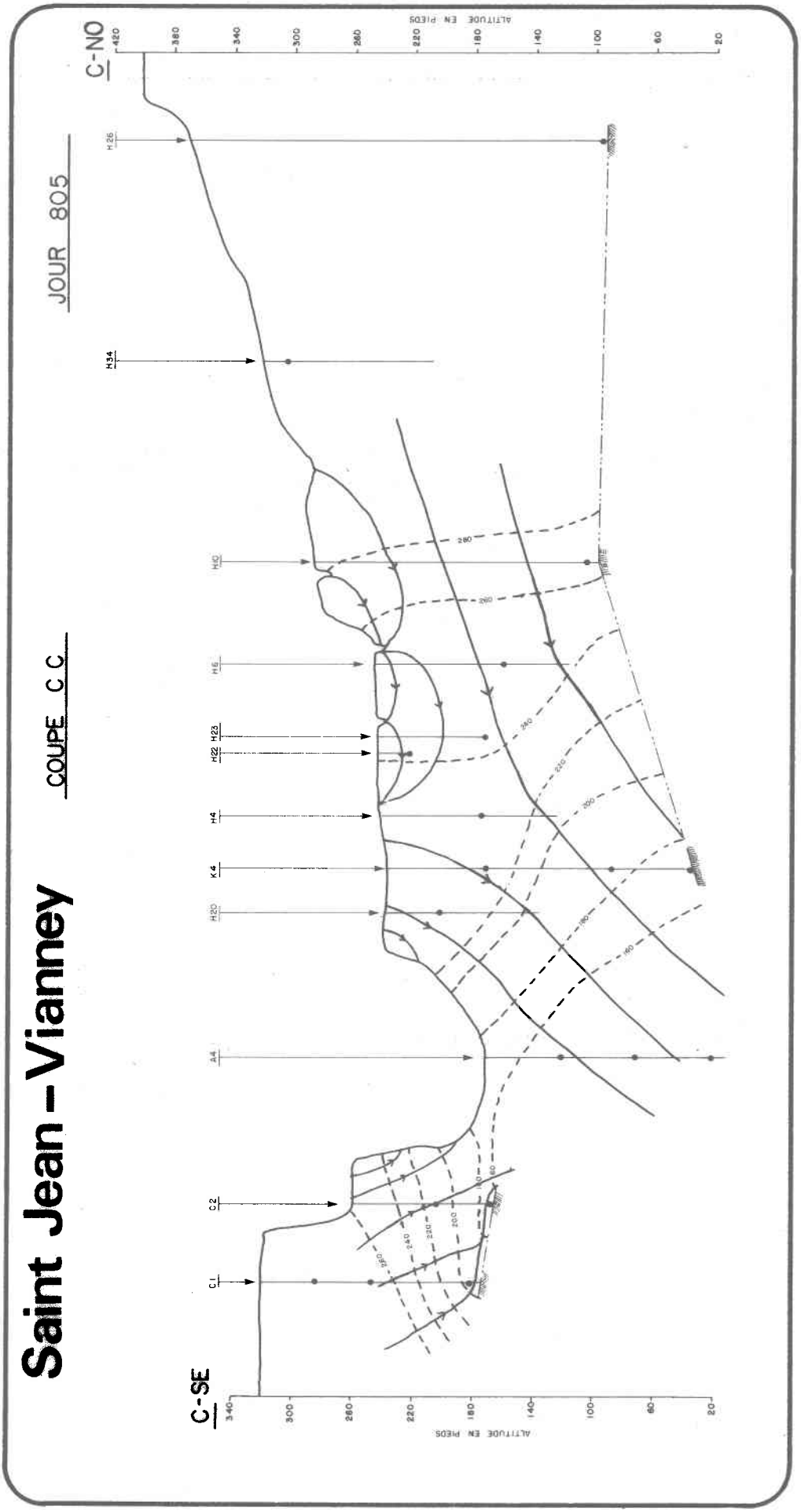


Figure 4.11.2. Stratigraphie de la coupe C - C équipotentielle au 10/9/73.

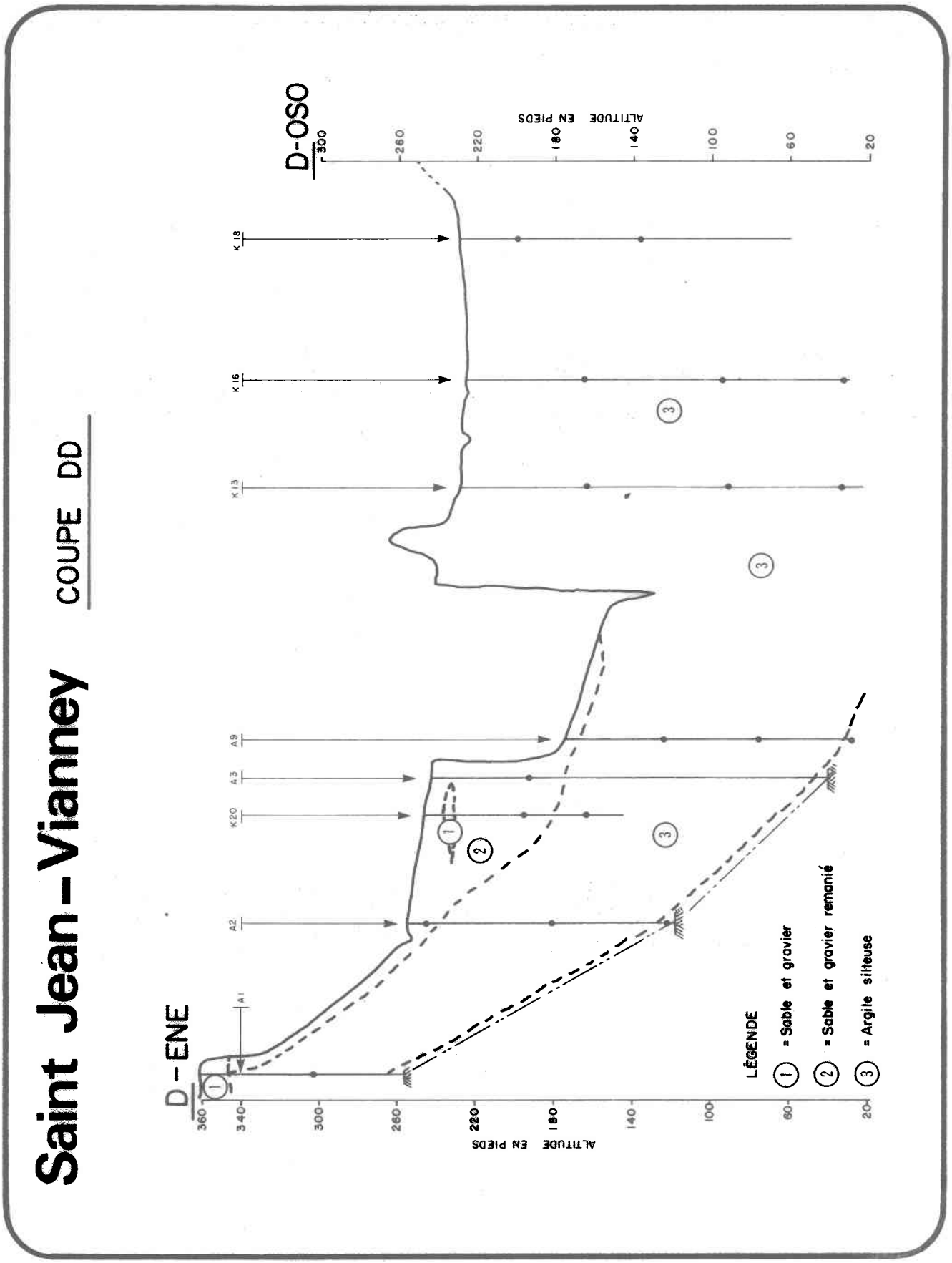


Figure 4.12. Stratigraphie de la coupe D - D.

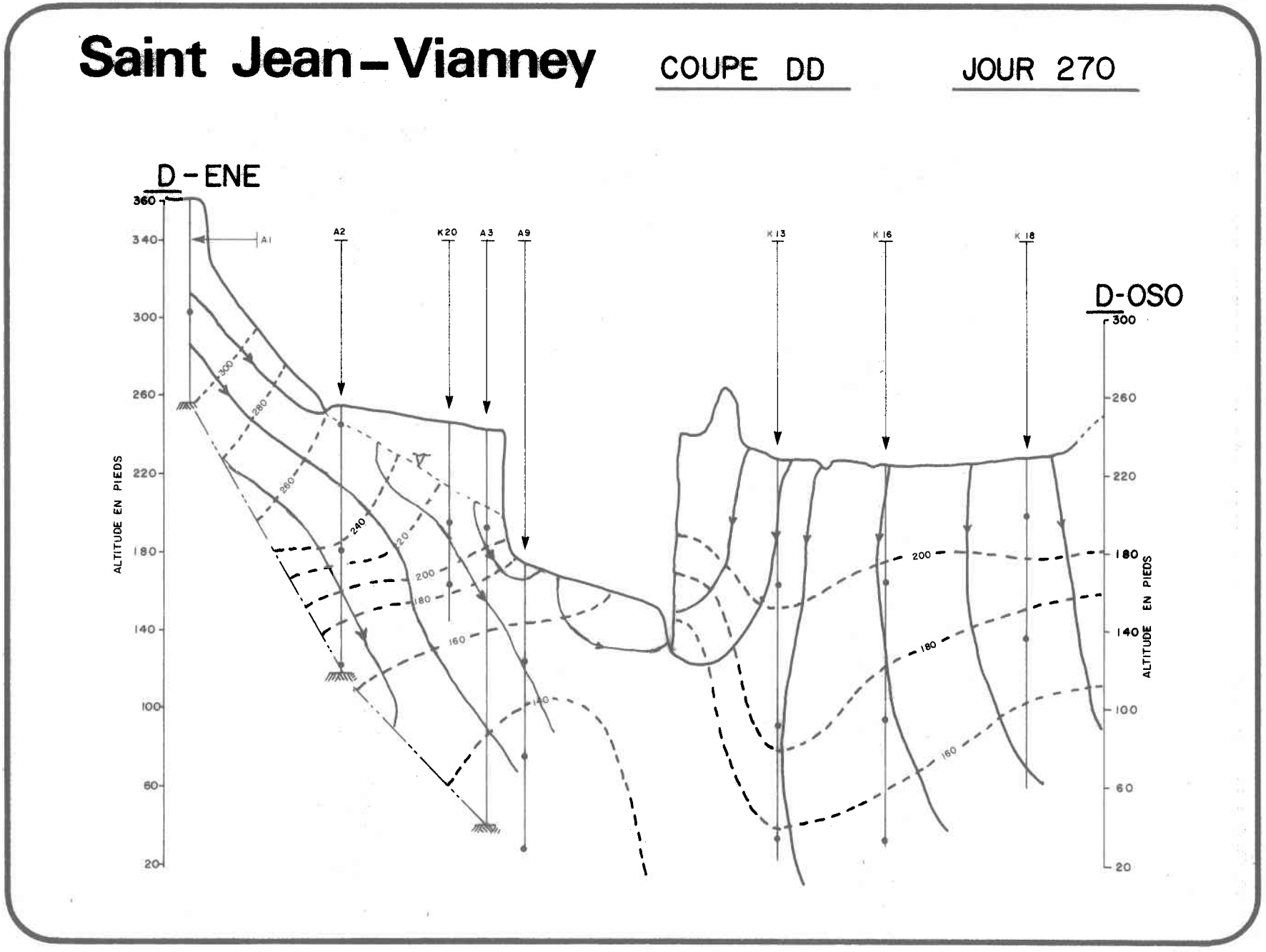


Figure 4.12.1. Stratigraphie de la coupe D - D équipotentielle au 20/3/72.

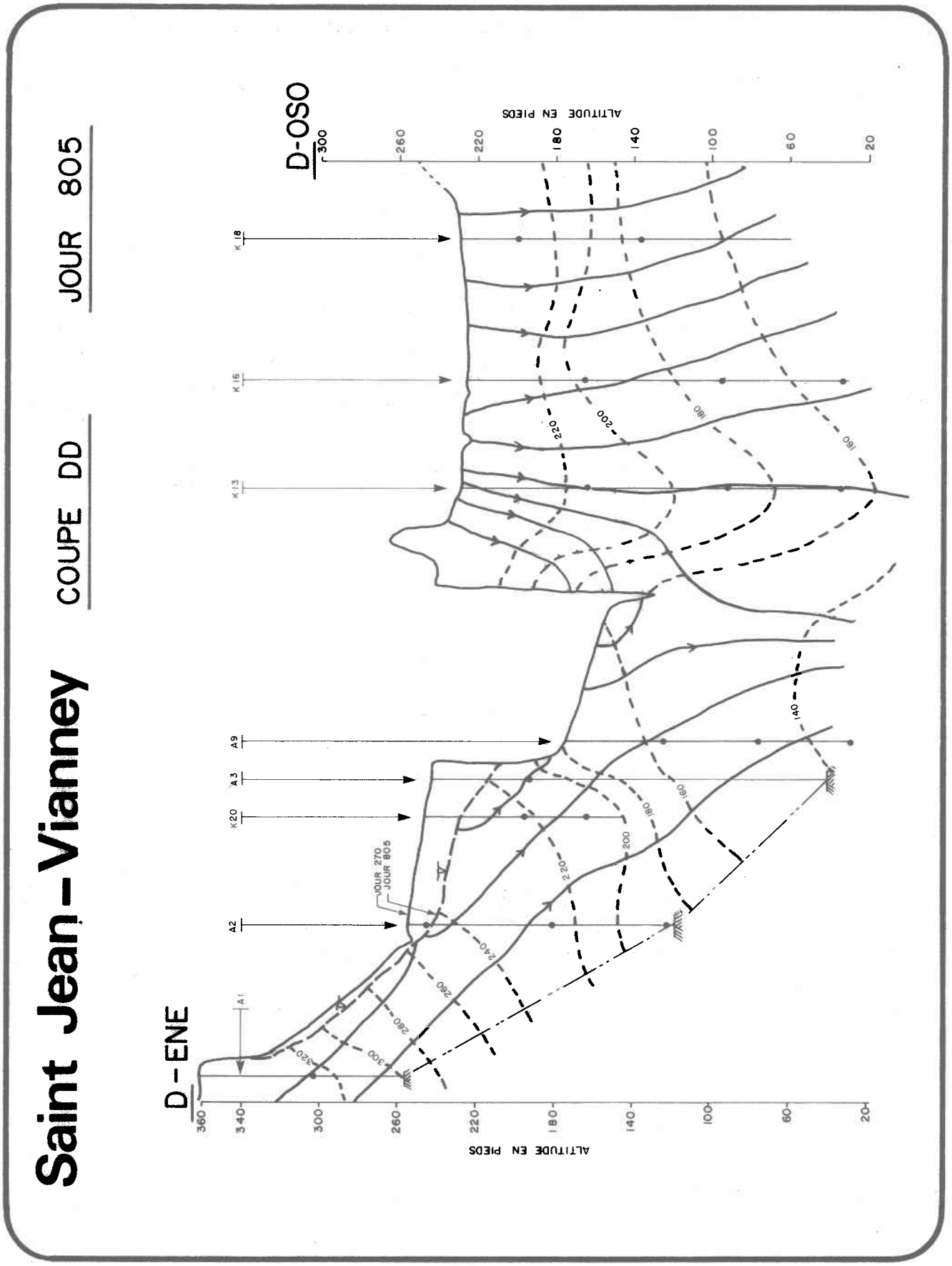


Figure 4.12.2. Stratigraphie de la coupe D - D équipotentielle au 10/9/73.

L'écoulement se fait à partir du forage A-1 vers le bas du bassin, suivant par le fait même la stratigraphie et la forme de la vallée. La partie supérieure de la nappe, située dans les sables et graviers remaniés, est drainée par le cratère formé par le glissement de mai 1971.

La région comprise entre la bordure du cratère K-18 se divise en deux, soit une bande mince jusqu'au forage K-1 qui se draine vers le cratère tandis que dans l'autre partie, l'écoulement se fait vers la partie basse de la vallée cachée en direction du Saguenay.

Il ne semble pas y exister de différence importante entre le patron de drainage du jour 270 et du 10/9/73.

4.6.5 Coupe E-E' (Fig. 4.13) Stratigraphie et schéma d'écoulement

Ce profil qui a une direction générale Nord-Est - Sud-Ouest nous donne une vue en coupe de l'axe du bassin et par le fait même de la vallée rocheuse sous-jacentre. On remarque également que l'on recoupe les vallées creusées par le ruisseau Petit-Bras ainsi que par la rivière des Vases.

A première vue, on remarque que l'écoulement a tendance à suivre la pente formée par la vallée sous-jacente. Donc l'écoulement se fait de la surface du sol vers le bas du profil avec une forte composante Nord-Sud se situant dans l'axe de la pente de la vallée rocheuse.

Les vallées formées par le ruisseau Petit-Bras et de la rivière des Vases captent la partie supérieure de la nappe.

On remarque qu'il n'y a pas de différence majeure dans l'évolution des schémas observés au 20/3/72 et au 10/9/73.

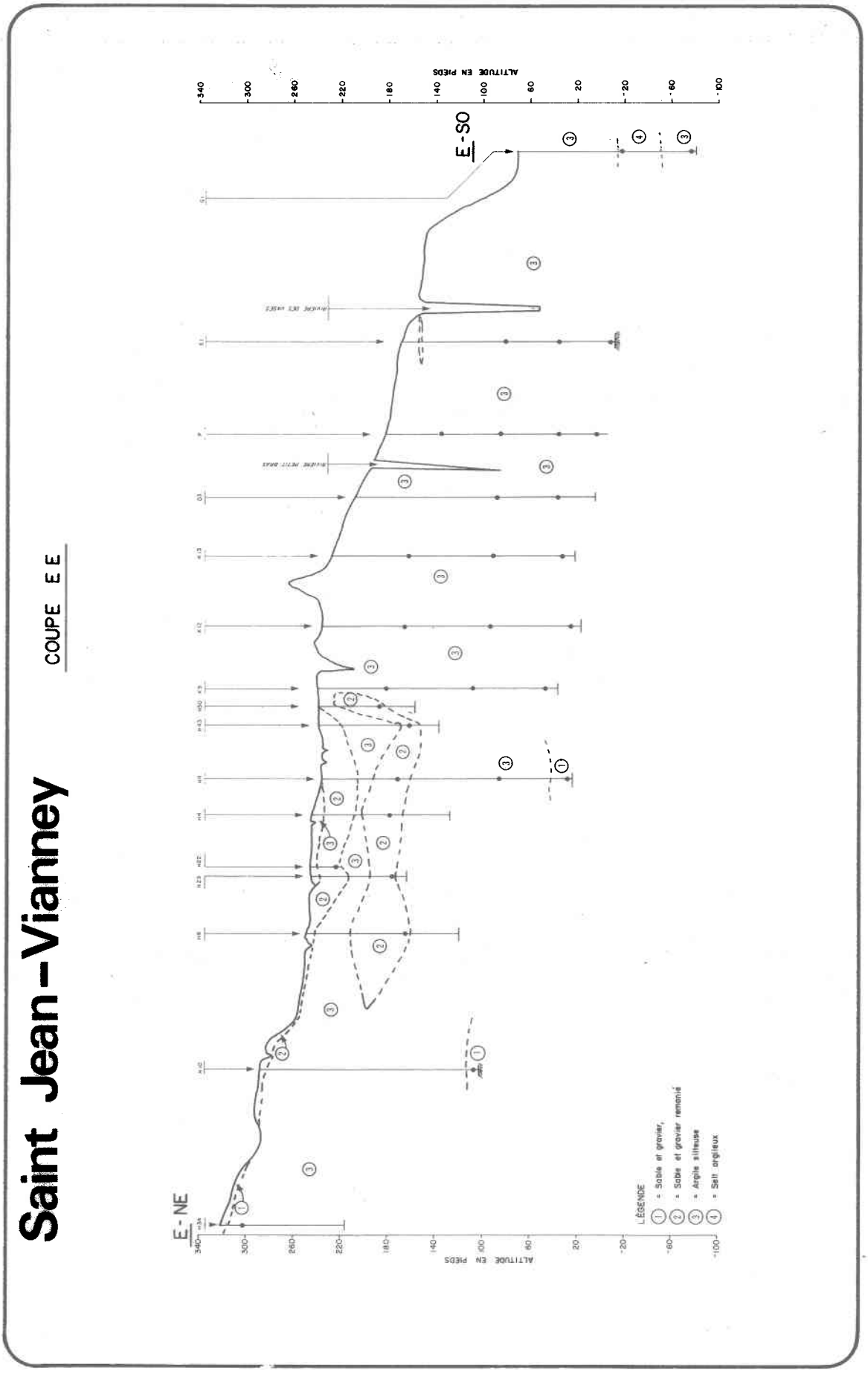


Figure 4.13. Stratigraphie de la coupe E - E.

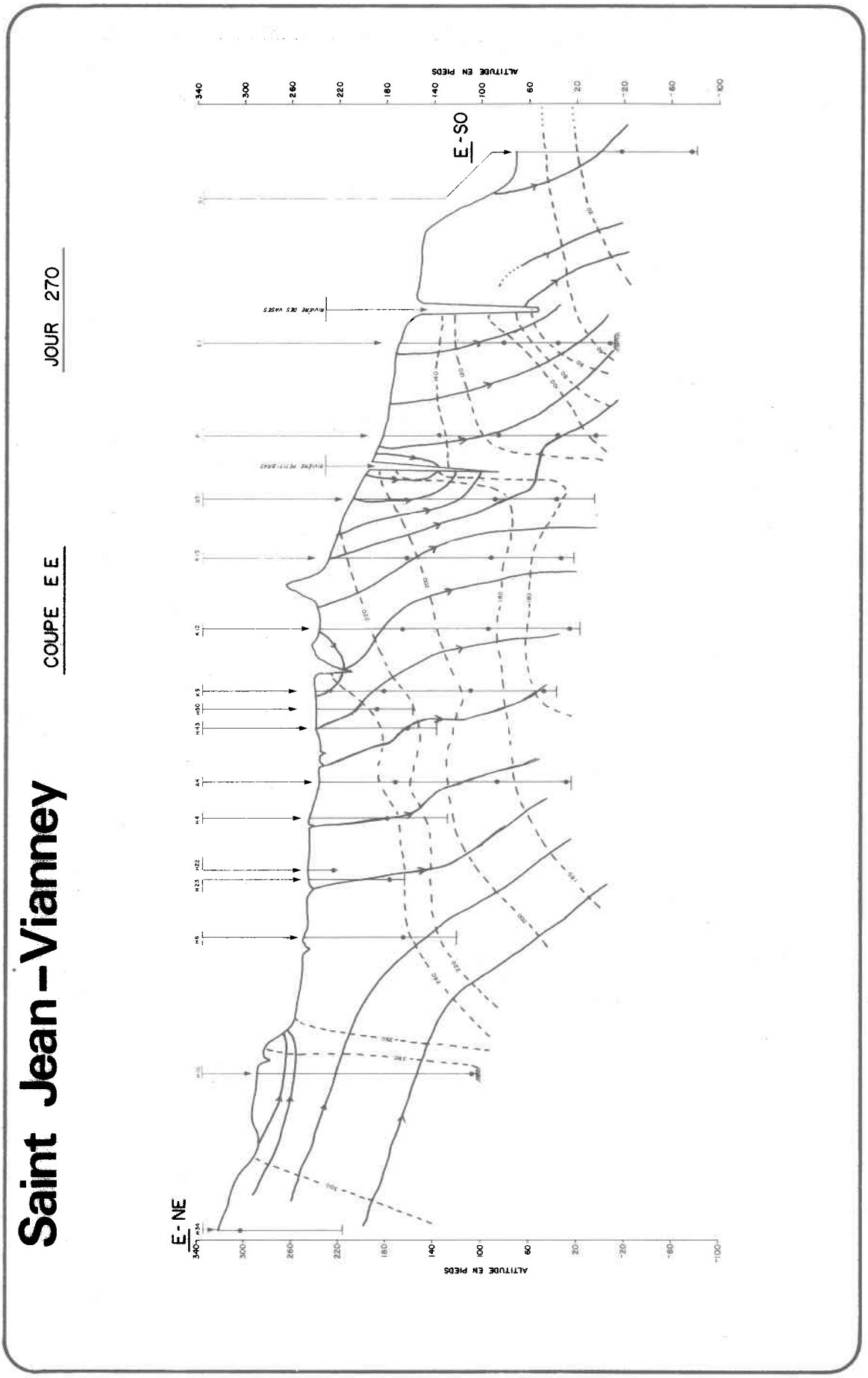


Figure 4.13.1. Stratigraphie de la coupe E - E équipotentielle au 20/3/72.

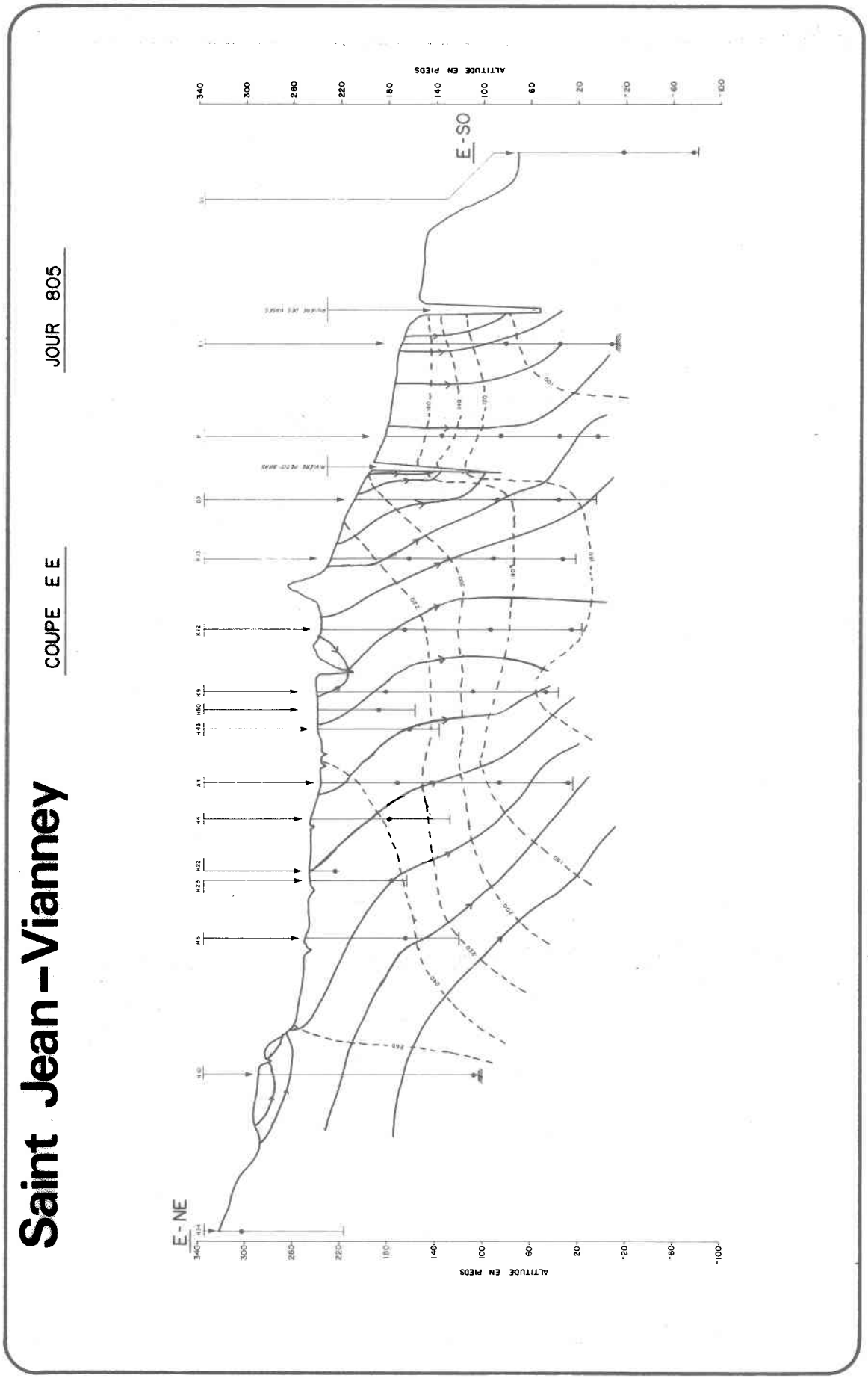


Figure 4.13.2. Stratigraphie de la coupe E - E équipotentielle au 10/9/73.

4.7 Rationalisation

Dans un but de rationalisation, il faut donc optimiser ce réseau de façon à ce qu'il nous donne le maximum d'informations pour un minimum de points d'observation, c'est-à-dire éliminer la redondance des mesures.

Lors des études qui ont suivi le glissement de mai 1971, on a essayé de déterminer les causes qui ont pu produire un tel évènement. De plus, on a laissé divers instruments (inclinomètres, piézomètres) dans le but de suivre l'évolution de cette région.

Toutefois, la mise sur pied d'un réseau piézométrique de surveillance n'a pas vraiment été mise au point. Donc notre réseau devra nous donner le maximum d'informations sur les zones pouvant influencer la stabilité régionale. Le choix des stations à conserver dans chacune des nappes et sur chaque coupe se fera selon le type de renseignement que chaque station ou groupe de stations pourra nous apporter.

4.7.1 Unité des tills ou graviers fluvio-glaciaires

Etant donné sa situation, cette nappe ne semble pas avoir d'influence sur la stabilité des argiles, sauf évidemment dans le phénomène du lessivage des argiles qui, dans notre cas, a déjà été effectué; on peut donc supposer que la mesure des niveaux piézométriques de cette nappe n'est pas nécessaire pour effectuer la surveillance de la stabilité du sol dans la région.

Toutefois on a remarqué que les piézomètres C-6-1, K-4-3 et K-2-3 montent continuellement; ils sont donc en charge. L'aquifère, à cet endroit, reçoit donc plus d'eau qu'il est capable d'en laisser passer, ceci

peut être dû à plusieurs facteurs tels que: diminution de la perméabilité, rétrécissement de l'aquifère, etc.

Il serait bon de garder ces trois piézomètres sous observation constante au cas où le phénomène suivant pourrait subvenir soit une inversion du gradient hydraulique suite à une trop grande élévation de la pression. Donc le gradient qui, au lieu d'être vers le bas, deviendrait alors vers le haut, ce qui pourrait créer des sous-pressions et par le fait même influencer la stabilité régionale.

4.7.2 Unité des sables et argile remaniés (Colluvions)

En se basant sur le tableau 4.4, on a réussi à déterminer quatre groupes de piézomètres qui semblent réagir de la même façon. On note également que le pizéomètre H-20 a des réactions qui peuvent être dues à des facteurs très localisés dont on ne devrait pas tenir compte dans un contexte plus régionalisé.

Dans la région de St-Jean Vianney, il a été reconnu que la présence de lentilles de sables fins complètement saturées d'eau, retenues par de minces barrières argileuses, a joué un rôle important lors du glissement de mai 1971. Il a d'ailleurs été décidé à la suite de ce rapport d'effectuer du drainage. C'est pourquoi il est nécessaire de surveiller les différents piézomètres qui sont dans cette zone.

Donc, dans un but de rationalisation, on pourrait conserver un ou des piézomètres contenus dans chacun de ces groupes (il serait possible de fusionner les groupes 1 et 2 étant donné qu'ils ont les mêmes réactions mais décalées de quelques jours).

Nappe située dans la poche de sable

Cette nappe est caractérisée par le fait qu'elle est située dans une poche de sable isolée au sein de l'argile remaniée. Ce processus s'est effectué lors de l'ancien glissement de terrain. D'ailleurs on peut la voir sur les coupes stratigraphiques E-E' (figure 4.13) et C-C' (figure 4.11). Cette zone est située à une profondeur variant de trante (30.0') pieds à soixante-quinze (75') pieds et s'étend au nord du cratère formé par le glissement de mai 1971. Elle est délimitée par les piézomètres H-6, H-7, H-43, K-21 et H-19.

On retrouve à cet endroit des conditions de nappe captive et les piézomètres qui réagissent de façon semblable ont été regroupés ensemble (tableau 4.5).

Etant donné l'importance que peut avoir la présence d'une telle poche de sable sur la stabilité régionale, il est donc nécessaire d'effectuer une surveillance de cette zone et donc de garder, pour chaque groupe, quelques piézomètres sous observation.

4.7.3 Fluctuations des piézomètres dans l'argile

Ici on a observé l'évolution et les réactions des piézomètres qui sont situés dans l'argile marine et que l'on retrouve sur les coupes qui ont des tendances générales bien marquées.

- Coupe A-A'

C-5-1, C-6-2 et K-9 : Pour tous ces piézomètres ou nids de piézomètres qui sont tous situés à la périphérie immédiate du récent glissement, on observe une augmentation continue de la pression avec le temps.

- Coupe B-B'

Certains piézomètres situés sur cette coupe présentent une évolution très peu orthodoxe. On note que K-12-1, K-12-2 et K-14-1 ont généralement tendance à monter tandis que K-11-2, K-11-3 et K-14-2 baissent continuellement. Il faut aussi remarquer que, dans cette région, le piézomètre K-15-2 descend alors que K-15-3, lui, remonte.

Le comportement de ces piézomètres est difficile à expliquer mais ces instruments sont situés au Nord-Est de la vallée du Petit-Bras et c'est dans cette zone que l'on a observé un décollement du terrain ayant une épaisseur de cinquante (50') pieds. Ce mouvement s'est effectué sur une distance de moins d'un pouce le long de cette vallée et les étranges comportements piézométriques peuvent être dus à cet évènement.

- Coupe E-E'

K-4, K-12, K-13 et P-3 ont tous une tendance générale à monter et sont situés dans le même groupe.

Si l'on examine à long terme l'évolution des gradients, on peut remarquer que le potentiel dans cette zone a tendance à augmenter.

- Coupe D-D'

K-13, K-16, K-20 et A-4-2: Ces piézomètres sont tous implantés autour du cratère (sauf A-4-2 qui est au fond de ce dernier) formé par le glissement de mai 1971 et expriment une tendance générale à la hausse.

Donc suite à cet évènement, il y a eu rééquilibre des pressions et ce phénomène se poursuit. Ceci est d'ailleurs confirmé par l'évolution

des équipotentielles qui augmentent avec le temps (voir profil).

4.8 Conclusions

Les piézomètres qui n'ont pas encore atteint leur stabilité déterminent donc des zones où les conditions hydrodynamiques peuvent changer avec le temps.

Dans l'optique de notre rationalisation, ce sont les facteurs qui peuvent influencer les conditions de stabilité régionale qu'il nous faut surveiller.

Un de ces phénomènes est la présence de poches de sable saturées d'eau qui, elles, ont eu une importance primordiale lors du glissement de St-Jean Vianney. Il est donc nécessaire de surveiller les piézomètres qui sont installés dans cette zone (tableau 4.5).

Les piézomètres qui n'ont pas atteint leur stabilité peuvent modifier les pressions hydrauliques et ainsi influencer la stabilité régionale et doivent être mis sous surveillance:

Tableau 4.2 Groupes 3 et 4

Tableau 4.6 Groupes 1 et 2.

Le fait de suivre l'évolution des schémas d'écoulement permettrait de connaître les modifications de ces derniers et ainsi déterminer les zones où pourraient se former des sous-pressions qui favoriseraient ainsi des conditions susceptibles de produire d'autres glissements. C'est pourquoi il serait bon de conserver quelques coupes (profils) dans ce but et d'y faire ainsi la surveillance des piézomètres qui y sont installés.

Les coupes à conserver seraient:

- Coupe A-A', qui est perpendiculaire à la vallée;
- Coupe E-E', qui est parallèle à l'axe longitudinal de la vallée;
- Coupe D-D', qui, elle, donne des informations sur la zone située au Nord-Est du cratère.

Le nombre de piézomètres à surveiller serait donc de 91. Toutefois, une réduction de piézomètres situés dans les poches de sable (tableau 4.5) est possible étant donné que quelques-uns semblent réagir de la même façon.

4.8.1 Résumé

- Coupe A-A' : H-30, H-12, H-44, H-45, K-8, K-9, C-6, C-5, C-4, C-3, C-2, C-1, H-43.
- Coupe E-E' : H-34, H-10, H-6, H-23, H-22, H-4, K-4, H-43, K-9, K-12, K-13, D-3, E-1.
- Coupe D-D' : A-1, A-2, A-3, K-20, A-4, K-16, K-13, K-18.
- Tableau : H-4, H-6, H-7, H-23, H-24, H-43, K-2, K-6, K-21, H-38, H-30, H-4-1.
- Montée : C-6, K-4, K-2, K-9, K-16, K-10, K-12, K-13, K-14, K-6, K-21, D-3, A-4, K-15, K-20, L-5, K-17.
- Descente : C-1, K-11, K-14, K-15, C-4, B-1, B-3, D-2, H-10.

Si on enlève ceux qui sont entrés deux fois ou plus et en considérant que l'on mesure le nombre de piézomètres que possède chaque forage,

on devra surveiller les forages suivants:

A-1, A-2, A-3, A-4, B-1, B-3, C-1, C-2, C-3, C-4, C-5, C-6, D-2, D-3, E-1, K-2, K-4, K-6, K-8, K-9, K-10, K-11, K-12, K-13, K-14, K-15, K-16, K-17, K-20, K-21, H-4, H-6, H-7, H-10, H-12, H-22, H-23, H-24, H-30, H-34, H-38, H-43, H-44, H-45, H-50,

ce qui fait en tout 46 forages.

CHAPITRE 5

APPROCHE STATISTIQUE

INTRODUCTION

L'étude du cas de St-Jean-Vianney comporte plusieurs objectifs précis et s'insère dans un contexte plus global de l'analyse des données. Les problèmes soulevés par une quantité imposante de données sont souvent d'ordre technique. En effet, à l'aide des méthodes analytiques décrites plus haut, il est possible d'étudier et de trier cette masse de données pour en tirer les principales caractéristiques et faire ressortir l'information désirée pour le problème considéré. Cependant, les moyens utilisés sont nombreux et demandent beaucoup de temps: graphiques, coupes du terrain, cartes isovaleurs, tableaux divers etc. Une part importante de l'information risque ainsi d'être masquée par l'abondance des procédés employés.

De plus, les études statistiques classiques (analyse de variance, étude de fréquences, corrélations, régressions etc.) sont des outils utiles mais leur utilisation demande aussi beaucoup de temps et est souvent soumise à des contraintes difficiles à respecter. Or ces méthodes fournissent souvent les preuves nécessaires à l'appui de certaines conclusions sur l'étude en cours.

L'utilité d'une méthode d'analyse globale et rapide de tout un ensemble de données apparaît donc d'une grande importance lorsque l'on

dispose d'une masse considérable de données et de temps limité pour mener à bien l'analyse de ces données. L'analyse factorielle fait partie de cette famille de méthodes de traitements qu'englobe l'analyse des données. C'est une méthode assez récente dérivée de l'analyse des tableaux de contingence dans la recherche des grands facteurs qui pouvaient influencés les réponses des gens aux différents questionnaires qui leur étaient soumis. On a simplement transposé le problème aux données liées à des phénomènes physiques.

L'analyse de données provenant d'un réseau piézométrique se prête très bien à ce type de traitement. Non seulement les liens entre les piézomètres sont le fruit d'une réalité physique mais l'évolution dans le temps de ces données dépend justement de certains facteurs (climatologiques ou autres) qui sont facilement identifiables. Comme l'interprétation de ces données ne réside en fait que dans la recherche et l'identification de ces facteurs et des liens qui existent dans la réalité, l'analyse factorielle se trouve pleinement justifiée pour l'étude de cas semblables.

Enfin, notre choix sur l'utilisation de l'analyse factorielle des correspondances (récemment développée par BENZECRI, 1973) plutôt que l'analyse factorielle en composantes principales, mieux connue depuis les années 60, repose sur les aspects particuliers des données disponibles et sur les possibilités accrues de cette première méthode sur la deuxième concernant l'interprétation. Nous verrons plus loin les détails de ces possibilités mais signalons tout de même que l'analyse en composantes principales risque de masquer certains phénomènes à cause des trop grandes différences numériques

observées dans l'ensemble des données (les mesures de niveau d'eau par rapport à la mer varient de quelques pieds à plusieurs centaines selon l'emplacement des piézomètres). De plus, cette dernière méthode ne permet pas l'analyse simultanée des données spatiales et temporelles contrairement à l'analyse des correspondances. Enfin, la rapidité et la simplicité de l'analyse factorielle des correspondances sont des atouts précieux dans ce genre d'étude et son utilisation nous apparaît justifiée.

5.1 L'analyse factorielle des correspondances

Aspects théoriques

L'analyse factorielle des correspondances est une méthode d'analyse des données qui se propose de fournir une représentation synthétique de vastes ensembles de valeurs numériques. C'est une des méthodes qui se rattachent à la statistique descriptive multidimensionnelle. Plus particulièrement, elle permet d'obtenir des descriptions de tableaux de dépendance (tableaux de contingence). En fait, nous l'employons pour décrire des tableaux de valeurs numériques positives et nous pouvons considérer cette technique comme un "algorithme de réduction de données qui fournit des images déformées et simplifiées de la réalité multidimensionnelle avec cependant des règles d'interprétation permettant de remonter aux structures réelles à partir des structures représentées". (Lebart L. et Fénélon J.P., 1973).

5.1.1 Les données

On considère des valeurs positives rangées dans un tableau (matrice) à n lignes et p colonnes.

$$\begin{array}{ccccc} k_{11} & \cdots & k_{1j} & \cdots & k_{1p} \\ | & & | & & | \\ | & & | & & | \\ k_{i1} & \cdots & k_{ij} & \cdots & k_{ip} \\ | & & | & & | \\ | & & | & & | \\ k_{m1} & \cdots & k_{nj} & \cdots & k_{np} \end{array}$$

Comme exemple de tableau (n x p), nous prenons le tableau de données piézométriques (137 x 32) précédemment construit. Les valeurs "k_{ij}" sont des hauteurs d'eau par rapport au niveau de la mer (données brutes) pour le piézomètre "i", à la date "j", on pourrait les transformer en soustrayant à chaque piézomètre le minimum de sa série de mesures dans le temps ou tout autre transformation jugée pertinente. Notons que lorsqu'on a affaire à des données négatives il existe certaines transformations pour se ramener à un tableau de valeurs positives.

On désire traiter ces données avec une approche probabiliste. Ainsi, posons

$$S = \sum_i \sum_j k_{ij}$$

"S" est la somme de toutes les valeurs contenues dans le tableau.

Si on divise chaque valeur "k_{ij}" par "S" on obtient un tableau (n x p) avec comme élément

$$p_{ij} = \frac{k_{ij}}{S}$$

et "p_{ij}" est une estimation de fréquence. En fait, "p_{ij}" est la probabilité empirique attachée à l'élément "k_{ij}", en d'autres termes, c'est la probalité d'obtenir la valeur "k_{ij}" dans notre tableau.

De plus, les quantités:

$$p_{i.} = \sum_j p_{ij} = \text{somme des } "p_{ij}" \text{ de la ligne } "i"$$

$$p_{.j} = \sum_i p_{ij} = \text{somme des } "p_{ij}" \text{ de la colonne } "j"$$

peuvent être interprétées en termes de fréquences marginales.

L'ensemble des "$p_{i.}$" (il y en a "n") est la distribution marginale des "lignes" (les piézomètres dans notre exemple) et l'ensemble des "$p_{.j}$" (il y en a "p") est la distribution marginale des "colonnes" (les dates dans notre exemple).

Ainsi, "$p_{i.}$" caractérise l'importance du piézomètre "i" et "$p_{.j}$" l'importance de la date "j". On appellera ces quantités le poids du piézomètre "i" ($p_{i.}$) et le poids de la date "j" ($p_{.j}$), dans notre analyse.

Comme on le constate, on parle de fréquences plutôt que de valeurs absolues. On désire donc une méthode qui permet de décrire les éventuelles proximités (relations, corrélations) existant entre les lignes et entre les colonnes de ce tableau de fréquences (relations entre formes, indépendamment des niveaux ou tailles), compte tenu des poids différents de ces lignes et de ces colonnes.

5.1.2 La méthode générale

Nous résumons ici les principaux aspects de la méthode générale de l'analyse factorielle qui englobe l'analyse en composantes principales et l'analyse des correspondances. Nous verrons plus loin en quoi ces deux dernières méthodes diffèrent.

Le tableau de valeur numérique (n x p) peut donner lieu à

deux représentations géométriques: dans l'espace "R^n", un nuage de "p" points dont les coordonnées sont les "n" composantes de Vol--Voj--Vop (où Voj est le vecteur colonne des "n" valeurs des piézomètres de la date "j"), ou bien, dans l'espace "R^p", un nuage de "n" points dont les coordonnées sont les "p" composantes de Vlo--Vio--Vno (où Vio est le vecteur ligne des "p" valeurs observées pour le piézomètre "i").

On a donc deux façons d'aborder le problème. Considérons la représentation "n" points dans "R^p". Nous cherchons à décrire la forme du nuage et sa position par rapport à l'origine dans un espace de dimension aussi faible que possible pour mieux visualiser et interpréter les données. On se pose le problème suivant: chercher la droite "f" passant par le centre de gravité, qui ajuste au mieux le nuage, ceci revient à chercher un axe sur lequel la somme des carrés des projections de nos "n" vecteurs Vio soit maximale. Soit U un vecteur unitaire porté par cette droite. Si on note

$$U = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_p \end{pmatrix} \qquad \text{et} \quad V = \begin{pmatrix} V_{10} \\ V_{20} \\ \vdots \\ Vno \end{pmatrix}$$

la projection de Vio sur U s'exprime par

$$\text{proj.}\ (Vio/U) = Vio\ U$$

d'où

$$\sum_{i=1}^{n} [\text{proj.}(Vio/U)]^2 = \sum_{i=}^{n} (VioU)'\,(VioU) = (VU)'\,(VU) = U'V'VU$$

où V' est la transposée de V.

Le problème est donc:

trouver U tel que: U'V'VU maximum sous la contrainte: U'U=1 car U est unitaire

ce qui revient à: $\frac{d}{dU}$ (U'V'VU - λ (U'U-1)) = 0

où λ est le multiplicateur de Lagrange

on obtient après dérivation:

$$V'VU - \lambda U = 0$$

soit

$$V'VU = \lambda U.$$

Ce qui nous prouve que U est vecteur propre de la matrice V' V (V est en fait notre tableau d'entrées p_{ij}) et que λ est la valeur propre associée à U.

Le maximum cherché est donc <u>la plus grande valeur propre</u> de V' V et on appellera l'axe de ce vecteur propre le <u>1er axe principal</u> ou axe d'inertie.

Si maintenant on projette les vecteurs initiaux Vio sur l'hyperplan orthogonal à cet axe, on a "n" nouveaux vecteurs et on peut se reposer le problème: i.e. chercher un axe sur lequel la somme des carrés des projections des n nouveaux vecteurs soit maximale. On montre de la même façon que la solution est le vecteur propre de la matrice V'V correspondant à la 2e plus grande valeur propre de V'V. On a alors trouvé le 2e axe principal, et ainsi de suite. Ainsi, sauf cas de dégénérescence (valeurs propres nulles), on obtient "n" axes orthogonaux dits axes principaux tels que la somme des carrés des projec-

tions sur ces axes des vecteurs Vio est maximale sur le 1er axe, puis sur le 2e axe etc.

On remarque de plus que la somme de toutes les valeurs propres $\sum_{i=1}^{p} \lambda_i$ est en fait la somme de toutes les projections des vecteurs Vio sur les axes principaux.

Et si l'on fait le rapport $\lambda_i / \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$ on obtient une valeur correspondante à une "part d'information expliquée" par le ie axe principal. Le premier axe expliquant la plus grande part et ainsi de suite.

Maintenant, on peut envisager le problème de l'autre façon, c'est-à-dire le nuage de p points dans R^n. En répétant la même démarche, on obtient des résultats analogues. Ainsi le 1er axe principal correspond au vecteur propre v associé à la plus grande valeur λ de la matrice V V' et ainsi de suite, (au lieu de V'V comme auparavant).

Si on cherche les relations qui peuvent exister entre les espaces R^p et R^n, on s'aperçoit rapidement que toute valeur propre non-nulle de la matrice VV' est aussi valeur propre de V'V et réciproquement et les vecteurs propres correspondants sont liés par les relations

$$U_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} \cdot V' v_i \quad i=1,m \qquad (5.1)$$

$$v_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} V \mu_i \quad i=1,m \qquad (5.2)$$

où m est le rang de V

Nous verrons plus loin l'utilité de ces relations lorsqu'il s'agira de connaître les représentations dans R^p et R^n et de passer facilement de l'une à l'autre.

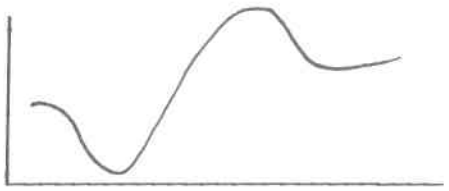
Ces résultats généraux étant vus, attardons nous aux particularités de l'analyse des correspondances, pour mettre en évidence ses avantages sur l'analyse en composantes principales par exemple. Cette méthode est peu appliquée en Amérique du Nord et ceci justifie qu'on l'explique de manière détaillée.

5.1.3 L'analyse des correspondances (BENZECRI, 1973)

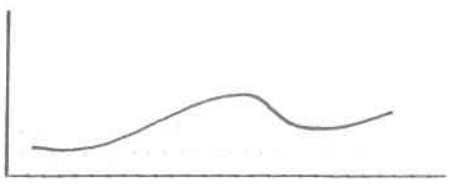
A - Les nuages de points:

Considérons la représentation de "n" points dans "R^p". Pour les fins de notre étude, nous désirons que les points ayant des "profils" semblables soient considérés comme voisins. En d'autres termes, nous ne désirons pas distinguer particulièrement les points dont les variations sont proportionnelles (c. à d. qui ont des comportements semblables). Ainsi, deux piézomètres ayant les profils suivant:

1.



2.



devront être confondus. Pour ce, nous divisons chaque coordonnés du point "i" par $(p_{i.})$. On aura donc "n" points dont les coordonnées sont:

$$\left(\frac{P_{ij}}{P_{i.}}\right), \quad j=i,\ldots,p$$

et le point "i" sera affecté de la masse "$p_{i.}$" (la fréquence conditionnelle). Cette particularité de la représentation en termes de fréquences est une caractéristique propre à l'analyse factorielle des correspondances qui se distingue ainsi de l'analyse en composantes principales. En réalité, ces points sont situés dans un hyper-plan de dimension (p-1). Notons que dans l'espace "R^n", nous construirions de même un nuage de "p" points, chaque point "j" ayant pour coordonnées:

$$\left(\frac{P_{ij}}{P_{.j}}\right), \quad i=1,\ldots,n$$

et étant affecté de la masse "$p_{.j}$". Et ces points seraient situés dans un hyper-plan de dimension (n-1).

B - La distance

Tout calcul de variance est basé sur la notion de distance. En effet, les calculs classiques de variance et covariance se basent sur la distance entre les points considérés et bien qu'on le mentionne rarement, cette distance se doit d'être définie et ses propriétés connues avant de l'appliquer.

En général, (en analyse des composantes principales, par exemple) on emploie la distance dite Euclidienne entre deux points "i" et "i'":

$$d^2(i,i') = \sum_{j=1}^{p} \left(\frac{p_{ij}}{p_{i.}} - \frac{p_{i'j}}{p_{i'.}} \right)^2$$

Cependant, cette formule fait apparaître la différence terme à terme des "p" éléments des profils de "i" et "i'", en donnant à ces "p" éléments le même poids. Or, si une de ces différences est très grande par rapport aux autres, elle jouera un rôle excessif dans la détermination des proximités. Pour atténuer ces disparités, nous considérons la distance pondérée suivante:

$$D^2(i,i') = \sum_{j=1}^{p} \frac{1}{p_{.j}} \left(\frac{p_{ij}}{p_{i.}} - \frac{p_{i'j}}{p_{i'.}} \right)^2$$

$D^2(i,i')$ est appelée distance distributionnelle entre "i" et "i'", ou "distance du X^2". De la même façon, on peut considérer dans "R^n" la distance distributionnelle entre 2 points "j" et "j'":

$$D^2(j,j') = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{p_{i.}} \left(\frac{p_{ij}}{p_{.j}} - \frac{p_{ij'}}{p_{.j'}} \right)^2$$

Cette distance a surtout l'avantage de vérifier "le principe d'équivalence distributionnelle" (i.e. on peut remplacer 2 points confondus affectés de poids différents par un seul point affecté de la somme de poids sans modifier l'analyse), c'est-à-dire que si deux points "i"

et "k" sont confondus dans "R^p" et si on les considère comme un seul point affecté de la somme des masses de "i" et "k", c'est-à-dire des fréquences marginales, alors les distances entre couples de points dans R^p et dans R^n sont inchangées (i.é. la distance "D^2" n'est pas modifiée et les nuages de points dans changés). Cette propriété assure une meilleure stabilité aux résultats.

C - Résolution du problème

Si on transforme à nouveau les coordonnées du point "i" de la façon suivante:

$$\frac{p_{ij}}{p_{i.}\sqrt{p_{.j}}} \quad , \quad j = 1,\ldots,p;$$

on s'apercoit que la distance euclidienne "$d^2(i,i')$ entre les points "i" et "i'" ainsi transformés est égale à la "distance du X^2, D^2 (i,i') entre les points "i" et "i" non transformés. Ceci facilitera beaucoup les calculs (en effet, il s'agit d'une simplification des calculs). Ainsi, pour trouver les axes principaux (axes factoriels) il s'agira de trouver les valeurs et vecteurs propres de la matrice: V = R'R (où R est la matrice d'entrée $\left(\frac{p_{ij}}{p_{i.}\sqrt{p.j}}\right)$ de la façon habituelle.

En fait, les entrées de la matrice à diagonaliser V (p x p), (matrice de covariance) sont:

$$Vjk = \sum_{i=1}^{n} \frac{p_{ij}\ p_{ik}}{p_{i.}\ \sqrt{p_{.j}\ p_{.k}}}$$

De même, dans R^n, la matrice W (n x n) = RR' à diagonaliser a comme entrée:

$$W_{ik} = \sum_{j=1}^{p} \frac{p_{ji}\ p_{jk}}{p_{j.}\ \sqrt{p_{.i}\ p_{.k}}}$$

et donne, comme on le sait, les mêmes valeurs propres que V = R'R et dont les vecteurs propres sont liés par une relation simple à ceux de W = RR'.

De plus, on sait que le pourcentage d'information expliquée par la valeur propre λq en pourcentage est:

$$\frac{100 \times \lambda q}{\sum_{q=1}^{p-1} \lambda q}$$

où

$\sum_{q=1}^{p-1} \lambda q$ = trace de la matrice V de dimension (n,p) moins la valeur 1 (λ=1 valeur triviale)

car dans R^p (ou R^n), on obtient la valeur propre $\lambda_o = 1$ correspondant à une dispersion nulle. On néglige donc cette valeur, ce qui explique que tous les points sont dans un hyper-plan de dimension (p-1) orthogonal à μ_o (vecteur propre correspondant à λ_o). Donc

$\sum_{q=1}^{p-1} \lambda q$ est la somme de toutes les valeurs propres de V sauf $\lambda_o = 1$.

D - Facteurs

On appelle facteur la projection d'un point "i" sur l'axe factoriel considérée. En fait, lorsqu'on projettera notre nuage de points sur un plan formé de 2 axes factoriels, les coordonnées des points sur ce plan sont les facteurs, c'est donc une notion de première importance qu'il faut connaître pour l'interprétation des graphiques de sorties.

C'est la position des points par rapport aux axes factoriels, donc les valeurs des facteurs, qui permettent l'interprétation de la signification physique des axes.

Ainsi, la projection du point "i" sur l'axe "q" notée "Fq (i)" est:

$$Fq\ (i) = \sum_{j=1}^{p} \frac{p_{ij}}{p_{i.}\sqrt{p_{.j}}}\ \mu_{jq}$$

où "μ_{jq}" est la j ième coordonnée du vecteur propre "μ_q" correspondant à la valeur propre "λ_q".

De plus, si nous cherchons des facteurs qui s'appliquent sur les données initiales $\frac{p_{ij}}{p_{i.}}$ (i.e. sans modification d'échelle), nous prendrons alors comme composante:

$$t_{jq} = \mu_{jq} / \sqrt{p_{.j}}$$

et "t" sera appelé facteur normalisé.

E - Relations entre R^p et R^n

Comme on l'a vu, il existe une relation entre les vecteurs propres (donc les axes principaux) de R^p et R^n. Voyons maintenant l'utilité de ces relations.

Dans R^p on a:

- μ_q : vecteur propre de R'R correspondant à la valeur propre "λ_q"
- $F_q(i)$: facteur du point "i" sur l'axe "q"
- t : facteur normalisé avec "t_{jq}" = $\dfrac{\mu_q}{\sqrt{p_{.j}}}$

note: t est un vecteur unitaire

Dans R^n on a:

- v_q : vecteur propre de RR', correspondant à la valeur propre "λ_q"
- $G_q(j)$: facteur du point "j" sur l'axe q
- w : facteur normalisé (vecteur unitaire) avec

$$w_{i_q} = \frac{v_{iq}}{\sqrt{p_{i.}}}$$

or, on a vu que: (relations 5.1 et 5.2)

$$\mu_q = \frac{1}{\sqrt{\lambda_q}} R' v_q$$

$$v_q = \frac{1}{\sqrt{\lambda_q}} R \mu_q$$

Si on développe les composantes de μ_q et de $R'v_q$, on s'aperçoit qu'elles sont identiques au facteur $\frac{1}{\sqrt{\lambda_q}}$ près. Or, μ_q est le vecteur propre associé à la valeur propre λ_q dans R^p et v_q est le vecteur propre associé à la valeur propre λ_q dans R^n. On voit donc la relation qui existe entre ces 2 espaces (symétrique).

On montre ainsi que:

$$F_q(i) = \sqrt{\lambda_q}\ W_{iq}$$

$$G_q(i) = \sqrt{\lambda_q}\ t_{jq}$$

et

$$F_q(i) = \frac{1}{\sqrt{\lambda_q}} \sum_{j=1}^{p} \frac{p_{ij}}{p_{i.}}\ G_q(j)$$

$$G_q(i) = \frac{1}{\sqrt{\lambda_q}} \sum_{i=1}^{n} \frac{p_{ij}}{p_{.j}}\ F_q(i)$$

Ces dernières relations traduisent en fait ce que l'on appelle "l'effet barycentrique au facteur $\frac{1}{\sqrt{\lambda_q}}$ près".

En effet, un point de R^p est barycentre (à $\frac{1}{\sqrt{\lambda_q}}$ près) du nuage de points de R^n et inversement et ce, pour chaque axe considéré.

En pratique, en raison des relations qui existent entre les facteurs de 2 espaces, il nous suffit de diagonaliser la plus petite des deux matrices carrées RR' et R'R pour connaître les représentations complètes dans R^p et R^n. Ceci est un avantage important en pratique.

De plus, dans R^p et dans R^n, on considère la projection des nuages sur un plan formé de 2 axes principaux (le 1er et le 2e axe par exemple), on obtient deux graphiques qu'il est possible de superposer en raison des relations (effet barycentrique du facteur $\frac{1}{\sqrt{\lambda_q}}$ près) qui existent entre les facteurs des 2 espaces, on verra plus loin la signification de la proximité d'un point de R^p et d'un groupe de points de R^n et vice-versa. D'après les relations ci-haut, on peut projeter directement sur le même graphique les 2 nuages de la façon suivante:

Prenons le plan P formé de l'axe 1 et 2 provenant de la matrice R'R donc de l'espace R^p. On projette sur ce plan les facteurs $F_q(i)$, plus exactement les facteurs $F_1(i)$ et $F_2(i)$, (les coordonnées des points i dans ce plan). Puis on fait de même avec les facteurs $G_1(j)$ et $G_2(j)$ des points j de R^n. On a donc un seul plan P avec tous les points i et j représentés. On sait que le calcul des distances entre les points i et j se fait à $\frac{1}{\sqrt{\lambda_q}}$ près (effet barycentrique) mais la représentation de l'ensemble demeure vraie (proximités, éloignements, positions respectives etc.).

Cette représentation de tous les points i et j sur un même plan P est particulière à l'AFC et confère à celle-ci un avantage marqué sur l'analyse en composantes principales qui ne permet pas une telle représentation sans déformation du nuage.

Notons enfin que si on prend un seul axe q et qu'on multiplie les coordonnées $G_q(i)$ des points j par $\sqrt{\lambda_q}$, tous les points i et j sont alors directement supperposables sur cet axe (i.e. le calcul des dis-

tances et la représentation globale sur cet axe se visualisent directement sans transformations). Mais cette représentation n'est en fait intéressante que dans certains cas très particuliers.

Nous venons de voir en gros l'approche de la méthode; si on désire plus de détails ou de précision concernant les aspects mathématiques, on consultera les travaux suivants: Benzecri (1973), Fontaine (1973) et Lebart et Fénelon (1971).

Pour terminer l'aspect théorique de l'analyse factorielle des correspondances notons quelques éléments qui seront utiles à l'interprétation.

F - Aides à l'interprétation

a) Reconstitution des données

Il est possible de reconstituer les valeurs initiales à partir des facteurs "F" et "G". En effet on a:

$$(R_{ij}) = \sum_q \sqrt{\lambda_q}\, v_{iq}\, \mu_{jq}$$

d'où:

$$p_{ij} = p_{i.}\, p_{.j} \left(1 + \sum_{q \geq 1} \frac{1}{\sqrt{\lambda_q}}\, F_q(i)\, G_q(j) \right)$$

c Cette reconstitution peut se faire à partir des premiers facteurs correspondant aux plus grandes valeurs propres (lorsque "q" est grand) ainsi, dans notre exemple on prendra les 5 premiers fac-

teurs (sur un total possible de 31). Ceci nous permet de juger de la qualité de la part d'information expliquée par ces facteurs.

b) Contribution

Nous calculerons, pour chaque point "i" et "j" apparaissant sur le graphique, deux contributions:

1. la contribution absolue qui exprime la part prise par un élément dans l'orientation d'un axe (i.e. dans l'inertie expliquée par cet axe). Pour la calculer on a:

$$\lambda_q = \sum_i F_q^2(i).p_{i.}$$

"$F_q^2(i)p_{i.}$" est la contribution absolue de l'élément "i" à la valeur propre "λ_q" (donc au q^e axe). La contribution absolue est donc reliée directement au carré du facteur de l'élément ($F_q^2(i)$) et à son poids ($p_{i.}$). On peut exprimer la contribution absolue de chaque élément "i" en pourcentage de la valeur propre "λ_q".

2. la contribution relative qui exprime le pourcentage de dispersion d'un élément expliqué par un facteur (donc un axe). Pour un axe donné c'est le rapport du facteur de l'élément sur sa distance au centre de gravité du nuage. En fait, c'est:

$$\frac{(\text{facteur})^2}{(\text{distance})^2} = \frac{F_q^2(i)}{\sum_q F_q^2(i)}$$

La contribution relative met donc en évidence l'importance d'un axe

pour un élément et la proximité du point i de l'axe q (ex: facteur ≙ distance). Nous verrons plus loin l'utilité de ces contributions lors de l'interprétation.

G - Eléments supplémantaires

Enfin, il est souvent utile de porter sur le graphique et d'étudier la position d'un élément supplémentaire sans pour cela lui donner un poids dans l'analyse. Cet élément est représenté sur les graphiques mais n'a aucun point dans l'analyse donc ne conditionne pas la position des axes principaux.

Les facteurs relatifs à cet élément (noté α) dans le nuage des points "i" sont donnés par:

$$F_q(\alpha) = \sum_j \frac{p_{\alpha j}}{p_{\alpha .}} \frac{G_q(j)}{\sqrt{\lambda_q}}$$

De même, pour un élément β dans le nuage des points "j" on a:

$$G_q(\beta) = \sum_i \frac{p_{i\beta}}{p_{.\beta}} \frac{F_q(i)}{\sqrt{\lambda_q}}$$

Enfin notons que dans l'AFC il n'y a pas lieu en général (comme c'est le cas en Analyse des Composantes principales) de faire de nouvelles rotations des axes factoriels (ex. VARIMAX ou autre) pour leur trouver une signification physique. En ce sens la souplesse de l'AFC permet une meilleure adaptation au phénomène étudié sans grandes modifications des données originales.

5.2 Possibilités de la méthode

Les axes factoriels dans R^p peuvent être considérés comme des "stations de mesures fictives" non corrélées ou indépendantes. On considérera un nombre d'axes suffisant pour expliquer un pourcentage de la variance totale acceptable, soit 75-90% de la variance totale. Et en les prenant 2 à 2, on projette le nuage de points sur ces sous-ensembles (sous-espaces qui, en fait, sont des plans) et on peut visualiser et interpréter le phénomène. En pratique, il suffit généralement de conserver 4 ou 5 axes car les valeurs propres sont extraites en ordre décroissant.

Dans un optique d'optimisation, il paraît logique de retenir les stations (points "i" ou piézomètres) les plus proches des premiers axes principaux puisque ces axes représentent le mieux le phénomène. Donc, les points proches des axes sont représentatifs de l'ensemble (forte valeur de contributions relatives pour l'axe considéré). Notons ici que le terme "proches" signifie plusieurs choses:

. en premier lieu, on parle de proximité sur le graphique (repérage visuel), on arrive au même résultat si on classe tous les points par ordre de facteurs car le graphique n'est que la visualisation de ce classement. Cependant, ceci n'assure pas forcément le même classement pour les contributions absolues;

. en second lieu, on cherche, parmi les points repérés visuellement, ceux dont la contribution relative à l'axe est la plus forte (i.e. ceux qui sont le mieux expliqués par l'axe), on obtient ainsi le ou les points les plus représentatifs pour l'axe considéré. De

plus, les points près les uns des autres sont des points qui ont des comportements semblables.

La représentation graphique finale mettra donc en évidence les liaisons entre stations et axes principaux (idem pour les dates auxquelles correspondent des comportements semblables). Cette représentation graphique comprend plusieurs plans formés des axes principaux pris 2 à 2 (en pratique, on retient les 4 ou 5 premiers axes principaux). Ces plans sont centrés en (0,0), point qui correspond au centre de gravité du nuage. Donc chaque axe possède une position dans le nuage de points basée sur un calcul de distance comme on l'a vu plus haut et qui passe évidemment par le centre de gravité du nuage.

Pour faciliter nos observations, on attribue un sens, une direction aux axes. Ceci nous permet de discerner les points de part et d'autre du centre de gravité (0,0). Cette différence est importante car cette opposition par rapport au centre de gravité permet de donner une signification physique à l'axe. En effet, le centre de gravité détermine souvent l'appartenance des points à un groupe plutôt qu'à un autre et les oppositions réflètent des comportements souvent complètement différents. Ainsi, on parle d'opposition sur un axe entre les points dont le facteur est positif (donc situés d'un côté du centre de gravité) et les points dont le facteur est négatif (situés de l'autre côté du centre de gravité). La grandeur de ces facteurs met en évidence l'importance des oppositions.

De plus, la visualisation simultanée des points "i" (variables) et "j" (observations) permet une étude sur les données tem-

porelles (i.e. trouver la période de mesure la plus représentative etc.) et sur les inter-relations entre variables et observations (par exemple si un groupe de stations est isolé avec un point observation, on pourrait dire que ces stations se distinguent des autres et ce, spécialement à tel moment de l'année (correspondant au temps du point "observation")).

Il est parfois possible de donner des noms aux axes. Pour ce, on considère les points dont les facteurs sur cet axe est élevée (en valeur absolue), on obtient ainsi deux groupes de points opposés sur cet axe (ceux dont le facteur est grand positif et ceux dont le facteur est grand négatif), comme on l'a vu plus haut. De ces deux groupes, on retient ceux qui ont la plus grande contribution absolue (i.e. ceux qui expliquent au mieux l'ace considéré). Ainsi, dans une étude piézométrique, il est possible qu'un axe serve de délimitation entre les piézomètres "calmes" et les piézomètres "agités" (i.e. nappes libres et captives par exemple) ou bien on notera une opposition entre les "tendances générales" des piézomètres, par exemple une tendance ascendante opposée à une tendance décroissante.

Enfin, l'analyse des correspondances permet de grouper les variables, c'est-à-dire de déterminer certaines familles de variables qui ont un comportement semblable, vis-à-vis des observations (i.e. fournissant la même information).

En résumé les buts de l'analyse factorielle des correspondances sont:

- identifier des groupes de variables (ex.: piézomètres) dont le comportement vis-à-vis des observations est semblable;

- identifier des groupes d'observations (ex.: dates) semblables;

- dégager l'existance des liaisons entre les groupes d'observations et les groupes de variables précédemment identifiés;

- caractériser les groupes de variables et d'observations par une ou plusieurs variables et observations représentatives de ces groupes;

- dégager les tendances qui caractérisent notre échantillon.

Notons qu'aucune hypothèse à priori n'est faite sur les données ou sur leur distribution, l'analyse ne tient compte que de la valeur même des chiffres pris en considération, la méthode est donc objective. L'interprétation des résultats en termes physiques ne dépend alors que de l'utilisateur et de son degré de connaissance du phénomène physique étudiée. Pour une meilleure interprétation on doit noter certaines grandes règles de procédure:

- l'observation des proximités entre variables et observations permet de grouper celles-ci;

- l'observation des oppositions sur les axes (facteurs) permet de caractériser et de dégager l'existence des tendances de notre échantillon;

- l'étude des premiers facteurs (du 1er au 3e axe en général)

nous révèlera les grandes oppositions entre variables et entre observations. Ces oppositions caractérisent souvent les grandes tendances de notre échantillon;

- l'étude des facteurs suivants mettra en évidence les nuances plus subtiles ou plus locales qui caractérisent un ou des sous-ensembles (groupes) à l'intérieur de notre échantillon;

- l'étude des relations entre les facteurs établira le lien physique essentiel entre tous les groupes identifiés de notre échantillon et ses tendances caractéristiques.

CHAPITRE 6

TRAITEMENTS STATISTIQUES ET INTERPRETATION

6.1 Préparation des données en vue de l'analyse factorielle des correspondances

Nous disposons d'un certain nombre de piezomètres (170) jugés satisfaisants pour études ultérieures et dont les mesures s'étendent irrégulièrement sur 817 jours. Comme on le sait, l'analyse factorielle des correspondances nécessite un tableau "complet" de nombres réels positifs. En effet, si le tableau de données brutes disponibles comprend certaines "cases vides" on doit procéder à une reconstitution de données (il existe certaines méthodes (ou formules) permettant de telles reconstitutions) afin de compléter le tableau. Cependant, ceci est soumis à des contraintes souvent difficiles à surmonter et dans notre cas, on préfère obtenir un tableau complet à partir des données disponibles directement.

Dans notre cas, il s'agit d'un tableau formé d'une part, des piezomètres à étudier (lignes du tableau) et d'autre part, des dates des relevés des piezomètres (colonnes du tableau).

Ainsi, si on dispose de 170 piezomètres relevés toutes les semaines pendant un an (52 semaines) on aura un tableau de 170 lignes et 52 colonnes. Pour obtenir un tableau complet, chaque piezomètre doit avoir une mesure correspondant à toutes les dates inscrites en colonnes (i.e. 52 mesures prises aux bonnes dates) ou inversement, à chaque date inscri-

te au tableau, on doit posséder une mesure pour tous les piezomètres inscrits en lignes (i.e. 170 mesures prises à cette date).

L'examen de l'ensemble des données disponibles nous a convaincu de l'impossibilité de traiter de cette façon les 170 piezomètres si on désire une période d'étude d'au moins un an. Notons que le désir d'obtenir une période d'étude d'au moins un an n'est pas un choix arbitraire. En effet, les fluctuations piezométriques sont en général intimement liées au régime des phénomènes naturels tels la climatologie et l'hydrologie. Ce régime, en effet, est soumis au cycle annuel de ces phénomènes. Et pour une meilleure interprétation des fluctuations piezométriques, l'étude doit s'effectuer en relation avec le cycle annuel. C'est pourquoi, afin de couvrir le cycle en son entier, nous désirons obtenir des mesures s'échelonnant sur au moins un an.

Le problème est donc d'étudier le maximum de piezomètres possibles sur une période de temps maximale. Le nombre de piezomètres étant, de toute façon, extrêmement grand pour la superficie de terrain, notre premier choix portera donc sur la période d'analyse qui est la contrainte majeure. Tout d'abord, on a dû éliminer rapidement les 200 premiers jours (du 1er juillet 1971 au 20 janvier 1972) les mesures n'ayant été prises que sur une cinquantaine de piezomètres situés très près les uns des autres et disposés autour de la région affaissée lors du glissement. La période allant de décembre 1972 à septembre 1973 (jours 500 à 800) n'est composée que de quelques mesures prises irrégulièrement sur quelques piezomètres ici et là et parsemée de "grands trous" de 2 ou 3 mois. Notre choix portera donc sur la période du 24 janvier 1972 au 18 novembre 1972, soit 10 mois environ, ce qui est très court, trop même, mais c'est

le seul choix possible dans les circonstances (si on désire conserver au moins une centaine de piezomètres pour l'analyse).

Concernant les piezomètres à étudier, nous devons éliminer tous ceux dont les relevés ne couvrent pas au moins la période choisie et ceux dont l'information est trop clairsemée dans l'année. A la suite de ce tri, il nous reste 137 piezomètres, soit un bloc encore imposant et suffisamment homogène pour l'étude que l'on veut en faire. Il est à noter que nous avons dû éliminer une vingtaine de piezomètres Gloetz, il nous était impossible de déterminer dans quel type de sol (sable, argile, etc.) sont implantés ces piezomètres, aucune coupe ou stratigraphie des puits n'étant disponible.

Enfin, nous devons déterminer certaines dates dans l'année pour obtenir notre tableau. On cherche donc un maximum de dates à intervalle régulier pour couvrir notre année de façon la plus uniforme possible. Pour un nombre suffisant (statistiquement valable) de mesures par piezomètres, l'idéal serait d'un relevé par semaine ou par 15 jours dans le cas qui nous concerne, mais comme les piezomètres ont été relevés à des temps différents, on cherche à déterminer une courte période (de 1 à 4 jours) pendant laquelle tous les piezomètres (137) ont été mesurés. Evidemment, ces périodes ne doivent pas être entrecoupées de fortes précipitations ou de fonte de neige de façon à supposer que toutes les mesures prises pendant une période donnée sont le reflet du même phénomène (i.e. on suppose que ces mesures sont prises en même temps le même jour; ceci permet une interpolation entre les dates). On obtient ainsi 32 périodes ou dates couvrant l'année 1972. Notre tableau de base pour l'analyse a donc comme dimensions, 137 lignes (les piezomètres) et 32 colonnes (les dates).

En conclusion, nous avons vérifié l'ensemble des données brutes qui étaient à notre disposition. Les principales conclusions sur ces données sont:

- le nombre imposant de piezomètres (184) couvrant la région immédiate du 2e glissement de terrain à St-Jean Vianney (mai 1971);
- la durée de la période de mesure (juillet 1971 à septembre 1973) trop courte pour les besoins et les objectifs d'une telle étude;
- les 3 campagnes menées sur le terrain sont incompatibles avec l'obtention d'un bloc de données homogènes et représentatives du phénomène;
- l'existence de nombreuses données douteuses suite à l'absence de contrôle sur la qualité des données;
- les données sont non concomitantes face aux objectifs précis que l'on désire atteindre;
- l'irrégularité de la fréquence d'échantillonnage qui rend ardue l'étude simultanée de plusieurs piezomètres à la fois.

Ces différentes remarques conduisent à une forte diminution des données validées sur lesquelles portent l'analyse. En conséquence, on a dû chercher parmi l'ensemble des données celles qui étaient compatibles avec le traitement envisagé. Le résultat de cette recherche nous a conduit au tableau (137 - 32) construit ci-haut.

6.2 Traitements

6.2.1 Données utilisées pour le traitement par l'analyse factorielle des correspondances

On a vu plus haut de quelle façon on est parvenu à obtenir un tableau d'analyse de 137 piezomètres avec 32 dates (couvrant une période

de 10 mois) par piezomètre. Nous verrons plus loin de quelle façon on est amené à rechercher un nombre maximum de piezomètres ayant 36 données (1 an complet) et, enfin, 67 mesures (1 an et 6 mois). De plus, tout au long de notre étude, on traitera les données brutes d'une part (hauteur d'eau par rapport au niveau de la mer) et les données notées "brutes-min" d'autre part obtenues en soustrayant, à chaque piezomètre, le minimum de sa série de mesures (32, 36 ou 67 mesures selon le cas).

Cette transformation sur les données brutes a pour but de minimiser les écarts entre les valeurs mesurées aux différents piezomètres pour éviter, dans certains cas, que les piezomètres dont les valeurs sont très éloignées de la moyenne de l'ensemble se voient accorder trop d'importance et se trouvent ainsi isolés du groupe en raison de cet écart trop marqué. Le phénomène s'en trouverait masqué et l'interprétation faussée. De plus, cette transformation diminue ces écarts sans fausser la signification physique des mesures et permet d'éviter l'apparition de valeurs négatives dans le tableau d'analyse, ce qui nous obligerait à procéder à de nouvelles transformations (translations) pour n'obtenir que des valeurs positives. Or, on doit éviter la multiplication de ces transformations qui, la métrique utilisée étant celle du X^2, risquent d'entraîner des difficultés concernant une déformation possible du nuage de points.

Enfin, on utilisera à l'occasion la transformation notée "brutes/min" obtenue de la même façon que "brutes-min" mais en divisant par le minimum au lieu de soustraire. Cette transformation nous permet de ramener toutes les données sur une échelle probabiliste (entre 0 et 1) tout en diminuant (en valeurs absolues) les écarts d'amplitude entre les piezomètres. On utilisera cette transformation surtout pour confirmer certaines

hypothèses et vérifier la stabilité des résultats obtenus avec les données brutes et brutes-min.

Notons qu'en règle générale, l'utilisation de plusieurs transformations est complémentaire et non contradictoire. Certaines d'entre elles permettent de mieux mettre en évidence certaines particularités.

6.2.2 Notion employée

Afin de ne pas surcharger les graphiques, on a établi une nouvelle codification (notation FACOR) des piezomètres de façon à n'avoir que 2 caractères (comprenant au moins une lettre) par identificateur (voir tableau 6.1). Pour identifier les dates, on utilise un chiffre (de 1 à 99) correspondant à l'ordre chronologique de la date dans la série. On trouve le détail de ces dates au tableau 6.2 pour les analyses avec 32 mesures, au tableau 6.3 pour celles avec 37 mesures et enfin, au tableau 6.4 pour celles de 67 dates.

6.2.3 Graphiques de sorties utilisés pour l'interprétation des résultats

En général, les 3 premiers axes ont un pourcentage cumulé d'explication variant de 70% à 90%. Bien que la reconstitution des données soit faite à l'aide des 5 premiers axes (cette opération est en fait un simple contrôle de la fiabilité et de la consistance de l'analyse), on utilisera toujours les 3 premiers axes pour les graphiques (pris 2 à 2, ceci nous donne 3 graphiques ou plans). Cependant, comme on le verra plus loin, nos conclusions porteront surtout sur le premier axe et ce, en raison de la grande part d'inertie expliquée par cet axe qui est prépondérant sur les autres (ce pourcentage d'inertie, en effet, varie suivant les cas de 30% à 70% pour le premier axe seulement) et aussi pour des raisons d'ordre

TABLEAU 6.1: Liste de tous les piezomètres

Piezo	Notation Facor	Piezo	Notation Facor	Piezo	Notation Facor	Piezo	Notation Facor
A-1-2	A 0	E-1-3	E 0	K-13-3	N 1	H-30	I 9
A-2-1	A 1	E-2-1	E 1	K-14-1	N 2	H-31	J 0
A-2-2	A 2	E-2-2	E 2	K-14-2	N 3	H-32	J 1
A-2-3	A 3	F-1-1	E 3	K-14-3	N 4	H-33	J 2
A-3-3	A 4	F-1-2	E 4	K-15-1	N 5	H-35	J 3
A-4-1	A 5	G-1-1	E 5	K-15-2	N 6	H-36	J 4
A-4-2	A 6	G-1-2	E 6	K-15-3	N 7	H-38	J 5
A-4-3	A 7	F-6-2	E 7	K-16-1	N 8	H-40	J 6
B-1-1	A 8	G-6-1	E 8	K-16-2	N 9	H-41	J 7
B-1-2	A 9	K-1-1	K 0	K-16-3	P 0	H-43	J 8
B-1-3	B 0	K-2-1	K 1	K-17-1	P 1	H-44	J 9
B-2-1	B 1	K-2-2	K 2	K-17-2	P 2	H-45	H A
B-2-2	B 2	K-2-3	K 3	K-18-1	P 3	H-46	H B
B-2-3	B 3	K-3-1	K 4	K-18-2	P 4	H-47	H C
B-3-1	B 4	K-3-2	K 5	K-19-1	P 5	H-48	H D
B-3-2	B 5	K-3-3	K 6	K-19-3	P 6	H-49	H E
B-3-3	B 6	K-4-1	K 7	K-20-1	P 7	H-50	H F
C-1-1	B 7	K-4-2	K 8	K-20-2	P 8		
C-1-2	B 8	K-4-3	K 9	K-21-1	P 9		
C-1-3	B 9	K-6-2	L 0	K-21-2	Q 1		
C-2-1	C 0	K-6-3	L 1	K-21-3	Q 2		
C-3-1	C 1	K-7-1	L 2	H-1	H 1		
C-3-2	C 2	K-7-2	L 3	H-2	H 2		
C-4-1	C 3	K-7-3	L 4	H-3	H 3		
C-4-2	C 4	K-8-1	L 5	H-4	H 4		
C-4-3	C 5	K-8-2	L 6	H-5	H 5		
C-4-4	C 6	K-8-3	L 7	H-6	H 6		
C-5-1	C 7	K-9-1	L 8	H-7	H 7		
C-5-2	C 8	K-9-2	L 9	H-8	H 8		
C-6-1	C 9	K-9-3	M 0	H-9	H 9		
C-6-2	D 0	K-10-1	M 1	H-10	H 0		
D-1-1	D 1	K-10-2	M 2	H-11	I 0		
D-1-2	D 2	K-10-3	M 3	H-18	I 1		
D-2-1	D 3	K-11-2	M 4	H-20	I 2		
D-2-2	D 4	K-11-3	M 5	H-21	I 3		
D-2-3	D 5	K-12-1	M 6	H-22	I 4		
D-3-1	D 6	K-12-2	M 7	H-23	I 5		
D-3-2	D 7	K-12-3	M 8	H-24	I 6		
E-1-1	D 8	K-13-1	M 9	H-27	I 7		
E-1-2	D 9	K-13-2	N 0	H-29	I 8		

TABLEAU 6.2: Liste des dates (étude avec 32 mesures)

Date	Notation Facor
28-01-72	1
11-02-72	2
21-02-72	3
16-03-72	4
27-03-72	5
14-04-72	6
20-04-72	7
26-04-72	8
06-05-72	9
11-05-72	10
15-05-72	11
19-05-72	12
25-05-72	13
07-06-72	14
15-06-72	15
24-06-72	16
06-07-72	17
18-07-72	18
25-07-72	19
03-08-72	20
09-08-72	21
16-08-72	22
23-08-72	23
04-09-72	24
20-09-72	25
04-10-72	26
11-10-72	27
18-10-72	28
25-10-72	29
01-11-72	30
08-11-72	31
15-11-72	32

TABLEAU 6.3: Liste des dates (étude avec 36 mesures)

Date	Notation Facor
23-11-71	1
08-12-71	2
21-12-71	3
06-01-72	4
28-01-72	5
11-02-72	6
21-02-72	7
16-03-72	8
27-03-72	9
14-04-72	10
20-04-72	11
26-04-72	12
06-05-72	13
11-05-72	14
15-05-72	15
19-05-72	16
25-05-72	17
07-06-72	18
15-06-72	19
24-06-72	20
06-07-72	21
18-07-72	22
25-07-72	23
03-08-72	24
09-08-72	25
16-08-72	26
23-08-72	27
04-09-72	28
20-09-72	29
04-10-72	30
11-10-72	31
18-10-72	32
25-10-72	33
01-11-72	34
08-11-72	35
15-11-72	36

TABLEAU 6.4: Liste des dates (étude avec 67 mesures)

Date	Notation Facor	Date	Notation Facor
02-08-71	1	23-04-72	35
09-08-71	2	28-04-72	36
18-08-71	3	06-05-72	37
25-08-71	4	12-05-72	38
01-09-71	5	19-05-72	39
08-09-71	6	25-05-72	40
16-09-71	7	29-05-72	41
22-09-71	8	06-06-72	42
20-09-71	9	15-06-72	43
08-10-71	10	19-06-72	44
14-10-71	11	26-09-72	45
20-10-71	12	03-07-72	46
27-10-71	13	10-07-72	47
03-11-71	14	17-07-72	48
11-11-71	15	24-07-72	49
18-11-71	16	31-07-72	50
26-11-71	17	04-08-72	51
03-12-71	18	09-08-72	52
10-12-71	19	14-08-72	53
12-12-71	20	21-08-72	54
21-12-71	21	28-08-72	55
04-01-72	22	04-09-72	56
10-01-72	23	11-09-72	57
18-01-72	24	18-09-72	58
31-01-72	25	25-09-72	59
11-02-72	26	02-10-72	60
18-02-72	27	09-10-72	61
24-02-72	28	20-10-72	62
03-03-72	29	30-10-72	63
24-03-72	30	06-11-72	64
30-03-72	31	13-11-72	65
05-04-72	32	20-11-72	66
12-04-72	33	11-12-72	67
17-04-72	34		

physique dont nous discuterons plus loin.

6.2.4 Analyses effectuées

Nous avons traité les données à l'aide du programme de calcul FACOR (Rapport interne no 11, INRS-EAU). On obtient ainsi tous les résultats désirés sous forme de tableaux (facteurs, contributions, poids, distances, etc.) et sous forme de graphiques (projection du nuage sur un plan formé de 2 axes factoriels). Dans nos analyses, nous avons retenu tous les résultats concernant les 3 premiers axes (tableaux et graphiques). Pour faciliter et simplifier l'exposé qui suit, nous avons conservé les graphiques les plus significatifs auxquels nous référons pour l'interprétation des différentes analyses effectuées à l'aide de FACOR.

Nous résumons ici les différentes analyses effectuées ainsi que les résultats qui ont été retenus dans le cadre de notre étude:

- Analyse des données brutes de 132 piezomètres sur 10 mois (32 dates)

  Résultats retenus:

  - Plan formé des axes 1 et 2: figure 6.1

- Analyse des données "brutes-min" de 130 piezomètres sur 10 mois (32 dates):

  Résultats retenus:

  - Plan formé des axes 1 et 2: figure 6.2
  - Plan formé des axes 1 et 3: figure 6.6
  - Plan formé des axes 2 et 3: figure 6.7

- Analyse des données brutes de 125 piezomètres sur 10 mois (32 dates):

  Résultats retenus:

  - Plan formé des axes 1 et 2: figure 6.3
  - Plan formé des axes 1 et 3: figure 6.10
  - Plan formé des axes 2 et 3: figure 6.11

- Analyse des données brutes de 48 piezomètres sur 12 mois (30 dates):

  Résultats retenus:

  - Plan formé des axes 1 et 2: figure 6.4

- Analyse des données brutes de 35 piezomètres sur 18 mois (67 dates):

  Résultats retenus:

  - Plan formé des axes 1 et 2: figure 6.5

- Analyse des données "brutes/min" de 125 piezomètres sur 10 mois (32 dates):

  Résultats retenus:

  - Plan formé des axes 1 et 2: figure 6.8

On retrouve le détail des listes de piezomètres et de dates sous forme de tableaux de même que certains résultats retenus concernant les contributions absolues et relatives issues des différentes analyses.

6.3 Interprétation

6.3.1 Résumé de l'approche

Pour interpréter les différentes analyses décrites plus haut, nous adopterons l'approche qui suit:

Premiers essais:

Cette partie a pour buts:

- de prendre contact avec la méthode et le programme FACOR;
- de dégager les caractéristiques générales de l'ensemble des données et d'identifier les données aberrantes n'ayant pas été éliminées;
- d'adopter une procédure précise concernant les cas particuliers qui apparaissent en utilisant FACOR (graphiques illisibles, phénomène masqué, etc.).

Etude des dates:

Cette partie a pour buts:

- l'étude complète des dates indépendamment des piezomètres;
- l'étude des variations cycliques des niveaux piezométriques à St-Jean Vianney
- établir les bases à l'aide desquelles on pourrait suggérer une fréquence de mesures des piezomètres pour ce genre d'études.

Etude des piezomètres:

Cette partie a pour buts:

- l'étude complète des piezomètres indépendamment des dates;
- la détermination des tendances générales de l'échantillon;
- le regroupement des piezomètres à l'aide de FACOR;
- justifier l'arrêt ou la reprise des études à St-Jean Vianney et, dans ce dernier cas, déterminer des critères pour le choix des piezomètres à conserver.

6.3.2 Premiers essais

Objectif: prise de contact avec la méthode et le programme FACOR et identification des données aberrantes non encore éliminées.

Moyens utilisés: passages successifs à l'aide de FACOR des données brutes, brutes-min et brutes/min provenant du tableau de 137 piezomètres et 32 dates précédemment construit.

Résultats: les résultats obtenus nous ont permis de repérer rapidement (repérage visuel sur les graphiques de sorties) certaines données fausses ou aberrantes qui subsistaient toujours même après plusieurs vérifications. Ainsi, plusieurs essais furent nécessaires pour s'assurer de la fiabilité de notre échantillon (le tableau 137 x 32) et de ce fait, nous nous sommes rapidement familiarisés avec le fonctionnement et les possibilités de la méthode d'AFC et du programme FACOR.

Objectif: dégager les caractéristiques générales de l'échantillon et adopter une procédure concernant les cas spéciaux.

Moyens utilisés et résultats: les premiers résultats sur les données brutes de 137 piezomètres et 32 dates nous ont permis de repérer certains piezomètres dont les écarts par rapport à la moyenne de l'ensemble sont tels que même pondérés, ils se détachent nettement du groupe et de ce fait, masquent complètement le phénomène sur

les graphiques de sorties. En fait, ces écarts sont significatifs soit d'un comportement très spécial explicable, soit d'une anomalie inexplicable. Dans de tels cas, la procédure adoptée fut celle-ci:

- on porte ces points en "points supplémentaires" i.e. on leur retire tout poids dans l'analyse tout en les laissant apparaître sur les graphiques;
- ou bien, si les différences au niveau des graphiques persistent, on les retire complètement pour poursuivre l'analyse sur les points restants.

Cette dernière procédure semble contraire aux objectifs que l'on poursuit, c'est-à-dire d'étudier l'ensemble comme un tout et d'en déduire les interrelations entre les composantes de notre tableau. Mais en fait, connaître les raisons du retrait de certains points est souvent préférable à poursuivre l'étude d'un phénomène masqué par ces points. Ceci n'entre pas en conflit avec nos objectifs et de plus, il est heureux de constater que la méthode d'analyse ne fait que "photographier" ces différences et que c'est à l'utilisateur que revient la dernière interprétation.

Résultats de l'analyse des données brutes (137 piezomètres et 32 dates): nous avons pu identifier ainsi 11 piezomètres: A1, D8, E5, E6, E7, E8, H1, H2, H3, D1, D2 (notation FACOR). Et la raison en est bien simple, à ces endroits, la nappe est à peine plus élevée que le niveau de la mer et les valeurs mesurées sont très en-deçà de la moyenne

du groupe.

- De plus, les piezomètres D1, D2, H1, H2 et H3 sont situés à l'extérieur de la zone d'étude proprement dite (soit la zone de la coulée de mai 1971) et très près de la rivière Saguenay. Ils sont de moindre importance dans notre étude; nous les supprimerons donc.
- Tel n'est pas le cas de A1, D8, E5, E6, E7 et E8. Ils sont situés dans la zone critique et nous aimerions les conserver pour les études en données "brutes-min" (où ces écarts disparaissent) et les supprimer lors des études en données brutes et "brutes/min" (où le phénomène est masqué par leur présence).
- Nous retirons complètement le piezomètre A1 dont le comportement nous est apparu aberrant et le piezomètre A5 qui est implanté dans le roc et par conséquent, ne mesure rien de représentatif.

Nous avons un exemple de graphique "masqué" et difficile à lire à la figure 6.1 où les piezomètres A1, D8, E5, E6, E7 et E8 sont vraiment isolés. (Il s'agit d'une analyse de données brutes de 132 piezomètres et 32 dates).

Nous ajustons donc notre échantillon comme suit:

- Pour les analyses en données "brutes-min", nous utiliserons 130 piezomètres, les piezomètres A1, A5, D1, D2, H1, H2 et H3 étant exclus de la liste du tableau 6.1.

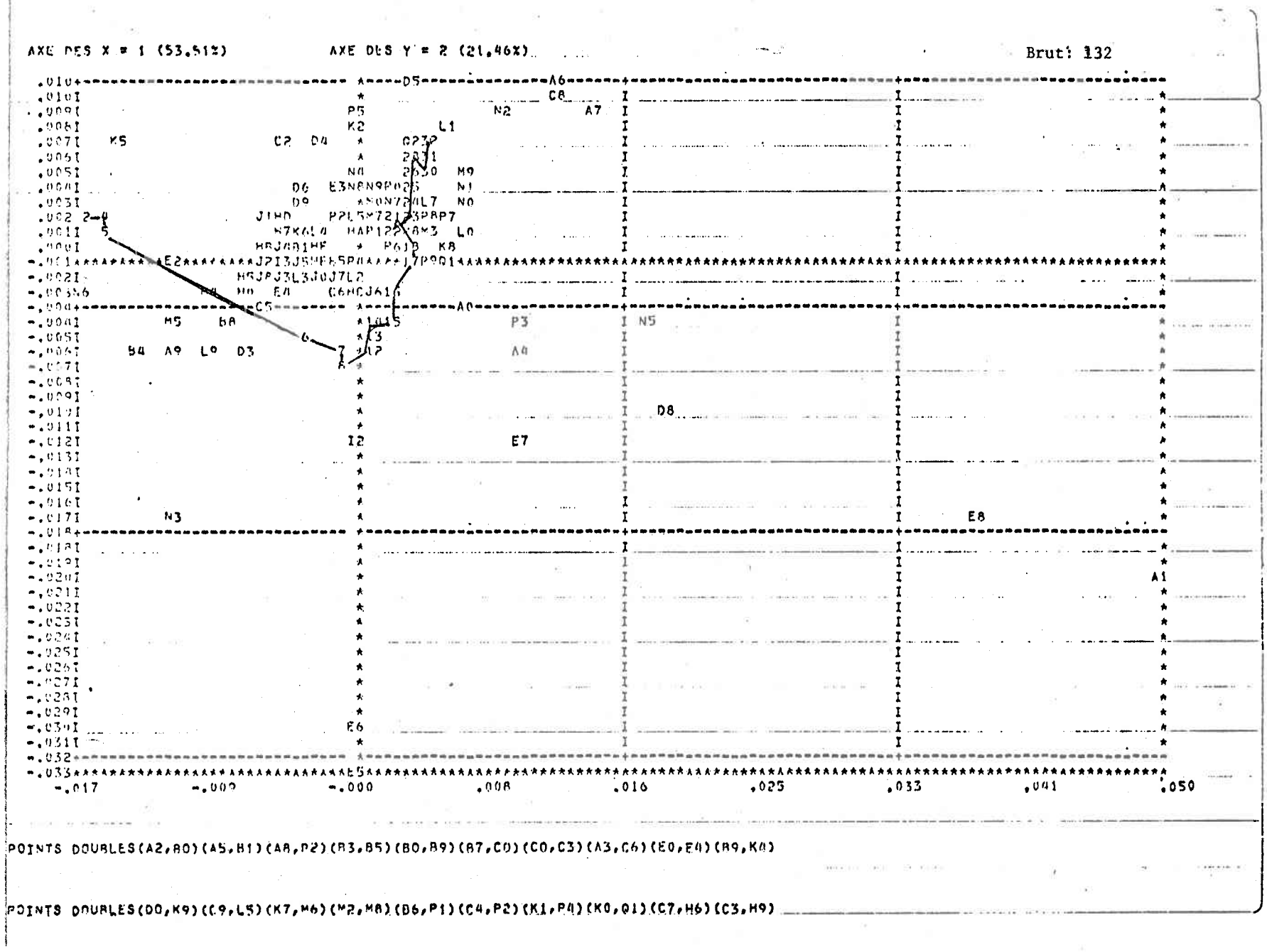


Figure 6.1. Plan 1-2; 132 piézomètres, 32 dates. Données brutes.

- Pour les analyses en données brutes et "brutes/min", nous utiliserons 125 piezomètres, les 11 piezomètres repérés plus haut et le piezomètre A5 étant retirés du tableau 6.1.

6.3.3 Etude des dates

Cette étude sur les dates se divise en 4 étapes principales:

- une première étape concernant l'aspect général des résultats et les premières constatations à partir surtout du 1er axe de l'analyse factorielle des correspondances;
- la seconde étape portera surtout sur l'étude du phénomène cyclique (cycle annuel) de la piezométrie à St-Jean Vianney;
- la troisième étape sert de complément à l'étude du phénomène cyclique mais en se basant sur des analyses de données supplémentaires (période d'étude plus longue);
- la quatrième et dernière étape traite surtout des aspects plus particuliers et des études plus fines basés sur l'analyse des résultats concernant les 2e et 3e axes de l'analyse factorielle des correspondances.

A) 1ère étape

Objectif: étude des dates indépendamment des piezomètres.

Moyens utilisés: analyse des données brutes et "brutes-min" (125 ou 130 piezomètres selon le cas et 32 dates, période de 10 mois).

Résultats: la première constatation que l'on fait est la disposition en forme de "V" des dates et ce, autant pour

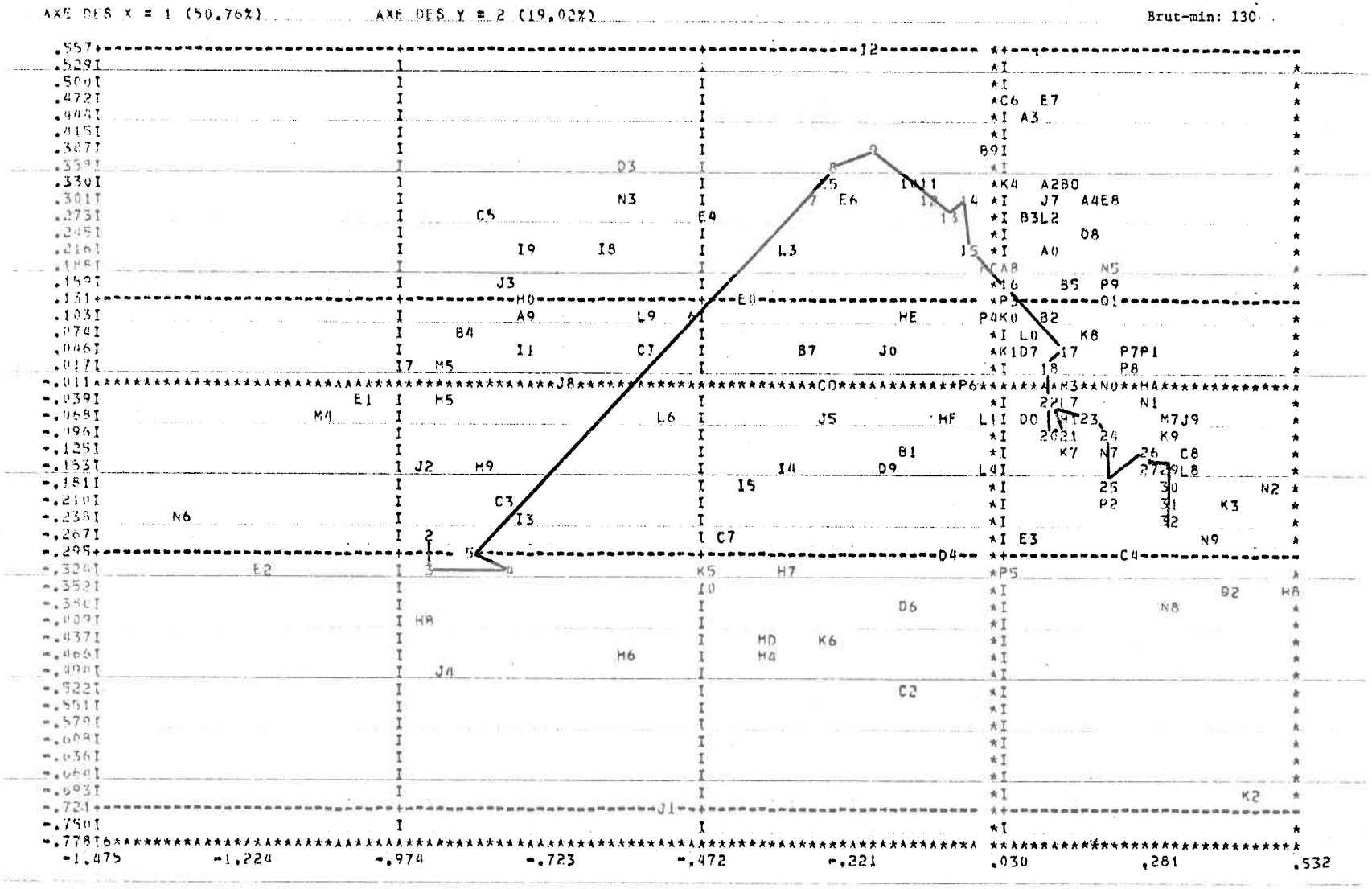
l'analyse des données brutes (figure 6.3) que celle des données "brutes-min" (figure 6.2). Nous nous attarderons donc sur ce fait en premier lieu.

Sur le premier axe, on s'aperçoit que les dates sont alignées selon leur ordre chronologique. Ceci montre bien que la structure du phénomène est liée au temps. Ainsi, chaque date est fortement conditionnée par la date qui la précède et qui la suit immédiatement, ce qui confirme l'aspect physique des fluctuations piezométriques.

Si maintenant on porte notre attention sur les proximités et les oppositions entre les dates, on peut mettre en évidence les points suivants:

- le regroupement des points 1 à 5 (28 janvier 1972 au 27 mars 1972), période qui correspond à l'hiver avec une abondante couverture de neige;
- la date 6 (14 avril 1972) correspond à la fonte des neiges et se détache nettement des autres;
- la période d'été s'étend du point 9 à 24 (du 6 mai 1972 au 4 septembre 1972) et suit une courbe régulière;
- on retrouve l'automne (points 25 à 32, 20 septembre 1972 au 15 novembre 1972) regroupé à l'une des extrémités du "V".

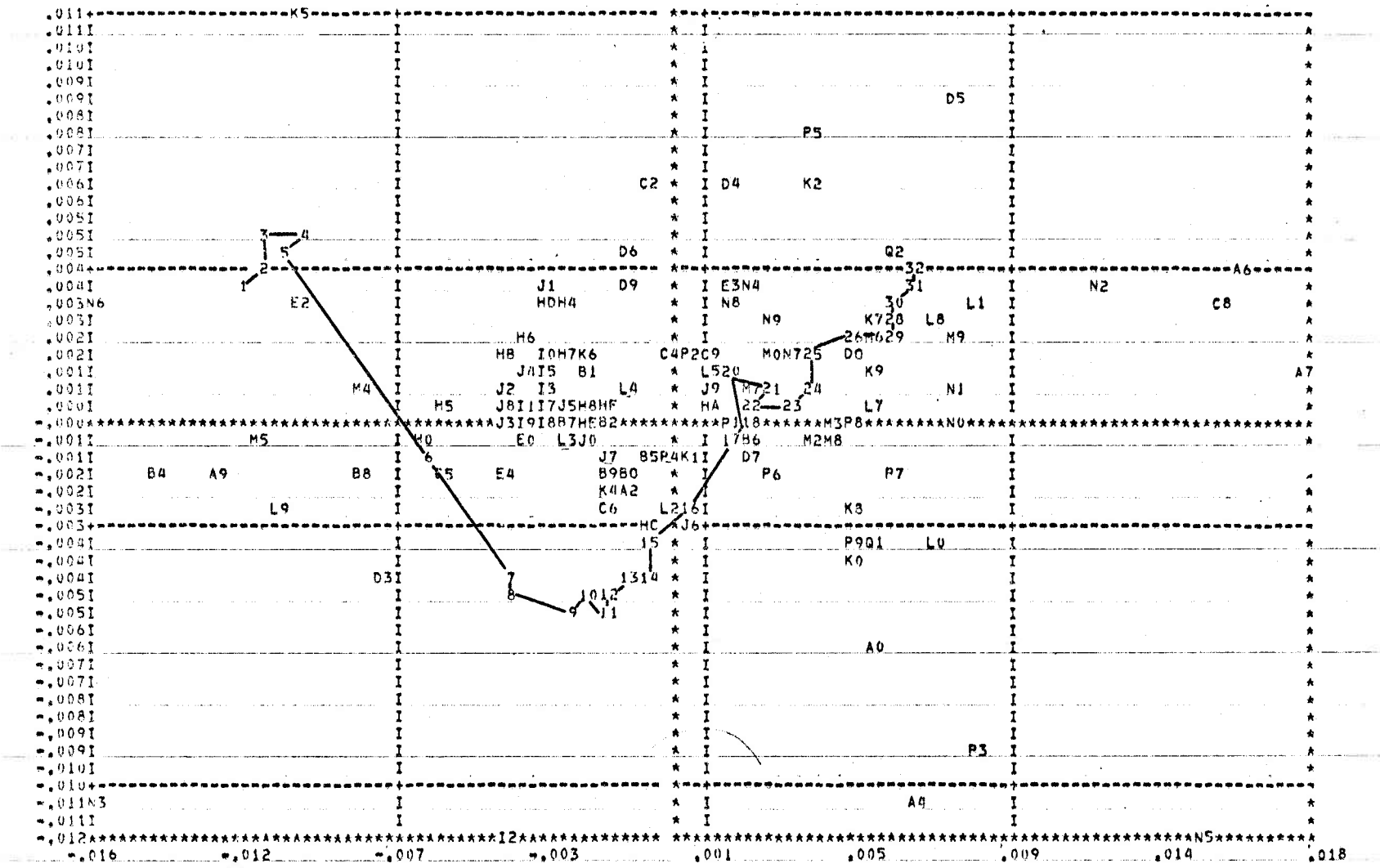
En résumé, on comprend assez bien la disposition de ces points. Cependant, on remarque la nette opposition



POINTS DOUBLES(D5,E3)(A7,L7)(N4,N8)(M8,P1)(B6,P7)(B8,J3)(J6,E8)(1, 2)(M2,18)(L5,20)

POINTS DOUBLES(N9,21)(19,22)(A6,26)(M6,27)(P0,28)(P8,29)(M0,30)(C9,31)(
VALEURS EXTREMES -1.47539 .55206
VALEURS EXTREMES -.77805 .58558

Figure 6.2. Plan 1-2; 130 piézomètres, 32 dates. Données brutes-min.



POINTS DOUBLES(A3,K4)(C7,I0)(E1,I1)(I4,I5)(C3,I7)(C0,I8)(L6,J2)(CI,J3)(H9,J5)(B3,J7)

POINTS DOUBLES(M1,J9)(I6,H8)(A8,HE)(19,22)(P0,25)(27,29)(K3,30)(
VALEURS EXTREMES -.01592 .01789
VALEURS EXTREMES -.01159 .01164

Figure 6.3. Plan 1-2; 125 piézomètres, 32 dates. Données brutes.

entre l'hiver et l'automne (les 2 extrémités du "V") et la grande similitude des points situés entre la fin du printemps et le début de l'été (au sommet du "V") qui de plus représente l'effet moyen de notre ensemble (vu leur disposition au sommet du "V") (MARCOTORCHINO, J.F.)

Nous avons donc pu grouper certaines dates et remarquer certaines oppositions qui demandent un approfondissement.

B) 2e étape

Objectif: étude du phénomène cyclique de la piezométrie à St-Jean Vianney.

Moyens utilisés: recherche et identification d'une forme cyclique dans les résultats graphiques des analyses sur une période de 10 mois. Etude restreinte au plan 1-2.

Résultats: Après étude des figures 6.2 (analyse sur données "brutes-min", 130 piezomètres, 32 dates) et 6.3 (analyse sur données brutes, 125 piezomètres, 32 dates), on remarque l'opposition entre l'hiver et l'automne qui nous surprend quelque peu. En effet, il serait logique de croire que les dates ont tendance à "boucler" pour former un cycle (annuel dans notre cas). Or ce n'est pas le cas, et qui plus est, celles qui devraient se rapprocher s'éloignent de plus en plus (le point 1 (28 janvier 1972) et le point 32 (15 novembre 1972)).

Cette constatation nous porte à croire que les nappes sont soumises à une modification au cours de cette période d'analyse et que les mesures ont été effectuées pendant une période de transition entre deux équilibres. En effet, nous devons garder à l'esprit que la période considérée (1972) suit presqu'immédiatement le dernier glissement de terrain (mai 1971) et que le milieu, très bouleversé à la suite de ce sinistre, tend vers un nouvel équilibre et ceci peut être très long, surtout si la région est très argileuse comme à St-Jean Vianney.

Mais avant d'approfondir ce nouvel aspect du problème, nous devons nous assurer du bien-fondé de nos remarques. Ainsi, notre étude ne porte que sur 10 mois de données, ce qui est beaucoup trop peu pour tirer des conclusions solides et valides sur cet état transitoire. Nous essaierons donc, si possible, d'étendre notre période d'analyse car nous disposons de données s'échelonnant de 1971 à 1973 inclusivement. Pour ce, nous avons dû nous résigner à ignorer près de 50% des piezomètres, vu l'impossibilité d'obtenir des données prises en même temps et qu'en fait, plusieurs piezomètres n'ont été relevés que sur une période très courte (12 mois au plus) et que plusieurs autres ne possèdent de relevés qu'à tous les 1 ou 2 mois en 1971 et 1973.

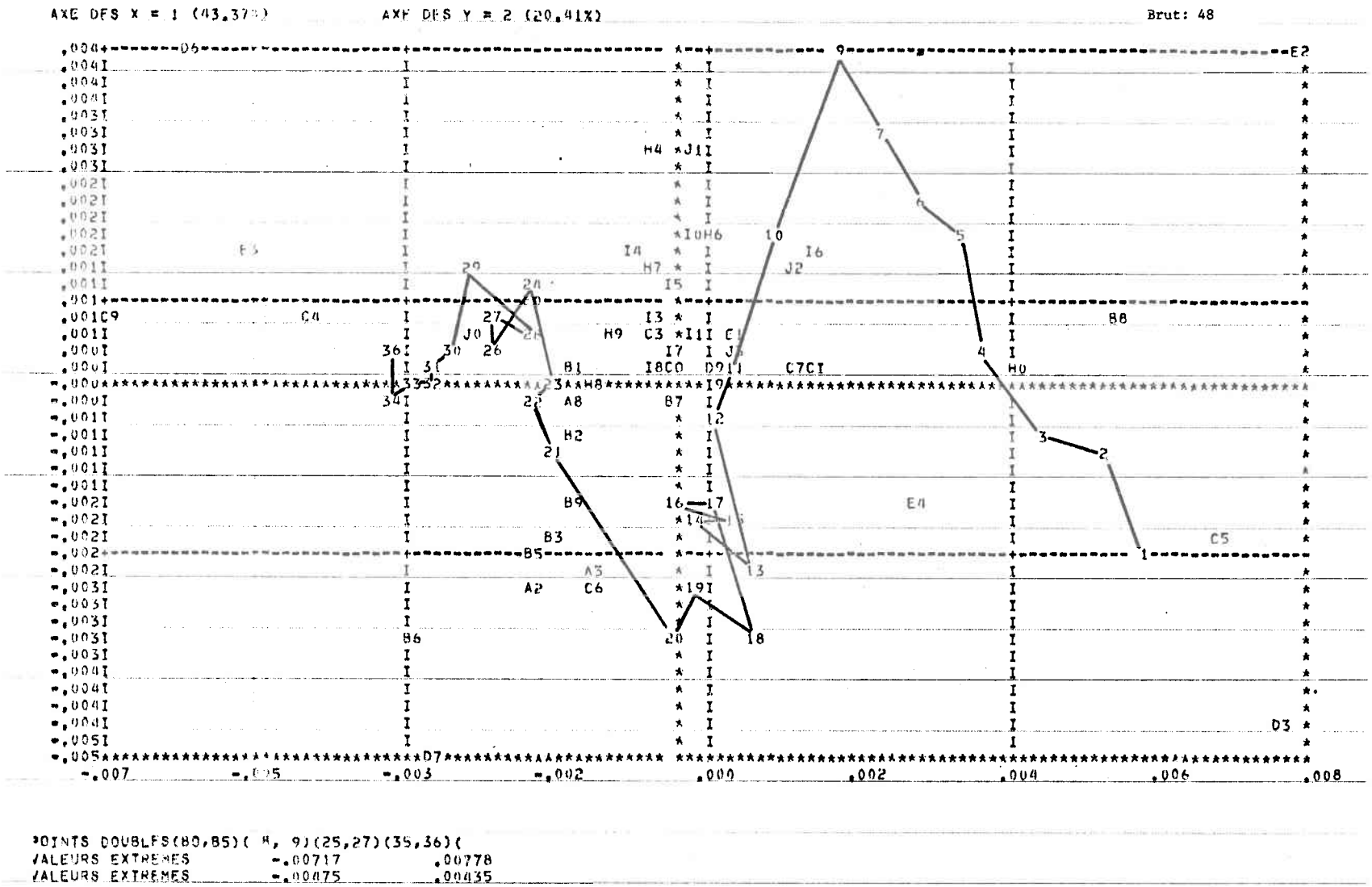
C) 3e étape

Objectif: étude sur une période allongée. Nous voulons vérifier si les dates ont tendance à "boucler".

Moyens utilisés: nous avons procédé à l'analyse de 48 piezomètres (liste au tableau 6.6) sur une période de 12 mois (novembre 1971 à novembre 1972) tableau 6.3). Analyse des données brutes.

Résultats: nous présentons en figure 6.4 les résultats de cette analyse (plan formé des axes 1 et 2). Comme on peut le constater, les dates ont toujours tendance à s'opposer sur l'axe premier. Notre hypothèse d'instabilité se confirme donc.

Pour plus de sureté, nous effectuerons une autre analyse avec 67 dates cette fois (18 mois, de juillet 1971 à décembre 1972, liste au tableau 6.4) sur les données brutes provenant de 37 piezomètres (tableau 6.5). Les résultats (figure 6.5) ne font que confirmer notre hypothèse et l'écart semble même s'accentuer entre les premières et les dernières dates. A ce stade, nous devons donc poursuivre notre étude dans l'hypothèse d'une période de transition après bouleversement. Ce que l'on observe ici est très différent de ce que l'on pourrait observer sur une nappe en "équilibre", avec bouclage.



POINTS DOUBLES(80,85)(8, 9)(25,27)(35,36)(
VALEURS EXTREMES -,00717 ,00778
VALEURS EXTREMES -,00475 ,00435

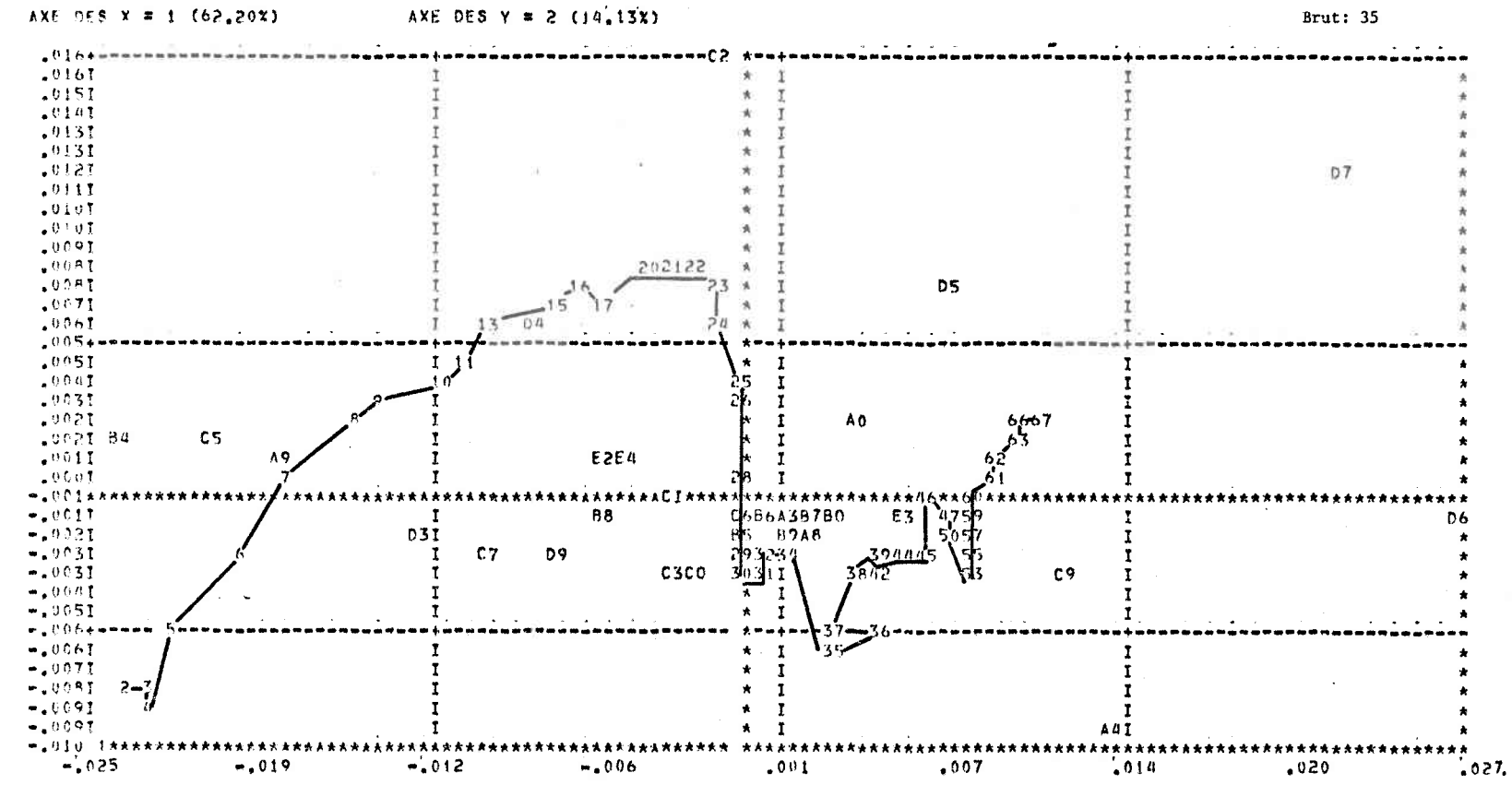
Figure 6.4. Plan 1-2; 48 piézomètres, 36 dates. Données brutes.

TABLEAU 6.5: Liste des piezomètres (35) - étude sur 18 mois

Piezo	Notation Facor
A-1-2	A 0
A-2-2	A 2
A-2-3	A 3
A-3-3	A 4
B-1-1	A 8
B-1-2	A 9
B-1-3	B 0
B-2-1	B 1
B-2-2	B 2
B-2-3	B 3
B-3-1	B 4
B-3-2	B 5
B-3-3	B 6
C-1-1	B 7
C-1-2	B 8
C-1-3	B 9
C-2-1	C 0
C-3-1	C 1
C-3-2	C 2
C-4-1	C 3
C-4-2	C 4
C-4-3	C 5
C-4-4	C 6
C-5-1	C 7
C-6-1	C 9
D-2-1	D 3
D-2-2	D 4
D-2-3	D 5
D-3-1	D 6
D-3-2	D 7
E-1-2	D 9
E-1-3	E 0
E-2-2	E 2
F-1-1	E 3
F-1-2	E 4

TABLEAU 6.6: Liste des piezomètres (48) - Etude sur 12 mois

Piezo	Notation Facor	Piezo	Notation Facor
A-2-2	A 2	E-1-3	E 0
A-2-3	A 3	E-2-1	E 1
B-1-1	A 8	E-2-2	E 2
B-1-3	B 0	F-1-1	E 3
B-2-1	B 1	F-1-2	E 4
B-2-2	B 2	H-4	H 4
B-2-3	B 3	H-6	H 6
B-3-2	B 5	H-7	H 8
B-3-3	B 6	H-8	H 8
C-1-1	B 7	H-9	H 9
C-1-2	B 8	H-10	H 0
C-1-3	B 9	H-11	I 0
C-2-1	C 0	H-18	I 1
C-3-1	C 1	H-21	I 3
C-4-1	C 3	H-22	I 4
C-4-2	C 4	H-23	I 5
C-4-3	C 5	H-24	I 6
C-4-4	C 6	H-27	I 7
C-5-1	C 7	H-29	I 8
C-6-1	C 9	H-30	I 9
D-2-1	D 3	H-31	J 0
D-3-1	D 6	H-32	J 1
D-3-2	D 7	H-33	J 2
E-1-2	D 9	H-35	J 3



POINTS DOUBLES(A2,A3)(B1,B2)(B2,B7)(B3,B9)(12,13)(14,15)(18,19)(19,20)(27,28)(E0,33)

POINTS DOUBLES(33,34)(C4,40)(40,41)(41,42)(43,44)(48,49)(49,50)(52,53)(51,54)(54,55)

POINTS DOUBLES(56,57)(58,59)(64,65)(65,66)(
VALEURS EXTREMES -.02515 .02698
VALEURS EXTREMES -.01005 .01706

Figure 6.5. Plan 1-2; 35 piézomètres, 67 dates. Données brutes.

D) 4e étape

Objectif: analyse plus poussée des dates

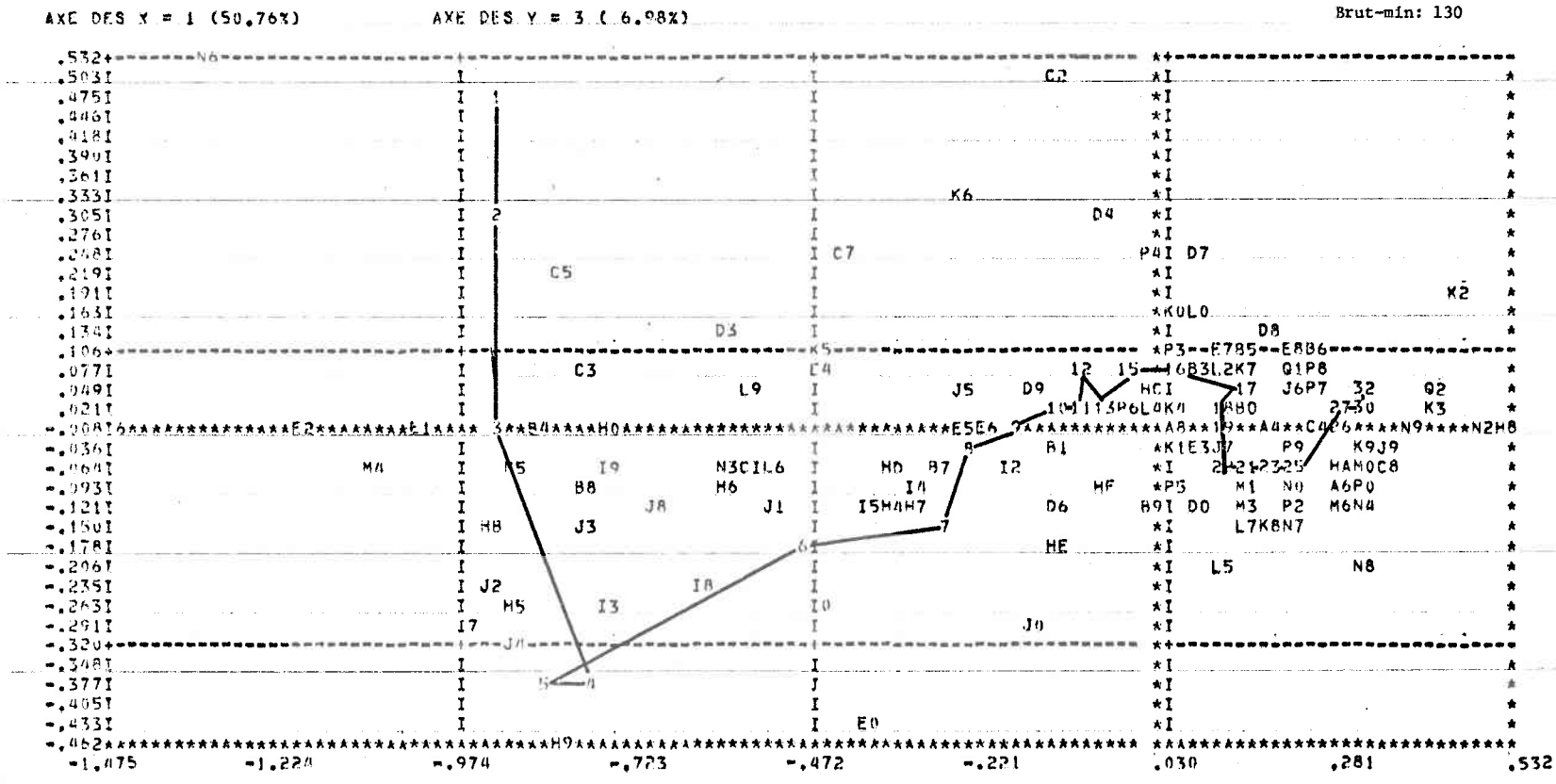
Moyens utilisés: étude des résultats concernant le 2e et 3e axes de l'analyse factorielle des correspondances.

Résultats: prenons l'analyse des données "brutes-min" sur 130 piezomètres et 32 dates (10 mois) et regardons les plans formés par les axes 1 et 3 (figure 6.6) et les axes 2 et 3 (figure 6.7).

Constatations:

- l'axe 3 aligne les points 1 à 5 (28 janvier 1972 au 27 mars 1972) de façon très nette. (figure 6.6) Ces points, on se souvient, étaient groupés sur le plan 1-2 (figure 6.2). Ceci dénote que l'axe 3 "rend compte" de la différence entre la période très froide de l'hiver (1 et 2) et celle, plus douce, précédant le printemps (4 et 5).
- les dates bouclent sur le plan 2-3 (figure 6.7). Sans pouvoir affirmer que l'on retrouve ici cette tendance que l'on cherchait, on peut quand même remarquer que ces axes (2 et 3) passent outre le phénomène de transition pour faire ressortir une analyse plus fine que le premier axe.

On pourrait conclure, par exemple, qu'à l'effet principal (montée ou descente continue indépendante de la date) se superpose un effet secondaire qui prend en compte l'influence saisonnière et qui se traduit par un



POINTS DOUBLES(A0,B2)(A3,E3)(C6,K1)(D5,L0)(L1,L4)(A7,M3)(C9,N0)(N1,P1)(N5,P9)(A9,H0)

POINTS DOUBLES(I1,I3)(L3,I4)(L8,J9)(P1,HA)(B2,E7)(C0, 8)(14,15)(A2,18)(M2,20)(M9,21)

POINTS DOUBLES(20,22)(24,25)(MA,26)(M7,29)(29,30)(28,31)(31,32)(
VALEURS EXTREMES -1,07539 ,53206
VALEURS EXTREMES -,46173 ,55993

Figure 6.6. Plan 1-3; 130 piézomètres, 32 dates. Données brutes-min.

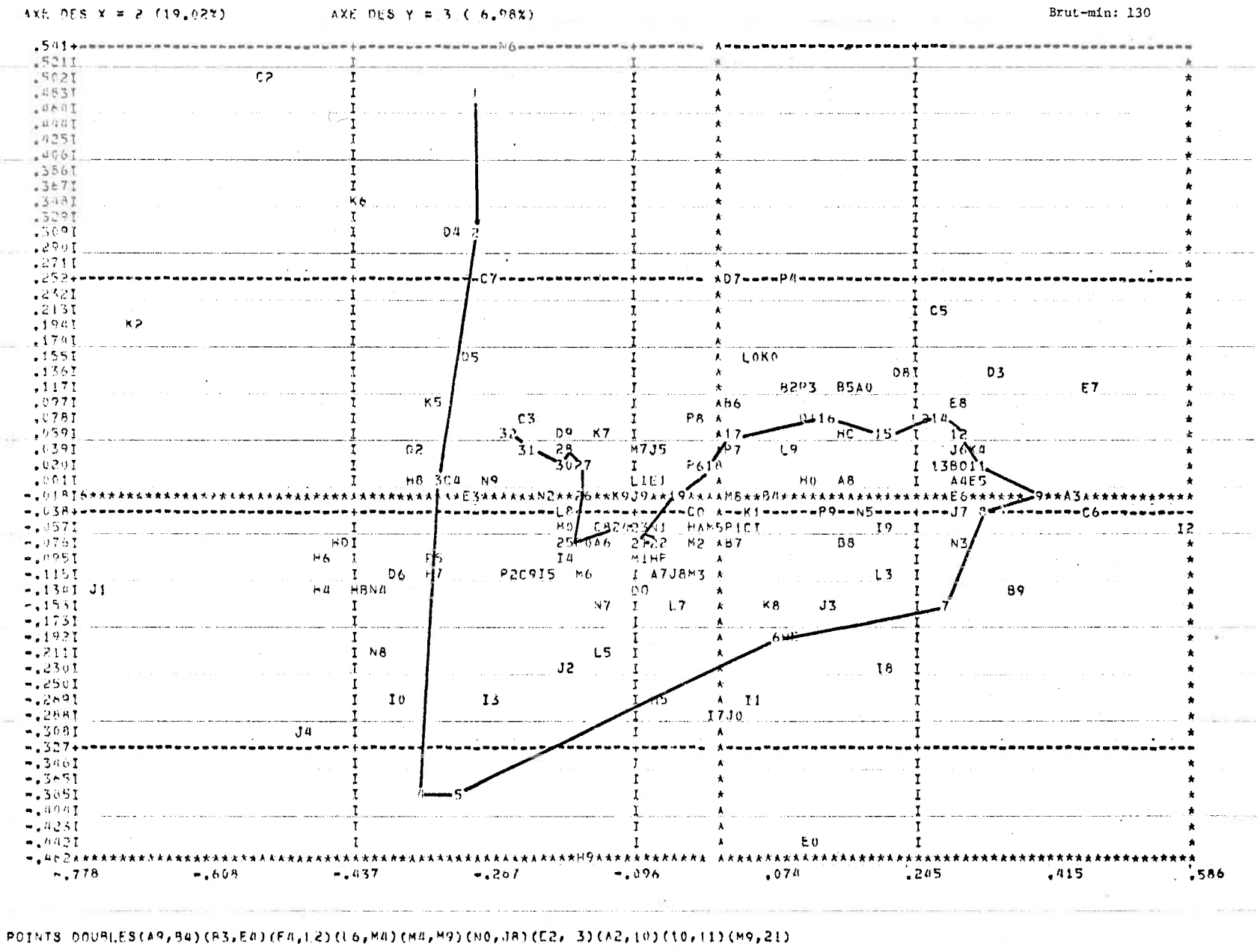


Figure 6.7. Plan 2-3; 130 piézomètres, 32 dates. Données brutes-min.

bouclage des dates. Mais avant d'aller plus loin dans cette voie, nous devons effectuer sur les points "piezomètres" la même analyse que celle effectuée sur les dates.

6.3.4 Etude des piezomètres

Cette partie comporte plusieurs objectifs comme on l'a vu précédemment (6.3.1) Pour mieux répondre à ces objectifs, on a divisé cette étude en deux étapes distinctes et complémentaires. Notons que les analyses de données brutes, des valeurs brutes moins le minimum ("brutes - min"), des valeurs brutes divisées par le minimum ("brutes/min") effectuées pour les besoins de l'étude, l'ont toutes été sur une période de 10 mois de mesures (32 dates). Ce, afin d'analyser le plus grand nombre possible de piezomètres à la fois. De ce fait, nous ne signalerons plus le nombre de dates lorsque nous référerons à une analyse en particulier puisqu'il s'agit toujours de la même période de 10 mois(28 janvier 1972 au 15 novembre 1972).

Dans la première étape on s'attarde surtout à l'étude des oppositions entre piezomètres sur les 3 premiers axes factoriels. Elle nous permet de dégager les principales caractéristiques de l'ensemble des piezomètres à St-Jean Vianney.

La seconde étape traite surtout du regroupement des piezomètres en classes afin d'identifier des groupes homogènes ou de comportement semblable dans le temps.

A) Première étape: étude des oppositions

- Objectifs:
  - dégager l'existence des tendances générales (plus ou moins grandes) de notre échantillon (le réseau St-Jean Vianney).
  - caractériser les axes de l'analyse factorielle des correspondances;
  - observations générales sur le comportement des piezomètres;
  - vérifier le pouvoir discriminant de l'analyse factorielle des correspondances.
- Moyens utilisés
  - étude des oppositions sur le 1er axe en vue de dégager les grandes tendances de l'échantillon et de faire des observations générales concernant l'ensemble des piezomètres;
  - étude des oppositions sur le 2e axe pour identifier les tendances secondaires;
  - étude des oppositions sur le 3e axe pour dégager d'autres tendances et vérifier le pouvoir discriminant de la méthode;
  - choix des résultats (représentations) à utiliser pour l'étude des oppositions.

Bien que la représentation des données "brutes-min" de 130 piezomètres (figure 6.2) semble se prêter mieux à l'interprétation (graphique plus lisible, mieux dégagé), nous nous attarderons surtout à l'analyse des données brutes de 125 piezomètres (figure 6.3) dont les représentations graphiques favorisent l'étude des oppositions.

- Etape préliminaire pour s'assurer de la fiabilité des représentations graphiques:

Avant de procéder à l'analyse détaillée de la figure 6.3 choisie plus haut, on veut s'assurer que cette "photographie" du phénomène est réelle, c'est-à-dire qu'elle n'est pas "masquée" ou "biaisée" par le comportement aberrant de certains piezomètres. En premier lieu, on repère les piezomètres dont les facteurs sont élevés sur le 1er et le 2e axes surtout et on les retire de l'analyse en les plaçant en points supplémentaires d'abord, puis en les retirant complètement. Par essais successifs, on passe de 125 piezomètres à 112, puis 95 et enfin à 85 piezomètres. Ces différents essais comprennent tous une analyse en données brutes et une en données "brutes-min". Les piezomètres ainsi enlevés sont ceux dont le comportement pourrait masquer l'ensemble, vu leur position extrême sur les axes.

On a ainsi pu établir que ces retraits successifs de piezomètres n'ont presque jamais influencé le nuage de points au niveau des oppositions, i.e., tous les points situés à l'intérieur d'un des quadrants du plan 1-2 (figures 6.2 et 6.3) se retrouvent presque toujours à l'intérieur d'un même quadrant sur les plans 1-2 issus des analyses successives. Et ce, tant sur les données brutes que "brutes-min".

Notons que les différentes transformations ne sont pas un artifice, mais "que c'est un peu comme si l'on prend une photo de différents angles". Les différentes études sont donc complémentaires.

Il faut aussi noter que les oppositions retrouvées avec les données brutes et "brutes-min" (figures 6.2 et 6.3) sont pratiquement

semblables, ce qui nous permet de croire que l'étude des oppositions sur ces deux analyses devraient conduire aux mêmes conclusions. Ceci nous montre bien d'une part la stabilité de l'analyse, et d'autre part, que le type de transformation utilisé donne une plus ou moins bonne visualisation.

Enfin, nous avons procédé à une analyse des données "brutes/min" de 125 piezomètres (les mêmes que ceux utilisés pour les analyses en données brutes). La représentation graphique du plan 1-2 issue de cette analyse (figure 6.8) est presque identique en tous points à celle de l'analyse sur les données brutes (figure 6.3).

Nous sommes donc en mesure d'affirmer que le graphique 1-2 (figure 6.3) des données brutes de 125 piezomètres représente un phénomène réel et global, et qu'il nous faut interpréter sachant qu'il est fortement relié à la période de transition identifiée dans l'étude des dates.

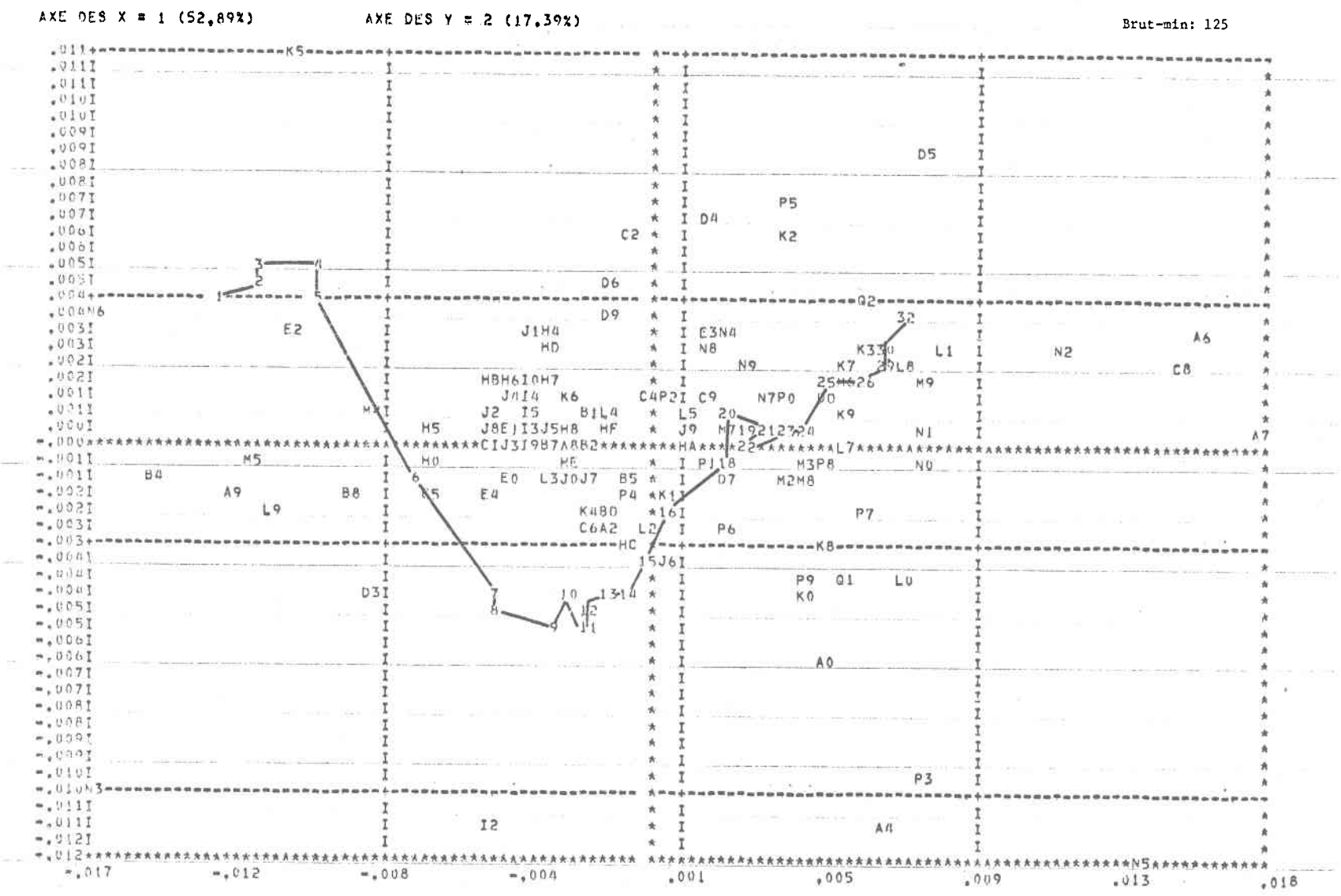
- Opposition sur le ler axe:

  (analyse des représentations issues de l'analyse des données brutes de 125 piezomètres (figure 6.3))

  - Grandes oppositions

On a mis en évidence au tableau 6.7 les piézomètres qui s'opposent sur le premier axe par ordre décroissant de leur facteurs sur cet axe.

On remarque ainsi une opposition entre les piezomètres dont la tendance générale est décroissante (piezomètres dont le niveau décroît régulièrement) (facteurs négatifs) et ceux dont la tendance générale est croissante (piezomètres dont le niveau croît régulièrement) (facteurs positifs) (voir graphiques types à la figure 6.9).



POINTS DOUBLES(A3,C6)(B9,K4)(M0,N7)(C0,I1)(C3,I3)(C7,I4)(H9,I7)(I1,I8)(I8,I9)(L6,J2)

POINTS DOUBLES(I7,J5)(B3,J7)(M1,J9)(I6,H8)(B6,I7)(I7,I8)(27,29)(28,30)(31,32)(
VALEURS EXTREMES -.01651 .01775

Figure 6.8. Plan 1-2; 125 piézomètres, 32 dates. Données brutes-min.

TABLEAU 6.7: Etude des oppositions

Axe-1

Facteurs négatifs				Facteurs positifs			
Piezo	Facor	Facteur	Contribut. relative	Piezo	Facor	Facteur	Contribut. relative
K-14-2	N 3	-.0159	.5851	* A-4-3	A 7	+.0179	.8806
K-15-2	N 6	-.0155	.7682	* A-5-2	A 6	+.0159	.8929
* B-3-1	B 4	-.0136	.9755	* C-5-2	C 8	+.0159	.9106
* B-1-2	A 9	-.0118	.9491	K-15-1	N 5	+.0150	.5867
K-11-3	M 5	-.0107	.7500	* K-14-1	N 2	+.0124	.8725
K-9-2	L 9	-.0103	.5912	K-6-3	L 1	+.0091	.4744
* E-2-2	E 2	-.0099	.8535	K-18-1	P 3	+.0090	.3244
K-3-2	K 5	-.0098	.3075	K-13-1	M 9	+.0086	.5006
* K-11-2	M 4	-.0079	.9136	K-13-3	N 1	+.0085	.7993
* C-1-2	B 8	-.0079	.9915	K-13-2	N 0	+.0083	.7758
D-2-1	D 3	-.0076	.4672	D-2-3	D 5	+.0082	.3065
* H-10	H 0	-.0061	.9705	K-6-2	L 0	+.0080	.4843
* H-5	H 5	-.0059	.8308	K-9-1	L 8	+.0076	.7830
* C-4-3	C 5	-.0059	.8373	A-3-3	A 4	+.0075	.2737
H-46	H B	-.0043	.7627	K-2-3	K 3	+.0068	.6751
* H-43	J 8	-.0043	.8535	K-20-1	P 7	+.0066	.7872
H-33	J 2	-.0043	.7617	K-21-3	Q 2	+.0066	.6252
H-24	I 6	-.0043	.7957	K-4-1	K 7	+.0061	.6843
* C-3-1	C 1	-.0043	.8247	K-21-2	Q 1	+.0061	.5859
* H-35	J 3	-.0038	.8818	K-8-3	L 7	+.0059	.6107
H-36	J 4	-.0036	.7659	K-12-1	M 6	+.0059	.6907
* E-2-1	E 1	-.0035	.8848	A-1-2	A 0	+.0058	.2872
* H-30	I 9	-.0033	.9283	* K-4-3	K 9	+.0058	.8075
* H-18	I 1	-.0032	.8686	C-6-2	K 0	+.0056	.6477
* H-29	I 8	-.0029	.8546	K-4-2	K 8	+.0055	.4288
* H-21	I 3	-.0029	.8343	K-1-1	K 0	+.0054	.3518
* C-4-1	C 3	-.0028	.8619	K-20-2	P 8	+.0054	.6863
* H-27	I 7	-.0027	.9117	K-21-1	P 9	+.0053	.4369
* H-9	H 9	-.0027	.8569	K-10-3	M 3	+.0052	.5403
H-38	J 5	-.0023	.7706	K-12-3	M 8	+.0050	.7137
* H-8	H 8	-.0017	.8259				

* Contribution relative > .8000

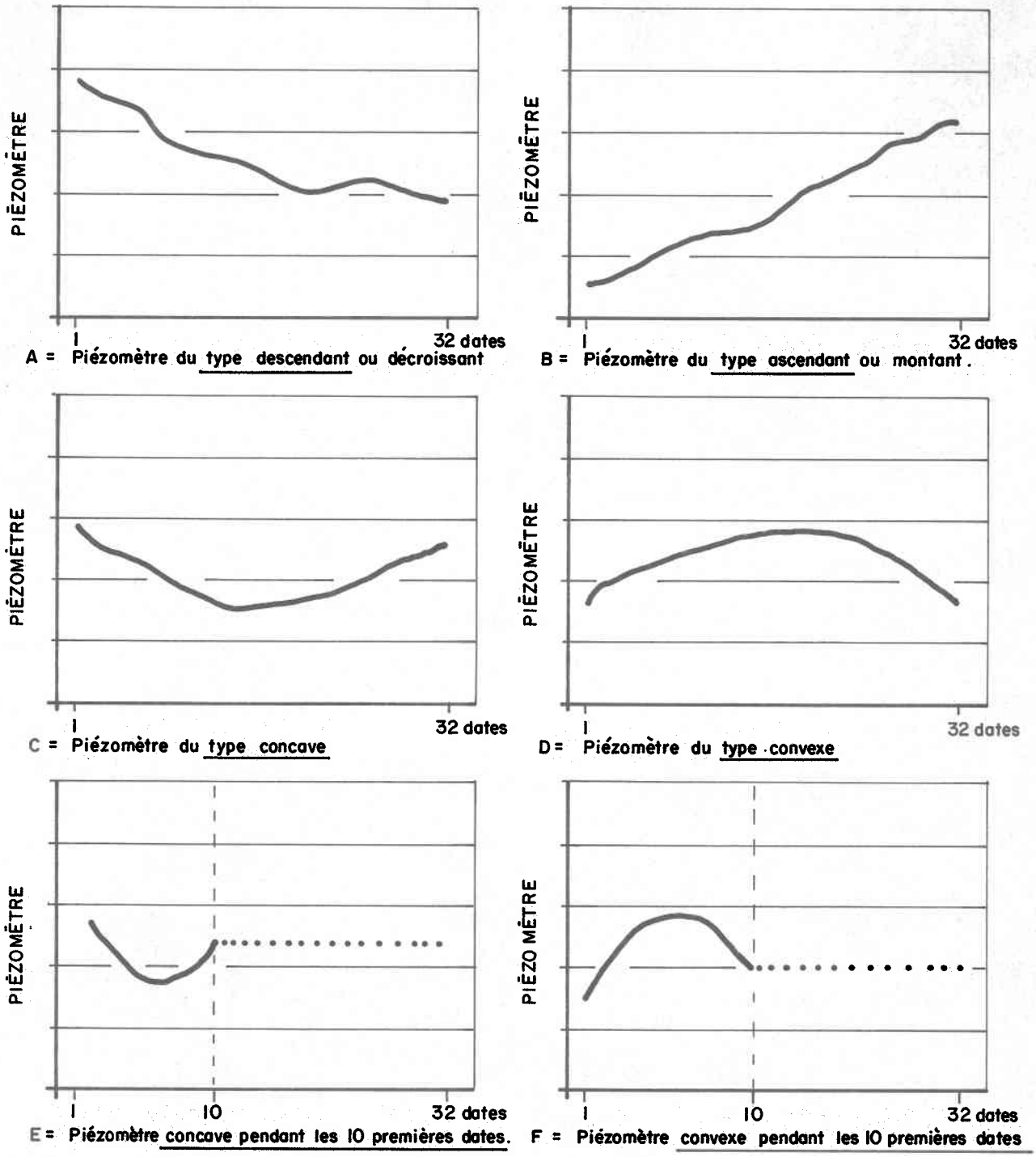


Fig. 6.9. Graphiques types. Allure générale du comportement piézométrique dans le temps.

La grandeur du facteur est en relation directe avec l'amplitude de cette tendance. Ainsi, les piezomètres N3, N6, B4 et A9 sont des piezomètres à tendance décroissante dont l'amplitude se situe entre 8 et 15 pieds, de ce fait, on les retrouve en tête des facteurs négatifs. De même, en tête des facteurs positifs, on retrouve les piezomètres A7, A6, C8, N5 et N2 qui ont une amplitude de 8 à 15 pieds, et ont tendance à croître tout au long de l'année 1972.

Enfin, les piezomètres dont les niveaux sont décroissants ou croissants mais dont l'amplitude varie de 1 à 5 pieds se retrouvent plus bas dans l'échelle des facteurs; par exemple, I7, I8 et I9 pour les piezomètres décroissants et M3, M8 pour les croissants.

Parmi les autres piezomètres dont le facteur est élevé, on retrouve, à divers degrés, des "cas spéciaux" (i.e. des sauts brusques) mais dont la tendance générale est ascendante ou descendante; par exemple, D3, J2, I6 et A4, N5, P9.

Le premier axe délimite donc les tendances à monter et descendre des niveaux des piezomètres.

Pour bien se convaincre de cette constatation, remarquons les piezomètres dont la contribution relative est supérieure à 80% (i.e. les piezomètres qui sont "expliqués" à plus de 80% par le 1er axe). Ce sont les piezomètres marqués d'un astérisque (*) dans le tableau 6.7. On s'aperçoit que ces piezomètres ont non seulement cette tendance à monter ou descendre, mais leur progression dans le temps est très régulière, indépendamment des saisons ou des actions auxquelles ils sont soumis (fonte des neiges, pluie, etc.). Les autres piezomètres sont moins réguliers

que ces derniers et souvent la "tendance générale" est très difficilement décelable à l'oeil. Ceci nous montre bien le pouvoir discriminant de l'analyse qui permet d'identifier rapidement des classes de comportement des piezomètres.

- Observations générales, zones importantes

On s'aperçoit que les piezomètres qui se détachent le plus (forte tendance à monter ou descendre) sont tous situés autour et dans le cratère formé par le glissement de mai 1971. De plus, les 3 piezomètres prépondérants (A7, A6 et C8) dont le groupe ascendant sont situés dans le cratère (ce sont d'ailleurs les seuls implantés à cet endroit) et les piezomètres à forte tendance descendante (N6, B4, A9, M5, E2, M4, B8) forment une ceinture (en demi-cercle) autour du cratère. Nous venons donc d'identifier une zone (celle du cratère et et ses environs immédiats) de première importance qui confirme notre hypothèse d'une recherche d'équilibre après la coulée.

- Zone spéciale

On remarque de plus que la majorité des piezomètres identifiés comme "descendants" et dont l'amplitude est très faible (J8, I2, I6, I3, J4, I9, I8, I7) couvre la partie plus au nord de la région étudiée, ce comportement peut s'expliquer par les travaux de drainage qui ont eu lieu de janvier 1972 à mai 1972 et qui ont sûrement eu pour effet d'abaisser quelque peu la nappe de surface.

- Cas spéciaux

Enfin, certains cas spéciaux ressortent de cette étude: quelques nids de piezomètres présentent des comportements difficiles à expliquer.

Ainsi, les points identifiés sur la carte (figure 3.1) par K-15, K-14, D-2 et K-8 comprennent chacun 3 piezomètres à des profondeurs différentes et les résultats obtenus sont assez surprenants. Les piezomètres N2 et N5 correspondant aux piezomètres K-14-1 et K-15-1 à des profondeurs de 64 et 63 pieds respectivement sont des piezomètres à très forte tendance ascendante. Or les piezomètres N3 et N6 (K-14-2 et K-15-2) situés à 134 et 135 pieds ont une forte tendance descendante. Ce sont des points qu'il nous faut retenir pour en trouver plus tard une explication physique (inversion de potentiel).

- Opposition sur le 2e axe: (analyse des données brutes de 125 piezomètres)

D'après le détail de ces oppositions (tableau 6.8, figures 6.3 et 6.11) on remarque la distinction entre les formes concaves et convexes des variations de niveaux piezométriques (voir graphiques types à la figure 6.9). Ainsi, les piezomètres N5, I2 et A4 ont des valeurs basses aux dates 1, 2, 3 (hiver), atteignent leur maximum en été (date 15 environ) et redescendent vers la fin (dates 30 à 32) alors que les piezomètres K5, K2, et C2 ont une allure contraire: d'un maximum au début, ils atteignent leur minimum au milieu de la période d'étude puis remontent vers la fin. La grandeur du facteur dépend de l'amplitude du piezomètre et de son allure plus ou moins régulière.

On notera que les différents comportements des piezomètres ainsi trouvés semblent souvent dépourvus de sens physique, un peu comme si une rivière sortait de son lit en période de sécheresse ou que sa période d'étiage correspondait à la fonte des neiges. Nous en avons évidemment été à priori surpris, et même déçus au début car cela laisserait

TABLEAU 6.8: Etude des oppositions

Axe - 2

	Facteurs négatifs					Facteurs positifs			
	Piezo	Facor	Facteur	Contrib. relative		Piezo	Facor	Facteur	Contrib. relative
	K-15-1	N 5	-.0116	.3522		K-3-2	K 5	+.0116	.4318
*	H-2-	I 2	-.0114	.6325		D-2-3	D 5	+.0087	.3398
*	A-3-3	A 4	-.0106	.5579		K-19-1	P 5	+.0077	.4493
	K-14-2	N 3	-.0106	.2592	*	K-2-2	K 2	+.0065	.5108
	K-18-1	P 3	-.0093	.3457		D-2-2	D 4	+.0065	.2535
	A-1-2	A 0	-.0064	.3461	*	C-3-2	C 2	+.0064	.5082
*	H-40	J 6	-.0032	.6731	*	D-3-1	D 6	+.0048	.7281
*	H-47	H C	-.0030	.6284		K-14-3	N 4	+.0036	.4984
*	K-7-1	L 2	-.0026	.6957		H-32	J 1	+.0036	.4816
*	C-4-4	C 6	-.0025	.5246		F-1-1	E 3	+.0035	.3479
*	A-2-2	A 2	-.0022	.5579	*	H-4	H 4	+.0033	.5095
*	B-1-3	B 0	-.0017	.6108		K-16-1	N 8	+.0032	.4512
						H-48	H D	+.0029	.4634
					*	C-4-2	C 4	+.0017	.6084

* : Contribution relative > .5000

planer un fort doute sur la validité de nos données. Cependant, une aussi forte proportion des piezomètres ayant un comportement spécial ne peut être causée par le hasard ou des erreurs. Ces comportements anomaliques peuvent être expliqués par des travaux de drainage qui ont dû contribuer à l'abaissement de certaines nappes en hiver et au printemps alors qu'on s'attendait à une remontée provoquée par la fonte des neiges. Il n'est donc pas surprenant de retrouver des comportements jugés aberrants dans des conditions normales et qui, de plus, confirment l'instabilité de la nappe que nous avons mise en évidence précédemment.

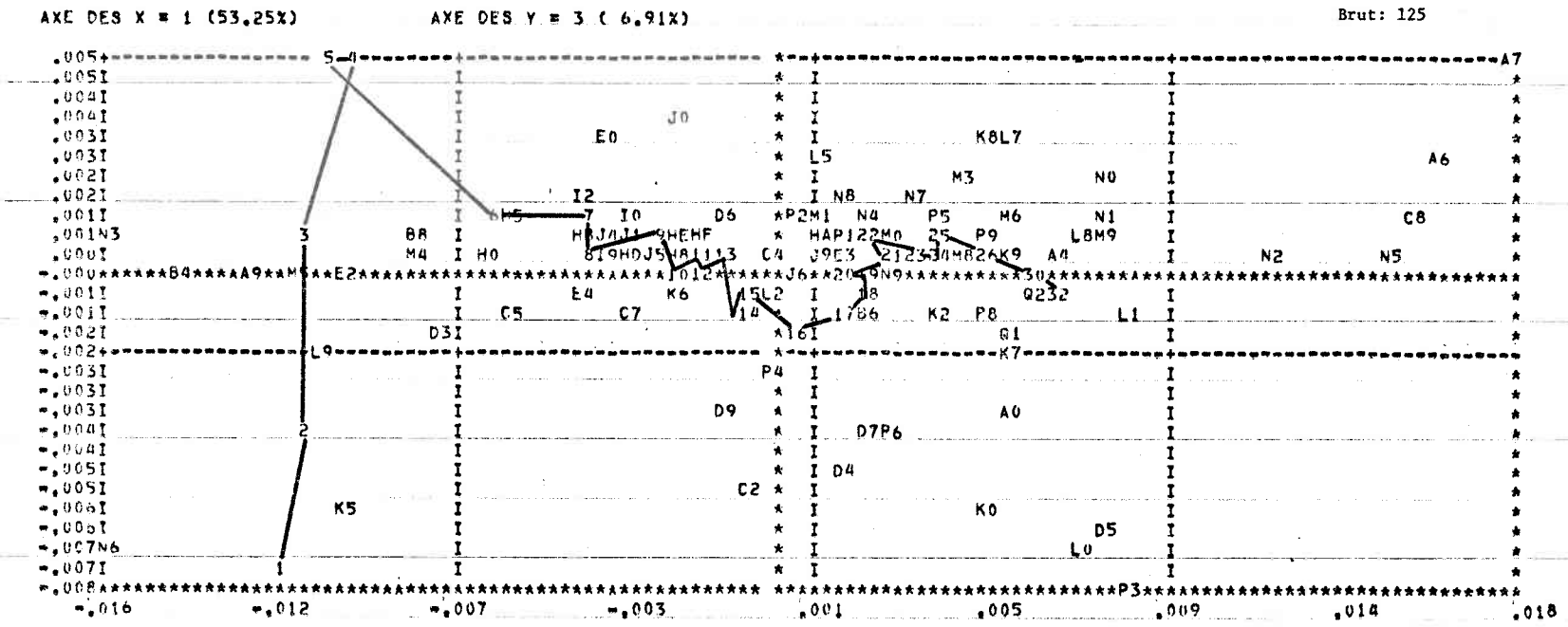
- Opposition sur le 3e axe: (analyse des données brutes de 125 piezomètres)

En raison de la forte discrimination des 5 premières dates remarquées sur cet axe, (figures 6.10 et 6.11) les piezomètres opposés sur cet axe devraient avoir des profils différents (contraires) sur ces 5 premières dates. Ainsi, si on regarde le tableau 6.9, les piezomètres K7, K0 et L0 ont des valeurs élevées au jour 1 et décroissent jusqu'au jour 5 pour ensuite remonter tandis que les piezomètres A7, J0, E0, L5 ont de faibles valeurs au jour 1, croissent jusqu'au jour 5 pour ensuite redescendre. Cet axe oppose donc les piezomètres d'allure concave et convexe pendant les 10 premières dates, i.e. de février à mai (voir graphiques types à la figure 6.12). La grandeur du facteur dépend de la régularité de ce profil.

B) Deuxième étape: étude des regroupements

Objectifs:

- choisir une méthode de regroupement des piezomètres;



POINTS DOUBLES(A2,B0)(A8,B1)(A3,B2)(B2,B3)(C0,C3)(B3,C6)(D0,K8)(B7,L3)(B0,L4)(M2,P0)

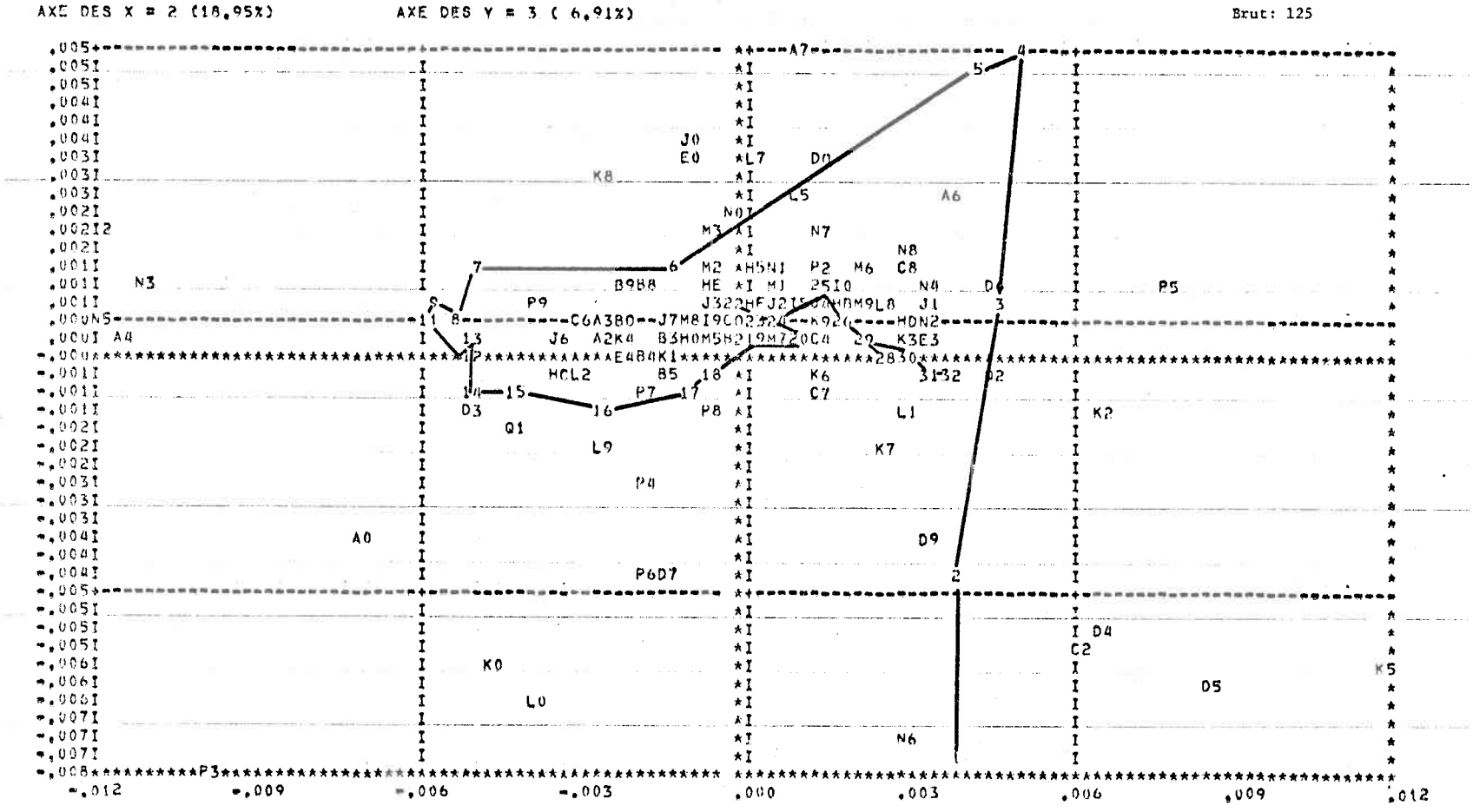
POINTS DOUBLES(P0,P5)(P7,Q2)(E1,H6)(H4,H7)(B1,H8)(H7,H9)(I3,I4)(I4,I5)(CI,I6)(I5,I7)

POINTS DOUBLES(I7,I8)(H6,I9)(I8,J1)(L6,J2)(J2,J3)(I1,J4)(L3,J5)(K1,J6)(C6,J7)(J3,J8)

POINTS DOUBLES(C9,HA)(J8,HB)(B5,HC)(C3,HD)(B9,HF)(I6, 8)(H9, 9)(J7,11)(K4,12)(L4,13)

POINTS DOUBLES(HC,15)(M7,19)(K3,27)(27,28)(28,29)(29,30)(31,32)(
VALEURS EXTREMES -,01592 ,01789
VALEURS EXTREMES -,00778 ,00560

Figure 6.10. Plan 1-3; 125 piézomètres, 32 dates. Données brutes.



POINTS DOUBLES(B7,C0)(A8,C1)(A9,E4)(E1,M4)(L4,M7)(L3,M8)(C9,P0)(C5,P7)(M0,H7)(M4,H8)

POINTS DOUBLES(L6,I3)(I4,I5)(H6,I6)(H9,I7)(P1,I8)(C1,I9)(H4,J1)(I3,J2)(I8,J3)(C3,J5)

POINTS DOUBLES(I7,J8)(H8,J9)(I1,HA)(H7,H8)(J8,HF)(10,13)(B6,17)(J5,19)(B1,21)(HA,22)

POINTS DOUBLES(J9,23)(21,24)(P0,25)(I6,26)(N9,27)(27,29)(E2,30)(
VALEURS EXTREMES -,01159 ,01164
VALEURS EXTREMES -,00778 ,00560

Figure 6.11. Plan 2-3; 125 piézomètres, 32 dates. Données brutes.

TABLEAU 6.9: Etude des oppositions

Axe - 3

	Facteurs négatifs					Facteurs positifs			
	Piezo	Facor	Facteur	Contrib. relative		Piezo	Facor	Facteur	Contrib. relative
	K-18-1	P 3	-.0078	.2417		A-4-3	A 7	+.0065	.0862
	K-15-2	N 6	-.0070	.1587	*	H-31	J 0	+.0037	.5455
*	K-6-2	L 0	-.0066	.3290		K-8-3	L 7	+.0034	.2057
	D-2-3	D 5	-.0062	.1736	*	E-1-3	E 0	+.0033	.3981
	K-3-2	K 5	-.0060	.1129		C-6-2	D 0	+.0032	.2101
*	K-1-1	K 0	-.0057	.3880		K-4-2	K 8	+.0031	.1384
*	C-3-2	C 2	-.0053	.3566	*	K-8-1	L 5	+.0026	.4081
	D-2-2	D 4	-.0051	.1584					
	K-19-3	P 6	-.0041	.0454					
*	D-3-2	D 7	-.0040	.4153					

* : Contribution relative > .3000

- effectuer un regroupement basé sur les résultats de l'analyse factorielle des correspondances.

Moyens utilisés:

- cartographie des facteurs des piezomètres sur le premier axe factoriel;
- facteurs issus de l'analyse des données brutes de 125 piezomètres.

- Choix des résultats (représentation) à utiliser:

Il nous apparaît très difficile de discerner des regroupements intéressants sur la figure 6.3 (données brutes, 125 piezomètres). En effet, peu importe le choix d'un groupe de points sur ce graphique, on s'aperçoit rapidement qu'il est impossible de leur attribuer un sens physique. On constate, par exemple, que parmi les piezomètres faisant partie d'un groupe de points semblables sur le plan 1-2 (figure 6.3), on retrouve:

- des piezomètres disposés un peu partout sur la région étudiée;
- des piezomètres implantés dans le sable ou l'argile;
- des piezomètres implantés à des profondeurs très différentes (de 10 à 200 pieds).

On peut cependant remarquer une meilleure "configuration" des points sur la figure 6.2 (données "brutes-min", 130 piezomètres). Il serait possible d'y distinguer certains groupes ou certaines directions permettant d'orienter notre étude pour interpréter ces résultats.

En fait, le choix de la transformation initiale ne conduit pas à des conclusions différentes, mais permet de mieux effectuer l'interpréta-

tion et les discriminations. Cependant, l'hypothèse de la période de transition entre deux équilibres (expliquée par les profils ascendant et descendant et par l'opposition des dates) étant considérée comme de première importance pour notre interprétation (cette hypothèse est prise en charge par le 1er axe avec 50% et plus d'inertie), nous retenons la figure 6.3 (données brutes, 125 piezomètres) où cet aspect est mieux mis en évidence.

- Choix de la méthode de regroupement:

Plusieurs méthodes s'offrent à nous, parmi celles-ci:

1) regrouper les points directement sur le graphique de la figure 6.3;
2) regrouper les points selon la géographie et la géologie du terrain et traiter ces groupes séparément à l'aide de FACOR;
3) chercher une "configuration type" sur le graphique (demi-cercle, triangle, ellipse, etc.) et regrouper en conséquence;
4) cartographier les facteurs.

Nous adoptons cette dernière méthode pour les raisons suivantes:

1) comme on le constate sur la figure 6.3, il nous est très difficile d'effectuer des regroupements directement sur ce plan 1-2;
2) cette deuxième méthode a en partie été utilisée dans le chapitre concernant les méthodes analytiques. De plus, nous désirons traiter les données globalement, ce qui ne serait pas le cas ici;

3) l'existence de telles configurations semble difficile à démontrer à l'aide des différentes analyses que nous possédons;
4) cette méthode a déjà fait ses preuves lors d'études du même type (CANCEILL (1971) et (1973)) et nous croyons, étant donné les difficultés évoquées ci-haut concernant les autres méthodes, que son utilisation peut nous être utile.

- Cartographie des facteurs:

Afin d'éliminer le problème que pose la cartographie des facteurs sur des nids de piezomètres (comment cartographier des valeurs en des points superposés?), on regroupe les piezomètres en trois grandes classes (selon leur profondeur d'implantation):

1) les piezomètres de surface (< 80 pieds) (liste au tableau 6.10);
2) les piezomètres "intermédiaires" (80' < x < 150') (liste au tableau 6.11)
3) les piezomètres de profondeur (> 150 pieds) (liste au tableau 6.12).

<u>On cartographie les facteurs du 1er axe de chacune des classes</u>.

On retrouve le résultat de la cartographie des piezomètres de surface à la figure 6.12, les facteurs des piezomètres sont détaillés au tableau 6.13.

L'idéal serait de pouvoir tracer les lignes iso-facteurs sur cette carte et ainsi déterminer des zones. On voit très bien la difficulté posée par ce problème dans notre cas, c'est pourquoi on a simplement tracé la ligne du facteur zéro (0.000) (en fait, cela nous donne 2 lignes).

TABLEAU 6.10: Cartographie des facteurs

Nappe de surface: < 80.0'

Piezo	Notation Facor	Profondeur (pieds)	Piezo	Notation Facor	Profondeur (pieds)
A-1-2	A 0	58	K-19-1	P 5	61
A-2-3	A 3	10	K-20-1	P 7	50
A-3-3	A 4	50	K-21-1	P 9	35
A-4-3	A 7	50	H-4	H 4	67
B-1-3	B 0	55	H-5	H 5	10
B-2-3	B 3	40	H-7	H 7	70
B-3-3	B 6	52	H-18	I 1	23
C-1-3	B 9	36	H-20	I 2	32
C-3-2	C 2	67	H-21	I 3	32
C-4-4	C 6	25	H-22	I 4	22
C-5-2	C 8	72	H-23	I 5	71
D-2-3	D 5	60	H-24	I 6	70
F-1-2	E 4	56	H-27	I 7	29
K-1-1	K 0	46	H-29	I 8	30
K-2-1	K 1	78	H-30	I 9	61
K-3-1	K 4	48	H-31	J 0	38
K-4-1	K 7	65	H-32	J 1	44
K-6-2	L 0	73	H-35	J 3	46
K-7-1	L 2	30	H-36	J 4	31
K-8-1	L 5	59	H-38	J 5	80
K-9-1	L 8	59	H-40	J 6	55
K-10-1	M 1	74	H-41	J 7	41
K-12-1	M 6	68	H-43	J 8	75
K-13-1	M 9	65	H-45	H A	60
K-14-1	N 2	64	H-46	H B	49
K-15-1	N 5	63	H-47	H C	26
K-16-1	N 8	60	H-48	H D	26
K-17-1	P 1	42	H-49	H E	36
K-18-1	P 3	30	H-50	H F	51

TABLEAU 6.11: Cartographie des facteurs

Nappe intermédiaire: 150' > x > 80'

Piezo	Notation Facor	Profondeur (pieds)	Piezo	Notation Facor	Profondeur (pieds)
A-4-2	A 6	98	K-7-2	L 3	119
B-1-2	A 9	97	K-8-2	L 6	125
B-2-2	B 2	85	K-9-2	L 9	130
B-3-2	B 5	97	K010-2	M 2	145
C-1-1	B 7	141	K-11-2	M 4	134
C-2-1	C 0	137	K-12-2	M 7	140
C-3-1	C 1	119	K-13-2	N 0	136
C-4-1	C 3	129	K-14-2	N 3	134
C-5-1	C 7	126	K-15-2	N 6	135
C-6-2	D 0	107	K-16-2	N 9	130
D-2-2	D 4	107	K-18-2	P 4	92
D-3-2	D 7	120	K-20-2	P 8	84
E-1-2	D 9	137	K-21-2	Q 1	98
E-2-2	E 2	121	H-6	H 6	85
F-1-1	E 3	107	H-11	I 0	85
G-1-2	E 6	88	H-33	J 2	140
K-2-2	K 2	135	H-38	J 5	80
K-3-2	K 5	100	H-44	J 9	86
K-4-2	K 8	150			

TABLEAU 6.12: Cartographie des facteurs

Nappe profonde: > 150'

Piezo	Notation Facor	Profondeur (pieds)
B-1-1	A 8	169
B-2-1	B1	171
B-3-1	B 4	166
C-6-1	C 9	215
D-2-1	D 3	175
D-3-1	D 6	171
E-1-1	D 8	176
E-2-1	E 1	156
G-1-1	E 5	150
K-2-3	K 3	198
K-3-3	K 6	180
K-4-3	K 9	169
K-6-3	L 1	199
K-7-3	L 4	189
K-8-3	L 7	191
K-9-3	M 0	191
K-10-3	M 3	227
K-11-3	M 5	187
K-12-3	M 8	208
K-13-3	N 1	194
K-14-3	N 4	198
K-15-3	N 7	199
K-16-3	P 0	193
K-19-3	P 6	196

SAINT JEAN VIANNEY
FIG. 6. 12.
CARTOGRAPHIE DES FACTEURS
(PIÉZOMÈTRES DE SURFACE)
LÉGENDE
Rivière
Shipshaw

TABLEAU 6.13: Facteurs des piezomètres de surface

No Forage	Facteur	No Forage	Facteur
A-1	.006	K-19	.004
A-2	-.001	K-20	.007
A-3	.008	K-21	.005
A-4	.018	H-4	-.003
B-1	-.001	H-5	-.006
B-2	-.001	H-7	0.003
B-3	.003	H-18	-.003
C-1	-.001	H-20	-.004
C-3	-.000	H-21	-.003
C-4	-.001	H-22	-.003
C-5	.016	H-23	-.003
D-2	.008	H-24	-.004
F-1	.004	H-27	-.003
K-1	.005	H-29	-.003
K-2	.001	H-30	-.003
K-3	-.001	H-31	-
K-4	.006	H-32	-
K-6	.008	H-35	-.004
K-7	.000	H-36	-.004
K-8	.002	H-38	-.002
K-9	.008	H-40	.001
K-10	.002	H-41	-.001
K-12	.006	H-43	-.004
K-13	.009	H-45	.002
K-14	.012	H-46	-.004
K-15	.015	H-47	.000
K-16	.002	H-48	-.003
K-17	.002	H-49	-.002
K-18	.009	H-50	-.001

Ce tracé nous permet de visualiser la distinction entre les piezomètres dont le facteur est négatif et ceux dont le facteur est positif. Cette opération se fait à l'oeil, au mieux de notre jugement et par conséquent, est ponctuée de beaucoup d'approximations et certains points difficiles à intégrer sont laissés pour compte.

Ceci nous permet de soulever un problème souvent rencontré en cartographie: le traçage de courbes iso-valeurs basé sur la connaissance de cette valeur en des points dispersés sur une carte. Le tracé que l'on effectue est approximatif et indicatif et doit être considéré comme un complément à notre étude. Dans certains cas cependant, le tracé de cartes iso-valeurs (iso-facteurs en particulier) peut revêtir une grande importance et il est alors important de disposer d'une méthode optimale.

Le Krigeage, (MATHERON, G. (1969)) utilisé en hydrométéorologie (DE L'HOMME, J.P. et DELFINER, P. (1973)) tient compte de la structure et de la variabilité spatiale du phénomène étudié, et permet la détermination des courbes isofacteurs et surtout de la variance d'estimation en chaque point. Ce dernier point est une particularité unique du Krigeage qui en fait la meilleure méthode d'interpolation disponible (les méthodes classiques d'interpolation ne permettent pas en effet de déterminer les erreurs d'estimation).

L'emploi de cette méthode est un atout important pour des études hydrogéologiques.

Notre essai nous donne cependant des résultats intéressants. Nous pouvons en effet délimiter 3 zones bien distinctes:

- la zone I au Nord (sablonneuse) (facteurs négatifs)
- la zone II au centre, comprenant le cratère et ses environs immédiats (zone argileuse avec poches de sable ici et là) (facteurs positifs)
- la zone III qui longe le cratère et se dirige vers le Saguenay en suivant les lignes du fond rocheux sous la couche de dépôts glaciaires (facteurs négatifs).

Si on fait de même pour les classes de piezomètres intermédiaires et profonds, on retrouve sensiblement les mêmes zones aux mêmes endroits sauf pour quelques points (les "cas spéciaux" repérés lors de l'analyse des oppositions sur le 1er axe). On obtient donc 3 groupes de piezomètres (tableau 6.14) que l'on peut vraiment considérer comme distincts (géographiquement et d'après l'analyse des correspondances). En effet, on obtient un groupe (le groupe II) concentré dans la région immédiate de la coulée d'avril 1971 dont les facteurs sont tous positifs (donc de tendance générale croissante). Les 2 autres groupes sont caractérisés par des facteurs négatifs (tendance générale décroissante) et couvrent tout le haut (nord) de la région étudiée (le groupe I) et le bas de cette région vers la rivière Saguenay (le groupe III).

6.3.5 Proposition d'un réseau de mesures à St-Jean Vianney

Objectifs:

- Choix des piezomètres à conserver
- Choix de la fréquence des mesures

Moyens utilisés:

- étude des critères de sélection selon la priorité des objectifs

TABLEAU 6.14: Identification des zones en surface

Zone-I	Zone-II	Zone-III
H-4	A-1-2	A-2-3
H-5	A-3-3	B-1-3
H-7	A-4-3	B-2-3
H-18	B-3-3	C-1-3
H-20	C-5-2	C-3-2
H-21	K-2-3	C-4-4
H-22	K-47	F-1-2
H-23	K-1-1	K-3-1
H-24	K-2-1	
H-27	K-4-1	
H-29	K-6-2	
H-30	K-7-1	
H-34	K-9-1	
H-36	K-10-1	
H-38	K-12-1	
H-40	K-13-1	
H-41	K-14-1	
H-43	K-15-1	
H-45	K-16-1	
H-46	K-17-1	
H-48	K-18-1	
H-49	K-19-1	
H-50	K-20-1	
K-8-1	K-21-1	

à atteindre;

- Etude sur la précision désirée pour atteindre nos objectifs.

- Résumé des études sur les dates et les piezomètres

Nous avons pu identifier les caractéristiques principales de notre échantillon et déterminer des sous-groupes dont le comportement est semblable. Résumons les résultats obtenus:

- le régime transitoire des nappes identifié comme principale caractéristique de l'ensemble des mesures prises à St-Jean Vianney;
- la première conséquence de ce régime transitoire est l'identification de la tendance montée-descente qui permet une séparation des piezomètres;
- l'évolution marquée des nappes dans le temps qui masque le comportement naturel (cyclique) des nappes dans des conditions normales;
- l'identification de la zone du cratère et ses contours immédiats comme de première importance dans notre étude;
- l'identification de 3 grandes zones distinctes quant aux comportements généraux des piezomètres;
- l'identification de cas spéciaux et de problèmes particuliers (inversion de potentiel) à ne pas négliger.

Ces points nous seront d'une grande utilité pour l'étude des critères de sélection des piezomètres qui suit.

- Reprise éventuelle des mesures à St-Jean Vianney

Nous croyons que la poursuite des mesures à St-Jean Vianney est

souhaitable. En effet, bien que les études soient arrêtées depuis quelque temps déjà, (1973), certaines questions demeurent en suspens et les réponses au problème posé sont insuffisantes (le manque de données dans le temps en est la principale cause). Les points à approfondir sont énumérés plus bas dans la section "choix des piezomètres à conserver."

Pour rationaliser cette étude piezométrique à l'aide de l'analyse factorielle des correspondances et dans l'optique de la poursuite éventuelle des mesures, nous procédons à une réduction du nombre de piezomètres basée sur certains critères énumérés ci-bas. Nous suggérons des emplacements déjà étudiés, pour profiter de l'information acquise.

- Choix des piezomètres à conserver

Etant donné les objectifs suivants:

- connaissance générale sur toute la région;
- étude de la stabilité des pressions hydrostatiques dans le temps;
- étude des inversions de potentiel;
- détermination du niveau critique de la pression dans les nappes pour prévenir un glissement possible;

nous proposons de porter une attention spéciale aux critères de choix des piezomètres suivants:

- cerner la zone du cratère et environs immédiats;
- conserver les piezomètres dont la tendance ascendante ou descendante est importante;
- poursuivre l'étude des "cas spéciaux" (inversion de potentiel, etc.);

- suivre l'évolution des limites entre les 3 zones identifiées plus haut;
- conserver quelques points représentatifs de chaque zone.

De plus, suite aux constatations sur la précision des mesures des différents piezomètres, nous croyons que le piezomètre du type Gloetz est le plus apte à fournir des données précises et fiables. Il est en effet le seul à fournir des données précises au centième de pied et son installation hermétique est mieux adaptée à nos conditions climatiques. Signalons enfin qu'un ou deux piezomètres du type limnigraphe à lecture continue seraient d'une grande utilité comme référence de base de notre réseau et dans le cas d'extension de données si le besoin s'en fait sentir. Nous croyons de plus que les piezomètres ouverts devraient être évités en raison des possibilités accrues d'erreurs de mesures qu'entraîne l'utilisation de ce type de piezomètre.

Pour le choix final des piezomètres à conserver, on procédera au tri des piezomètres répondant aux 5 critères énumérés ci-haut et de là, on formera un groupe final (les notations employées sont les identificateurs originaux, non pas la notation FACOR); à noter de plus que ces identificateurs désignent souvent un nid de piezomètres (2 ou 3 ou 4 piezomètres implantés à des profondeurs différentes). En fait, ces identificateurs désignent les forages effectués sur le terrain. De plus, nous croyons utile de conserver un puits en entier si ce puits est choisi dans le groupe final, ceci permet d'ailleurs l'étude des inversions de potentiel, impossible autrement.

1) Zone du cratère: A-3, A-4, B-3,C-4, C-5, D-2, D-3, K-5, K-6, K-13, K-21, H-38;

2) Forte tendance à monter ou à descendre: A-4, B-3, C-1, C-5, D-2, E-2, B-1, K-2, K-3, K-4, K-6, K-9, K-11, K-13, K-14, K-15, K-18, K-21.

3) Cas spéciaux: D-2, K-8, K-14, K-15.

4) Limites entre 3 zones:

Zones I et II: K-2, K-4, K-6, K-9, K-10, K-14, H-20, H-24, H-36, H-38, H-39, H-40, H-47, H-48, H-49, H-50.

Zones II et III: A-1, A-2, B-2, B-3, C-4, C-5, D-2, K-3, K-7, K-20.

5) Points représentatifs de chaque zone: les points H-5 et H-30 pour la zone I (choix exclusivement géographique). Les autres points possibles, de même que les points représentatifs des zones II et III sont inclus automatiquement dans les points déjà sélectionnés par les 4 premiers critères.

Comme on peut le constater, plusieurs points sont énumérés plus d'une fois, il s'agit maintenant d'en extraire le groupe final en choisissant les piezomètres Gloetz (série K) en premier lieu et en ne conservant les piezomètres ouverts que par nécessité extrême. De plus, certains piezomètres, une fois groupés, peuvent être remplacés par un seul, vu leur très grande proximité géographique. Ainsi, les piezomètres H-20, H-38, et H-50 peuvent aisément être remplacés par H-43 sans aucune perte d'information, de même que H-47 et H-49 peuvent être remplacés par K-10. Enfin, on cherche surtout à conserver un minimum de piezomètres de façon à respecter au mieux nos 5 critères. Ce dernier choix s'effectue à l'aide des résultats obtenus de l'analyse factorielle des correspondances comme guide et en accord avec l'avis de l'hydrogéologue.

Nous suggérons donc, à titre d'exemple, le groupe de forages à conserver suivant:

A-4	B-1	B-3	C-4	C-5
C-6	D-2	E-2	K-2	K-3
K-4	K-6	K-7	K-8	K-9
K-10	K-11	K-13	K-14	K-15
K-18	K-20	K-21	H-5	H-24
H-30	H-38	H-43		

pour un grand total de 70 piezomètres possibles.

- Fréquence de mesure

Nous n'avons pas beaucoup approfondi cet aspect mais néanmoins nous sommes en mesure de faire les constatations suivantes concernant les résultats des plans 1-2 de chaque analyse. Les regroupements des dates déjà identifiés nous montre que:

- les saisons sont groupées entre elles sauf pendant les périodes critiques: Ex: printemps où la période de fonte des neiges est isolée (dates 5-6-7) et à certaines périodes de l'été (forte pluie, sécheresse, etc. (dates 15-16-17).
- les autres dates, tout en étant alignées selon leur ordre chronologique, demeurent groupées en petits sous-groupes: Ex:
  dates 1 à 5 (hiver, janvier à mars)
  dates 9 à 14 (6 mai au 7 juin)
  dates 18 à 24 (18 juillet au 4 septembre)
  dates 26 à 32 (4 octobre au 15 novembre).

Nous pouvons en conclure que:

- étant donné les faits suivants:
  - l'espacement moyen des dates est de 9 jours environ (32 dates sur 10 mois);
  - le regroupement de certaines dates démontre que ces dates fournissent la même information (en moyenne) concernant l'ensemble des piezomètres. On se trouve donc devant une information redondante;
  - l'isolement de certaines dates nous montre que ces dates fournissent une information particulière face à l'ensemble des autres dates;
  - le besoin de précision supplémentaire pendant les périodes critiques (grande variation des nappes);
- nous suggérons:
  - une mesure à tous les 3 jours environ à chaque piezomètre pendant la principale période critique de l'année (la fonte des neiges);
  - une mesure à tous les 15 à 30 jours environ à chaque piezomètre pour le reste de l'année (suivre l'évolution générale des nappes);
  - surveiller la concomitance et la régularité des relevés à tous les piezomètres;
  - l'implantation de 1 ou 2 piezomètres à lecture permanente (réseau primaire) (1 dans la zone critique et 1 à l'extérieur, par exemple, à titre de référence de base pour suivre l'évolution du réseau).

CONCLUSION

Nous avions, au début, un total de 184 piezomètres, nous en avons effectivement traité 137 et nous proposons d'en conserver 70, ce qui, vu la précision demandée, les buts poursuivis et le problème local, est une réduction assez remarquable. En fait, la perte d'information spatiale suite à cette réduction est presque nulle, notre réseau demeure très dense et est mieux structuré.

Soulignons enfin que malgré toutes les analyses que nous avons faites, il y aurait lieu de traiter séparément les zones par analyse des correspondances et de la même façon, traiter séparément les piezomètres de surface, intermédiaires et profonds. Ces études apporteraient sans doute beaucoup d'information supplémentaire et permettraient peut-être une nouvelle réduction. Nous pourrions aussi analyser les 70 piezomètres restants pour en réduire le nombre de nouveau. De plus, une étude des moyennes hebdomadaires, bi-mensuelles et mensuelles seraient non seulement plus aisée, mais plus concluante que celles effectuées sur les données ponctuelles utilisées dans ce mémoire. Evidemment, en ce qui nous concerne, nous croyons être arrivés à des résultats intéressants qui démontrent sans aucun doute les possibilités et la pertinence de l'analyse factorielle des correspondances pour l'étude de cas similaires, et c'est à titre d'exemple que nous signalons, en fin d'analyse, d'autres possibilités d'approches face à ce problème. Ainsi, dans les circonstances (étude préliminaire), nous n'avons pas jugé utile de procéder à une analyse approfondie dates-piezomètres, les seules analyses sur les dates d'une part et sur les piezomètres d'autre part, nous sont apparues suffisantes.

En conclusion, nous constatons que les difficultés rencontrées au cours de cette étude sont principalement reliées à l'existence d'une période de transition suite au glissement et à la trop courte période de mesures qui ne permet pas de suivre l'évolution de la nappe vers un état d'équilibre. C'est pourquoi nous recommandons la reprise des études à St-Jean Vianney afin de combler ce manque; ces études permettraient d'une part une surveillance constante de la région (considérée comme dangereuse) et d'autre part, d'acquérir des informations supplémentaires qui pourraient s'avérer utiles pour la détection et la prévention de glissements futurs.

CHAPITRE 7

COMPARAISON ENTRE L'APPROCHE ANALYTIQUE ET STATISTIQUE

Axées sur l'étude du cas de St-Jean Vianney, les deux approches se distinguent déjà par leurs objectifs propres. Sans être complètement différents, certains objectifs sont particuliers à l'approche adoptée et de ce fait, on ne peut comparer les deux approches point par point. Nous avons cependant retenu quelques points qui nous permettront de mieux apprécier les avantages ou désavantages de chaque approche.

7.1 Conclusions similaires: (issues des 2 approches)

- identification de la période de transition (recherche d'un nouvel équilibre). Phénomène concentré dans la région immédiate du nouveau cratère;
- l'importance de premier ordre accordée au phénomène montée-descente et aux cas spéciaux d'inversion de potentiel;
- surabondance de piezomètres dans la région de St-Jean Vianney;
- manque de données dans le temps pour répondre aux questions soulevées par cette étude;
- analyse rendue difficile par le manque de planification et le mauvais contrôle des données lors des 3 campagnes menées sur le terrain à St-Jean Vianney;

7.2 Complémentarité des deux approches

- le problème posé par la difficulté d'obtenir des mesures concomitantes pour l'emploi de méthodes statistiques n'existe pas avec l'approche analytique;
- l'approche statistique (FACOR) a permis la localisation très précise des points importants concernant le phénomène montée-descente alors que l'approche analytique permet d'identifier ce phénomène dans la région du cratère sans autre distinction;
- la méthode FACOR fait ressortir beaucoup de détails sur l'échantillon étudié. Ainsi, les axes 2 et 3 nous montrent une analyse très fine tant au point de vue des dates que des piezomètres. La méthode analytique ne permet pas ce genre d'analyse vu l'abondance de graphiques et de données à étudier.

7.3 Avantages de l'approche statistique

- sa fiabilité et son objectivité démontrées par ses résultats et représentations qui conduisent aux mêmes interprétations que celles obtenues à l'aide des méthodes classiques d'analyse;
- sa rapidité d'exécution qui fournit tous les résultats désirés en un minimum de temps (donc à un coût moindre);
- sa souplesse d'utilisation par les transformations possibles sur les données brutes;
- sa facilité d'adaptation pour l'étude d'un phénomène physique quelconque;
- la possibilité de traiter l'ensemble des données comme un tout ou en groupes séparés et distincts, en tenant compte de toute l'information disponible;

- les possibilités moins exploitées que recelle la méthode, par exemple: l'étude des axes 4, 5...
  la cartographie des facteurs du 1er, 2e et 3e axe, etc.
  étude plus poussée sur les contributions;
- la possibilité de "photographier" rapidement une masse de données et d'en dégager les principales caractéristiques de façon sûre et rapide (utile dans les études préliminaires comme celle-ci);
- son utilité en tant qu'outil pour toute étude de rationalisation ou d'optimisation de réseaux de mesure.

Pour ces raisons, nous croyons, outre notre objectif principal concernant la méthodologie de rationalisation et l'étude du cas de St-Jean Vianney, avoir atteint un autre objectif important qui était de montrer l'apport des méthodes statistiques et en particulier de l'analyse factorielle des correspondances pour le traitement de grands tableaux de données.

7.4 Choix du groupe final des piezomètres à conserver

Lorsque l'on compare les piezomètres choisis à l'aide de l'approche statistique et ceux conservés par l'emploi de méthodes analytiques, on s'aperçoit que ce dernier groupe (plus nombreux) englobe presqu'entièrement le premier bien que les critères de sélection varient quelque peu. Nous réunissons donc ces deux groupes pour en tirer un choix final et complet.

- Sélection finale

Il s'agit de respecter au mieux les critères de sélection issus

des 2 approches tout en éliminant les piezomètres devenus superflus à la suite du regroupement de tous les piezomètres retenus.

- Nous conservons évidemment tous les piezomètres retenus à la fois par l'approche analytique et par l'approche statistique;
- Parmi les piezomètres restants, nous distinguons deux ensembles:
  1) les piezomètres sélectionnés par FACOR et ignorés par les analyses classiques;
  2) les piezomètres sélectionnés par les analyses classiques et ignorés par l'analyse statistique.

1) Le premier groupe comprend les forages E-2, K-3, K-7, K-18 et H-5.
   - nous conservons K-3 en raison de sa situation géographique particulière et de sa forte tendance descendante identifiée par FACOR;
   - nous conservons K-18, point important dans la zone II identifiée par FACOR;
   - les forages E-2, K-7 et H-5 peuvent aisément être remplacés par E-1, K-20 et H-34 en raison de leur proximité géographique. Ces 3 derniers forages faisant partie des piezomètres sélectionnés par l'approche analytique.

2) le second groupe comprend 36 piezomètres.

   Etant donné l'importance des études de profils, coupes, etc., nous devons conserver le maximum de piezomètres sur les coupes jugées de première importance.
   - les forages H-4 et H-23 peuvent être remplacés par H-24, et

H-50 par H-38 en raison de leur proximité géographique;

- nous conservons les forages K-12, D-3, H-6, H-7 et H-10 à cause de leur importance sur les coupes et leur représentativité des différentes zones identifiées par l'analyse des correspondances;
- bien que l'analyse des correspondances ne met pas en évidence les autres piezomètres, on ne peut les ignorer étant donné leur position stratégique sur les différentes coupes décrites plus haut. Il s'agit des forages notés: A-1, A-2, A-3, C-1, C-2, C-3, E-1, K-16, K-17, H-12, H-34, H-44, H-45, et H-48.

Le groupe final comporte donc 44 forages pour un total de 96 piezomètres (tableau 7.1) On retrouve à la figure 7.1 la localisation de ces forages.

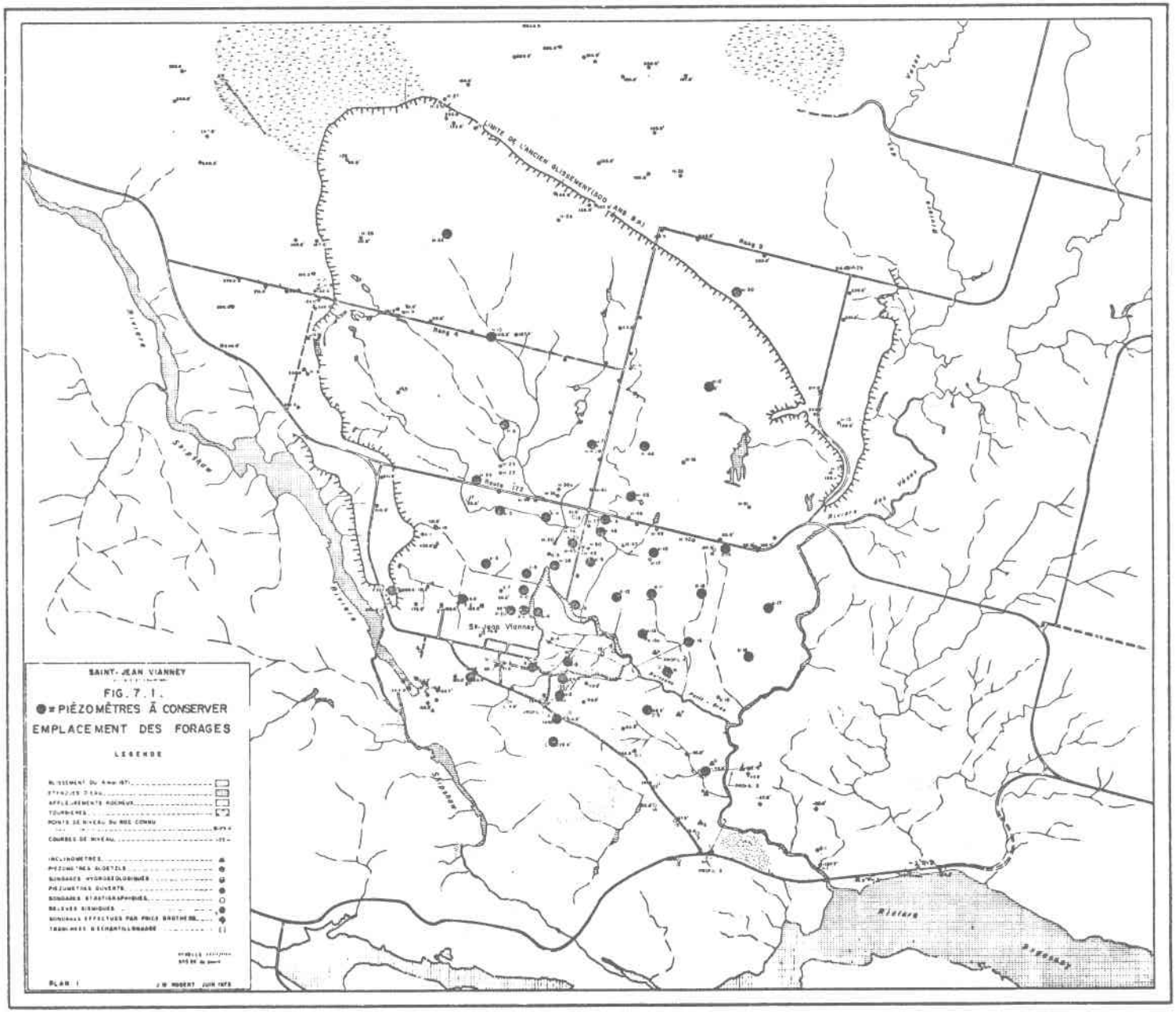
CONCLUSION

On se surprendra peut-être de l'importance des piezomètres à conserver dans une si petite région et on aura raison. Nous pourrions, en effet, procéder à une nouvelle réduction assez importante (de l'ordre de 50%), mais pour cela, il faudrait aller plus en détail dans le choix et la justification de certaines coupes et procéder à une nouvelle étude en analyse des correspondances sur notre choix final. Les possibilités déjà admises de cette dernière méthode nous permettraient peut-être de distinguer de nouveaux groupes homogènes (donc présumés redondants) et ainsi effectuer des classifications pour n'en conserver que les points les plus représentatifs. De plus, l'étude détaillée des profils nous permettrait sans doute d'éliminer certains piezomètres superflus. Par contre, la

TABLEAU 7.1: Piézomètres à conserver

44 forages, 96 piézomètres

A - 1 - 2	D - 3 - 1	K - 13 - 2
A - 2 - 1	D - 3 - 2	K - 13 - 3
A - 2 - 2	E - 1 - 1	K - 14 - 1
A - 2 - 3	E - 1 - 2	K - 14 - 2
A - 3 - 2	E - 1 - 3	K - 14 - 3
A - 3 - 3	K - 2 - 1	K - 15 - 1
A - 4 - 1	K - 2 - 2	K - 15 - 2
A - 4 - 2	K - 2 - 3	K - 15 - 3
A - 4 - 3	K - 3 - 1	K - 16 - 1
B - 1 - 1	K - 3 - 2	K - 16 - 2
B - 1 - 2	K - 3 - 3	K - 16 - 3
B - 1 - 3	K - 4 - 1	K - 17 - 1
B - 3 - 1	K - 4 - 2	K - 17 - 2
B - 3 - 2	K - 4 - 3	K - 18 - 1
B - 3 - 3	K - 6 - 2	K - 18 - 2
C - 1 - 1	K - 6 - 3	K - 20 - 1
C - 1 - 2	K - 8 - 1	K - 20 - 2
C - 1 - 3	K - 8 - 2	K - 21 - 1
C - 2 - 1	K - 8 - 3	K - 21 - 2
C - 3 - 1	K - 9 - 1	K - 21 - 3
C - 3 - 2	K - 9 - 2	H - 6
C - 4 - 1	K - 9 - 3	H - 7
C - 4 - 2	K - 10- 1	H - 10
C - 4 - 3	K - 10- 2	H - 12
C - 4 - 4	K - 10- 3	H - 24
C - 5 - 1	K - 11- 1	H - 30
C - 5 - 2	K - 11- 2	H - 34
C - 6 - 1	K - 11- 3	H - 38
C - 6 - 2	K - 12- 1	H - 43
D - 2 - 1	K - 12- 2	H - 44
D - 2 - 2	K - 12- 3	H - 45
D - 2 - 3	K - 13- 1	H - 48


LIMITE DE L'ANCIEN GLISSEMENT(1000 ANS B.P.)
St Jean Vianney
SAINT-JEAN VIANNEY
FIG. 7.1.
●= PIÉZOMÈTRES À CONSERVER
EMPLACEMENT DES FORAGES
LEGENDE
PLAN 1
J.M. MOUROT JUIN 1975

complexité du problème très spécial de St-Jean Vianney est souvent telle que ces études auraient une ampleur incompatible avec un tel travail préliminaire.

De plus, il ne faut pas négliger l'importance de cette première réduction qui nous permet de réduire le nombre de forages de 103 initialement à 44 et le nombre de piezomètres à mesurer de 184 à 96 et ce, sans aucune perte d'information ou presque. Enfin, n'oublions pas qu'il s'agit de maintenir un réseau tertiaire donc assez dense et le plus complet possible.

RECOMMANDATIONS

A la suite de notre étude et devant l'impossibilité de déterminer avec précision la ou les causes réelles du glissement à St-Jean Vianney en mai 1971 (on ne peut que faire des suppositions dans l'état actuel des choses), nous croyons que la reprise des relevés est nécessaire étant donné l'état de transition où se trouvaient les nappes à la suite du glissement. Il n'est cependant pas nécessaire d'effectuer ces relevés sur tous les piezomètres, une rationalisation s'impose.

Evidemment, le temps écoulé depuis le glissement pourrait être un handicap quant à l'opportunité de certains de nos objectifs (suivre l'évolution de l'état transitoire par exemple) mais nous suggérons notre plan de rationalisation à titre d'exemple et nous espérons qu'il pourrait être utile lors d'études similaires.

Nos recommandations sont basées sur 3 lacunes principales qui ont été identifiées:

- la surabondance des piezomètres, même dans le cadre d'un réseau tertiaire;
- le manque de données dans le temps;
- le manque de planification et le mauvais contrôle des données lors des 3 études menées sur le terrain à St-Jean Vianney. Une meilleure concertation aurait sûrement facilité l'étude des données qui aurait pu être plus concluante.

SUGGESTIONS D'UN PLAN DE RATIONALISATION A ST-JEAN VIANNEY

- Objectifs:
  - Etude locale d'un cas particulier: glissement de terrain à St-Jean Vianney;
  - Déterminer les causes du glissement;
  - Etude très poussée dans la région immédiate du cratère;
  - Surveillance (zone potentiellement dangereuse).
- Sous-objectifs et études nécessaires:
  - Déterminer quand la stabilité des pressions hydrostatiques sera atteinte;
  - Déterminer le niveau critique de la pression dans les nappes, plus spécialement les nappes dans les poches de sable entourées d'argile;
  - Etude des profils, coupes;
  - Surveillance de la direction de l'écoulement;
  - Surveillance des inversions de potentiel;
  - Connaissance générale de toute la région (déjà acquise) et suivre l'évolution générale des nappes de la région.

- Choix des variates et précision désirée

  - niveau des nappes: précision moyenne sur l'ensemble de la région;
  - pression dans les nappes: précision extrême dans la région immédiate du cratère, dans les poches de sable entourées d'argile, dans les cas d'inversion de potentiel;
  - évolution des nappes (niveau et pression) dans le temps: précision extrême dans les périodes de changement brusque (évolution très rapide): fonte des neiges, pluie intense: précision moyenne le reste du temps.

- Type de réseau nécessaire

  - Réseau tertiaire avec:

    Stations de base: (de référence)

    - un piezomètre à lecture continue dans la zone du cratère;
    - un piezomètre à lecture continue hors de la zone immédiate du cratère;

    Stations satellites: (axées autour des stations de base)

    - tous les autres piezomètres de type Gloetz (capteur de pression);
    - nids de piezomètres (pour les inversions de potentiel).

- Piezomètres à conserver

  Choix basé sur la méthode d'analyse des correspondances et les méthodes analytiques.

Critères de sélection

- phénomène montée-descente;
- coupes et profils importants;
- zone du cratère;
- cas spéciaux (inversion de potentiels)
- points représentatifs des zones identifiées par la cartographie des facteurs et des zones potentiellement dangereuses localisées par l'étude géologique (poches de sable).

Liste des piezomètres à conserver au tableau 7.1.

- Fréquence de mesure

Choix basé sur la précision désirée et les résultats déjà acquis:

- une mesure à tous les 3 jours environ à chaque piezomètre pendans la principale période critique de l'année: la fonte des neiges;
- une mesure à tous les 15 à 30 jours environ à chaque piezomètre pendant le reste de l'année. Un choix précis entre 15 et 30 jours demeure difficile à faire et pourrait, en fait, être déterminé par le budget disponible. Il importe, cependant, que ces mesures soient prises le même jour (concomitance des mesures).

Dans le cadre d'une rationalisation dynamique, les données obtenues aux points de mesure suggérés pourraient être analysées dans une deuxième étape. Ainsi, une analyse de la variabilité spatio-temporelle plus détaillée et basée sur un ensemble de données représentatives pourrait être effectuée.

L'étude devrait se poursuivre jusqu'à l'atteinte de tous les objectifs. Par la suite, seules les stations de base pourraient être conservées à titre de stations d'observation en tant que composantes d'un réseau primaire régional ou national.

BIBLIOGRAPHIE

BEAR, J. ZASLAVSKY, (1968), Physical principles of water percolation and seepage, U.N. ESCA 1968.

BENZECRI, J.P., (1973), L'analyse des données. Tome II. Dunod.

CANCEIL, M. et SAUCEROTTE, H., (1970), Optimisation du réseau hydrométrique de la Beauce. Rapport B.R.G.M. 70 SGN 364 HYD.

CANCEIL, M., (1971), Le traitement statistique des données en hydrologie: Optimisation des réseaux piezométriques et hydrométriques, Rapport B.R.G.M. 71 SGN 156 HYD.

CANCEIL, F., (1973), Rationalisation des réseaux de mesure piezométriques à l'aide de techniques d'analyse multivariate. International Symposium on Uncertainties in Hydrologic and Water Resources Systems.

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

CAZES, P., SOLETY, P., VUILLAUME, Y., (1970), Exemple de traitement statistique de données hydrochimiques, Bull. B.R.G.M. (2), III, 4-1970: 75-90.

COTTINET, D., (1974), Contribution à l'étude des fluctuations de la nappe du massif forestier Landais, Thèse de docteur en Sciences de la Terre à l'Université de Bordeaux I.

COOLEY, RICHARD, HARSH, L., DAVIS, JOHN F. LEWIS, (1972), Principles of Groundwater hydrology, The hydrologic engineering center corps of engineers U.S. Army, 1972.

CROWFORD, C.B. EDEN, (1967), Stability of Natural slopes in sensitive clay, Proceeding of the American Society of Civil Engineers, July 1967.

DAVIS, H. GEORGES, (1965), Groundwater data network in the United States. A.I.H.S., Québec, 1965.

DEGALLIER, R., (1969), Interprétation des variations naturelles du niveau des nappes. Bull. B.R.G.M. (2), III, 2-1969: 7-56.

DELHOMME, J.P. et DELFINER, P., (1973), Application du Krigeage à l'optimisation d'une campagne pluviométrique en zone aride. Communication au "Colloque sur l'élaboration des projets d'utilisation des ressources en eau sans données suffisantes", Madrid.

DELHOMME, J.P. et Al., (1973) Construction automatique de cartes d'une grandeur mesurée ponctuellement. Rapport final CIG.

DELFINER, P. et DELHOMME, J.P., (1973) Optimum interpolation by kriging. Rapport Centres de Morphologie mathématique et d'informatique géologique.

DE MARSILY, G., (1971). Symposium Varsovie 1971, Session VII, 20 juillet.

DUBREUIL, P., GUISCOFRE, J., (1970). Planification d'un réseau hydrométrique minimal. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. Service Hydrologique Paris.

DUERBAUN, H.J., TRIPPLER, K., (1972). Comparaison of statistical and deterministics approaches in the determination of hydrological parameters of aquifers. International symposium of uncertainties in hydrologic and water resource systems. Volume III - Décembre II-14 1972, University of Arizona, Tucson, Arizona.

EMSELLEM, Y. et MARGAT, J. (1971). Collecte et stockage des informations sur les caractéristiques hydrodynamiques des réservoirs aquifères et l'état des réserves d'eau souterraines. Bulletin du bureau des recherches géologiques et minières (B.R.G.M.), 2(3): 3-10.

FERRIS, J.G., KNOWLES, P.B., BROWN, R.H., STALLMAN, R.W., (1962). Theory of aquifer tests. Geological Survey Water Supply paper 1536 - E.

FONTAINE, A., (1972). Exercice pratique d'analyse factorielle. LHM/R72/10.

FONTAINE, A., (1973). Modèles en statistique multidimensionnelle descriptive. LHM/R73/21.

FORKASIEWECY, J., et MARGAT, J., (1967). Création d'un réseau général de piezomètres permanents en France - Note préliminaire. B.R.G.M. DS 67 A 29.

FORKASIEWECY, J. et MARGAT, J., (1969). Objectifs des réseaux de piezomètres permanent. Bull. B.R.G.M. (2), III, 2-1969: 99-104.

FREEZE, ALLEN R., (1967), Quantitative Interpretation of regional Groundwater Flow Patterns as an Aid to Water Balance Studies. Inland Waters Branch. Department of energy, mines and resources, Canada, Reprin series No 16.

FREEZE, R.A., (1969). Regional Groundwater Flow Ald-Wives. Lake Drainage Basin Saskatchewan. Department of Energy, Mines & Resources, Canada, Scientific Series no 5.

FREEZE, R.A., (1969). Theoritical Analysis of Regional Groundwater Flow. Department of Energy, Mines & Resources, Canada, Scientific series no 3.

FRIND, E.O., (1970). Theoritical analysis of aquifers response due to dewatring welland. Canadian Geotechnical Journal 7, 205, 1970.

GAGNON, R.M., FERLAND, M.G., (1974). Climat du Québec méridional. Ministère des Richesses Naturelles. Service de la Météorologie.

GRENIER, CLAUDE, (1973). Levée Hydrogéologique - Saint-Cuthbert. Ministère des Richesses Naturelles. Service des eaux souterraines.

HVORSLEV, M. SOUL, (1951). Time lag and soil permeability in groundwater observations. U.S. Army Waterways Experiment Station, Bull. Nov. 36 1951.

HVORSLEV, M., JUUL, (1960). Physical components of the shear strength of saturated clays. Research Conf. on shear strength of soils, 1960.

INESON, J., (1965). Ground Water - Principles of Network Design. Symposium Design of Hydrological Networks, Tome 2, 476-487.

JARRETT, P.M., EDEN, W.J., (1970). Groundwater flan in eastern Ottawa. Canadian Geotechnical Journal 7, 367 (1970).

JURDANT, M. et Al. (1972). Carte écologique de la région du Saguenay-Lac St-Jean. Centre de recherche forestière des Laurentides. Région de Québec, Rapport d'information Q-F-X-3-I.

KADULA, J., (1972). Etude Hydrogéologique de la région de St-Jean Vianney. Services techniques en eau souterraine ing. Montréal, mars 1972.

LAROCHELLE, P., (1973). Rapport de synthèse des études de la coulée d'argile de St-Jean Vianney. Ministère des Richesses Naturelles, Québec, Mars 1973.

LASALLE, P., (1973). Surficial Geology of the St-Jean Vianney Area. Ministère des Richesses Naturelles, Service d'exploitation géologique, Québec.

MANDEL, S., (1965). The design and instrumentation of hydrogeological observation networks. A.I.H.S. Quebec 1965.

MARCOTORCHINO, J.F., Les marques de cigarettes HC no 3 (cigarettes), sur une étude faite au C.I.R.O., d'après une note de cours écrites par M. Horps.

MARGAT, J., (1972). Evaluation des ressources hydrauliques - Méthode d'implantation d'un réseau piezométrique général. B.R.G.M. 72 SGN 126 AME.

MATHERON, G., (1969). Le Krigeage Universel, Cahier du centre de morphologie mathématique (Fontainebleau), Fascicule 1.

PALOC, H., (1972). Sélection des piezomètres dans un réseau surabondant pour constituer un réseau piezométrique primaire - Application à la nappe de CRAU (Bouches-du-Rhône). B.R.G.M. 72 SGN 126 AME.

ROUX, P., (1971). Présentation de l'analyse factorielle des correspondances, d'après une note du Pr. Benzecri (1). LHM/N71/7.

ROUX, P., (1971). Incidence de l'analyse factorielle des correspondances sur l'optimisation des réseaux piezométriques. LHM/R71/13.

ROUX, P., (1974). Analyse des correspondances au service de l'hydrogéologue. Congrès A.I.H. Montpellier, Septembre 1974.

ST-MARTIN, HENRI, GRISEL, HENRI, (1974). Importance d'un réseau de qualité de l'eau souterraine au Québec. Ministère des Richesses Naturelles, Direction générale des eaux, Québec.

TISON, L.J., (1948). Fluctuations d'une nappe aquifère étendue. A.I.H.S., 1948 No 33.

TOTH, J., (1962). A theorical analysis of groundwater flow in small drainage basins. Proc. Hydrol. Symposium No 3 Calgary.

TOTH, J., (1972). Properties and Manifestations of Regional Groundwater Movement. Intern. Geological Congress, Montreal 1972.

TRUPIN, G., (1969). Variation piezométrique d'un aquifère captif sous l'action d'une surcharge de dimension finie. B.R.G.M. Deuxième série No 2, Section III - Hydrogéologie.

VABRE, P., BOBEE, B., D. CLUIS, (1974), Programme FACOR - Analyse factorielle des correspondances. INRS-Eau, rapport interne no 11, 44 p.

VAN EVERDINGEN, R.O. Observed changes in Groundwater Regime Caused by the Creation of Diefanbaker Lake Saskatchewan. Inland Waters Branch. Department of Environment, Technical Bulletin No 59.

VILLENEUVE, J.P. et Al. (1972). Rationalisation du réseau hydrométrique du Québec. Etude pour le Ministère de l'environnement, Gouvernement Fédéral du Canada. INRS-Eau.

VILLENEUVE, J.P. et al. (1973). Méthodologie de rationalisation des réseaux hydrométriques. Bulletin des Sciences Hydrologiques, XVIII, 4 12/1973.

WALTON, (1970). Groundwater-resource evaluation. McGraw Hill series in water resources and environmental engineering 1970.

WALTON, WILLIAM (1962). Selected Analytical Methods for well and aquifer evaluation. Illinois State Water Survey. Department of registration & Education, 1962.

WATKINS, J.R., Groundwater Hydrology. University of Queensland, Department of civil engineering, Bulletin No 12, August 1969.