

Gestion des eaux souterraines



par Prof. Dr Aurèle Parriaux

LABORATOIRE DE GÉOLOGIE
DE L'INGÉNIEUR ET DE L'ENVIRONNEMENT
Edition 2007



Photos de couverture :



Galerie de captage des Bornels à L'Etivaz
(Service des Eaux de la Ville de Lausanne). Photo A. Parriaux



Foreuse pour sondage au rotary. Photo A. Parriaux



Table des matières

Table des matières	1
Introduction.	3
1. Les différentes manières de considérer les eaux souterraines.....	5
1.1. Composante du patrimoine environnemental	5
1.2. Ressource exploitable	5
1.3. Gêne dans les aménagements et les constructions.....	6
2. Les réservoirs hydrogéologiques sur la Terre.....	7
2.1. Caractéristiques hydrogéologiques des terrains meubles et des roches.....	7
2.1.1. Porosité	7
2.1.2. Composition pétrographique de la roche	8
2.1.3. Perméabilité	8
2.2. Notion de bassin en hydrogéologie.....	10
2.2.1. Bassin hydrogéologique	10
2.2.2. Bassin d'alimentation des eaux souterraines	11
2.3. Fonctionnement des aquifères	13
2.3.1. Bilan hydrologique des aquifères	13
2.3.2. Rôle de tampon hydraulique	14
2.4. Configurations hydrogéologiques typiques	14
2.4.1. Configurations typiques de la Suisse	15
2.4.1.1. Aquifères des alluvions fluviales récentes	15
2.4.1.2. Aquifères des dépôts fluvio-glaciaires	15
2.4.1.3. Aquifères des roches molassiques	17
2.4.1.4. Aquifères des roches karstiques carbonatées	19
2.4.1.5. Aquifères des roches karstiques évaporitiques	19
2.4.1.6. Aquifères des roches cristallines silicatées	19
2.4.1.7. Systèmes géothermiques	23
2.4.2. Configurations types extérieures à la Suisse	24
2.4.2.1. Aquifères des roches volcaniques	24
2.4.2.2. Régions arides	24
2.4.2.3. Régions côtières	26
3. La gestion dans l'optique du développement durable.....	27
3.1. Besoins en eau	27
3.2. Cadre légal et administratif.....	27
3.2.1. Sur la propriété des eaux souterraines	28
3.2.2. Sur la protection des eaux	28
3.3. Evaluation du potentiel hydrogéologique	30
3.3.1. Notion de réserve totale	30
3.3.2. Notion de réserve renouvelable	31
3.3.3. Notion de ressource exploitable	32
3.3.4. Principes de gestion	32
3.3.4.1. Gestion journalière et hebdomadaire	32
3.3.4.2. Gestion saisonnière	33
3.3.4.3. Gestion à long terme	33
3.3.5. Méthodes de réalimentation provoquée	35
3.3.5.1. Réalimentation artificielle	36
3.3.5.2. Réalimentation induite	37
3.3.5.2.1. Cas à partir d'une rivière	37
3.3.5.2.2. Cas à partir d'un lac	37
3.3.6. Méthodes d'inhibition des exutoires naturels	40
3.3.7. Vulnérabilité	42

3.4. Evaluation économique.....	42
3.5. Comparaison multifactorielle de variantes et critères de choix	42
4. Mise en valeur des eaux souterraines.....	43
4.1. Prospection des ressources.....	43
4.1.1. Cartographie hydrogéologique de surface	43
4.1.2. Prospection géophysique	46
4.1.2.1. Méthodes sismiques	46
4.1.2.1.1. Paramètres intrinsèques du matériel	48
4.1.2.1.2. Effets de la structure du sous-sol	50
4.1.2.1.3. Sismique réfraction	50
Exercice 4.1 : Sismique (voir annexe II).....	51
4.1.2.1.4. Sismique réflexion	53
4.1.2.1.5. Usage de la sismique en hydrogéologie	55
4.1.2.2. Méthodes géoélectriques	55
4.1.2.2.1. Notion de résistivité électrique des terrains	55
4.1.2.2.2. Circulation du courant électrique dans le sous-sol	57
4.1.2.2.3. Le sondage électrique	60
4.1.2.2.4. Le traîné électrique	63
4.1.2.3. Synthèse sur les méthodes géophysiques appliquées à l'hydrogéologie.	64
4.1.3. Sondages mécaniques avec essais de pompage exploratoires	66
4.1.3.1. Techniques de sondage	66
4.1.3.1.1. Sondages à la pelle mécanique	66
4.1.3.1.2. Sondages carottés	66
4.1.3.1.3. Sondages au rotary à la boue	69
4.1.3.2. Essais de pompage dans les sondages	71
4.1.3.2.1. Courbe caractéristique du sondage	71
4.1.3.2.2. Détermination de la perméabilité	71
4.1.3.2.2.1. Perméabilité moyenne	71
4.1.3.2.2.2. Profil de perméabilité par courantométrie de forage	73
Exercice 4.3 : Flowmeter (voir annexe II)	74
4.1.3.2.3. Détermination de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement	78
4.1.3.2.4. Analyse de la qualité chimique de l'eau souterraine	78
4.1.3.2.5. Analyse de la qualité bactériologique de l'eau souterraine	78
4.1.4. Puits d'essai avec essais de pompage de longue durée	79
4.1.4.1. Les puits d'essai	79
4.1.4.2. Les essais de pompage de longue durée	80
4.2. Bilan quantité - qualité de la ressource	80
4.3. Infrastructure d'exploitation	81
4.3.1. Ouvrages de captages	81
4.3.1.1. Aquifères quaternaires peu épais à faible profondeur	81
4.3.1.2. Aquifères des grès molassiques	81
4.3.1.3. Aquifères quaternaires profonds ou épais	83
4.3.1.3.1. Puits filtrants verticaux	83
4.3.1.3.2. Puits à drains horizontaux	85
4.3.1.4. Aquifères rocheux profonds ou épais	88
4.3.1.4.1. Aquifères de versant	88
4.3.1.4.2. Aquifères de fond de vallée ou de plateau	89
4.3.2. Systèmes de distribution	90
4.4. Mesures de protection	93
Exercice 4.4 : Prospection de ressources en eau de boisson (voir annexe II).....	94
4.5. Conclusion.....	94
Annexe I : Principaux textes légaux.....	95
Annexe II : Exercices (hors cahier).....	96
Index alphabétique des termes principaux.....	97

Introduction.

L'eau source de vie, source de bien-être, source de plaisir, source de pureté. Toutes les représentations plus ou moins allégoriques des vertus de l'eau la montrent quelque part à la surface de la terre, que ce soit dans un frais torrent, dans une bouteille d'eau minérale ou arrosant quelque naïade aux bains (figure 0.1 page 3). Ces images évoquent pour nous un milieu qui nous est familier.

Se représenter les eaux souterraines, c'est plus difficile, déjà parce que l'on ne les voit pas avant qu'elles arrivent

en surface. Autant il est facile de visualiser l'eau contenue dans un lac, autant il est malaisé d'imaginer comment de l'eau peut être accumulée dans des terrains. Autant il est facile de constater le sens d'écoulement d'une rivière, autant il est difficile de savoir dans quelle direction coule une nappe souterraine.

C'est ainsi que l'Homme, qui a fait des eaux de la surface un symbole d'extraversion, donne aux eaux cachées une connotation plus ou moins occulte. Ceci explique, en par-



Figure 0.1: Elliot Daingerfield, *La source dans la forêt*, huile sur toile, collection privée.



Figure 0.2: Gravure sur bois : Sourciers, illustration du *De re metallica*, d'Agricola.

tie en tous cas, pourquoi ce milieu est le terrain de prédilection des sourciers et autre spécialiste des noeuds telluriques (figure 0.2 page 4).

Ce cours devrait contribuer à apporter un peu de lumière sur ce sombre compartiment de l'environnement, sans vouloir à tout prix le démystifier, ce serait dommage sur le plan poétique.

Dans le premier chapitre, nous examinerons l'eau souterraine avec beaucoup de recul, pour identifier toutes les interactions entre l'eau souterraine, l'Homme et la société.

Dans le chapitre 3, nous présenterons les grands principes qui conduisent à la gestion de cette ressource vitale à grande échelle et ce qu'implique une telle gestion pour un pays quelque part sur la terre.

Le chapitre 2 décrira concrètement sous quelle forme se

trouve l'eau dans les différentes formations géologiques, que ce soit en Suisse ou dans des endroits exotiques. On verra comment les eaux circulent dans le milieu géologique, comment les nappes sont réalimentées naturellement.

Le chapitre 4 sera chargé. On y verra les méthodes de prospection et de mise en valeur des eaux souterraines. L'ingénieur aux côtés du géologue y travaille beaucoup dans la pratique de sa profession.

1. Les différentes manières de considérer les eaux souterraines

La présence d'eau dans le sous-sol peut être le meilleur ou le pire pour l'ingénieur, selon qu'elle est désirée ou pas. Ces perceptions très diverses d'un même élément peuvent être explicitées par des exemples.

1.1. Composante du patrimoine environnemental

Les eaux souterraines, en tant qu'élément de l'hydrosphère et branche du cycle de l'eau, s'intègre dans le patrimoine naturel. Même si cette notion est moins évidente que pour les lacs et les rivières, elle est néanmoins à défendre. Il suffit pour s'en convaincre de savoir que ces dernières sont alimentées à basses eaux presque uniquement par les eaux souterraines. Le sous-sol en général a été pendant longtemps négligé. Nous l'avons utilisé pour placer des substances indésirables loin de notre regard ou de notre nez. Cette politique a fini par causer un tort irréversible à de nombreuses nappes souterraines.

Dans l'action de grande envergure de remédiation des sites contaminés, qui est actuellement entreprise, les eaux souterraines occupent une place prioritaire, comme en témoigne la récente ordonnance sur le traitement des sites contaminés (figure 1.1 page 5). Elles entrent aux côtés des eaux de surface, des sols et de l'air dans les biens à protéger.

D'une manière indirecte, les eaux souterraines entrent dans les opérations de protection des biotopes humides, des marais d'importance nationale et des géotopes, notion récemment introduite pour conserver le patrimoine géologique.

1.2. Ressource exploitable

Les eaux souterraines sont le principal pourvoyeur en eau de boisson. En Suisse, elles fournissent près de 80 % des réseaux d'eau potable, malgré le fort développement de l'exploitation des eaux de surface dans les grandes villes

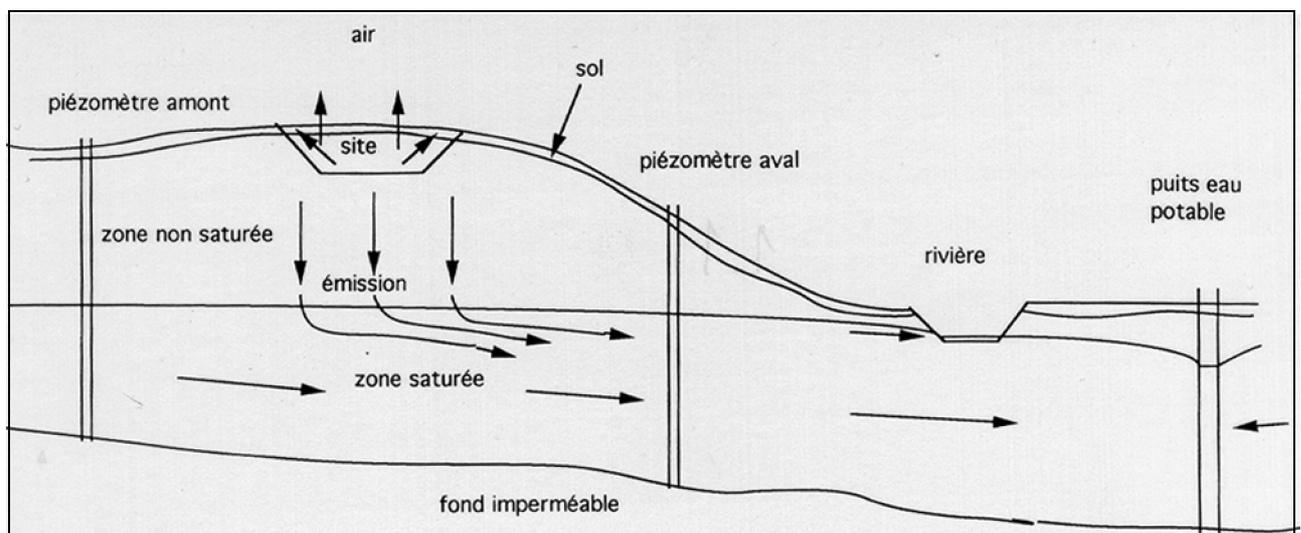


Figure 1.1: Les eaux souterraines sont une des principales préoccupations de la politique de décontamination des sites pollués.

où la demande est telle qu'elle dépasse la capacité du sous-sol. Dans l'agglomération lausannoise, par exemple, proportion d'eau souterraine est tombée à 25 % environ. A la campagne, c'est le phénomène inverse.

Les eaux souterraines participent aussi à la couverture des besoins agricoles, qui sont encore bien supérieurs en volume aux précédents. Elles assurent la production de nourriture sur la terre, qu'elle soit végétale ou animale. Rappelons à ce propos quelques ordres de grandeur tirés du cours de Géologie de première année : 1000 l d'eau sont nécessaires pour produire 1 kg de pain; il en faut 10 fois plus pour produire 1 kg de viande.

L'évolution de la politique gérant l'exploitation des ressources dans le domaine agricole est intéressante. Pendant des millénaires, l'irrigation privilégiait le détournement des eaux de surface puisqu'elles pouvaient par des réseaux impressionnants arriver par gravité dans les champs. Les eaux souterraines présentaient le défaut de nécessiter un pompage. Dans les régions privées d'eaux de surface, on extrayait l'eau des puits par la force de l'homme, des animaux ou du vent (figure 1.2 page 6).

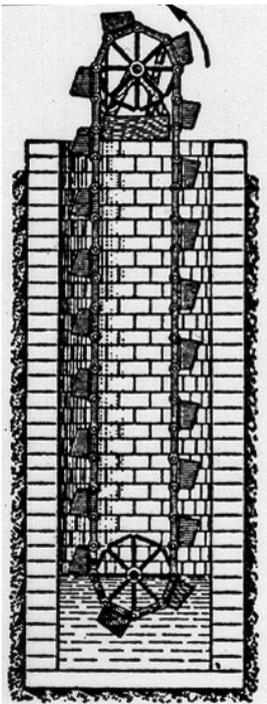


Figure 1.2: La noria (du mot arabe naora) était à l'origine faite d'une série de pots de terre cuite liés à une corde qui tourne sur une grande roue en surface et une roue de renvoi au fond du puits. Les pots se renversent dans un réservoir. Des norias existent encore aujourd'hui dans les régions pauvres; des chaînes remplacent les cordes et des godets en tôle les pots de terre.

Le développement de l'électricité et des pompes a modifié profondément la donne au début du XXe siècle. Ceci a donné un fort essor à l'irrigation des grandes plaines alluviales par le creusage d'une multitude de puits.

Dès le milieu du XX siècle, l'exploitation des eaux de surface a connu un regain par la construction de barrages de grande taille pour retenir l'eau en amont des zones de culture. C'est une des fonctions principales du barrage d'Assouan. Ce mouvement continue activement. Dans les bassins du Tigre et de l'Euphrate, la Turquie prive l'Iraq

et la Syrie d'une partie importante du débit des fleuves qui conditionnent leur survie agricole; ces aménagements préparent de prochaines guerres de l'eau.

Dans les pays développés, les récentes législations environnementales veulent garantir un débit minimal dans les rivières et proscrivent les prélèvements pour l'agriculture. Ceci donne un nouvel intérêt pour les eaux souterraines. Cependant, les débits très élevés qui sont nécessaires et la priorité donnée aux eaux de boisson limitent beaucoup dans les faits ce retour à l'eau souterraine. Nous reviendrons sur ce point à propos de la gestion des ressources en eau (voir chapitre 3).

A cette valeur humaine s'ajoute une valeur purement économique. L'utilisation d'eau souterraine comme eau de boisson est souvent une économie financière très importante. En effet, ces eaux sont souvent acheminées par gravité et sans traitement qualitatif. Si on compare leur coût d'exploitation avec des eaux de lac, on observe une différence majeure. Pour s'en convaincre, il faut savoir que le Service des eaux de la Ville de Lausanne est le plus gros consommateur d'électricité de la région : plusieurs m³/s sont pompés depuis le Léman (372 msm) aux réservoirs du haut de la ville dont certains sont situés à près de 900 m dans le Jorat (voir figure 4.42 page 92).

Aux usages eau de boisson et eau agricole, il faut ajouter celui de l'industrie. Certaines firmes ont besoin d'eau très pure qui peut être fournie par les nappes souterraines.

L'eau souterraine est aussi une ressource énergétique par les différents développements de la géothermie à haute ou basse enthalpie.

1.3. Gêne dans les aménagements et les constructions

Les eaux souterraines sont aussi une gêne importante dans les activités de l'ingénieur. C'est le cas notamment dans les domaines suivants :

- zones en permanence inondées dans les champs cultivés ("mouilles"), l'eau provenant d'aquifères en charge: nécessité de drainer
- instabilité naturelle des versants (coulées de boue, glissements de terrain, éboulements), fortement liée à la circulation d'eau souterraine : évaluation géologique et géotechnique, zonation du danger naturel, calcul du risque, travaux de confortation.
- difficultés constructives dans les fondations : nécessité d'études préliminaires plus étendues, travaux spéciaux coûteux.

2. Les réservoirs hydrogéologiques sur la Terre

L'ingénieur a coutume de représenter les eaux souterraines dans des milieux hautement simplifiés, pour faciliter les calculs qu'il doit réaliser pour la constructions de ses ouvrages ou pour des aménagements. Nous voulons dans ce chapitre montrer sous quelles formes ces ressources en eau se trouvent en réalité dans leur contexte naturel.

2.1. Caractéristiques hydrogéologiques des terrains meubles et des roches

Le terme roche est pris tantôt dans son sens large décrivant tous les géomatériaux naturels (sols et roches des géotechniciens), tantôt dans son sens strict de roche indurée (roches des géotechniciens). En pratique et dans la nature, la limite entre sols et roches est souvent floue en raison des phénomènes de diagenèse et d'altération. C'est le contexte de qui fixe le sens considéré.

Le comportement hydrogéologique des différents terrains rencontrés dans la nature est la résultante de nombreux facteurs. Ils sont issus d'une part de la genèse de la matrice initiale de la roche, d'autre part des phénomènes qui ont affecté la roche originale jusqu'à aujourd'hui (par exemple cimentation, fissuration, altération, dissolution). On essaie d'intégrer ces facteurs fondamentaux dans un nombre réduit de paramètres globaux qui facilitent la transcription géologie - hydrogéologie - hydrodynamique. Il ne faut pas oublier toutefois que dans la pratique du terrain il est nécessaire de retourner aux facteurs fondamentaux. Les paramètres globaux retenus dans le cadre de ce cours sont donnés ci-dessous.

2.1.1. Porosité

La porosité totale est le rapport du volume des pores sur le volume de l'échantillon. Nous faisons référence au cours de physique de sol pour la définition des autres types de porosité (efficace, cinématique etc.).

La nature de la porosité dans les sols et roches naturels est très variable. Plusieurs approches permettent de la décrire

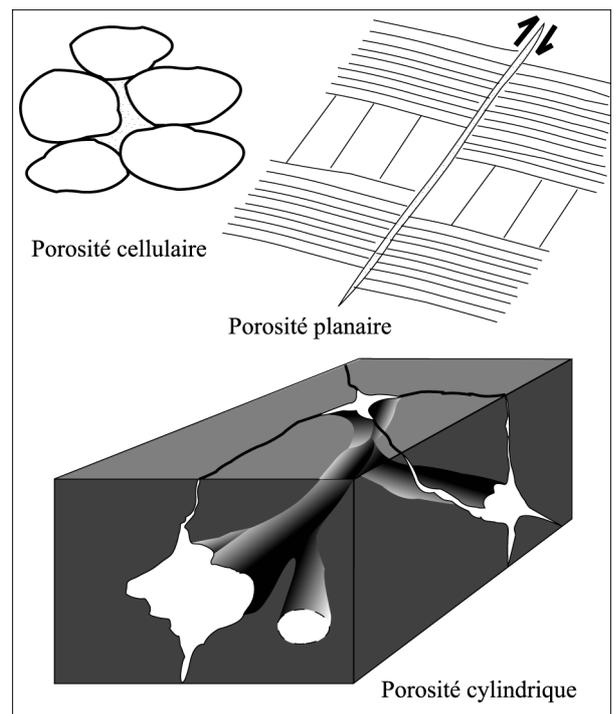


Figure 2.1: Géométrie des pores dans les roches

et donnent des définitions sur différents critères qui se complètent.

Différentes définitions de la porosité :

Selon géométrie des pores

Porosité cellulaire : pores de forme compacte, sans direction nettement privilégiée (figure 2.1 page 7)

Porosité planaire : deux directions privilégiées

Porosité cylindrique : une direction privilégiée

Selon l'histoire de la roche

Porosité primaire : faite en même temps que la roche

Porosité secondaire : faite après la formation de la roche

Selon processus de formation

Porosité d'interstices : espaces intergranulaires

Porosité de fissure : espaces dans les fissures issues d'effets purement mécaniques

Porosité karstique : espace développé par dissolution de la matrice rocheuse

Selon communication entre les pores

Porosité ouverte : pores communicants (ex : roches détritiques)

Porosité confinée ou occluse : pores isolés (ex : roches volcaniques)

2.1.2. Composition pétrographique de la roche

Elle va influencer le processus de formation de la porosité et sa géométrie (ex karstification).

Elle dictera aussi la composition chimique des eaux :

- roches siliceuses : eaux peu minéralisées, parfois acides, qui peuvent dissoudre le ciment.
- roches carbonatées : eaux hydrogénocarbonatées calciques, neutres à alcalines. Peuvent entuffer les tuyaux.
- roches évaporitiques : eaux sulfatées ou/et chlorurées, fortement minéralisées. Eaux en général inappropriées aux réseaux de distribution d'eau de boisson. Peuvent attaquer les bétons (sulfates) et les métaux (chlorures).

La relation nature de la roche et formes de la porosité est synthétisée dans la figure 2.2 page 9 pour toutes les formes courantes de roches rencontrées sur la terre.

Démonstration sur échantillons

2.1.3. Perméabilité

La perméabilité est la faculté qu'a une roche de se laisser traverser par des fluides souterrains, généralement de l'eau souterraine. Nous faisons référence au cours de physique du sol pour la définition hydrodynamique de la perméabilité et de la conductivité hydraulique.

La perméabilité est liée d'une manière complexe à la porosité.

Principe général : plus la porosité est élevée, plus la perméabilité est élevée.

Conditions de validité :

A. Valable pour porosité ouverte uniquement

B. Valable pour les pores de taille suffisante pour que l'eau soit mobile dans un champ gravifique. Les eaux des pores inférieurs à environ 0.1 mm sont fixées au squelette

et ne participent pas à l'écoulement d'eau libre. Dans les sols ou roches à matrice fine, la relation porosité - perméabilité s'inverse. Par exemple, une argile est très poreuse mais très peu perméable.

C. La porosité doit être considérée dans ses différentes échelles, y compris à l'échelle du massif (porosité karstique ou de fissure).

Selon sa perméabilité, une formation géologique appartiendra à l'une des trois catégories suivantes de terrain au sens hydrogéologique :

Aquifère : roche présentant une perméabilité suffisante pour permettre une circulation importante d'eau souterraine et une exploitation de la ressource. Un aquifère comprend en général une zone saturée et une zone non-saturée. La zone saturée s'appelle la nappe souterraine.

Aquitard : roche présentant une perméabilité trop faible pour donner lieu à une exploitation mais non négligeable au point de vue des écoulements souterrains.

Aquiclude : roche très peu perméable constituant pratiquement un écran à l'écoulement des eaux.

Genèse	Forme des pores		
	Cellulaire	Planaire	Cylindrique
Syngénétique (porosité primaire)	Espace intergranulaire des roches détritiques <i>poudingue</i> M <i>brèche sédimentaire</i> M <i>grès</i> m <i>siltstone</i> m <i>argilites</i> m	Espace intercrystallin des roches plutoniques et métamorphiques <i>granite</i> m <i>gneiss</i> m <i>marbre</i> m <i>etc..</i>	<i>organismes fouisseurs</i> M+m joints de stratification M fissures de retrait des laves (<i>orgues basaltiques</i>) M <u>fissures de dessiccation</u> (argiles) M
	Espace intergranulaire des roches organogènes <i>massifs coralliens</i> M+m <i>oolithes</i> m <i>tufs</i> M+m <i>travertins</i> M+m <u>Organismes fouisseurs</u>	Vacuoles des roches volcaniques <u>ponces</u> M+m	
Postgénétique (porosité secondaire)	Altération physique Roches fortement tectonisées <i>brèche tectonique</i> M+m <i>kakirites</i> m Roches gélives: - <i>marne</i> m - <i>argilite</i> m - <i>grès marneux</i> m <u>Lithophages</u>	Altération chimique Roches granulaires à solubilité hétérogène: <u>-cornieule</u> M+m - <i>grès calcaires</i> m - <i>lumachelles</i> M+m - <i>calcaires et dolomies à pâte hétérogène (fossiles et microfossiles)</i> M+m - <i>gypse impur</i> M+m - <i>roche salifères hétérogènes</i> M+m <i>granite</i> m	chenaux des roches karstiques <i>calcaire</i> M <i>dolomie</i> M <i>gypse</i> M <u>minéralisation des fossiles végétaux</u> <i>troncs de la molase</i> M
Légende : M = macroporosité : >~ 5mm m = microporosité : <~ 5mm Porosité <-----> Perméabilité non souligné : porosité ouverte _____ : porosité semi-confinée ===== : confinée			

Figure 2.2: Forme de la porosité pour différentes roches

2.2. Notion de bassin en hydrogéologie

A l'instar d'une rivière, un exutoire d'eau souterraine possède aussi un bassin d'alimentation. Cette notion est toutefois plus complexe que celle d'un bassin de pur ruissellement qui se réduit à un problème de surface dans l'espace : le bassin topographique (figure 2.3 page 10).

Dans le cas des eaux souterraines, deux notions différentes doivent être distinguées : le bassin hydrogéologique au niveau de la zone saturée et le bassin d'alimentation des eaux souterraines en surface.

2.2.1. Bassin hydrogéologique

Ce premier bassin décrit uniquement les écoulements au sein de la nappe souterraine. Dans la partie saturée de l'aquifère, les eaux s'écoulent en fonction du gradient du potentiel h selon la loi de Darcy :

$$\vec{v} = k \cdot \overrightarrow{\text{grad } h}$$

avec v = vitesse apparente de Darcy

k = conductivité hydraulique

La répartition spatiale du potentiel hydraulique de la nappe est donnée sous la forme d'une carte piézométrique. Les lignes de niveau correspondent à des lignes équipotentielles ou isopièzes.

L'exutoire est le point le plus bas de ce champ de poten-

tiel. Les eaux souterraines qui s'écoulent vers lui cheminent perpendiculairement aux équipotentielles si l'aquifère est isotrope.

Le bassin hydrogéologique est délimité par l'extension horizontale de la nappe et la ligne de partage avec d'autres bassins hydrogéologiques (figure 2.3 page 10). Cette dernière dépend de l'effet de concurrence des exutoires. Sa position est donc une fonction complexe intégrant la cote des exutoires et le champ de transmissivité (conductivité hydraulique * épaisseur de la zone saturée) depuis le point considéré jusqu'à ces exutoires. La limite du bassin hydrogéologique est donc fixée sur la base de critères purement géologiques et hydrodynamiques.

Exercice 2.1 voir annexe II

Délimitation d'un bassin hydrogéologique.

Dans une région donnée, les bassins hydrogéologiques peuvent parfois être proches des bassins topographiques, parfois s'en différencier complètement.

Les exemples ci-dessous permettent de mieux visualiser ces bassins dans des cas inspirés de situations hydrogéologiques réelles.

Dans les cas de terrains qui ne sont perméables que près de la surface, comme dans la molasse, le bassin hydrogéologique est proche du bassin topographique (figure 2.4 page 11).

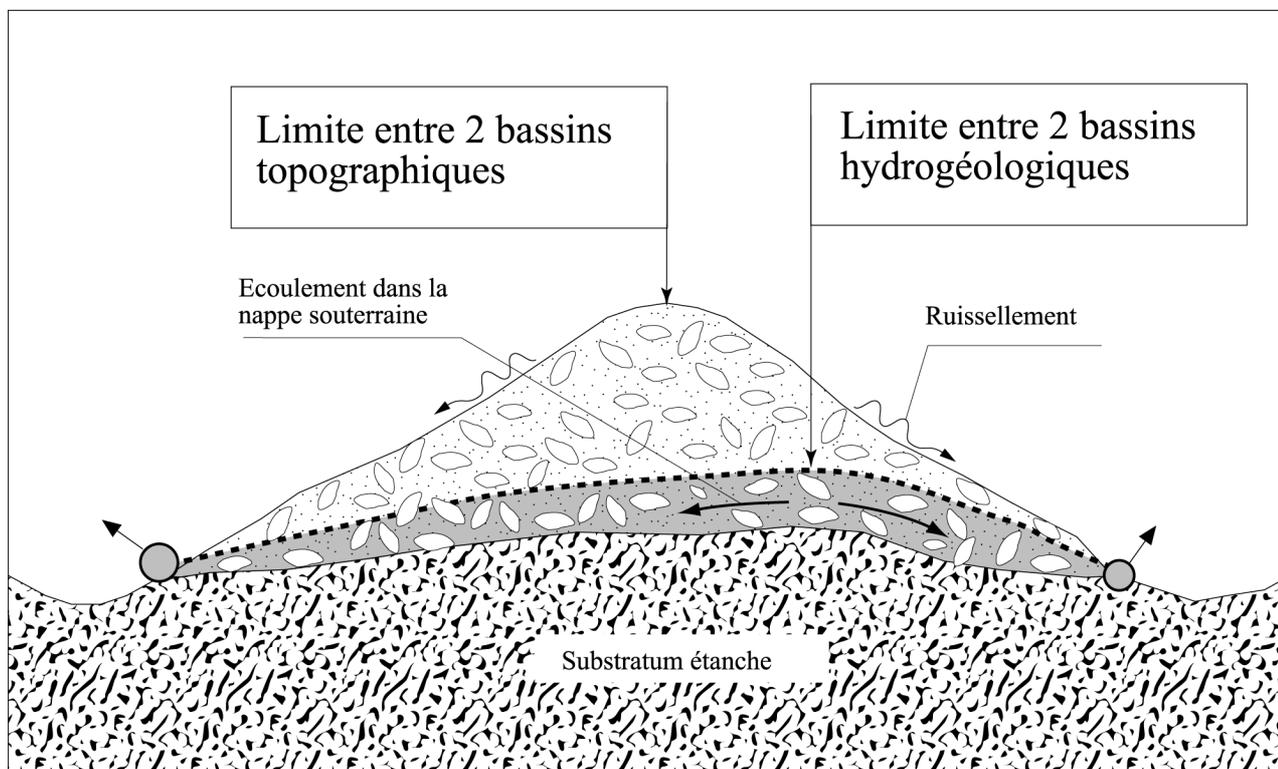


Figure 2.3: Schéma montrant les limites de bassins topographiques et de bassins hydrogéologiques dans le cas d'une nappe dans une moraine graveleuse (schéma sans échelle).

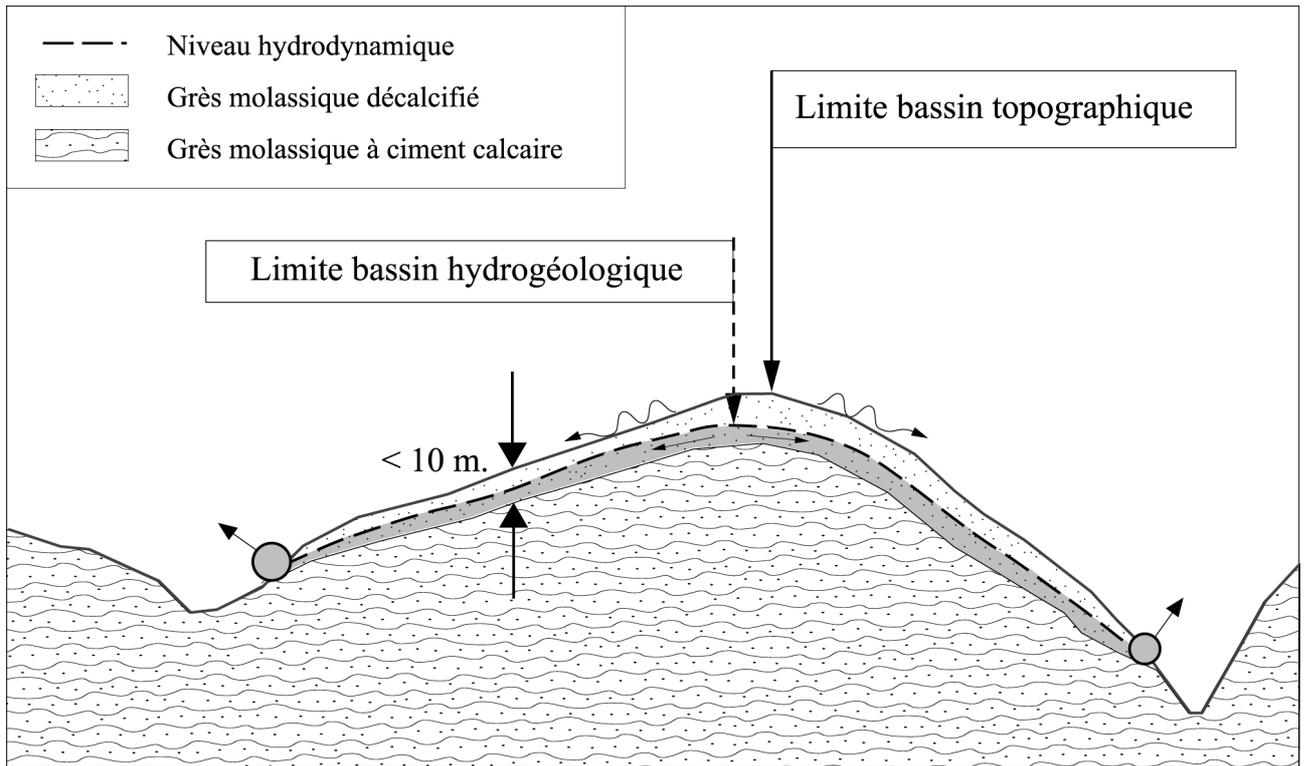


Figure 2.4: Bassin hydrogéologique en pays molassique (schéma sans échelle).

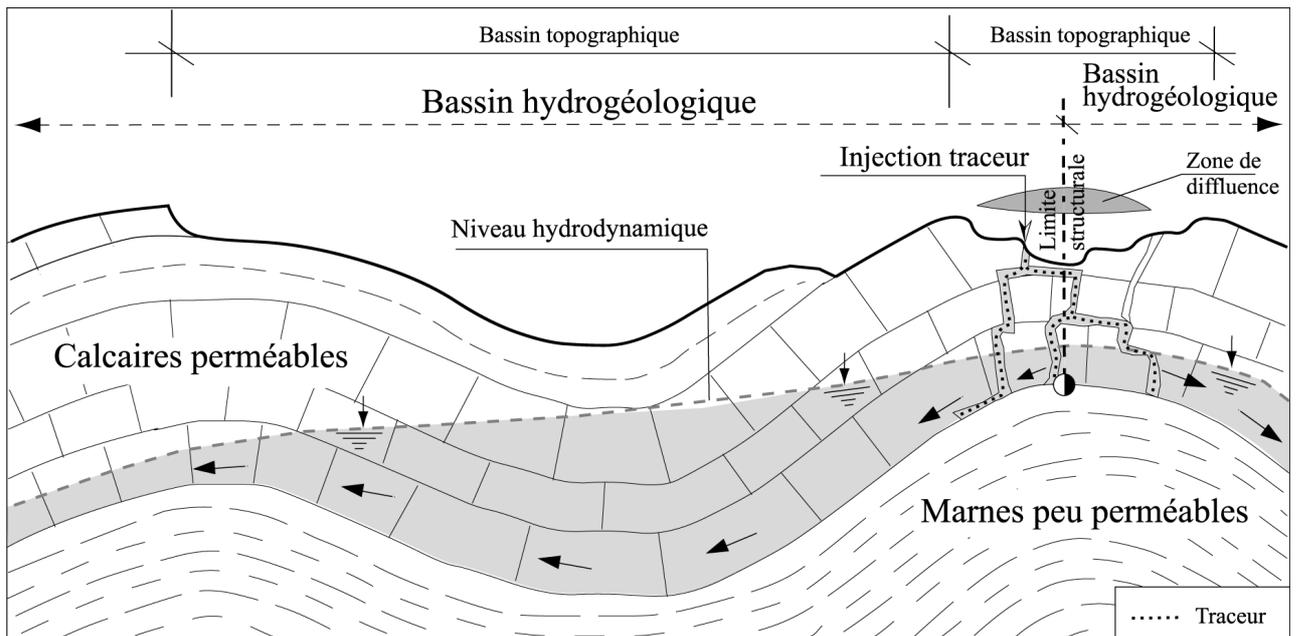


Figure 2.5: Bassin hydrogéologique en pays calcaire avec phénomène de diffluence mis en évidence par un essai de traçage (schéma sans échelle).

Dans les roches à perméabilité de fissure ou karstique possédant une zone non saturée très épaisse, la limite du bassin devient floue. En effet, les essais de traçage dans ces régions de bordure de bassin mettent en évidence le phénomène de la diffluence : un traceur déversé en un point peut arriver à plusieurs exutoires à la fois. Ceci est dû à une forte dispersion dans le réseau de conduits que l'eau parcourt avant d'arriver dans la zone saturée (figure 2.5 page 11).

2.2.2. Bassin d'alimentation des eaux souterraines

Ce second bassin a la fonction d'alimenter le premier. Il correspond au lieu géométrique des points du territoire qui fournissent de l'eau au bassin hydrogéologique, donc à l'exutoire considéré (figure 2.6 page 12).

Cette définition qui paraît simple à prime abord est en réalité fort complexe à appliquer dans la pratique sur le

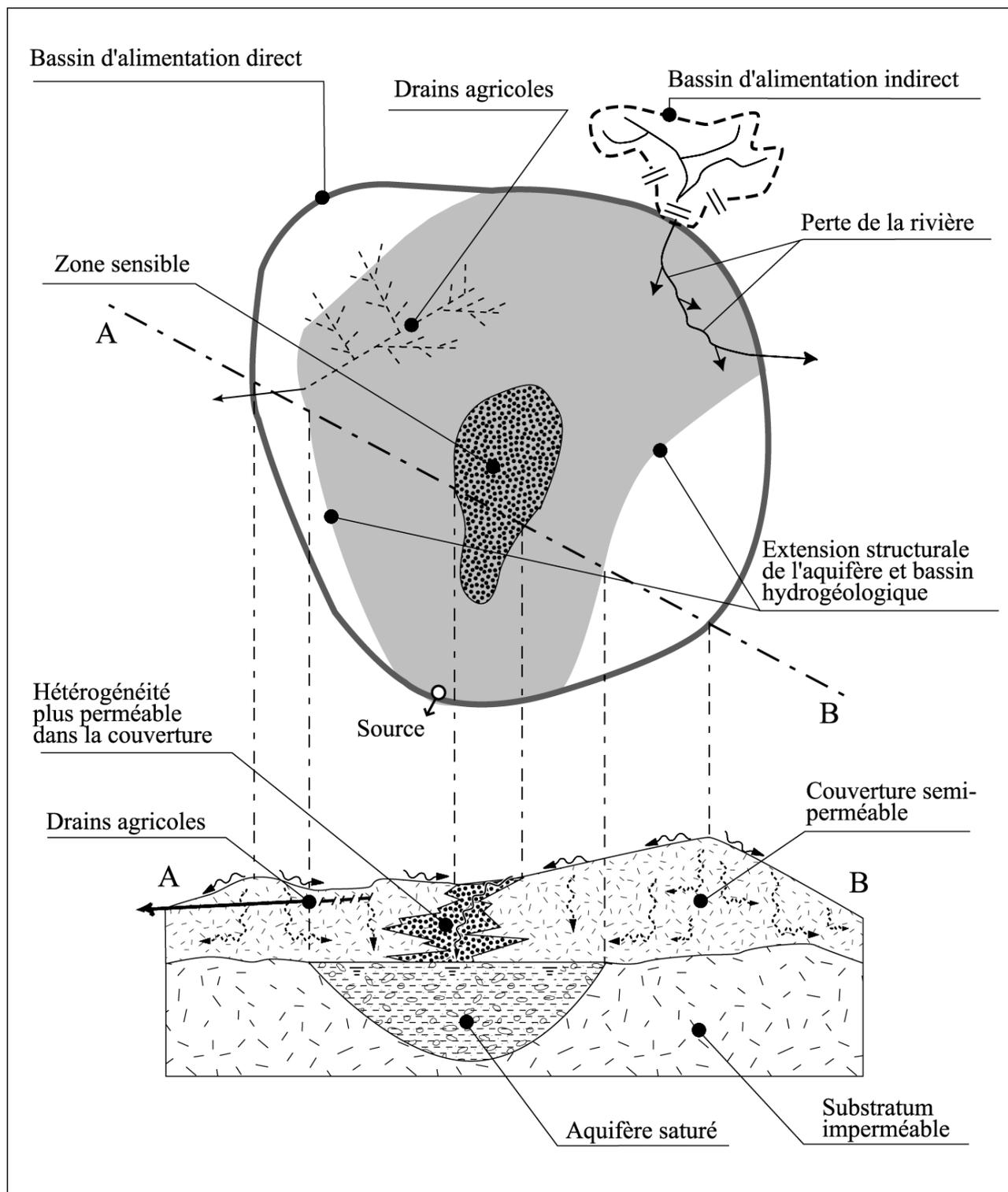


Figure 2.6: Délimitation du bassin d'alimentation des eaux souterraines d'une source. Exemple d'un aquifère fluvio-glaciaire profond recouvert de moraine semi-perméable. On pose dans cet exemple que l'aquifère est entièrement saturé et qu'il n'alimente que la source considérée ; son extension structurale correspond ainsi au bassin hydrogéologique. Le bassin d'alimentation dépasse le bassin hydrogéologique car les terrains voisins peuvent aussi contribuer à fournir de l'eau à l'aquifère, par percolation à travers la moraine. Comme les eaux de ruissellement diffus sur la couverture peuvent ensuite s'infiltrer au droit de l'aquifère, on considère souvent pour le bassin d'alimentation la première limite topographique à l'extérieur du bassin hydrogéologique. Plus on s'éloigne du bassin hydrogéologique, plus la probabilité qu'une molécule d'eau qui s'infiltré dans la couverture parvienne à l'aquifère est faible. Des réseaux de drainage agricoles diminuent aussi cette probabilité en exportant une partie du flux d'alimentation hors du bassin. Au contraire, la présence de zones plus perméables dans la couverture provoque une alimentation intense et détermine des régions du bassin particulièrement sensibles au point de vue de la protection des eaux souterraines.

terrain. On connaît généralement mal la percolation des eaux depuis le sol jusqu'à la zone saturée de l'aquifère. Elle dépend de la géométrie des corps géologiques en profondeur et de leurs contrastes de perméabilité. De plus l'alimentation se fait non seulement par l'infiltration diffuse des précipitations mais aussi par des pertes de rivières (bassin indirect).

Ces facteurs font que les bassins d'alimentation des eaux souterraines sont beaucoup plus difficiles à déterminer que ceux des eaux de surface. Leur définition est souvent affectée d'une assez grande incertitude. Réduire cette incertitude nécessite des investigations géologiques et hydrogéologiques de terrain.

A propos du bilan hydrologique d'une nappe, nous verrons en détail les différents processus d'alimentation (2.3.1).

2.3. Fonctionnement des aquifères

Dans le cycle de l'eau, un aquifère possède les mêmes fonctions qu'un réservoir en surface :

- accumulateur imparfait (avec pertes)
- amortisseur de variations temporelles à l'entrée (hydraulique, physico-chimique).

Il faut ajouter les fonctions spécifiques suivantes, qui seront développées plus loin dans le cours, à propos de la qualité des eaux :

- marqueur géochimique (minéralisation de l'eau au contact du solide)
- épurateur microbiologique.

Nous décrivons le comportement hydraulique par le bilan de l'aquifère et son degré d'inertie.

2.3.1. Bilan hydrologique des aquifères

En régime transitoire, ce qui correspond pratiquement à la plupart des situations réelles, la variation de volume d'eau dans l'aquifère ΔV entre le temps t_2 et le temps t_1 est exprimée par

$$\Delta V = \int_{t_1}^{t_2} Q_e dt - \int_{t_1}^{t_2} Q_s dt$$

avec Q_e = somme des débits entrants (alimentation)

et Q_s = somme des débits sortants (pertes)

Alimentation

Cette fonction est contrôlée principalement par les conditions hydroclimatologiques. Elle est donc très irrégulière dans les pas de temps inférieurs à l'année. Elle comprend (figure 2.7 page 14):

- 1 : l'infiltration de la pluie
- 2 : l'infiltration de la fonte de neige
- 3 : l'infiltration des ruisseaux et des rivières
- 4 : les apports d'autres aquifères
- 5 : l'infiltration artificielle des eaux claires urbaines (toits, places, chemins d'accès)
- 6 : les installations de réalimentation artificielle

Pertes

Elles comprennent (figure 2.7 page 14) :

- 7 : les sources
- 8 : les puits et forages de pompage
- 9 : l'alimentation des rivières
- 10 : les pertes dans d'autres aquifères

Les pertes naturelles sont beaucoup plus régulières en raison du pouvoir tampon de l'aquifère. En revanche les points de pompage sont très variables dans le temps.

Contrôle du bilan

Le bilan peut être en tout temps effectué si l'on dispose d'un réseau piézométrique assez dense. La variation de volume accumulé si la nappe est libre correspond au volume compris entre les deux surfaces piézométriques multiplié par la teneur en eau gravitaire. Le volume d'eau stocké dans la zone non saturée est plus difficile à connaître. Il est en général beaucoup plus faible que celui contenu dans la nappe et peut être considéré comme constant en première approximation.

Nous reviendrons sur ce bilan à propos de la gestion des eaux souterraines.

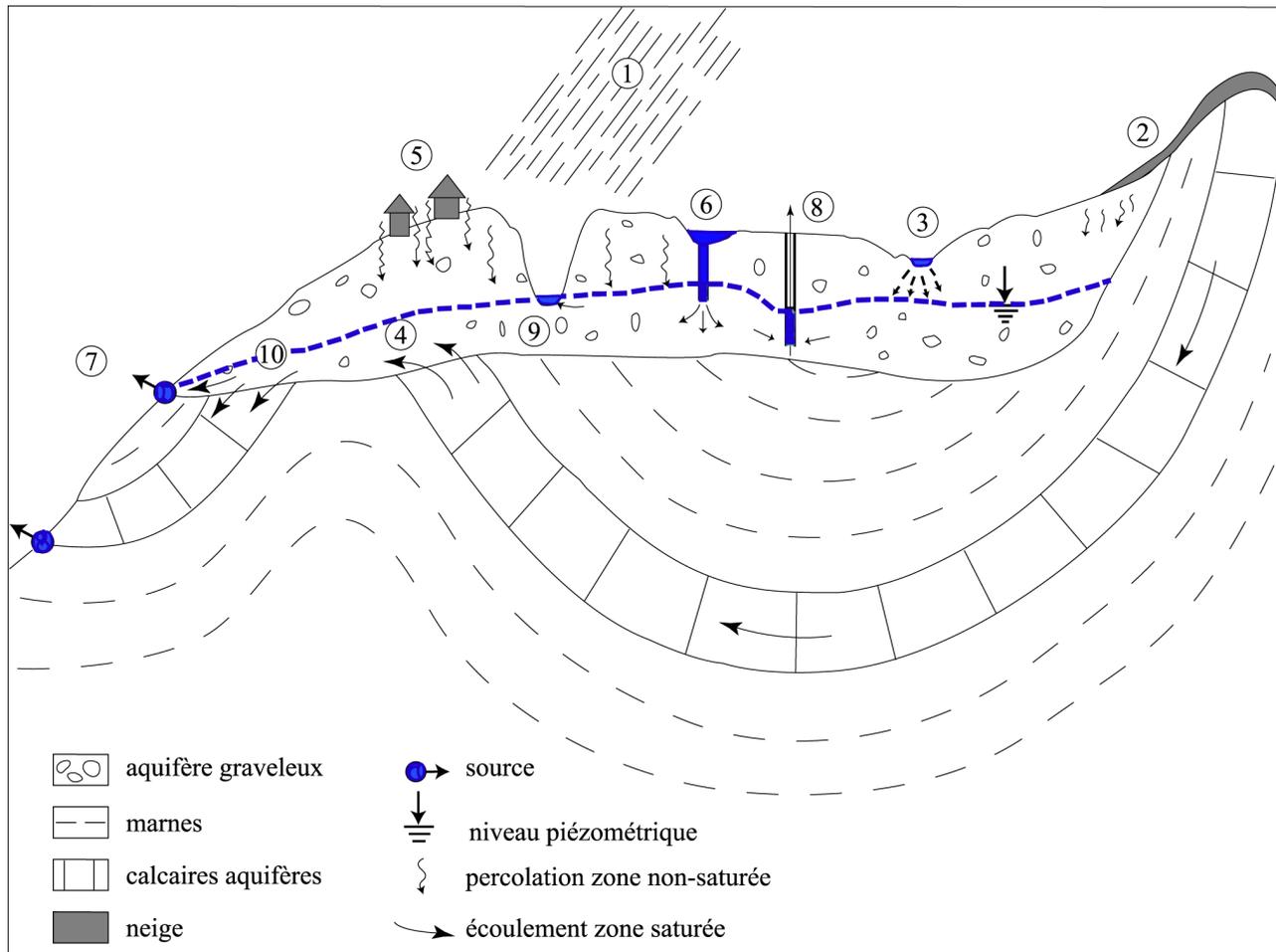


Figure 2.7: Les entrées et les sorties d'une nappe souterraine. Les numéros se rapportent aux entrées et aux sorties décrites dans le texte (schéma sans échelle).

2.3.1. Rôle de tampon hydraulique

Le rôle d'amortisseur des écoulements est similaire à celui d'un bassin de rétention tel que l'ingénieur les conçoit sur les réseaux d'évacuation des eaux pluviales. Les facteurs dominants sont :

- le type de nappe : libre, captive, semi-captive (voir fig 3.2)
- le volume du réservoir
- la vitesse de l'eau dans le réservoir

Ces facteurs sont implicitement contenus dans des grandeurs caractéristiques d'aquifères. Par exemple, en régime permanent, l'alimentation interannuelle moyenne permet de définir le *taux de renouvellement annuel* par le rapport de l'alimentation sur le volume total.

Ce taux est l'inverse du *temps de transit moyen* dans l'aquifère qui donne le temps que mettent les molécules d'eau en moyenne pour arriver à l'exutoire. La diversité des chemins parcourus par les différentes gouttes d'eau de

l'aquifère font que la dispersion autour de la moyenne est énorme. Par exemple, un aquifère molassique à temps de transit d'un an possède des cheminements rapides dans les joints où l'eau met quelques semaines pour parvenir à la source; une partie des eaux des pores peut mettre une dizaine d'années pour parcourir la même distance.

L'inertie du système est maximale si la nappe est libre, l'aquifère de grand volume et le temps de transit élevé. Les nappes captives donnent des réponses très rapides aux variations à l'entrée, à l'image d'un réseau de distribution d'eau sous pression; il faut noter que c'est une réponse de pression et non pas un déplacement rapide de l'eau.

2.4. Configurations hydrogéologiques typiques

Les configurations hydrogéologiques sont des assemblages d'aquifères, d'aquicludes et d'aquitards ordonnés selon une structure tectonique. On a sur la terre une

multiplicité de structures impliquant une multiplicité de formations géologiques. Chaque cas possède ses caractéristiques propres et doit faire l'objet de reconnaissances sur le terrain pour les déterminer. On peut cependant grouper ces diverses configurations en un nombre réduit de situations typiques ou exemplaires, basées généralement sur la nature de la formation aquifère.

2.4.1. Configurations typiques de la Suisse

La Suisse offre l'avantage, par sa grande diversité de roches et de structures tectoniques, de contenir des exemples de la plupart des configurations types. C'est pourquoi on utilise dans le présent cours les 7 aquifères types décrits dans l'Atlas hydrologique de la Suisse. Ils seront complétés par quelques configurations qu'on ne rencontre pas dans notre pays.

2.4.1.1. Aquifères des alluvions fluviales récentes

Beaucoup de vallées ont été creusées par les glaciers du Quaternaire. Lors du retrait, des sédiments lacustres fins se sont d'abord mis en place. Puis, les rivières ont construit une plaine alluviale faite de graviers et sables grossiers. Cette succession de dépôts lacustres et alluviaux et leur structure sédimentaire est bien visible dans l'exemple de la plaine du Rhin à Oberriet (figure 2.8 page 16). Les graviers des basses terrasses présentent des conditions hydrogéologiques comparables.

Les alluvions des plaines constituent des aquifères très importants en raison de leur grande productivité. En effet, leur perméabilité d'interstices est élevée. Elles contiennent dans leurs pores quelque 150 l/m^3 à saturation. Comme la nappe souterraine communique avec le lit du fleuve, des transferts d'eau sont possibles entre eux. Dans des conditions de basses eaux de la rivière, la nappe alimente cette dernière. Durant les crues, au contraire, une partie des eaux du fleuve s'infiltrer vers la nappe. Ce phénomène permet de remplir rapidement la réserve souterraine. L'eau très douce du fleuve contribue aussi à diminuer la minéralisation de l'eau de la nappe. Cette dernière est naturellement hydrogénocarbonatée calcique dans les bassins où affleurent des roches calcaires. Des proportions importantes de sulfates peuvent apparaître quand des roches évaporitiques (par exemple le gypse) sont en contact avec les alluvions.

Ces aquifères sont malheureusement très vulnérables. La qualité de l'eau y est fortement influencée par l'occupation du sol (agriculture, industries, habitat), car le niveau de l'eau est à quelques mètres de la surface, sans couche de protection étanche.

2.4.1.2. Aquifères des dépôts fluvio-glaciaires

Ce sont des terrains semblables aux alluvions récentes mais occupant d'anciennes vallées périglaciaires

aujourd'hui comblées. Les gisements sont plus rares et souvent couverts par des moraines qui peuvent masquer complètement leur présence, comme c'est le cas dans l'exemple de Urdorf - Badwies (figure 2.9 page 17). Les parties graveleuses de ces dépôts sont plus discontinues que dans les alluvions récentes.

Le fonctionnement hydrodynamique est très différent de celui observé dans les alluvions. La recharge de l'aquifère ne se fait que par les précipitations. Lorsque les graviers sont recouverts de moraine, seule une faible partie de l'eau s'infiltrer. Cette moraine, peu perméable, explique pourquoi la nappe est par place en charge, voire artésienne comme à Badwies.

Les eaux sont stockées en profondeur et bien protégées contre la pollution par les couches de surface. Leur composition chimique est du même type que celle des alluvions, mais avec une minéralisation plus élevée en raison d'un long temps de séjour de l'eau dans l'aquifère.

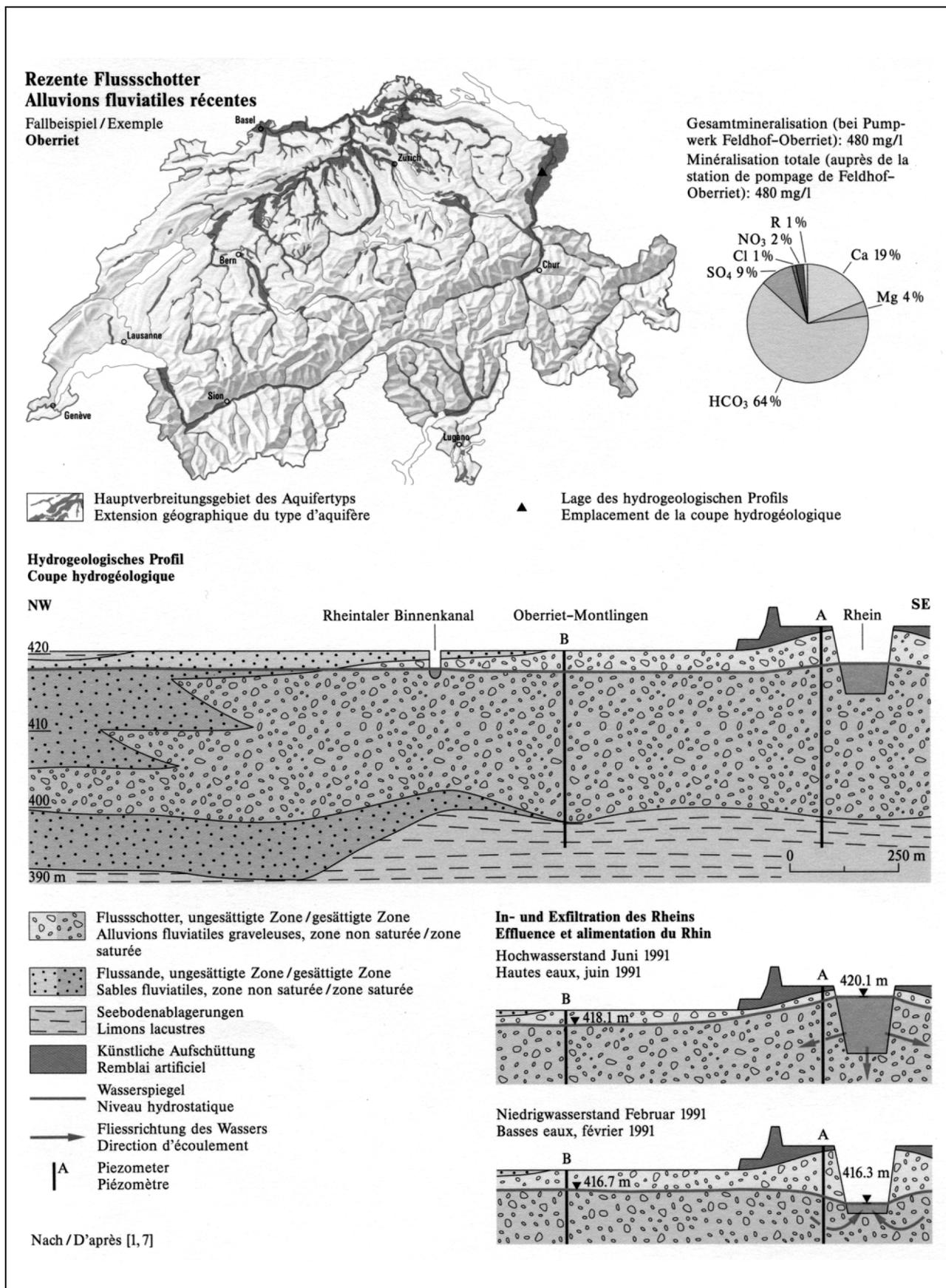


Figure 2.8: Aquifères des alluvions fluviales récentes : exemple d'Oberriet (plaine du Rhin). Tiré de l'Atlas Hydrologique de la Suisse.

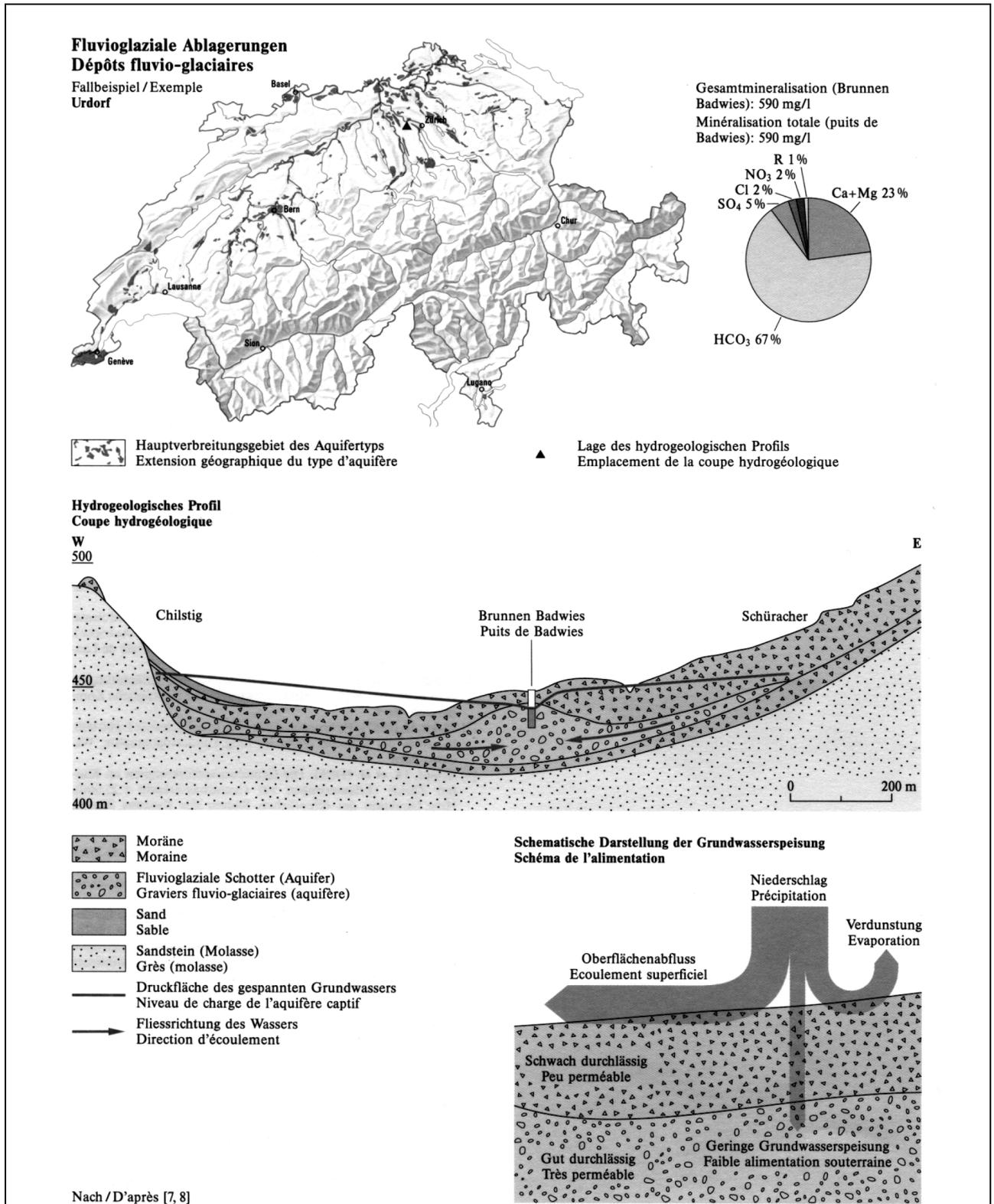


Figure 2.9: Aquifères des dépôts fluvio-glaciaires : exemple de Urdorf. Tiré de l'Atlas Hydrologique de la Suisse.

2.4.1.3. Aquifères des roches molassiques

Les roches molassiques qui forment le Plateau suisse et les premiers contreforts préalpins sont de nature très variable, allant des marnes aux conglomérats en passant par

les grès. Seules ces deux dernières roches peuvent contenir de l'eau en suffisance pour alimenter des captages.

L'eau circule dans la Molasse par des fissures et des joints de stratification. Dans les grès, l'altération superficielle a

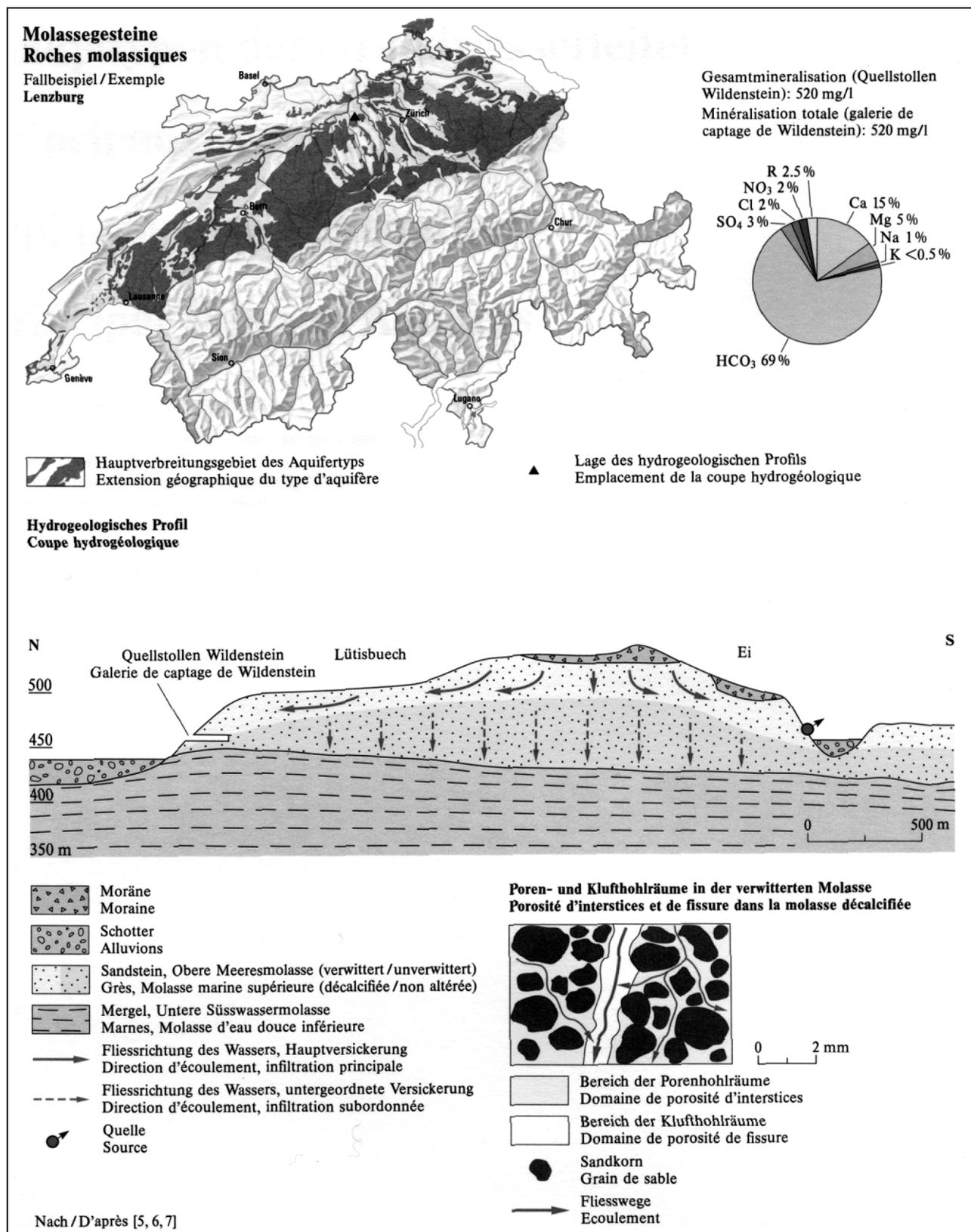


Figure 2.10: Aquifères des roches molassiques : exemple de Lenzburg. Tiré de l'Atlas Hydrologique de la Suisse.

provoqué la dissolution du ciment calcaire sur une dizaine de mètres d'épaisseur. Ceci confère à la roche une porosité d'interstices qui favorise le stockage d'eau souterraine. L'exemple de Lenzburg - Lütisbuech

(figure 2.10 page 18) montre comment l'eau s'infiltré depuis le haut de la colline et s'écoule vers les versants. On trouve souvent un recouvrement de terrains glaciaires sur ces collines. Les sources apparaissent au contact entre la

Molasse aquifère et des horizons à faible perméabilité, comme les marnes.

Les sources de la Molasse sont exploitées de longue date. Bien que de faible débit, elles sont très nombreuses et constituent globalement une ressource non négligeable. Leur régime est variable si l'eau circule dans des discontinuités. Il est plus régulier si elle provient des pores des grès, ce qui produit aussi une eau de bonne qualité microbiologique. La composition de ces eaux est hydrogéo-carbonatée calcique et magnésienne en raison du ciment calcaire du grès.

2.4.1.4. Aquifères des roches karstiques carbonatées

Les calcaires et dolomies forment des aquifères caractérisés par une perméabilité extrêmement hétérogène. L'eau circule à la fois dans les petites fissures et les pores de la roche et dans des conduits et des cavités de dimensions parfois importantes. Ces conduits résultent de la dissolution de la matrice carbonatée sous l'action du gaz carbonique de l'atmosphère et surtout du sol. Dans les discontinuités de petite taille, la perméabilité est faible mais le volume d'eau accumulé est relativement important. Dans les conduits karstiques, au contraire, la perméabilité est très grande avec un faible volume du réservoir. Des rivières y disparaissent même entièrement pour réapparaître quelques kilomètres plus loin. Le débit varie énormément selon les conditions météorologiques.

Par leur circulation très rapide, les eaux karstiques sont souvent de qualité bactériologique médiocre en hautes eaux. On doit dans ces cas les désinfecter, voire les filtrer. Dans certaines régions du Jura ou des Alpes, elles constituent des ressources irremplaçables. L'eau captée par des forages profonds est en général de meilleure qualité. Le contact de courte durée avec la roche confère aux eaux karstiques une faible minéralisation bicarbonatée calcique.

L'Areuse est un exemple de source karstique bien connu en Suisse (figure 2.11 page 20). Cette source est alimentée par les calcaires du Malm, épais de quelque 350 mètres. Les marnes de l'Argovien constituent le plancher de l'aquifère. C'est la forme de ce plancher qui détermine le bassin d'alimentation et non pas la topographie.

2.4.1.5. Aquifères des roches karstiques évaporitiques

Sous le nom d'évaporites, on entend ici essentiellement les roches contenant des sulfates. En Suisse, ces roches sont présentes dans la plupart des formations triasiques. Dans le Jura, elles forment des couches comprimées dans le cœur des anticlinaux. Dans les Alpes, ce sont plutôt des panneaux peu épais qui se suivent sur des dizaines de kilomètres.

Près de la surface, le gypse encore plus que le calcaire, a

tendance à se dissoudre. La roche est ainsi parcourue de conduits à haute perméabilité. A quelques dizaines ou centaines de mètres de profondeur, le gypse passe à l'anhydrite qui est, elle, étanche.

La composition chimique de l'eau est marquée par les sulfates de calcium. La minéralisation très élevée leur confère un caractère d'eau minérale, comme dans l'exemple de la source des Bouillets (figure 2.12 page 21) Ce cas représente un captage moderne et performant par galerie et drains forés, à l'aval de la couche de gypse aquifère. Grâce aux résidus insolubles occupant les conduits, la filtration de l'eau est suffisante pour assurer une bonne qualité microbiologique.

2.4.1.6. Aquifères des roches cristallines silicatées

La tectonique est le facteur déterminant pour la circulation des eaux dans les massifs cristallins. En effet, les diverses roches silicatées (granites, gneiss, serpentinites etc) ne sont ni poreuses ni solubles. Ce sont les discontinuités (failles, diaclases, décrochements) qui donnent à ces massifs une faible perméabilité fissurale très hétérogène.

La perméabilité de l'aquifère est accrue dans une zone épidermique de quelques dizaines de mètres. On y trouve de nombreuses fractures ouvertes dues à une décompression postglaciaire des versants de vallée et à l'altération, où l'eau peut circuler facilement.

Cette zone à perméabilité relativement élevée a été rencontrée lors du percement du tunnel entre Mappo et Morettina (figure 2.13 page 22). En profondeur, sous une couverture importante, les venues d'eau sont plus faibles puisqu'elles ne sont plus liées qu'à quelques fractures communiquant avec la surface.

En raison de la faible solubilité des roches, la minéralisation des eaux reste très faible. Notamment les teneurs en hydrogénocarbonates sont basses, ce qui implique des eaux légèrement acides. Il arrive que les eaux soient chargées de sulfates, non pas issus de roches gypseuses, mais de l'oxydation de la pyrite contenue abondamment dans la roche (jusqu'à 300 mg/l de sulfates dans certaines venues d'eau du tunnel Mappo-Morettina).

Ces aquifères sont présents dans les régions cristallines des massifs de l'Aar et du Gotthard, ainsi que dans les Alpes valaisannes, tessinoises et grisonnes. Les sources y sont nombreuses mais généralement de faible débit.

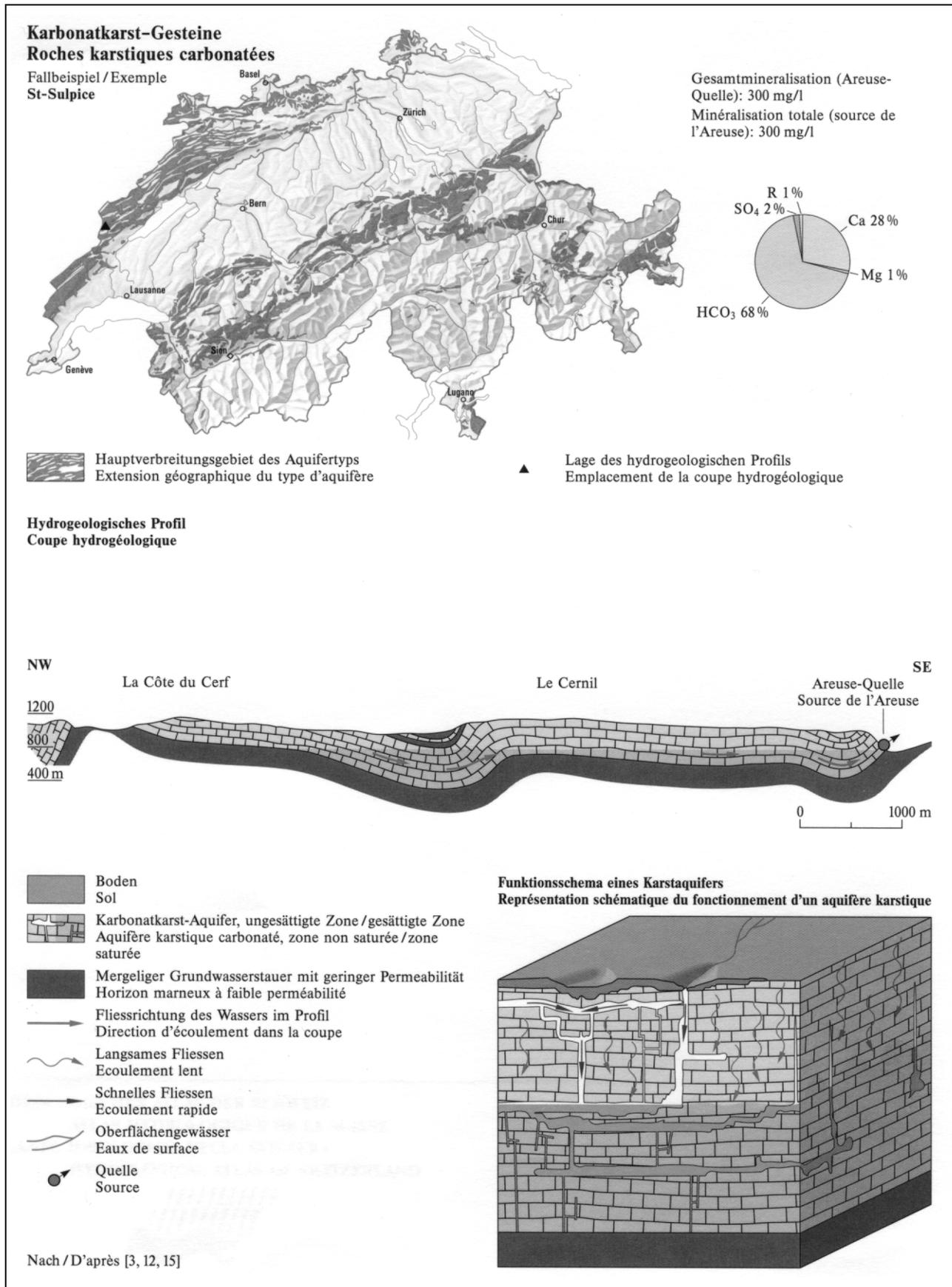


Figure 2.11: Aquifères des roches karstiques carbonatées : exemple du bassin de l'Areuse. Tiré de l'Atlas Hydrologique de la Suisse.

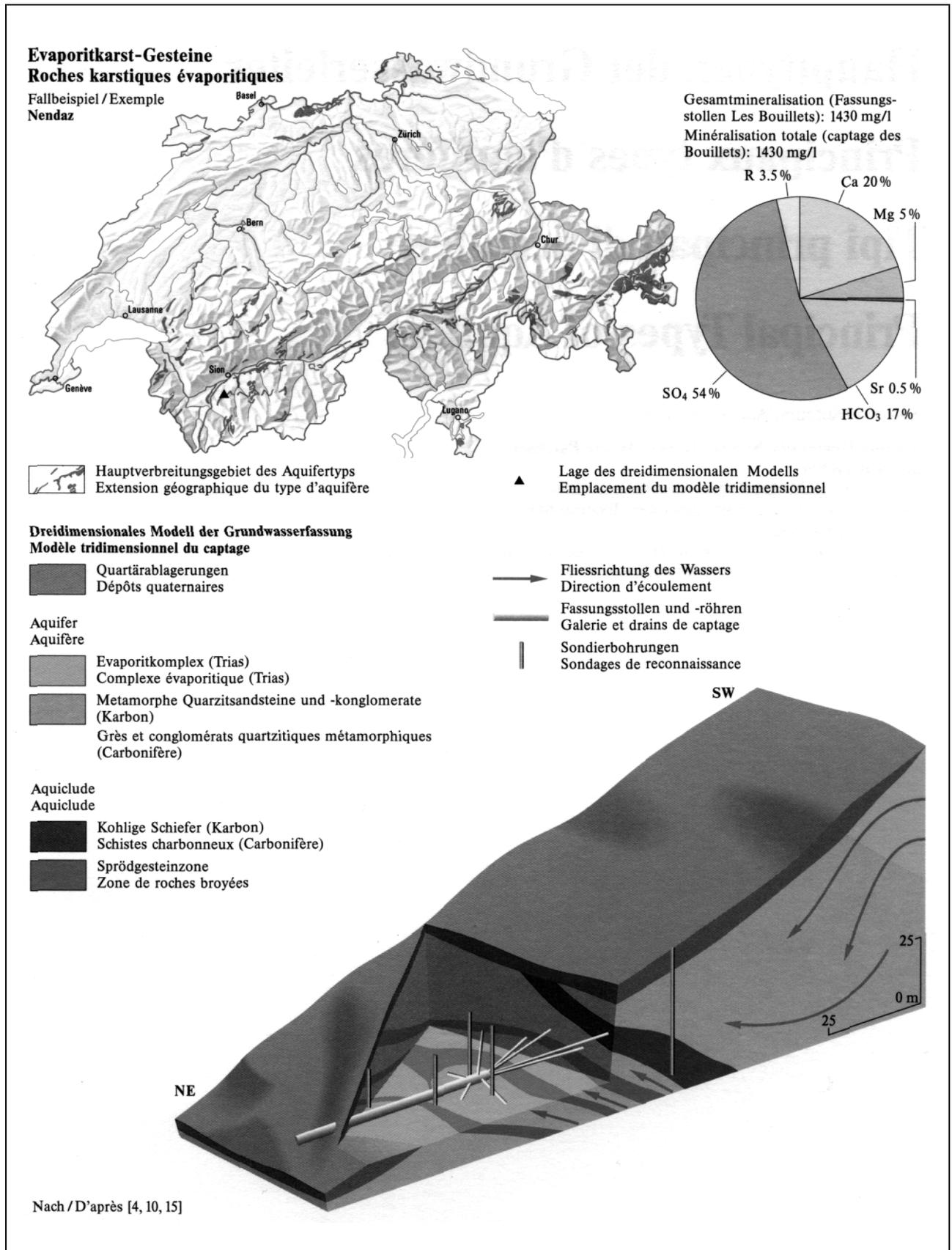


Figure 2.12: Aquifères des roches karstiques évaporitiques : exemple de la source minérale des Bouillets, Nendaz, VS. Tiré de l'Atlas Hydrologique de la Suisse.

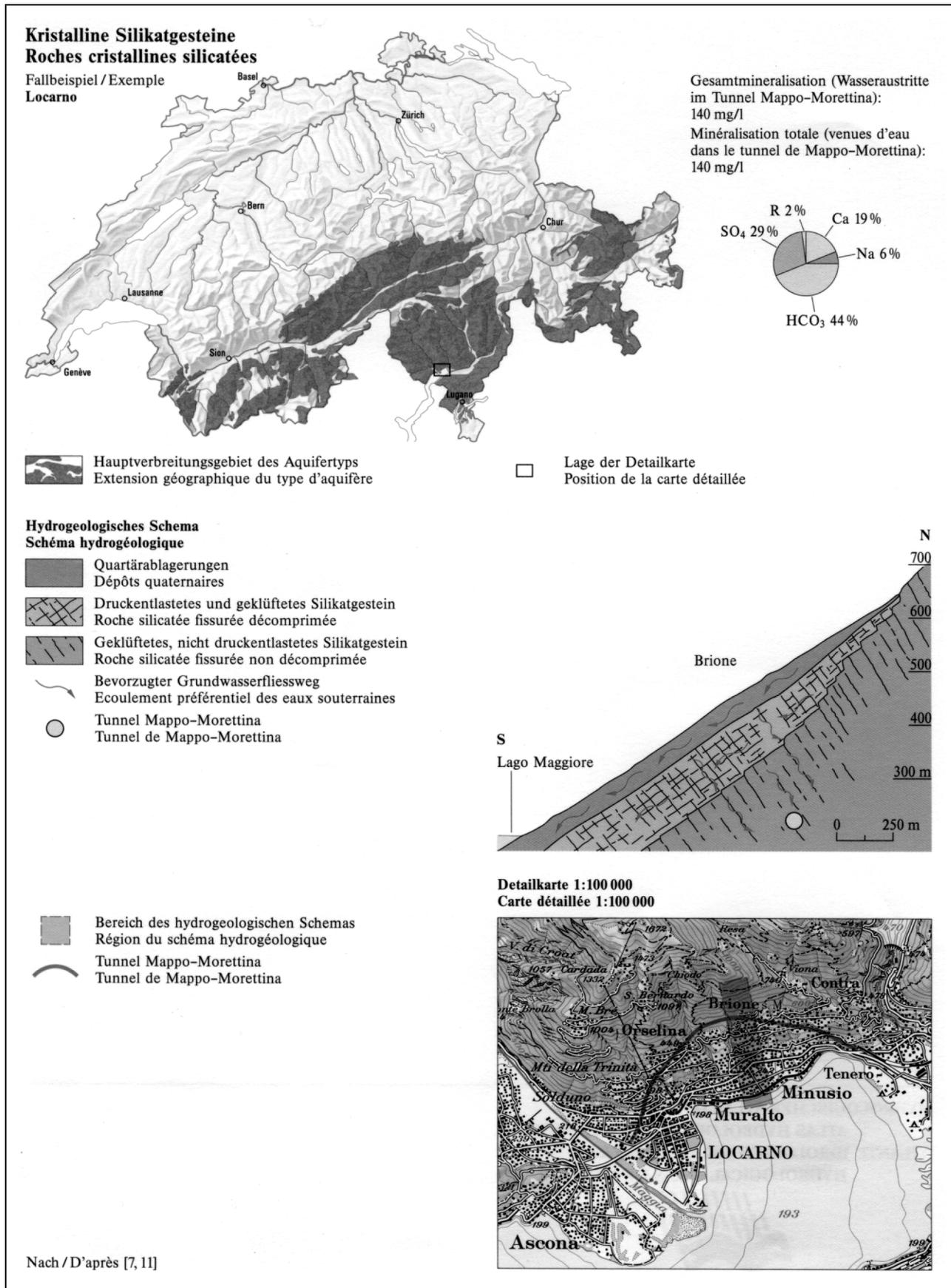


Figure 2.13: Aquifères des roches cristallines silicatées : exemple du tunnel entre Mappo et Morettina (TI). Tiré de l'Atlas Hydrologique de la Suisse.

2.4.1.7. Systèmes géothermiques

Bien qu'ils ne constituent pas un aquifère type proprement dit, les systèmes géothermiques ont été associés à cette représentation en raison du grand intérêt des eaux chaudes. Ils sont caractérisés par des températures éle-

vées des eaux aux exutoires, en raison du flux géothermique. Il s'agit soit d'eaux d'origine profonde soit d'eaux infiltrées en surface et ayant cheminé à des profondeurs suffisamment grandes pour être réchauffées. L'exemple de Lavey-les-Bains (figure 2.14 page 23) appartient à cet-

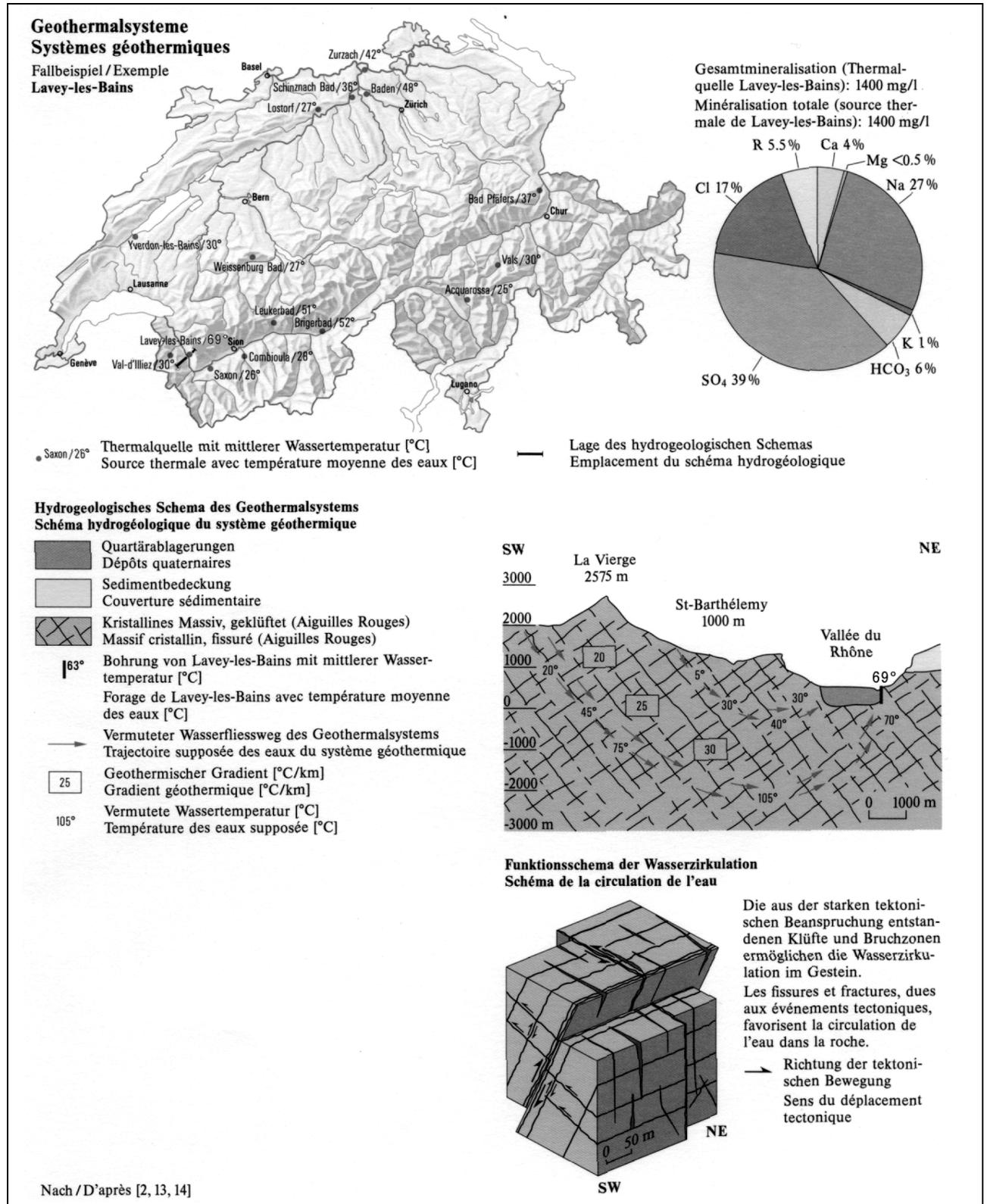


Figure 2.14: Systèmes géothermiques : exemple des thermes de Lavey-les-Bains (VD). Tiré de l'Atlas Hydrologique de la Suisse.

te seconde catégorie. Dans ce cas, les études ont montré que les eaux transitent à une profondeur d'environ 2000 m sous le niveau de la mer, où elles atteignent une température de quelque 100°C. La remontée des eaux à la surface doit être rapide pour qu'elles ne se refroidissent pas notablement. Elle se fait à la faveur d'accidents tectoniques.

La circulation en profondeur est généralement associée soit aux évaporites du Trias, soit à des zones altérées et fracturées du soubassement cristallin, au contact avec leur couverture sédimentaire (exemple de Lavey-les-Bains). Grâce aux conditions thermodynamiques particulières, les eaux ont une minéralisation élevée qui diffère de celle des eaux froides.

En Suisse, on distingue 15 zones thermales où les eaux ont des températures supérieures à 25°C.

2.4.2. Configurations types extérieures à la Suisse

Ce sont surtout trois configurations hydrogéologiques qui manquent en Suisse.

2.4.2.1. Aquifères des roches volcaniques

Les roches volcaniques sont parfois l'illustration d'un paradoxe dans la relation porosité - perméabilité. Dans beaucoup de régions volcaniques et notamment dans les îles du Pacifique, les reliefs sont taillés dans une succession de couches de cendre et de coulées massives de basalte. Si on considère ces deux roches à l'échelle de l'échantillon, on verra que les cendres sont très poreuses alors que le basalte ne l'est absolument pas. En appliquant le principe général reliant la porosité à la perméabilité, on aurait tendance à décréter que la couche de cendre est l'aquifère et que le basalte est un aquitard.

En réalité, comme le montre le terrain (figure 2.15 page 24), les sources apparaissent dans les versants au mur des basaltes et au toit des couches de cendre. Ceci traduit un comportement des roches contraire à celui imaginé a priori sur échantillon. La raison est trouvée dans deux conditions de validité du principe général qui ne sont pas remplies ici. La porosité des cendres volcanique est surtout occluse, ce qui se traduit par une très faible perméabilité. Les couches de basalte, considérées à une échelle supérieure à l'échantillon, sont parcourues par de nombreuses fractures de retrait qui sont ouvertes et communicantes. C'est celles qui définissent le faciès dit des "orgues basaltiques" qu'on rencontre souvent dans ce genre de roche.

Les deux autres configurations se distinguent par des conditions aux limites particulières plus que par le type d'aquifère.

2.4.2.2. Régions arides

La très forte évaporation superficielle et son effet de succion sur les aquifères peu profonds provoque une salinisation progressive des eaux souterraines (figure 2.16 page 25).

Les apports salins par les embruns océaniques enrichissent les aquifères car ils ne retournent qu'en faible proportion à l'océan. La culture qui utilise l'irrigation par les eaux de la nappe accélère fortement ce processus d'enrichissement en sel. Elle y ajoute les nitrates et autres produits indésirables dans l'eau de boisson (figure 2.17 page 25).

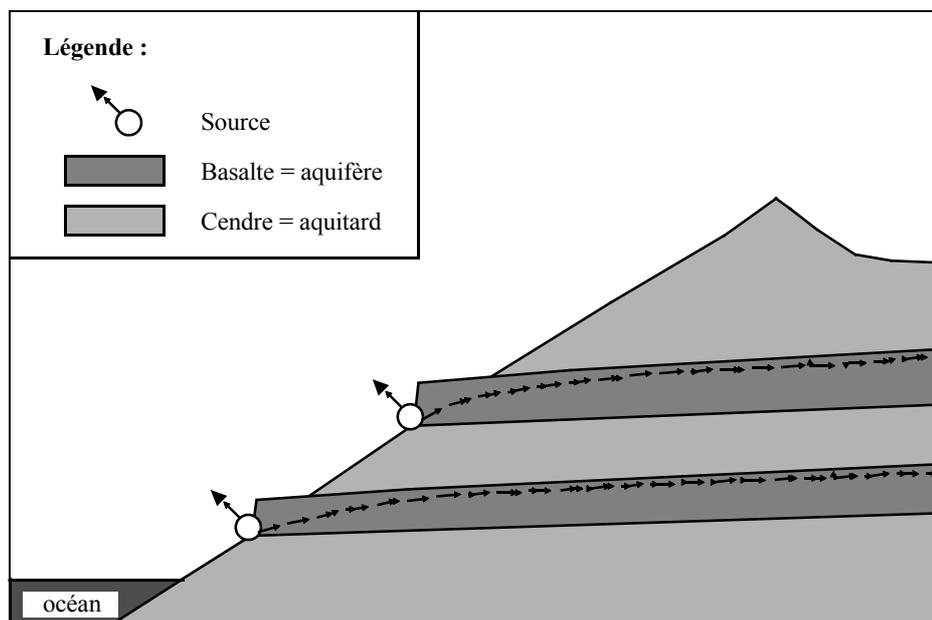


Figure 2.15: Aquifères des roches volcaniques : exemple des îles du Pacifique.

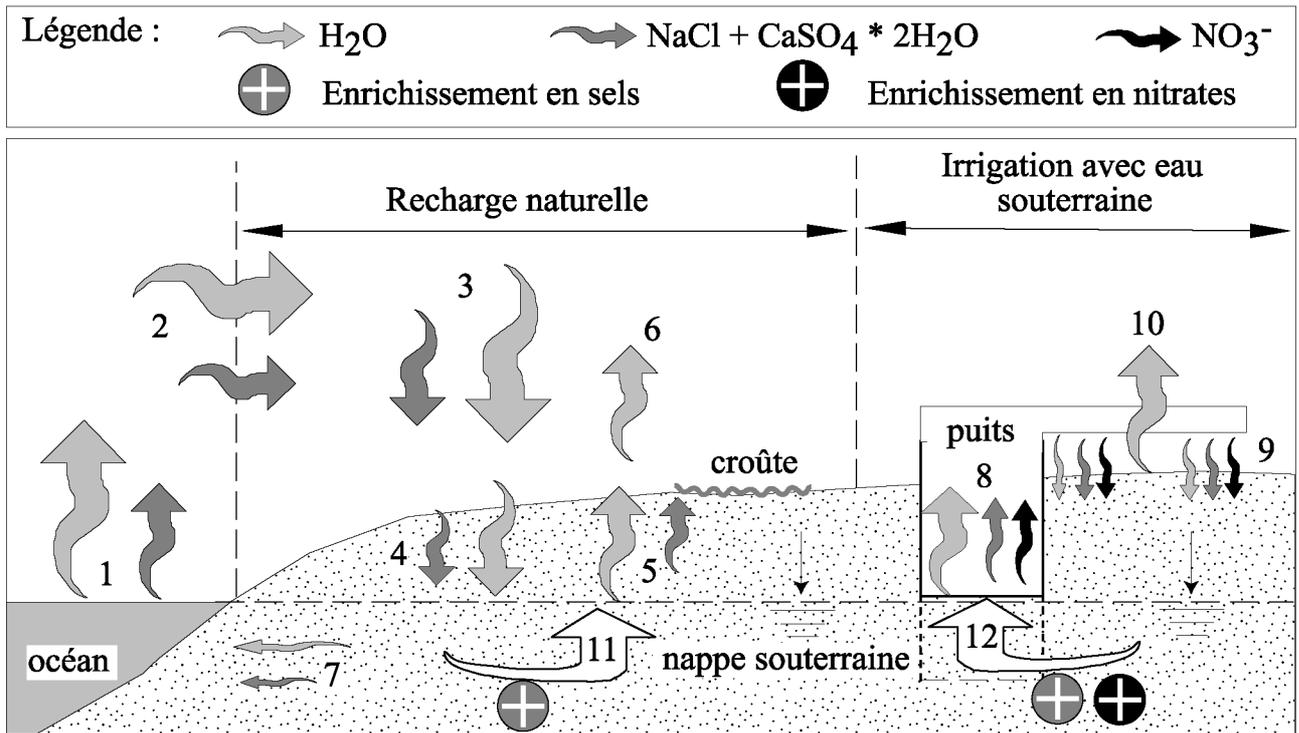


Figure 2.16: Nappes souterraines en milieu aride. Exemple des nappes côtières atlantiques en Afrique du Nord. Légende : 1. Évaporation océanique contenant des sels. 2. Aérosols salins arrivant sur le continent. 3. Précipitations rares mais volumineuses. 4. Infiltration vers la nappe. 5. Écoulement per ascensum par succion. 6. Évaporation de l'eau et dépôt du sel. 7. Flux d'exportation à l'océan négligeable. 8. Pompage par puits. 9. Irrigation. 10. Évaporation de l'eau uniquement. 11. Cycles naturel d'enrichissement en sel. 12. Cycle anthropique d'enrichissement en sel et en fertilisants.

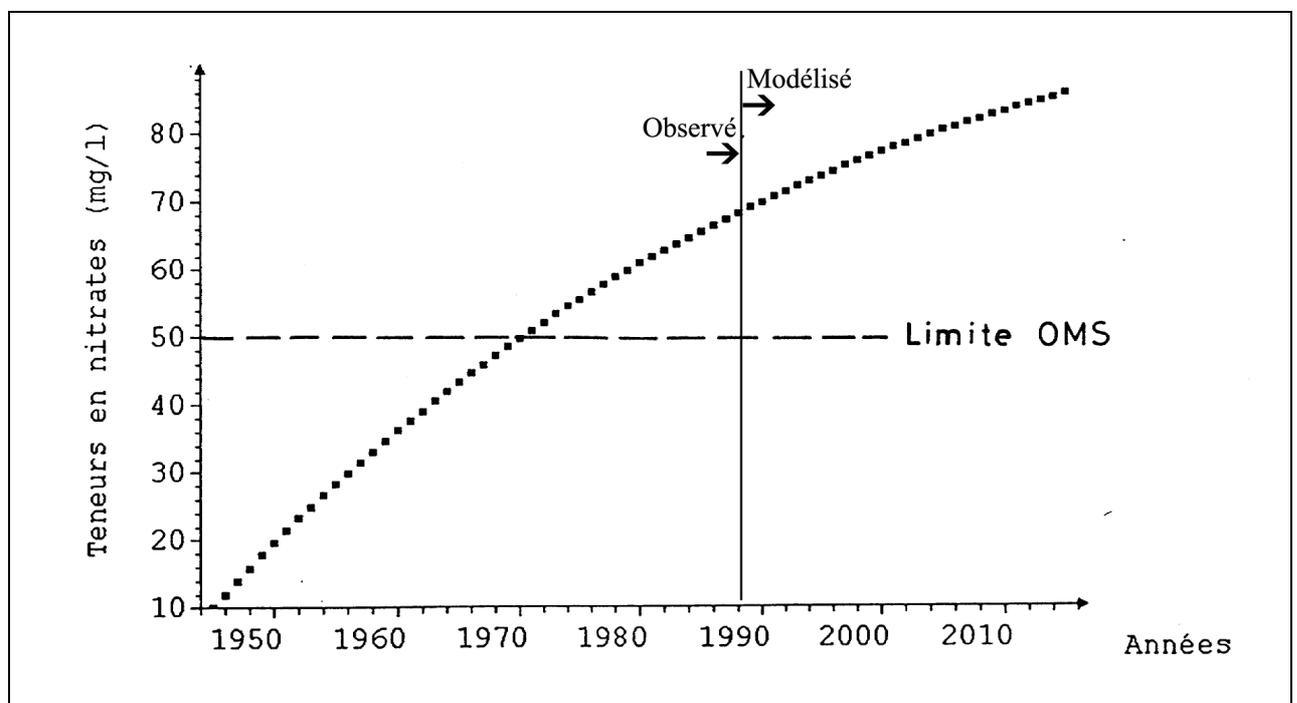


Figure 2.17: Modélisation de la croissance observée en nitrates et calcul de la croissance prévisible dans les eaux de la nappe de la Chaouia (Maroc). Principe du calcul. Concentration initiale en 1945, avant culture intensive : 10 mg/l NO_3 . Engrais lessivés vers la nappe: 120 Kg N/ha depuis 1946. La nappe met 50 ans pour se renouveler entièrement. Tiré de Marjoua.

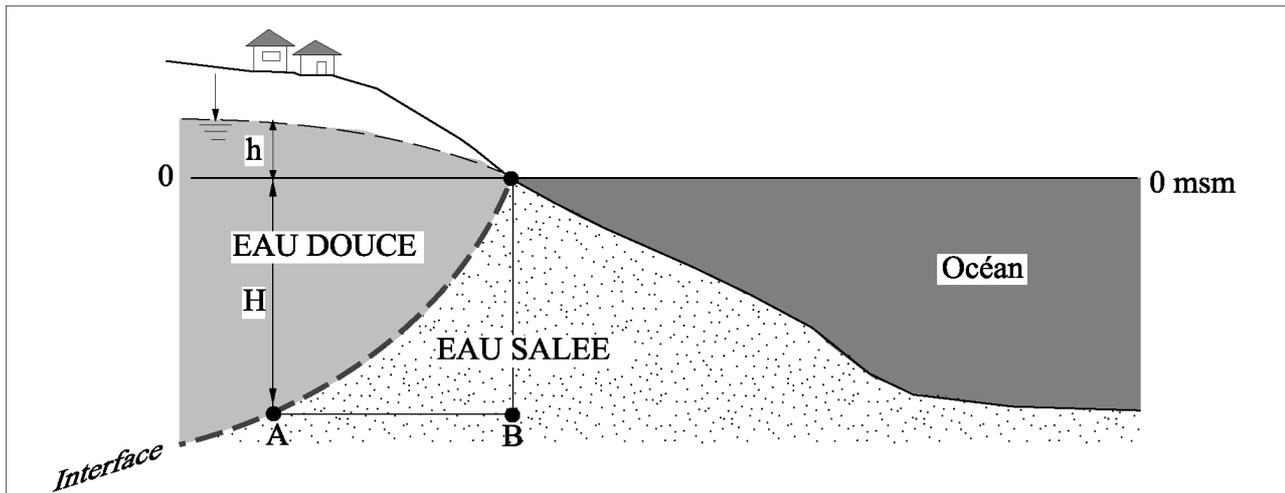


Figure 2.18: Contact eau douce - eau salée en zone côtière avec condition d'équilibre statique de Ghijben - Herzberg.

2.4.2.3. Régions côtières

Un problème spécifique aux régions côtières marines est la pénétration d'eau de mer dans l'aquifère, conduisant à une salinisation progressive des eaux douces (figure 2.18 page 26).

Cette situation ne se produit pratiquement que par surexploitation des nappes sur le littoral. A l'état naturel, la nappe s'écoule vers la mer et les mécanismes de diffusion moléculaire sont en général neutralisés par l'advection de l'eau. On peut approximer la forme du contact eau douce - eau salée sur la base de l'équilibre statique des densités tel que l'ont calculé Ghijben - Herzberg (figure 2.18 page 26).

Calcul de l'équilibre hydrostatique des pressions P sur un horizon contenu dans le biseau d'eau salée

$$P_A = \gamma_{ed}(H + h) = P_B = \gamma_{es}H$$

$$H = \frac{\gamma_{ed}}{\gamma_{es} - \gamma_{ed}} h$$

Si on prend des ordres grandeur usuels pour les poids spécifiques de l'eau, on obtient

$$\gamma_{ed} = 10 \text{ kN} / \text{m}^3 \quad \text{et} \quad \gamma_{es} = 10.25 \text{ kN} / \text{m}^3$$

$$H \cong 40h$$

En pratique, les formes du contact sont beaucoup plus complexes déjà par le simple fait que c'est un équilibre hydrodynamique et non pas statique. Les hétérogénéités structures des aquifères sont toutefois la principale source de complication.

Le remédiation de situations de ce type est très difficile. En pays à faible moyens financiers, on ne peut qu'abandonner la culture et l'habitation dans ces zones. Dans les

pays plus riches, on crée des adductions régionales permettant une recharge en eau douce ou, comme récemment au Japon, on confine tout le front de l'aquifère avec des rideaux d'étanchéité souterrains (parois moulées, injections etc).

3. La gestion dans l'optique du développement durable

La gestion des eaux souterraines s'inscrit dans un large contexte scientifique, technique, environnemental, législatif, financier et finalement socio-politique. Elle est bien évidemment une composante de la gestion globale des ressources en eaux. Elle est donc multifactorielle et ne dépend pas seulement de critères parfaitement objectifs.

L'introduction récente de la notion du développement durable modifie profondément les conditions cadres de l'exploitation des eaux souterraines. Par exemple, la surexploitation des aquifères entre en contradiction flagrante avec ce principe. L'application du principe à la consommation énergétique a également un effet direct sur le pompage dans les nappes. Dans la suite du cours, nous présentons les règles de gestion appliquées aujourd'hui puis les directions à prendre pour aller dans le sens du développement harmonieux à long terme. Le développement durable nécessite des changements de société d'une telle ampleur qu'il n'est pas possible pour le moment de connaître précisément quelles seront les nouvelles conditions aux limites.

3.1. Besoins en eau

Le Globe se divise en régions où les besoins en eau sont actuellement couverts et ceux où un déficit plus ou moins important prévaut. Cette répartition correspond approximativement à la répartition pays riches - pays pauvres, pays du Nord - pays du Sud. Les eaux souterraines, malgré quelques particularités régionales liées à la perméabilité du sous-sol, suivent ce même modèle. Le développement durable nécessitera une répartition plus équitable des ressources en eau au sens large. Les clés de la faisabilité d'une telle politique sont notamment :

- une diminution de la consommation d'eau douce dans les pays industrialisés
- une meilleure adéquation qualité - usage de l'eau (réserver les eaux souterraines de qualité aux eaux de boisson), donc création de réseaux différenciés

- une politique tarifaire favorisant les économies
- une gestion scientifique et internationale des ressources, notamment la répartition High lands - Low lands
- la création de grands réseaux de distribution nord-sud.
- une prospection systématique et à grande échelle des ressources souterraines profondes
- un développement de la recharge interaquifères et de la réalimentation artificielle
- l'utilisation combinée eau de surface - eau souterraine
- une protection efficace des ressources
- la réhabilitation de réservoirs contaminés

Cette opération concerne les eaux douces en général et les eaux souterraines en particulier.

En Suisse, actuellement, on calcule le besoin d'une collectivité publique pour un réseau d'eau de boisson sur la base suivante :

- Moyenne par habitant (y compris petite industrie et artisanat, arrosage, pertes sur les réseaux) : 400 l/j

dont pour le seul ménage : 160 l/j

- Bétail par UGB (unité de gros bétail):

entre 60 et 120 l/j
selon nourriture, altitude etc...

Dans l'optique du développement durable, ces normes déjà fortement revues à la baisse, devraient être encore réduites.

3.2. Cadre légal et administratif

Les règles du droit sur les eaux souterraines sont très

variables d'un pays à l'autre et même d'un canton à l'autre pour ce qui concerne la Suisse. Il est donc vain de faire une revue de ces différents systèmes. En guise d'illustration, nous pouvons donner quelques informations sur le cas de la Suisse et quelques règles cantonales issues du canton de Vaud.

3.2.1. Sur la propriété des eaux souterraines

Le canton de Vaud fixe que les eaux d'une nappe appartiennent au domaine public cantonal si son débit dépasse 300 l/mn. On entend ici par eaux de nappes les eaux qui ne sortent pas naturellement à la surface d'un fond et que l'on doit pomper. Un utilisateur potentiel d'une telle nappe doit faire une demande de concession au canton s'il veut pomper un débit supérieur à 50 l/mn. Il devra payer un montant fixé en fonction du débit. Dans le dossier de demande de concession, l'intéressé devra justifier du besoin et des capacités de la nappe à fournir les débits demandés (figure 3.1 page 29).

En ce qui concerne les sources, c'est-à-dire des eaux souterraines qui sourdent naturellement à la surface, elles appartiennent au propriétaire du fond sur lequel elles apparaissent. Le propriétaire peut vendre à un tiers un droit d'eau sur son terrain moyennant une servitude de fouilles et captages inscrite au Registre foncier.

Ces règles apparemment claires ne le sont pas dans tous les cas. Le législateur n'étant pas géologue ne peut saisir certaines ambiguïtés. Par exemple, il faut savoir que toute source est un exutoire d'une nappe souterraine; la construction d'un captage de quelques mètres de profondeur au droit d'une source naturelle peut livrer plus d'eau que ce qui sortait naturellement au niveau du sol. Pour en savoir plus, l'étudiant peut consulter la thèse de S. Mérot sur ces problèmes (éd. Payot 1996).

3.2.2. Sur la protection des eaux

La Confédération suisse a édicté un grand nombre de textes légaux et de directives qui se rapportent directement ou indirectement aux eaux souterraines. Elle sont citées en annexe à ce cours (annexe I).

Ces textes fixent les principes généraux de la protection et les mesures à mettre en place. Ils contiennent aussi des valeurs limites à ne pas dépasser dans les eaux de boisson. Nous verrons quelques applications à propos de la qualité des eaux lors des prospections de ressources (chapitre 4.1) et sur les zones de protection (chapitre 4.4).

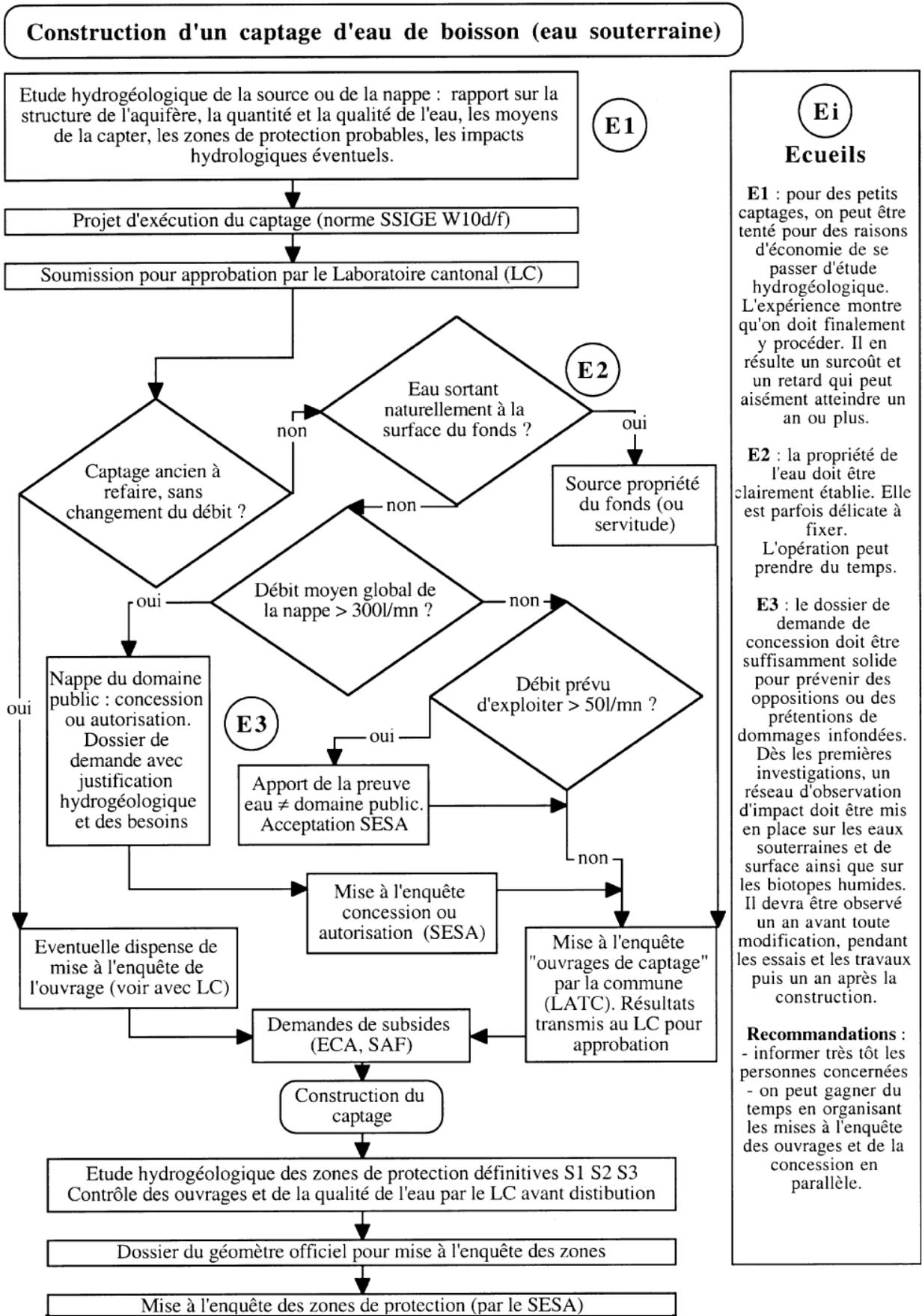


Figure 3.1: Exemple de procédure appliquée dans le canton de Vaud pour la construction d'un captage, avec mention des écueils à éviter.

3.3. Evaluation du potentiel hydro-géologique

La gestion des eaux souterraines nécessite, à l'image des ressources financières, une bonne connaissance du volume d'eau présent et des débits que l'on peut faire entrer ou sortir de ce volume. Un certain nombre de concepts hydro-géologiques sont nécessaires pour traiter du sujet.

3.3.1. Notion de réserve totale

Comme pour un réservoir d'eau en surface, on essaie de caractériser le volume d'eau contenu dans le réservoir souterrain. Le volume de l'eau égouttable (donc libérable par gravité) contenu dans une nappe entière constitue la réserve totale.

Dans le cas de la nappe libre, on l'obtient par le produit du volume de la zone saturée V multiplié par la porosité efficace n_e (figure 3.2 page 30) :

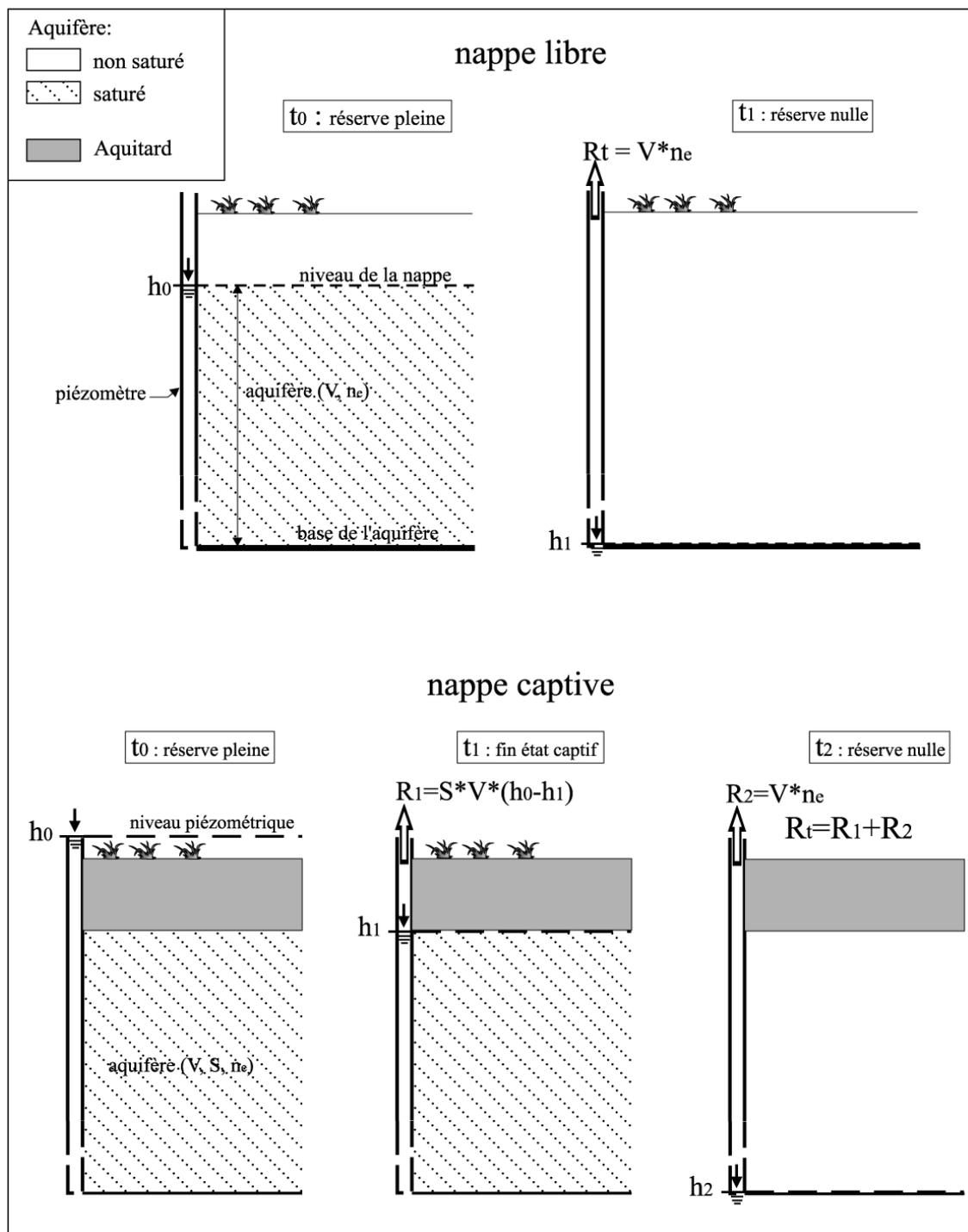


Figure 3.2: Les réserves dans les nappes libres et les nappes captives.

$$R_t = V \cdot n_e$$

Ce nombre global ne donne pas une image réaliste de ce que l'on peut tirer de cette nappe et ceci pour plusieurs raisons.

- pour vider toute l'eau gravifique contenue dans une nappe souterraine, il faudrait une infinité de puits
- l'exploitation des puits nécessite de ne pas abaisser le niveau jusqu'au fond de l'ouvrage pour éviter leur ensablement
- même si l'on pouvait abaisser le niveau hydrostatique jusqu'au plancher de l'aquifère, cette réserve ne dit rien sur son taux de renouvellement.

Pour une nappe captive, cette notion devient plus complexe (figure 3.2). A supposer que l'on puisse abaisser le niveau hydrostatique jusqu'au plancher, il faut ajouter au cas de la nappe libre le volume d'eau d'abord libéré par décompression de l'eau et compression verticale du squelette, selon les équations de Theis :

$$R_t = S_s \cdot V \cdot (h_0 - h_1) + V \cdot n_e$$

avec $S_s = \rho \cdot g \cdot (\alpha + n \cdot \beta)$

et $\alpha = 1/E_s$ et $\beta = 1/E_e$

$$S = S_s \cdot (h_1 - h_2)$$

V = volume de l'aquifère saturé [L³]

S = coefficient d'emmagasinement de l'aquifère [-]

S_s = coefficient d'emmagasinement spécifique [L⁻¹]

h₀ = cote du niveau hydrostatique de repos [L]

h₁ = cote du toit de l'aquifère [L]

h₂ = cote de la base de l'aquifère [L]

n = porosité totale [-]

n_e = porosité efficace [-]

ρ = masse volumique de l'eau [M · L⁻³]

g = accélération de pesanteur [L · T⁻²]

α = compressibilité verticale du squelette aquifère [LT²M⁻¹]

E_s = module de compressibilité [ML⁻¹T⁻²] = [Pa] verticale du squelette aquifère

$$E_s = (\Delta\sigma' / (\Delta z)) \cdot (h_1 - h_2)$$

σ' = contrainte effective [ML⁻¹T⁻²] = [Pa]

Δz = tassement vertical du squelette [L]

β = compressibilité de l'eau [LT²M⁻¹]

E_e = module de compressibilité de l'eau [ML⁻¹T⁻²] = [Pa]

$$E_e = \Delta p / \frac{\Delta V}{V}$$

p = pression hydrostatique [M · L⁻¹T⁻²]

Le terme décompression est souvent très faible par rapport au terme nappe libre.

3.2.2. Notion de réserve renouvelable

La partie renouvelable de la réserve, que l'on appelle réserve renouvelable R_r, ou ressource naturelle, est la caractéristique première d'une gestion à long terme d'une nappe souterraine. Elle correspond au volume d'eau qui alimente la nappe au cours d'un cycle hydrologique (figure 3.3 page 31). On peut la calculer par :

$$R_r = \int_0^n Q_i dt + (V_n - V_0) \cdot n_e$$

avec Q = somme des débits des exutoires

V₀ = volume de la nappe au début du cycle

V_n = volume de la nappe à la fin du cycle.

Cette grandeur varie beaucoup d'un cycle à l'autre. On peut définir une ressource interannuelle moyenne.

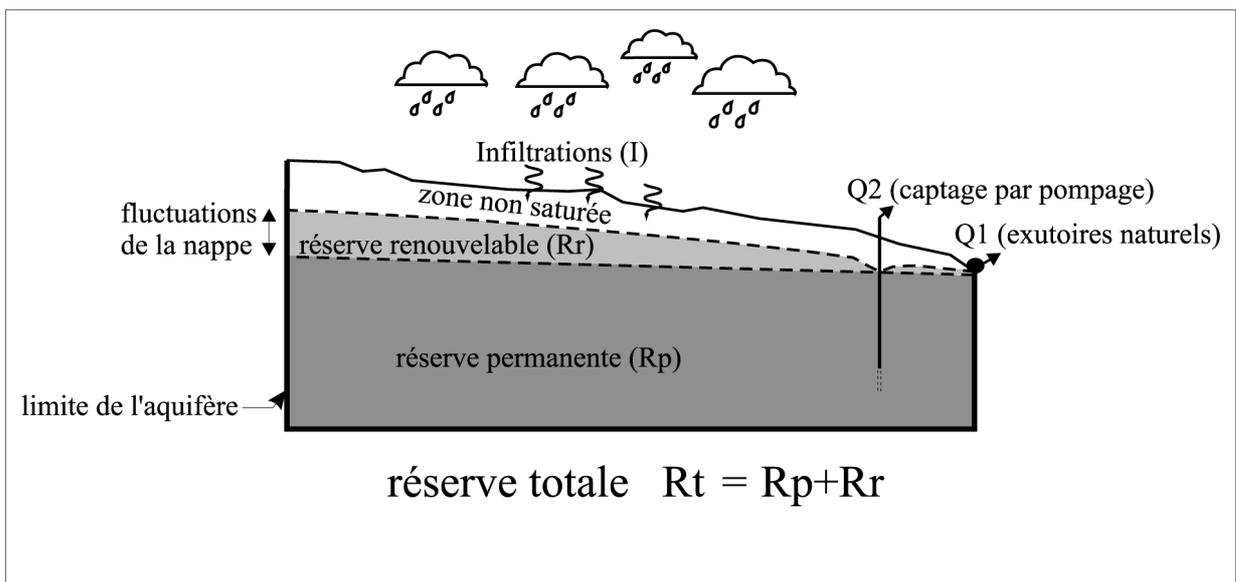


Figure 3.3: Notion de réserve totale et de réserve renouvelable.

3.3.3. Notion de ressource exploitable

La ressource exploitable est le débit moyen que l'on peut extraire d'un aquifère dans des conditions techniques et environnementales réalistes et d'une manière économique. Comme on le voit, cette notion dépend de conditions aux limites qui peuvent évoluer avec le temps, notamment la rentabilité de l'exploitation. La ressource exploitable comprend indistinctement la ressource renouvelable et la ressource d'exploitation de la réserve.

3.3.4. Principes de gestion

La gestion d'un aquifère au sens purement hydraulique consiste à l'utiliser comme récepteur et comme émetteur tout à la fois. C'est un système qui doit transformer une fonction temporelle variable en une autre, si possible sans perte (figure 3.4 page 32). Ces fonctions sont :

- à l'entrée : l'alimentation sur laquelle nous n'avons aucune prise (sauf si réalimentation artificielle)
- à la sortie : la distribution par laquelle on doit couvrir les besoins instantanés.

Il y a généralement aucune adéquation naturelle entre la demande et l'offre. Elles sont même souvent opposées.

La clé du système repose dans trois facultés du dispositif :

- l'alimentation moyenne doit être suffisante pour couvrir la somme des besoins
- le volume d'eau accumulé dans la nappe doit être adapté à la durée des plus longues périodes sans alimentation

- les ouvrages d'extraction de l'eau dans la nappe doivent permettre des débits de pointe supérieurs ou égaux à la demande ponctuelle maximale prévisible.

Ces critères hydrauliques sont aujourd'hui insuffisants. Ils sont complétés par des critères environnementaux comme le non-tarissement de ruisseaux ou de biotopes humides par exemple.

Comme nous le voyons, le pas de temps de cette gestion varie de quelques secondes à des années. La gestion à court et à long terme nécessitent d'être traitées successivement puisqu'elles s'appuient sur des infrastructures différentes.

3.3.4.1. Gestion journalière et hebdomadaire

La couverture des débits instantanés dans un réseau de distribution, y compris la défense incendie, nécessiterait des ouvrages de captages très sophistiqués et nombreux; certains aquifères à rendement relativement faible ne le permettraient même pas. De plus, ce système serait mal sécurisé en cas de crise puisque le débit serait fourni par des pompes dépendant du réseau électrique. C'est une des raisons pour lesquelles on utilise pour le tampon journalier des réservoirs construits en surface, de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de m³, situés au point le plus haut du réseau (voir Cossonay, chapitre 4.3.2). Quelles que soient les circonstances, ils peuvent alimenter gravitairement le réseau.

Cette solution offre un autre avantage sur le plan énergétique. Les puits de pompage sont exploités uniquement la nuit, lorsque le prix de l'énergie est le plus bas.

En aucun cas, de tels réservoirs ne peuvent assurer une gestion saisonnière.

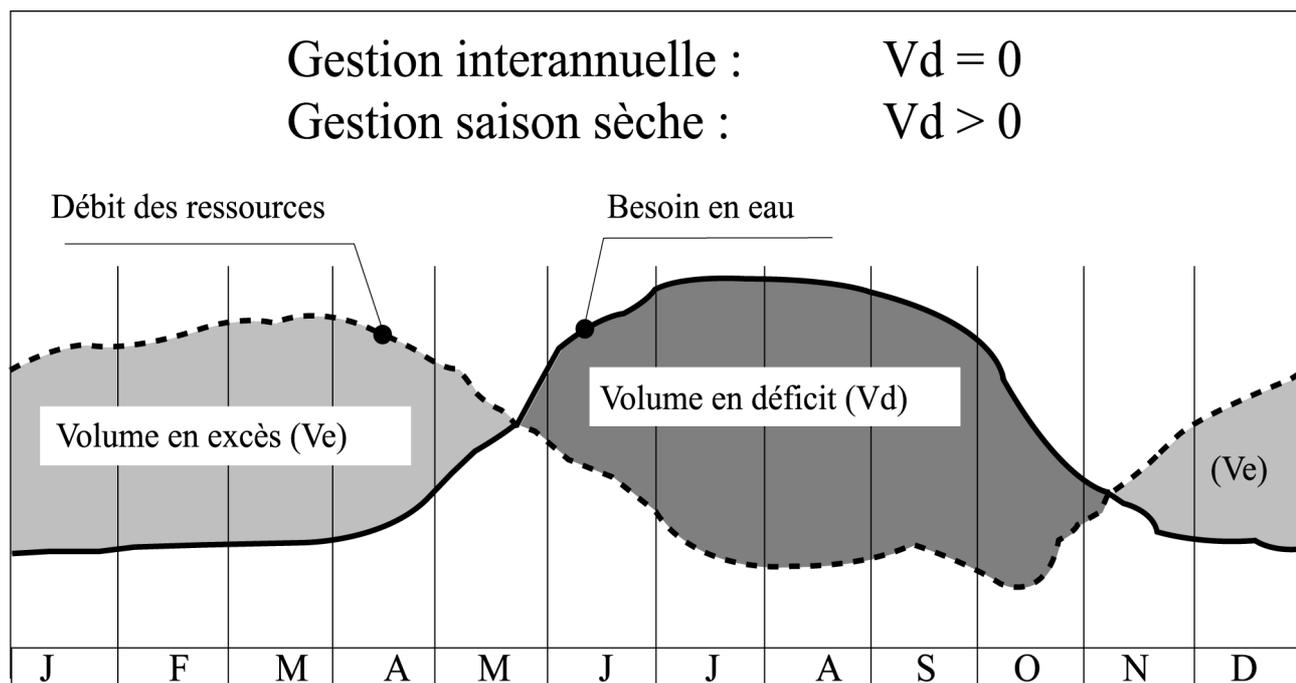


Figure 3.4: Inadéquation du régime des eaux souterraines et de la demande au cours d'une année type.

3.3.4.2. Gestion saisonnière

La gestion intersaisonnière fait appel à des volumes de stockage beaucoup plus importants. C'est la nappe souterraine qui fonctionne comme réservoir. A la manière d'une retenue hydroélectrique, on provoque un creux pendant la période de haute consommation, creux qui est sensé être comblé par les apports prévisibles lors de la prochaine saison à forte alimentation.

Le facteur déterminant est le volume d'eau souterraine accumulé avant la période de haute consommation et l'intensité de ses pertes gravitaires (sources). C'est la structure hydrogéologique qui va être prépondérante : on distinguera des aquifères plus ou moins favorables à l'accumulation. Prenons deux exemples issus des aquifères du pied lémannique du Jura (figure 3.5 page 33). Ces deux cas sont tout à fait voisins du point de vue géographique puisqu'ils sont distants de quelques centaines de mètres dans la zone des captages de la Commune de Bassins (VD).

Aquifère de la source de la Montau

La source de la Montau est captée par une galerie qui draine à sa base une couche de gravier aquifère plus ou moins horizontale. La forme plane de l'aquifère, son intersection avec le versant et la grande efficacité du captage facilitent une baisse rapide de la réserve en eau. Le régime de la source s'en ressent : très forts débits de fin

d'hiver et de printemps, forte baisse en été.

Aquifère artésien

Au-dessous de l'aquifère de la Montau, nous avons découvert par géophysique puis par forage un sillon graveleux fluvio-glaciaire artésien. Son chapeau peu perméable perd légèrement au droit de la source dite "Bataille"; le régime de cette dernière est très régulier. Cette structure aquifère, par sa profondeur, est dotée d'une grande inertie hydraulique. Un puits artésien a été construit pour mieux l'exploiter; il est muni d'une vanne qui alimente le réseau à la demande quand la pression est plus élevée que le niveau du sol; il est équipé également d'une pompe pour exploiter l'eau au-dessous de la surface du sol en période de forte demande.

Une des difficultés dans toute gestion saisonnière est la prévision de l'apport post-exploitation. Si l'on réalise un creux trop important, la prochaine saison sèche ne pourra tabler que sur une réserve partielle. Si l'on réalise un creux trop faible, la réalimentation sera en partie perdue pour le bilan de la nappe.

3.3.4.3. Gestion à long terme

Le développement durable exige que seule la réserve renouvelable soit exploitée. Si ce principe est déjà effectif dans beaucoup de pays industrialisés, il est en revanche une exception dans les régions à fort déficit hydrique.

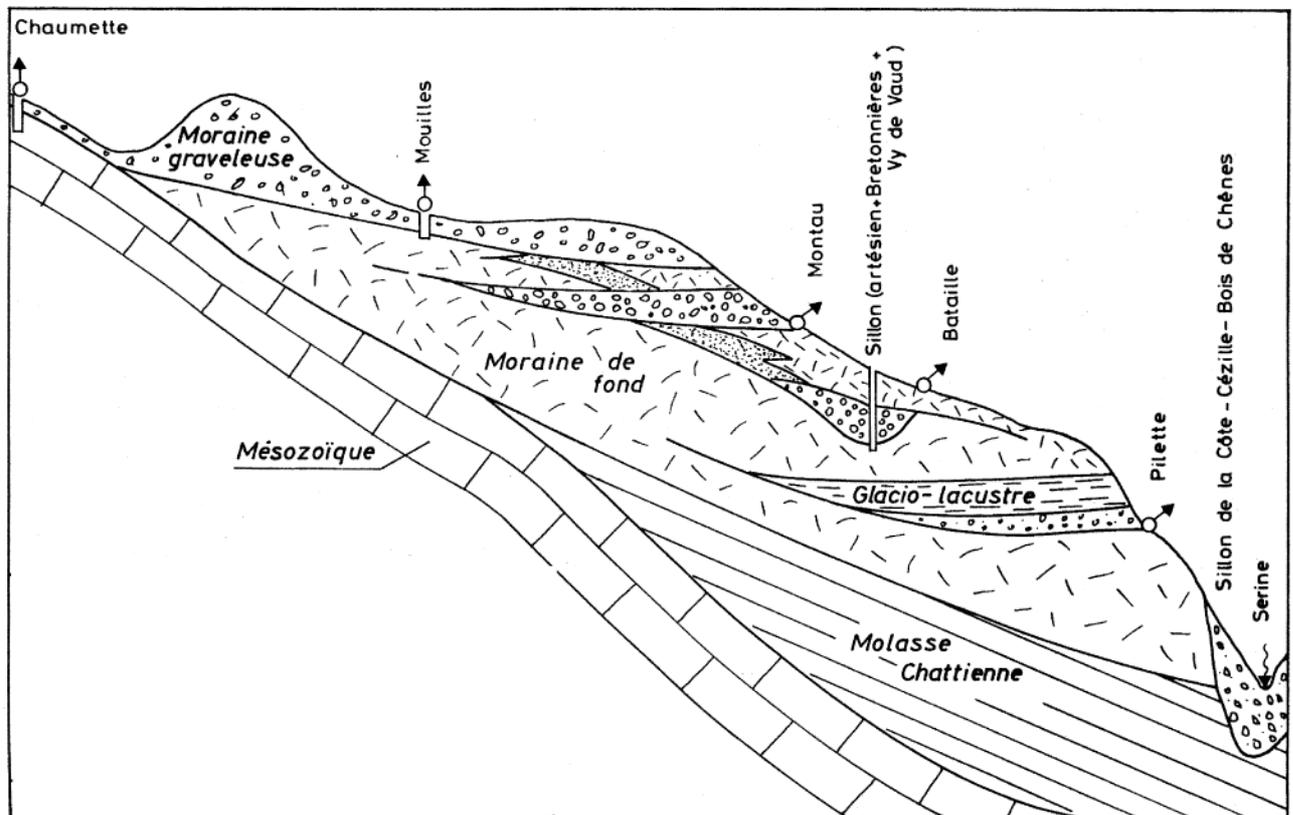


Figure 3.5: Aquifère favorable et défavorable à l'accumulation des eaux. Cas des eaux souterraines de Bassins (VD) (schéma sans échelle).

Leur développement est une sorte de fuite en avant qui ne peut conduire à terme qu'à des catastrophes humaines et écologiques.

Le scénario de la surexploitation est plus ou moins le suivant : pour développer une région à déficit hydrique, on exécute des forages profonds qui découvrent un aquifère à rendement suffisamment élevé pour permettre une colonisation de la région. L'eau extraite est une eau ancienne qui ne se renouvelle que partiellement. Il en résulte un abaissement progressif du niveau de la nappe et donc du volume de la réserve. Ces effets peuvent se produire rapidement ou au bout de décennies voire de siècles dans le cas de nappes de très grande taille comme le Continental intercalaire du Sahara par exemple (figure 3.6 page 35).

La surexploitation conduit en régions côtières à la pénétration d'eau salée (voir 2.4.2.3).

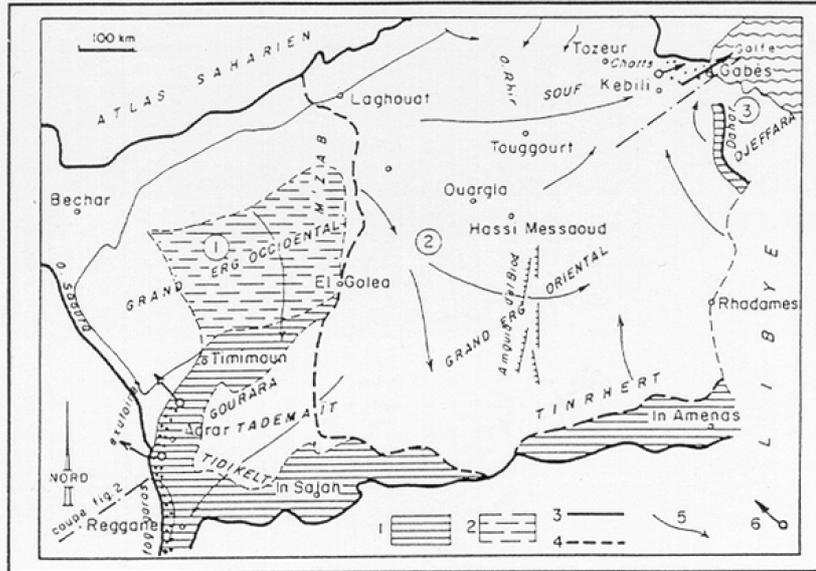
La détermination de la réserve renouvelable pourrait théoriquement être tirée d'un bilan sur le bassin d'alimentation des eaux souterraines.

$$I = P - R - ETP$$

Dans les faits, cette méthode ne convient que pour une première esquisse car les incertitudes sur la détermination du ruissellement pur et de l'évapotranspiration moyens dans le bassin sont particulièrement grandes. On procède plutôt de manière indirecte par des essais de pompage qui sollicitent la nappe d'une manière drastique; on observe la reconstitution de la nappe après les pompages (voir 4.1.4).

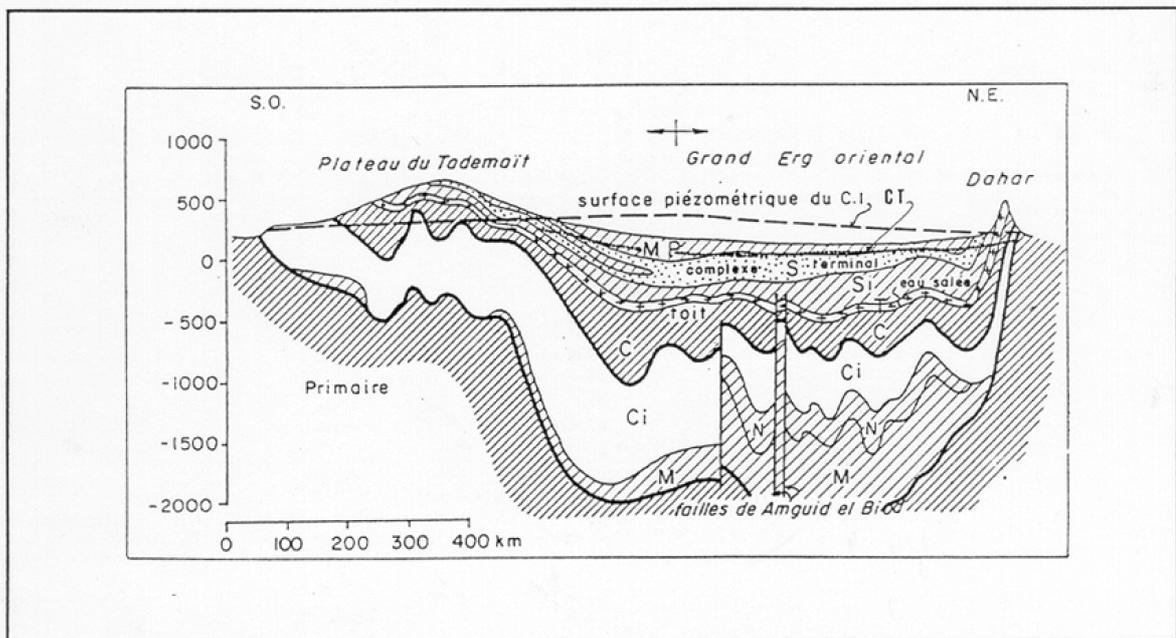
Les méthodes géochimiques sont également une aide précieuse pour déterminer s'il s'agit d'eaux actuelles, donc qui se renouvellent rapidement ou si l'on a affaire à des eaux anciennes. Les datations isotopiques de l'eau sont très performantes : par exemple, une eau qui ne contient pas de Tritium s'est infiltrée avant les années cinquante, date des premiers essais nucléaires dans l'atmosphère.

Quelle que soit la méthode utilisée, c'est finalement le contrôle de l'évolution hydraulique et géochimique au cours de l'exploitation qui apporte la meilleure garantie. Il nécessite un réseau piézométrique spécifiquement destiné à cette surveillance aux endroits névralgiques. Cette phase reste malheureusement souvent virtuelle dans beaucoup d'aménagements. Une fois que l'eau est là, on oublie le reste. Ce problème est d'une grande acuité dans l'aide aux pays en voie de développement; si la gestion n'est pas effective, l'aide n'aura été qu'une illusion passagère, génératrice d'une nouvelle misère dans quelques décennies.



Cadre général du système aquifère du Continental intercalaire CI.

1. Affleurements de la formation ; 2. Affleurements sous le Grand Erg occidental (drainance) ; 3. Limites du bassin hydrogéologique ; 4. Ligne de partage des eaux souterraines; 5. Direction de l'écoulement souterrain ; 6. Exutoires principaux. 1 sous-bassin occidental ; 2 sous-bassin oriental ; 3 sous-bassin de la Djeffara.



Coupe hydrogéologique schématique à travers le Sahara septentrional.

Q : Quaternaire ; MP : Miopliocène imperméable ; Pontien : Pontien sableux ; E : Eocène imperméable ; Ss : Sénien supérieur carbonaté ; E + Ss = Aquifère du Complexe terminal CT au sens large ; Si : Sénien inférieur argilo-gypseux ; T : Turonien dolomitique ; C : Cénomaniens argileux + gypse + anhydrite imperméable ; V : Vraconien argileux ; A : Albien argileux ; N : Néocomien argileux ; CI : Aquifère du Continental intercalaire ; M : Malm ; J : Jurassique indéterminé ; P : Primaire.

Figure 3.6: Exploitation de nappes fossiles : cas de l'aquifère du Continental intercalaire qui est une véritable couche d'eau douce sous le désert du Sahara. On estime sa durée de renouvellement à 150'000 ans.

3.3.5. Méthodes de réalimentation provoquée

Au cours de la seconde moitié du XX siècle, plusieurs

installations de réalimentation provoquée ont été construites pour palier aux carences de l'alimentation naturelle. Ces méthodes sont une des clés d'une utilisation plus optimale des réservoirs souterrains. Beaucoup de nappes

possèdent de très grandes réserves mais ne sont que très peu alimentées en raison d'une couverture peu perméable; on ne peut les exploiter que faiblement pour cette raison. Fondamentalement, on distingue deux types de méthodes : la réalimentation artificielle et la réalimentation induite.

3.3.5.1. Réalimentation artificielle

La réalimentation artificielle consiste en la réalisation d'ouvrages qui injectent de l'eau de surface en profondeur. Ces dispositifs sont soit des tranchées absorbantes, ouvertes ou remblayées, ou des puits d'injection en profondeur. Les difficultés majeures proviennent du fait que ce sont des eaux de surface, donc impures. Deux effets négatifs peuvent se présenter :

- les ouvrages ont tendance à se colmater par ces impuretés (matières minérales en suspension, matières organiques); ils doivent être périodiquement régénérés pour retrouver la capacité d'infiltration; ceci n'est pas facile à réussir pour des ouvrages en profondeur

- la matière organique consomme de l'oxygène pour se minéraliser; le stock d'oxygène dans la nappe étant limité, on observe une réduction progressive de l'eau de la nappe qui finit par devenir impropre à la consommation (eau ferrugineuse); c'est ce phénomène qui a mis fin à l'exploitation de l'usine de réalimentation artificielle d'Aarberg (BE).

Si l'eau brute utilisée pour la réalimentation n'est pas particulièrement propre, on a intérêt à la traiter pratiquement comme une eau potable, par décantation et filtration, avant de l'injecter dans l'aquifère. C'est ce qui a été réalisé à Genève avec l'usine de Vessy qui prend des eaux très chargées dans l'Arve pour les injecter dans le sillon fluvio-glaciaire de l'ancienne Arve (figure 3.7 page 36).

Lorsqu'on doit injecter des eaux de surface brutes dans le sous-sol, comme le prescrit la Confédération pour les eaux claires urbaines, il est recommandé, dans la mesure où le site le permet, de mettre en place des fossés d'infiltration ouverts, plus faciles à décolmater si nécessaire.

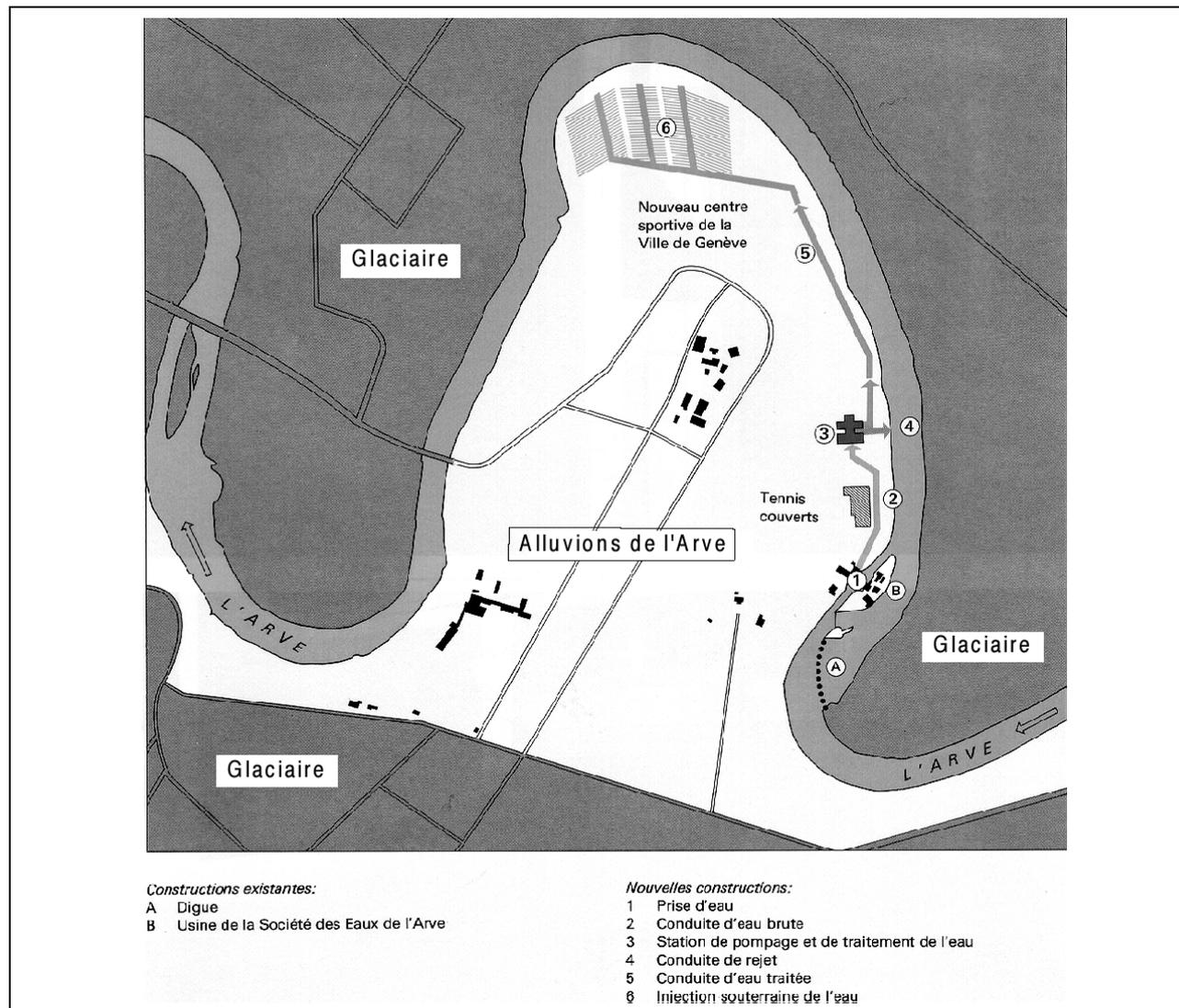


Figure 3.7: Réalimentation artificielle du sillon de l'ancienne Arve à Genève

3.3.5.2. Réalimentation induite

On dénomme réalimentation induite une alimentation sollicitée à partir d'une surface d'eau libre (lac ou rivière). On place en bordure du cours d'eau un dispositif qui crée un appel d'eau vers la profondeur. On agit soit par un gradient hydraulique accentué soit par la mise en place d'une zone plus perméable. Le débit de perte de la rivière vers la nappe s'en trouve fortement accentué. La distance surface d'eau libre - ouvrage de prise doit être suffisamment importante pour que l'eau de surface soit épurée naturellement par filtration au travers des terrains. On compte en général plusieurs dizaines de mètres dans le cas de graviers sableux.

3.3.5.2.1. Cas à partir d'une rivière

Exemple : puits de la ville de Berne dans la plaine de l'Aar (figure 3.8 page 37).

Plusieurs puits exploitent indirectement l'eau de l'Aar pour la Ville de Berne par le procédé de la réalimentation induite. Par exemple, le puits de Belpau, près de Muri, doit plus des 95 % de son débit à la réalimentation induite.

La réalimentation induite est souvent bénéfique pour la qualité de l'eau en raison de la faible dureté des eaux de surface. Cependant, lorsque l'eau du cours d'eau est fortement chargée de matière organique, il se produit une réduction de la nappe qui conduit à l'apparition de fer, de

manganèse, de nitrites et parfois d'ammoniac. Ces altérations sont fréquentes en Allemagne où les eaux de surface sont plus chargées qu'en Suisse.

3.3.5.2.2. Cas à partir d'un lac

Exemple : delta du Boiron (Léman)

Le delta du Boiron à l'ouest de Morges (figure 3.9 page 38) ne possède qu'une mince nappe graveleuse inexploitable en elle-même. Nous avons construit dans cette nappe une tranchée d'essai à une trentaine de mètres du rivage, dans laquelle on rabat la nappe d'environ 2 mètres. Ceci crée un appel des eaux du lac vers la tranchée, eaux qui se mélangent à l'apport du haut du delta. La proportion d'eau du lac atteint 60 % à long terme. Les eaux sont épurées sur les 30 m de trajet depuis le lac vers le captage. Un dispositif d'exploitation devrait être implanté prochainement sur ce site selon ce système.

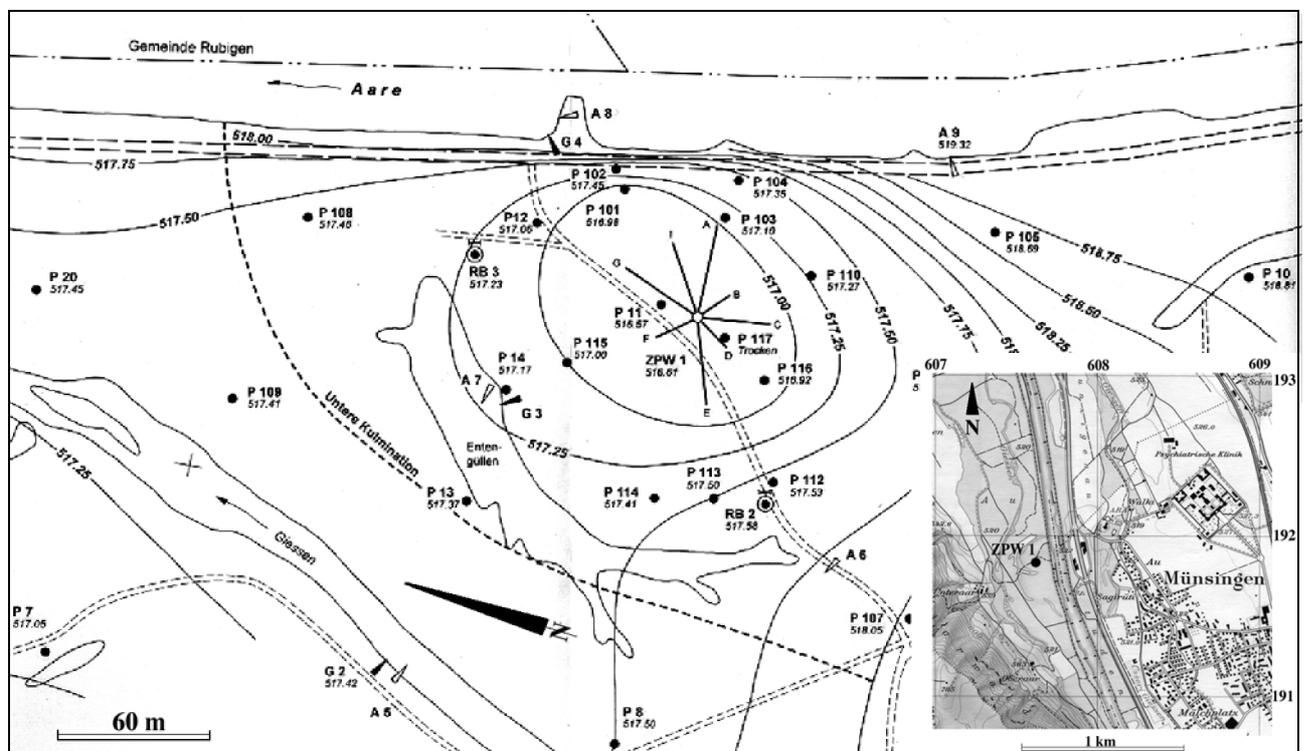


Figure 3.8: Réalimentation induite en bordure du lit de l'Aar à Belp (BE). La flèche sur la carte en médaillon indique la situation du captage. La carte détaillée montre le captage à drains rayonnants (ZPW 1), les piézomètres (P) et le niveau piézométrique de la nappe.

3.3.6. Méthodes d'inhibition des exutoires naturels

On peut augmenter la part exploitable d'un aquifère en réduisant ou en supprimant ses pertes naturelles. Ces techniques s'inspirent des méthodes ancestrales utilisées dans les pays désertiques où des barrages souterrains étaient construits dans les alluvions des oueds pour retenir l'eau dans les pores des alluvions (figure 3.11 page 40)

Aujourd'hui, on est en mesure de barrer complètement un aquifère par des méthodes du génie civil moderne (parois moulées, rideaux d'injection, etc). Les captages à écoulement gravitaire libre doivent être remplacés par des captages à prélèvement régulé sur la demande (figure 3.12 page 41). Le caractère novateur de telles méthodes et leur coût assez élevé retient pour le moment beaucoup leur mise en pratique. On peut penser cependant qu'elles sont promises à un bel avenir.

Le contrôle du débit des exutoires naturels doit prendre en compte aussi l'écologie des ruisseaux concernés par ces sources. On évitera la mise à sec de tronçons de rivière. En revanche, l'amélioration du stockage d'eau souterraine dans l'aquifère offre la possibilité de soutenir les débits d'étiage de ruisseaux qui ont tendance naturellement à tarir.

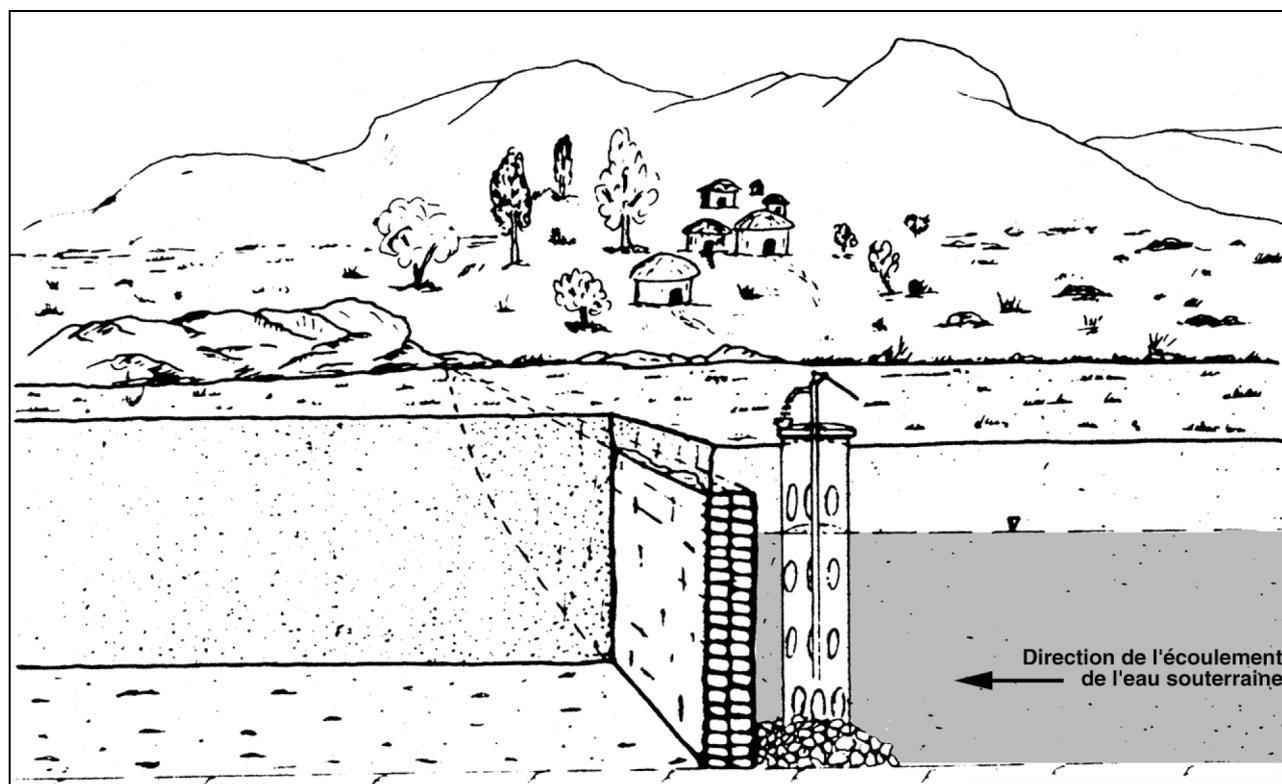


Figure 3.11: Le barrage souterrain est construit entre les deux bords de l'oued par tranchée et remplissage de matériau étanche. Une pompe ou des drains gravitaires sont installés à l'amont du barrage pour collecter l'eau. La difficulté de tels ouvrages tient à la possible perméabilité du substratum rocheux.

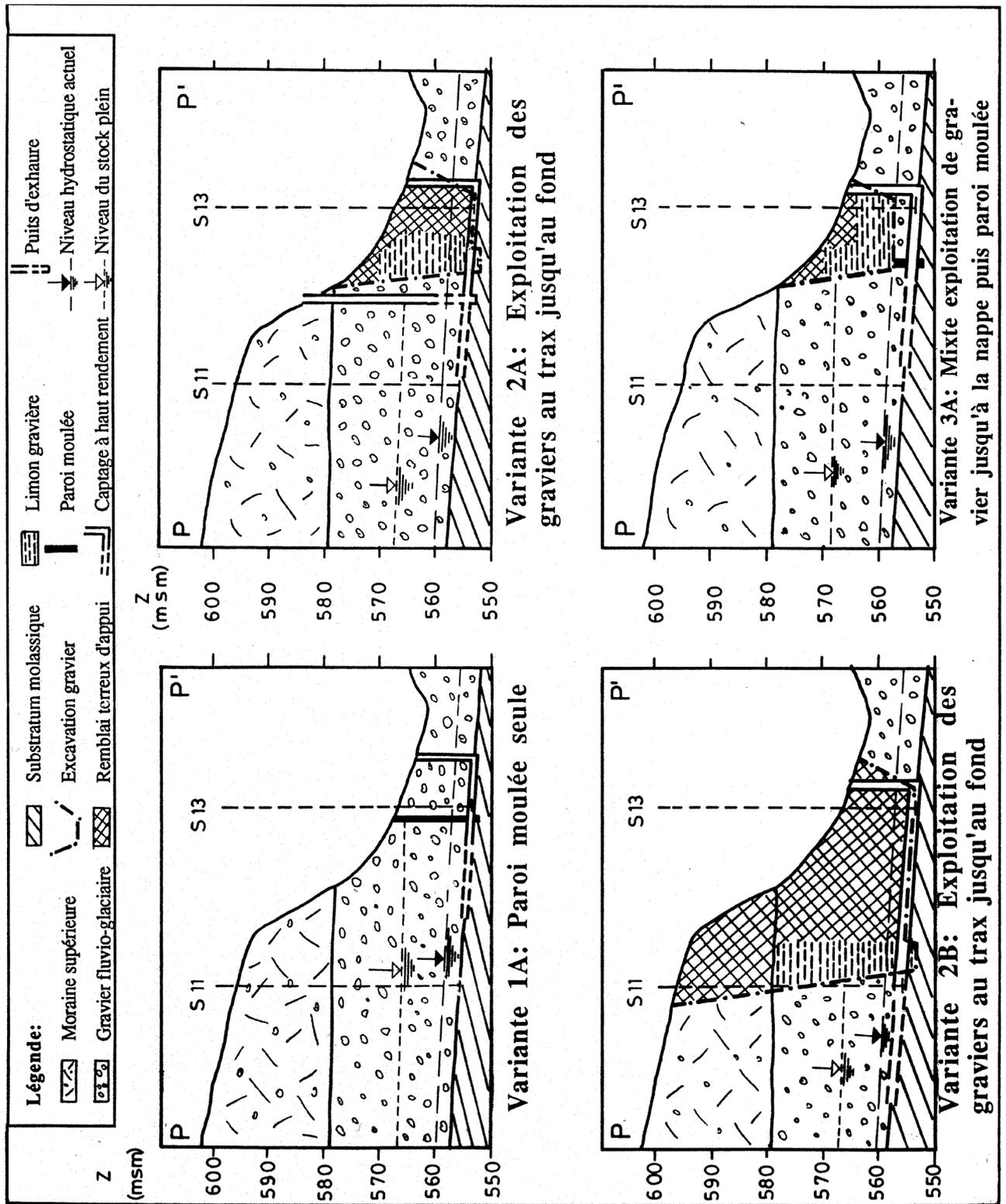


Figure 3.12: Projet de rideau d'étanchéité barrant la nappe à écoulement libre de Prévondavaux, Service des eaux de la Ville de Lausanne.

3.3.7. Vulnérabilité

L'évaluation d'un potentiel hydrogéologique d'une région ne peut se passer d'une étude de la vulnérabilité des réserves souterraines découvertes. Les conditions hydrogéologiques présentent des situations contrastées qui doivent être prises en compte dans une analyse des dangers de pollution. Voici deux situations extrêmes :

- bassin karstique sans couverture : les eaux de surface pénètrent à grande vitesse dans l'aquifère puis y circulent dans des chenaux, sans filtration conséquente; ce cas traduit une vulnérabilité maximum.
- sillon graveleux sous une couche de moraine faiblement perméable : les eaux de surface sont filtrées très efficacement avant d'arriver aux ouvrages de captage; les éventuelles pollutions microbiologiques sont à coup sûr éliminées.

Nous verrons plus loin comment les zones de protection s'adaptent à tel ou tel cas.

3.4. Evaluation économique

L'analyse économique d'un projet d'exploitation d'eau souterraine doit prendre en compte les coûts suivants :

Investissements (amortis en principe sur 50 ans).

- coûts des prospections (début à fonds perdu) : $n \times 100$ kFr
- achat de la zone de captage (quelques dizaines de m^2 à quelques hectares selon les zones de protection) ou d'un droit d'eau : $n \times 10$ kFr
- construction des ouvrages de captage : $n \times 100$ kFr
- conduites au réseau de distribution : $n \times 100$ kFr
- frais de procédure : $n \times 10$ kFr

Frais d'exploitation

- entretien (notamment électro-mécanique)
- coûts énergétiques
- coûts de traitement (éventuel)
- personnel de surveillance
- frais d'analyse de contrôle de qualité
- éventuels dédommagements dans les zones de protection

Ces charges financières doivent être estimées dans chaque cas pour permettre des comparaisons de variantes. Le prix du m^3 d'eau en est déduit. En principe, le compte de l'eau d'une collectivité publique ne doit faire ni bénéfice ni déficit.

3.5. Comparaison multifactorielle de variantes et critères de choix

Si plusieurs solutions sont concevables pour couvrir les besoins en eau d'une région, on utilisera une évaluation multifactorielle de chaque variante. Les principaux facteurs en prendre en compte sont les suivants :

- scientifiques

- quantité
- qualité
- pérennité
- vulnérabilité
- impact sur l'environnement

- économiques

- durée d'amortissement
- coûts d'investissement
- coûts d'exploitation

- droit

- propriété de la ressource
- réserves des tiers

- politique

- acceptabilité par la population
- sécurité publique
- zones de protection

La pondération de ces différents facteurs n'obéit pas à des règles fixes. Elle varie de cas en cas. Par exemple, une région où un grand nombre de possibilités d'exploitation existent est traitée bien différemment que des régions plus pauvres. Les facteurs humains restent difficiles à pondérer judicieusement.

4. Mise en valeur des eaux souterraines

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'approche méthodologique conduisant à la construction d'un système d'exploitation des eaux souterraines.

tes plus synthétiques existent partiellement au 1/100'000 et une feuille générale au 1/500'000 (géologique et tectonique).

4.1. Prospection des ressources

La phase de reconnaissance du sous-sol visant à déterminer s'il est apte à couvrir les besoins en eau d'une région est une opération de longue haleine, faisant intervenir des méthodes scientifiques variées. Les premières étapes privilégient les prospections peu coûteuses, afin de n'investir des montants importants que lorsque les présomptions de succès sont suffisantes.

4.1.1. Cartographie hydrogéologique de surface

Les cartes hydrogéologiques sont établies sur la base de la carte géologique, levée sur le terrain par le géologue.

Le levé géologique de surface aboutit à la **carte géologique** qui porte sur un fond topographique (figure 4.1 page 44) :

- les différentes formations géologiques affleurant à la surface du sol ou se trouvant sous la couche pédologique. Les noms des formations sont rattachées à l'étage stratigraphique correspondant à l'époque de leur création (par exemple Pierre jaune de Neuchâtel de l'étage Hauterivien supérieur)
- les accidents tectoniques (failles, décrochements etc)
- des symboles ponctuels comme le pendage des couches, les blocs erratiques, les sondages, les dolines et les sources.

La carte géologique est levée systématiquement en Suisse au 1/25'000 par les collaborateurs du Service hydrologique et géologique national (SHGN) à Ittigen près de Berne. C'est l'Atlas géologique. De nombreuses lacunes existent encore dans la couverture du territoire. Des car-

Présentation de différentes cartes géologiques.

Les **cartes hydrogéologiques** sont des traductions de la carte géologique de base. On remplace généralement le descriptif stratigraphique par les propriétés hydrogéologiques des formations. On complète ces surfaces par de nombreuses données concernant les points d'eau, leurs caractéristiques quantitatives et qualitatives, les zones de recharge, les liaisons entre les eaux souterraines et les rivières etc. Cette traduction nécessite sur le terrain un complément au levé géologique et une synthèse de données hydrogéologiques (banques de données sur les points d'eau, l'interprétation d'essais de pompage etc).

La carte hydrogéologique est moins strictement codifiée que la carte géologique. Il en existe une grande variété selon ce qu'on veut faire ressortir par la carte. Il peut y avoir plusieurs cartes pour une même région, cartes qui se complètent. Les échelles sont aussi très variables, avec des cartes très détaillées pour certaines zones (échelle au 1/5000 ou 1/10'000). Les principaux systèmes de représentation sont :

- cartes de perméabilités
- cartes de transmissivités d'un aquifère (figure 4.2 page 45)
- cartes des ressources en eau souterraine
- cartes de la qualité des eaux souterraines
- cartes de vulnérabilité
- cartes de zones de protection

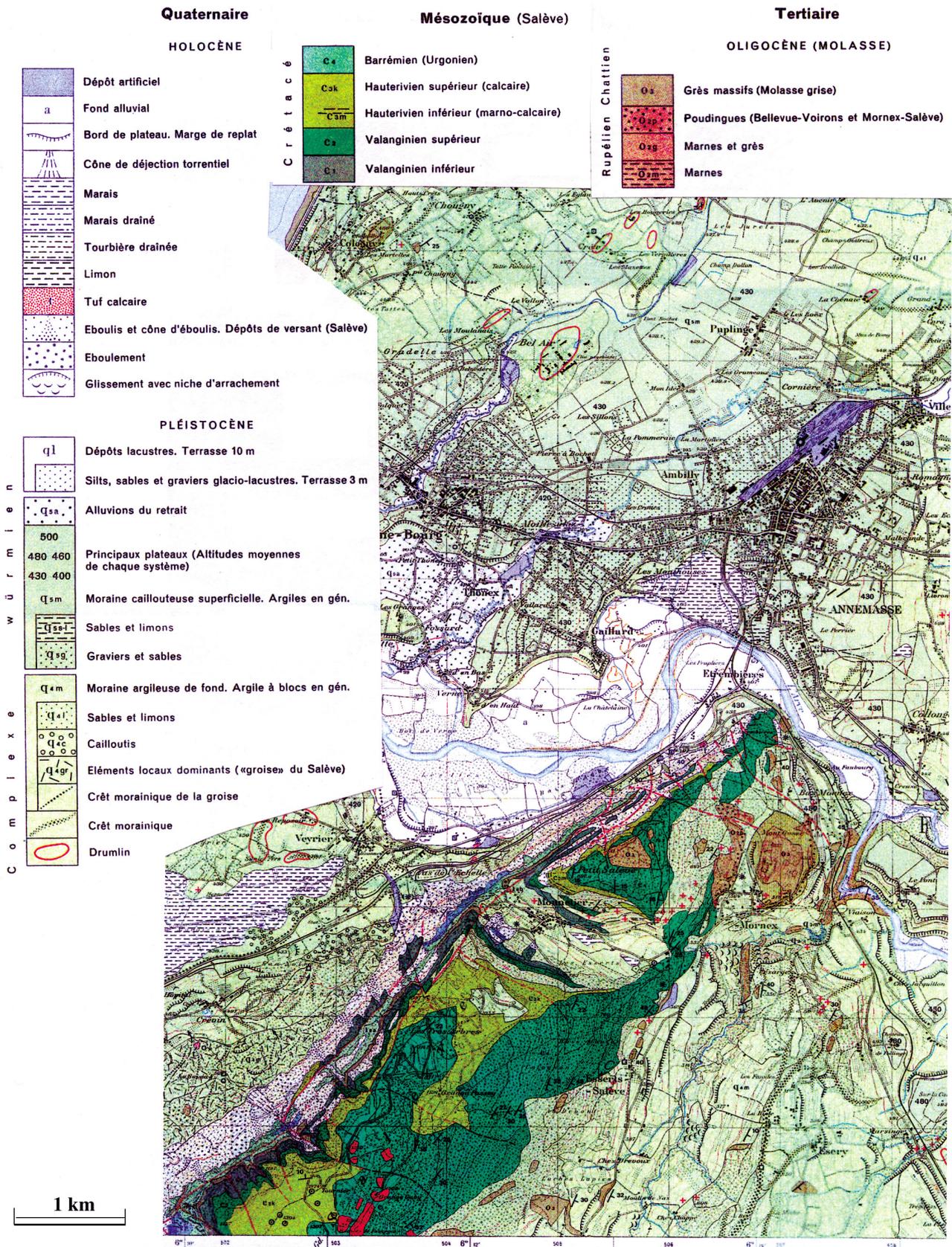


Figure 4.1: Carte géologique au 1/25'000 de l'Atlas de la Suisse. Exemple tiré de la feuille Genève réduite ici au 1:50'000.

Présentation de cartes hydrogéologiques

La carte hydrogéologique est un bon moyen de synthétiser et d'illustrer les conditions hydrogéologiques dans le

territoire. Le travail de prospection dans la pratique fait en revanche plutôt appel à la carte géologique qui reste le fondement structural du sous-sol.

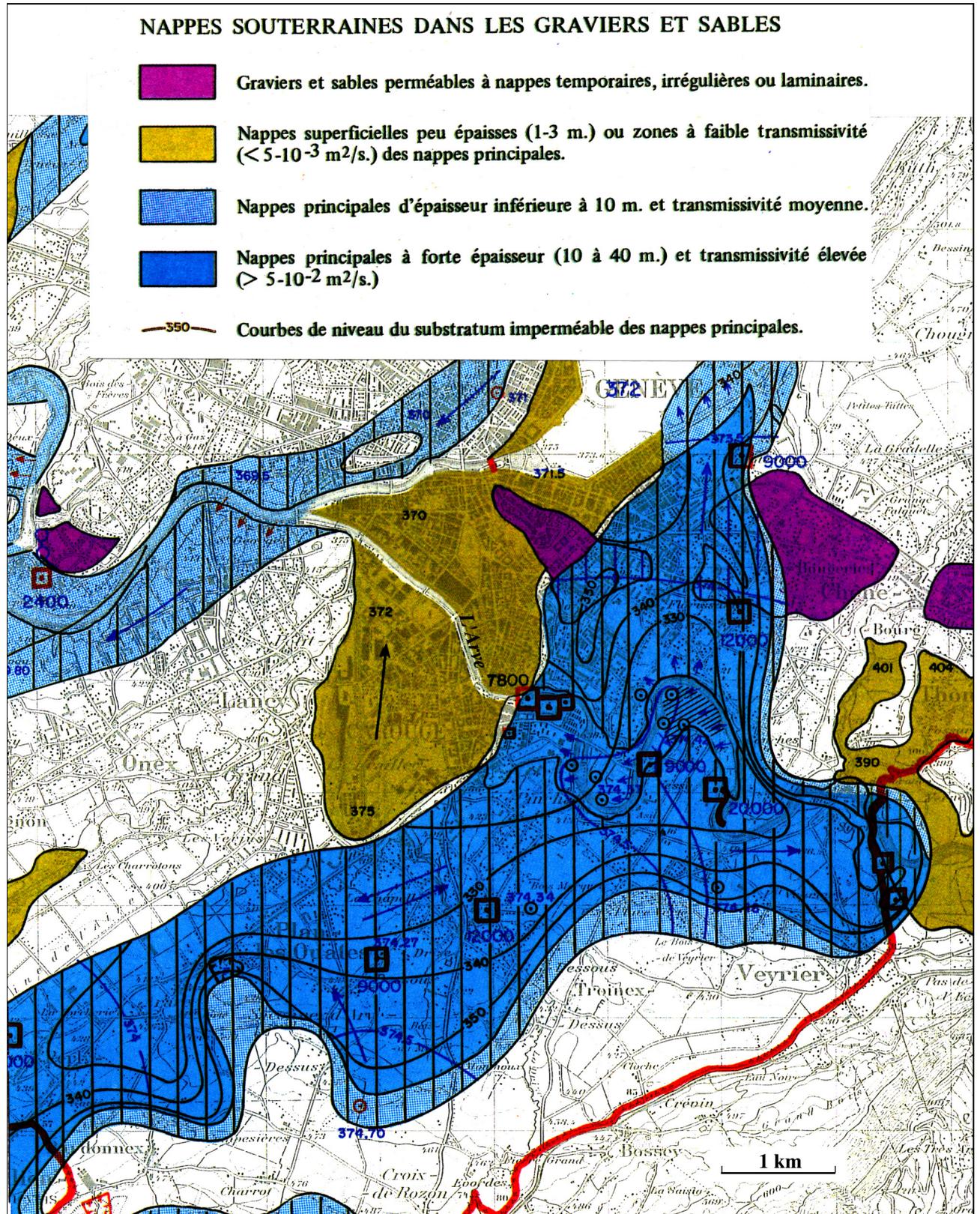


Figure 4.2: Carte hydrogéologique de transmissivités. La partie finement hachurée au centre de la carte indique la zone de réalimentation artificielle de l'usine de Vessy (voir figure 3.7). Exemple tiré de la carte du Canton de Genève au 1/50'000. Les carrés correspondent aux puits.

La cartographie de surface permet d'identifier des cibles pour la recherche de ressources en eau, comme le fait le géologue du pétrole. Ces zones à présomptions favorables sont celles dans lesquelles on identifie la présence d'un aquifère qui, grâce à une position structurale particulière, permet d'espérer un gisement de qualité. Ceci fait donc appel à l'étude lithologique des terrains quaternaires et des roches couplée aux recherches tectoniques et paléogéographiques du territoire prospecté.

Par exemple, on repérera la présence d'une ancienne vallée anté-glaciaire remplie de gravier perméable. On cherchera les tronçons de cette vallée où l'eau souterraine peut le mieux s'y accumuler en raison de sa forme, des zones de recharge et des points de vidange. Autre exemple : on recherchera un synclinal plissant des roches karstiques. Il devra être suffisamment enfoncé dans le sous-sol pour éviter qu'il ne se vide par les bords. On prospectera pour l'implantation d'un forage une zone tectonisée pour que les fissures qui en résultent augmentent la perméabilité de la roche.

L'analyse de la carte de surface et le modèle structural qui en découle permettent de guider la suite de la prospection avec des méthodes plus sophistiquées mais aussi plus coûteuses.

4.1.2. Prospection géophysique

La géophysique appliquée offre une panoplie de méthodes qui servent à déterminer de manière indirecte les propriétés du sous-sol. Elles s'appliquent à tout une série de domaines de la géologie des ressources comme les gisements miniers, le pétrole, les géomatériaux. Certaines d'entre elles s'appliquent avec profit au domaine des eaux souterraines, soit pour les prospecter, soit pour les étudier et mieux les gérer ou les protéger.

Les deux principales méthodes utilisées en hydrogéologie sont la géoélectrique et la sismique (figure 4.3 page 47). Ce sont celles qui sont traitées dans cours, en se limitant à leurs applications en surface. Nous n'aborderons pas les mesures électriques et sismiques en forage (diagraphies géophysiques).

Fondamentalement, les méthodes géophysiques précisent et complètent les structures détectées par le levé géologique. Elles participent donc efficacement à la définition des cibles de prospection et servent ainsi à optimiser les reconnaissances par méthodes directes : les campagnes de sondages mécaniques. Globalement, elles augmentent la probabilité de succès d'une prospection de ressources en eau et diminuent les coûts de reconnaissance.

4.1.2.1. Méthodes sismiques

La sismique provoquée consiste à étudier la réponse dynamique du sous-sol à une sollicitation mécanique instantanée provoquée. C'est en quelque sorte un

tremblement de terre artificiel de faible intensité.

Dans la "petite sismique", au contraire de la sismique profonde de l'industrie du pétrole, la sollicitation est un ébranlement provoqué par une masse frappant le sol ou une petite charge explosive placée dans un sondage à la tarière à faible profondeur.

La déformation mécanique est transmise par le sol vers des écouteurs de vibration qu'on appelle géophones. Ce sont des sismomètres mobiles de terrain (voir schéma d'un sismographe dans le cours de géologie I). Ceux-ci sont placés en lignes et sont reliés à un moniteur qui permet d'enregistrer le déplacement du sol en fonction du temps (figure 4.4 page 48). Dans ces méthodes, on n'enregistre en général que les déplacements verticaux.

La réponse du sous-sol va dépendre :

- de facteurs intrinsèques à la matière
- de l'arrangement géologique de cette matière, donc de la structure du sous-sol.

En petite sismique, on va s'intéresser uniquement aux ondes les plus rapides, les ondes primaires (P), qui sont des ondes de compression.

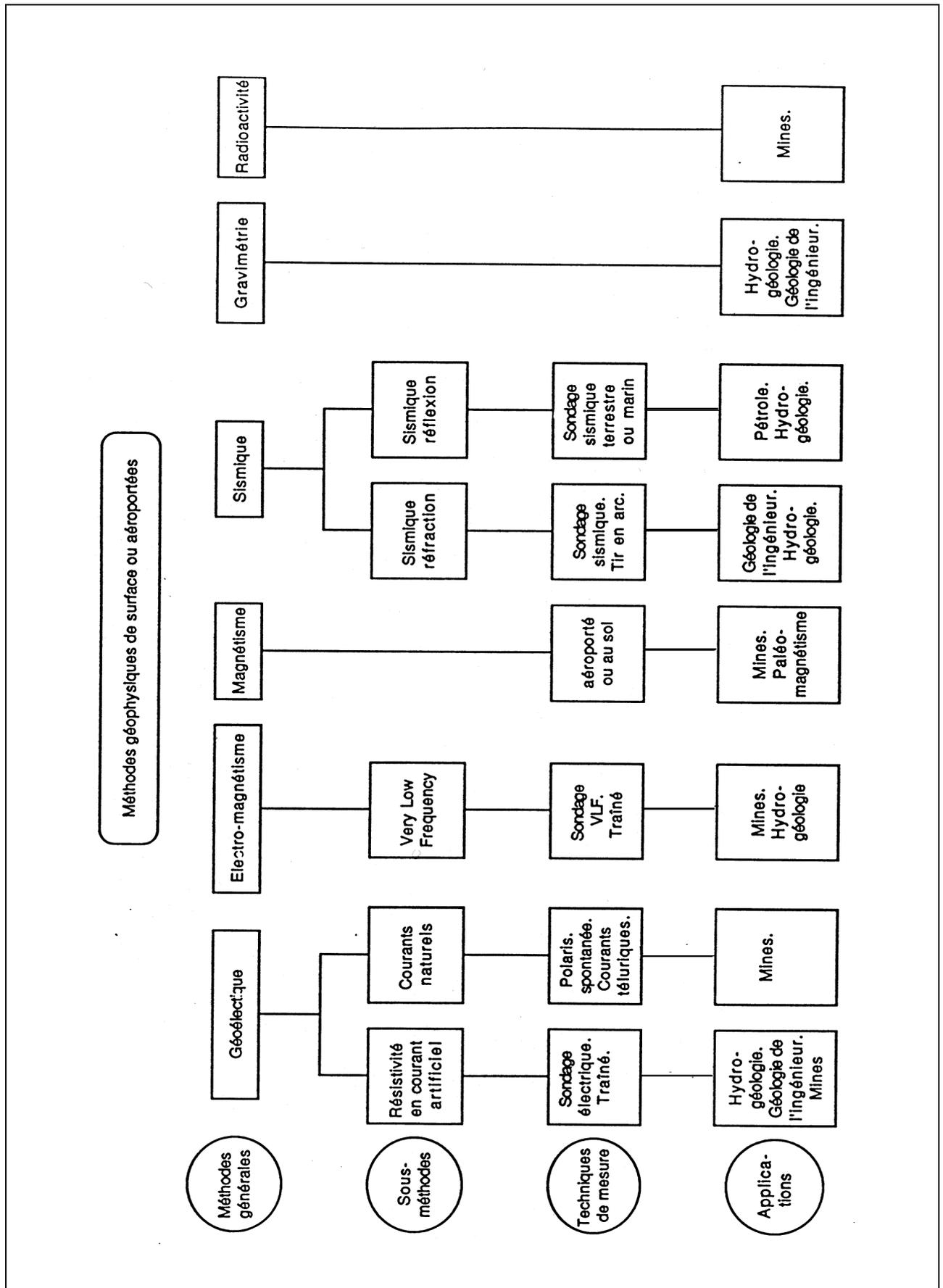


Figure 4.3: Méthodes géophysiques en général et domaines d'application.

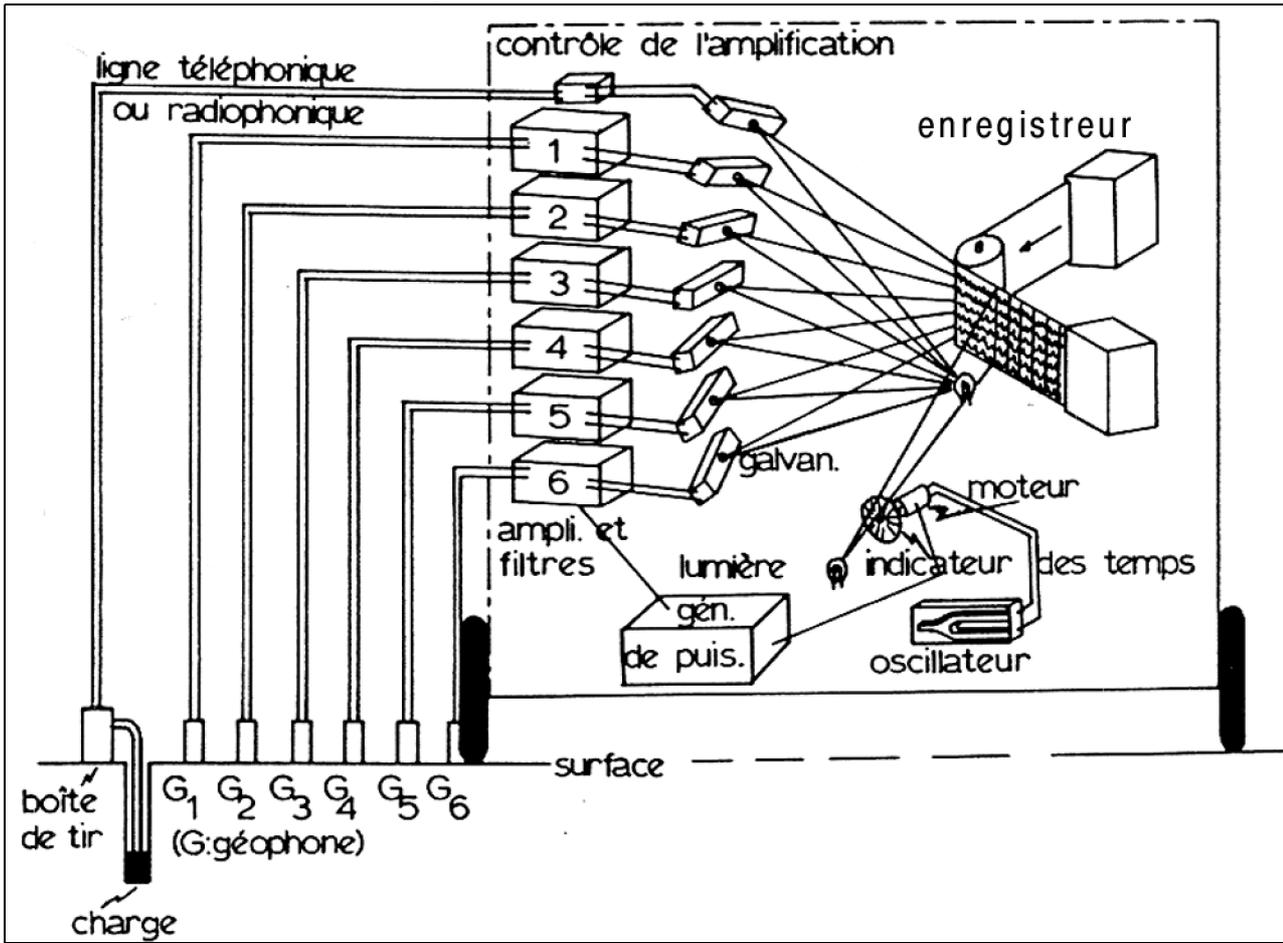


Figure 4.4: Schéma de fonctionnement d'un sismographe multipistes pour la prospection sismique.

4.1.2.1.1. Paramètres intrinsèques du matériel

moshenko, elle peut être calculée à partir des paramètres d'élasticité de la roche (figure 4.5 page 48).

La caractéristique intrinsèque du matériel sera la vitesse de propagation des ondes P dans ce milieu. Selon Ti-

On obtient ainsi les fonctions graphiques de la figure 4.6 page 49.

avec

$E = \text{module d'Young} = \frac{\Delta\sigma_z}{\Delta\varepsilon_z} \quad [N/m^2]$

$\nu = \text{coefficient de Poisson} = \frac{\Delta x/x}{\Delta z/z} = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} \quad [-]$

$\rho = \text{masse volumique} \quad [kg/m^3]$

Figure 4.5: Rappel sur les définitions des paramètres d'élasticité par un essai de compression simple sur une carotte de roche élastique.

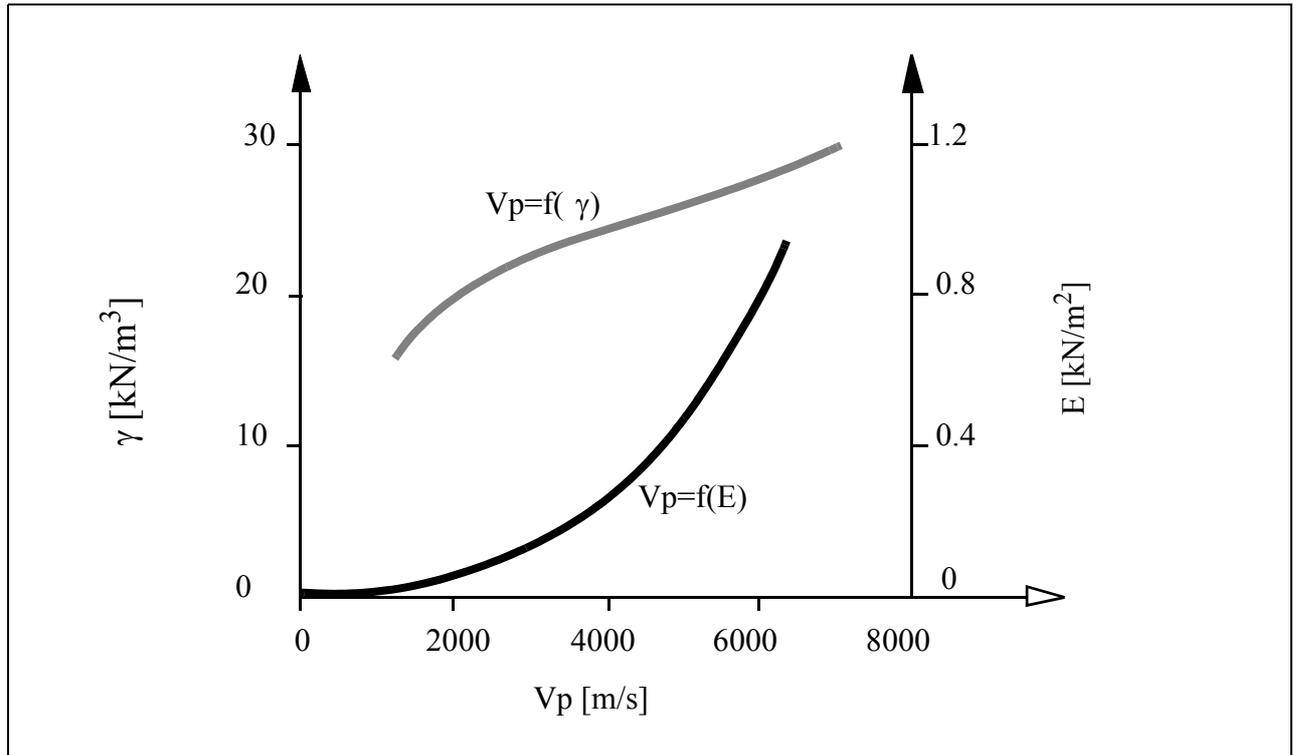


Figure 4.6: Relation $V_p = f(E, \gamma)$, selon Farmer 1968, tiré de Attewell et al. ($\gamma = \rho \cdot g$).

Les ordres de grandeur de vitesse pour les roches courantes et les terrains meubles sont donnés à la figure 4.7 page 49.

Terrains meubles	Non saturés (m/s)	Saturés (m/s)
Moraine de fond	1800-2500	idem
Gravier sableux	700-1500	1800-2500
Sable moyen	500-1200	1500-2000
Limon argileux	500-1200	700-1600
Tourbe	300-500	500-1000

Roches	(m/s)
Roches cristallines	4000-6000
Calcaires	2000-4000
Marnes mésozoïques	2000-3000
Molasse conglomératique	2500-3500
Molasse gréseuse	2000-3000
Molasse marneuse	1800-2500

Figure 4.7: Vitesse sismique des ondes P de quelques terrains courants en Suisse.

4.1.2.1.2. Effets de la structure du sous-sol

Nous avons vu au cours de géologie I que dans un milieu homogène et isotrope, les ondes P vont cheminer en ligne droite (rai d'onde) en radiant depuis la source. Ces rais sont perpendiculaires aux surfaces d'onde qui sont des sphères centrées sur la source. Une surface d'onde ou front d'onde est le lieu géométrique des points du milieu atteints en même temps par la déformation. Lorsque les rais d'onde rencontrent une discontinuité entre deux milieux, ils subissent des transformations qui sont semblables à celles des rayons lumineux, bien que de nature très différente. On retrouve les deux phénomènes fondamentaux de l'optique que sont la réflexion et la réfraction.

On peut aussi appliquer le principe de Huygens qui dit que tout point d'un front d'onde se comporte comme une nouvelle source et génère autour de lui une ondelette circulaire. L'enveloppe des de ces ondelettes est un nouveau front d'onde.

Il a été établi (cours de géologie I) que les équations qui règlent la réflexion (angle incident = angle réfléchi) et la réfraction des rayons d'onde sismique sont similaires à celles de l'optique en remplaçant les rapports d'indice de réfraction par les vitesses sismiques. La loi de Snell-Descartes dit ainsi :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

4.1.2.1.3. Sismique réfraction

Cette méthode est la plus courante car elle n'implique pas en principe une interprétation compliquée. On ne traite sur l'enregistrement des géophones que l'arrivée de l'onde la plus rapide.

Elle repose sur le fait qu'un terrain rapide en profondeur accélère la propagation de l'onde et la réémet vers la surface de telle sorte que, malgré un trajet plus long que celui des ondes directes, elle arrive avant ces dernières. La démonstration dans le cas de terrains horizontaux est faite à la figure 4.8 page 50.

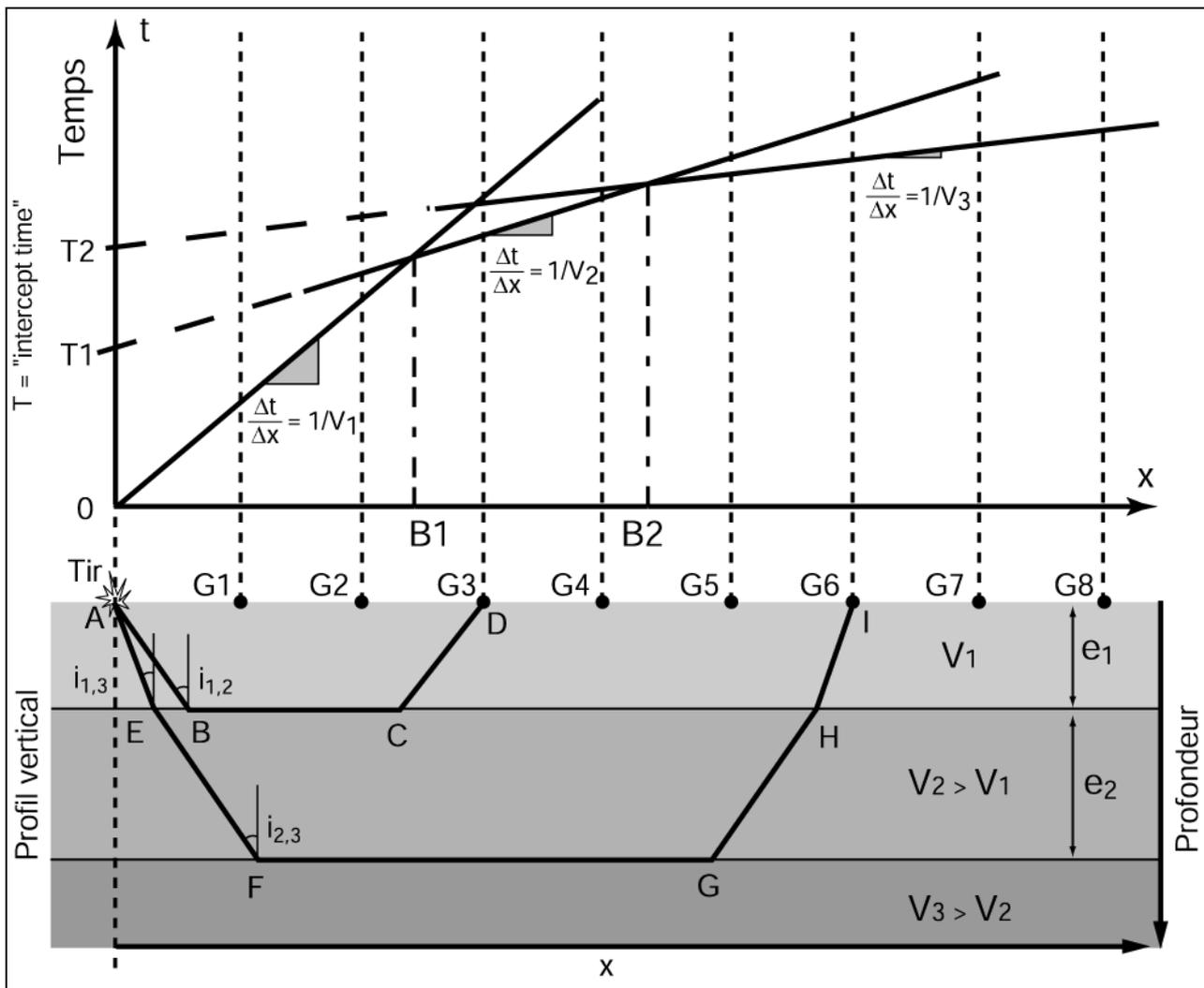


Figure 4.8: Propagation des ondes directes et réfractées dans un terrain à trois couches horizontales. Les vitesses sont croissantes en profondeur.

On dépouille les tirs sismiques en reportant sur un graphique le temps d'arrivée des ondes à chaque géophone, ceux-ci étant placés sur les abscisses selon leur distance au point de tir. La fonction temps d'arrivée - distance s'appelle la dromochronique. En sismique réflexion, on ne reporte sur la dromochronique que la première arrivée.

Dans le cas d'une sollicitation en surface et dans l'hypothèse de trois milieux stratifiés horizontalement à vitesse croissante en profondeur (figure 4.8 page 50), la fonction commence par un premier tronçon de droite représentant l'onde directe dans le premier milieu. Sa pente est inversement proportionnelle à la vitesse des ondes dans le premier milieu. L'onde directe arrive la première car son trajet est beaucoup plus court que les ondes réfractées des milieux profonds. A une certaine distance, les ondes directes sont dépassées par les ondes réfractées du deuxième milieu. Ce phénomène se marquera sur la dromochronique par une deuxième portion de droite, ne passant cette fois plus par l'origine et de pente plus faible égale à l'inverse de la vitesse du deuxième milieu. L'intersection des deux droites détermine un point de brisure qui permet le calcul de la profondeur du contact entre les deux couches. A leur tour, les ondes réfractées du deuxième milieu seront dépassées par les ondes réfractées du troisième milieu, déterminant un troisième segment de droite.

Par les pentes des segments de la dromochronique, on calcule les vitesses des milieux. Par l'ordonnée à l'origine des segments réfractés ("intercept time") ou la position des points de brisure, on calcule la profondeur des contacts (figure 4.9 page 52).

Les choses sont un peu plus compliquées dans le cas de contacts plans non horizontaux mais se calculent aisément (voir traité de géophysique). Il en va de même pour tenir compte d'une profondeur de tir non nulle.

Les configurations à vitesses décroissantes en profondeur ou à contacts non plans ou discontinus sont beaucoup plus difficiles à interpréter. Or, elles ne sont pas rares dans la nature. Elles peuvent être sources d'erreurs d'interprétation.

Le principe de la réflexion a une conséquence pratique sur les campagnes de mesure. L'observation des ondes réfractées nécessite de mesurer les ébranlements sur de longues distances, celles-ci étant d'autant plus longues que le contraste des vitesses entre les milieux est faible. Comme les lignes standards ne comportent que 12 ou 24 géophones, il est nécessaire de réaliser de nombreux tirs en déplaçant la ligne pour acquérir l'entier de la dromochronique sur une distance suffisante. Cette difficulté pratique n'est pas seule. Il est probable en effet que sur la longue distance d'investigation les conditions géologiques ne soient pas constantes.

Exercice 4.1 : Sismique (voir annexe II)

Equation de la dromochronique en réfraction

Premier milieu:

Branche onde directe (V_1): $t = \frac{x}{V_1}$

Branche réfractée contact 1 et 2

$$t = \frac{AB}{V_1} + \frac{BC}{V_2} + \frac{CD}{V_1} = 2 \cdot \frac{e_1}{V_1 \cdot \cos i_{1,2}} + \frac{x - 2 \operatorname{tgi}_{1,2} \cdot e_1}{V_2}$$

comme $\operatorname{tgi}_{1,2} = \frac{\sin i_{1,2}}{\cos i_{1,2}} \Rightarrow t = \frac{2 \cdot e_1}{V_1 \cdot \cos i_{1,2}} - \frac{2 e_1 \sin i_{1,2}}{V_2 \cdot \cos i_{1,2}} + \frac{x}{V_2}$

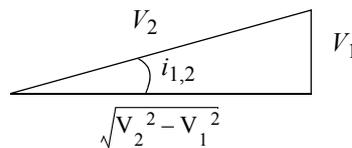
avec $\sin i_{1,2} = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow V_2 = \frac{V_1}{\sin i_{1,2}} \Rightarrow \frac{2 e_1 \cdot \sin i_{1,2}}{V_2 \cdot \cos i_{1,2}} = \frac{2 e_1 (\sin i_{1,2})^2}{\cos i_{1,2} \cdot V_1}$

$$t = \frac{2 \cdot e_1}{V_1 \cdot \cos i_{1,2}} [1 - (\sin i_{1,2})^2] + \frac{x}{V_2} = \frac{2 \cdot e_1}{V_1 \cdot \cos i_{1,2}} \cdot (\cos i_{1,2})^2 + \frac{x}{V_2}$$

car $(\sin i_{1,2})^2 + (\cos i_{1,2})^2 = 1$

$$t = \frac{2 \cdot e_1 \cos i_{1,2}}{V_1} + \frac{x}{V_2}$$

En remplaçant $\cos i_{1,2}$ par les vitesses:



$$\cos i_{1,2} = \frac{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_2} \Rightarrow t = \frac{x}{V_2} + \frac{2e_1 \sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 \cdot V_2}$$

Intercept time T_1 : valeur de t pour $x = 0$

$$T_1 = \frac{2 \cdot e_1 \sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 \cdot V_2}$$

Avec une lecture de T_1 sur l'axe et le calcul de V_1 et V_2 par la pente des segments de la dromochronique, on peut calculer

$$e_1 = \frac{T_1}{2} \cdot \frac{V_1 \cdot V_2}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}$$

Deuxième milieu:

Même type de calcul avec $\sin i_{1,3} = \frac{V_1}{V_3}$ $\sin i_{2,3} = \frac{V_2}{V_3}$...

L'épaisseur du second milieu s'exprime par

$$e_2 = \frac{1}{2} \left(T_2 - 2e_1 \frac{\sqrt{V_3^2 - V_1^2}}{V_1 \cdot V_3} \right) \frac{(V_2 \cdot V_3)}{\sqrt{V_3^2 - V_2^2}}$$

Figure 4.9: Calcul en réfraction de la profondeur de 2 contacts plans horizontaux, selon la figure 4.8 page 50.

4.1.2.1.4. Sismique réflexion

Un contact entre deux couches réfléchit une partie de l'énergie sismique ("miroir sismique"). Sur une dromochronique, l'arrivée des ondes réfléchies se marque par une hyperbole dans le cas d'un plan horizontal (figure 4.10 page 53). La forme de l'hyperbole et son intersection avec l'axe du temps détermine la vitesse du milieu dans lequel a lieu la réflexion et la position du miroir (figure 4.11 page 54).

Comme les ondes réfléchies ont un long parcours avec des faibles vitesses, elles arrivent très tard après les premières arrivées qu'on étudie en sismique réfraction. Leur étude nécessite des enregistrements plus longs. Mais les géophones enregistreront aussi toutes sortes d'ondes "parasites" plus lente que la première arrivée : ondes directes, réfractées, ondes S, ondes de surface etc. La sismique

réflexion nécessitera donc un traitement extrêmement complexe de signaux pour filtrer les diverses réflexions du bruit.

Les mesures de sismique réflexion sont organisées en lignes de tir. Les réflexions identifiées dans les différents tirs sont mises en place dans un profil sismique (figure 4.12 page 55) qui porte en abscisses la distance et sur les ordonnées dirigées vers le bas le temps d'arrivée des ondes (TWT = two ways time). Ce graphique donne une pseudo-image de la géométrie des réflecteurs dans le sous-sol. Elle doit ensuite être convertie en un véritable profil géophysique avec en ordonnée la profondeur des réflecteurs en utilisant le dépouillement fait sur le calcul des vitesses de chaque milieu.

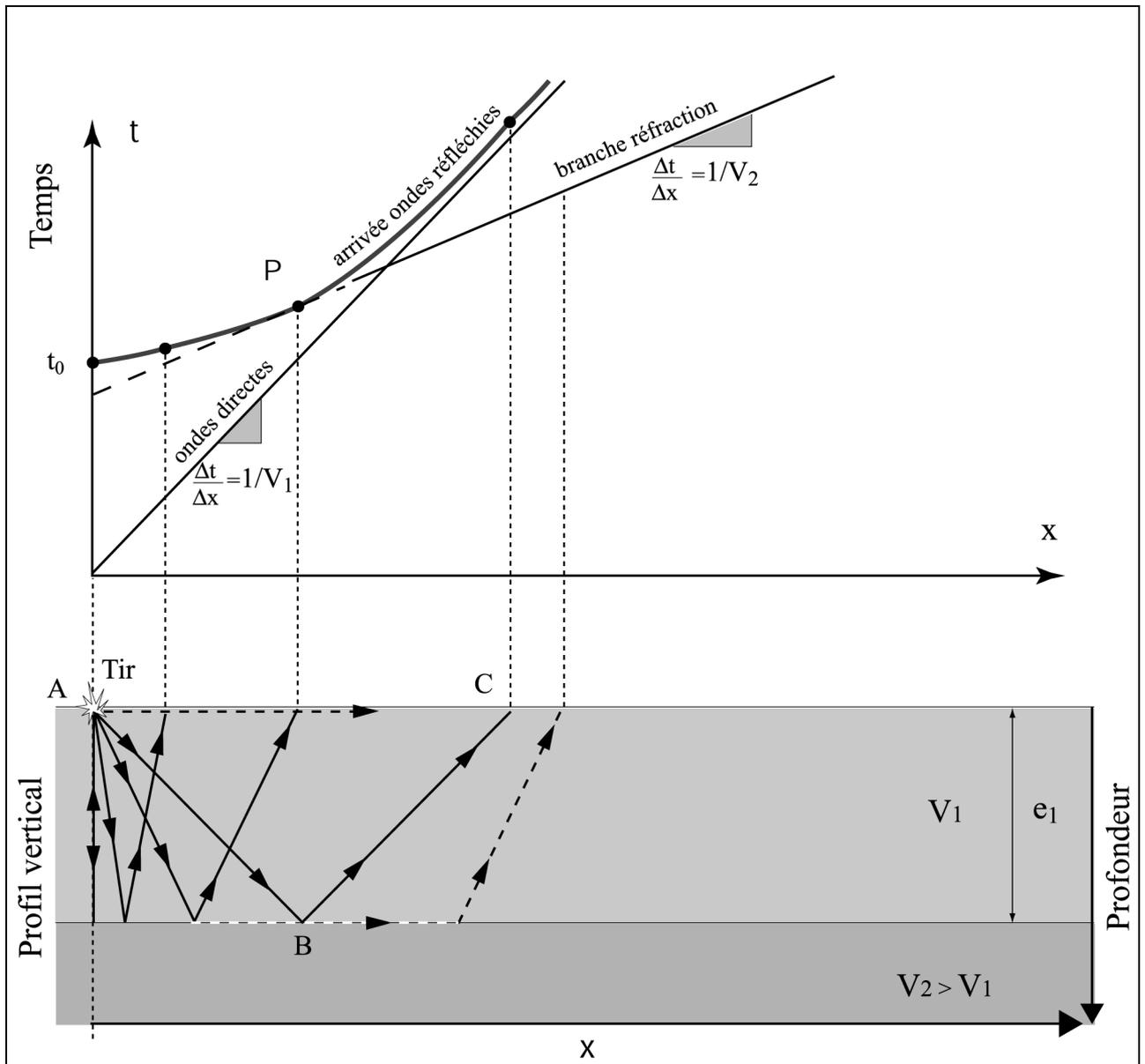


Figure 4.10: Réflexion sur un miroir plan horizontal.

Equation de la dromochronique en réflexion

Réflexion du miroir 1,2

$$t = \frac{AB}{V_1} + \frac{BC}{V_1} = \frac{2 \cdot \sqrt{e_1^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2}}{V_1}$$

$$t^2 = \frac{4 \left[e_1^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2 \right]}{V_1^2} = \frac{4e_1^2 + x^2}{V_1^2}$$

$$\frac{1}{V_1^2} x^2 - t^2 + \frac{4e_1^2}{V_1^2} = 0$$

Equation de la forme $Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F = 0$

avec $A = \frac{1}{V_1^2}$ $C = -1$ $F = \frac{4e_1^2}{V_1^2}$ $B = D = E = 0$

$$B^2 - AC = 0 - \frac{1}{V_1^2} \cdot (-1) = \frac{1}{V_1^2} > 0 \Rightarrow \text{Hyperbole}$$

Elle passe par le point P correspondant à la première onde réfractée. Elle est alors tangente à la droite réfractée du milieu 2. Elle a comme asymptote la droite de l'onde directe. L'ordonnée à l'origine est la valeur de t pour $x = 0$.

$$t_0 = \frac{2e_1}{V_1}$$

En pratique, on mesure V_1 par la pente de l'asymptote. On mesure t_0 sur l'axe des temps. On calcule

$$e_1 = \frac{t_0}{2} \cdot V_1$$

Pour d'autres miroirs plus profonds, on fait de même en tenant compte de la réfraction dans les milieux supérieurs.

Figure 4.11: Calcul en réflexion de la profondeur d'un miroir plan horizontal.

La sismique pétrolière a fait faire des progrès gigantesques à ces méthodes. Il y dix ans encore, elles étaient réservées aux gros systèmes de calcul. Maintenant, grâce au développement des micro-ordinateurs et la commercialisation de logiciels performants, la sismique réflexion est en train de se démocratiser et joue un rôle croissant en hydrogéologie.

La sismique réflexion présente un avantage sérieux par rapport à la réfraction : on ne s'intéresse qu'aux ondes proches du point de tir. Il est donc possible de déterminer une structure profonde par un tir local avec une ligne de faible extension. La discrimination structurale sur un profil traversant une région est donc nettement meilleure.

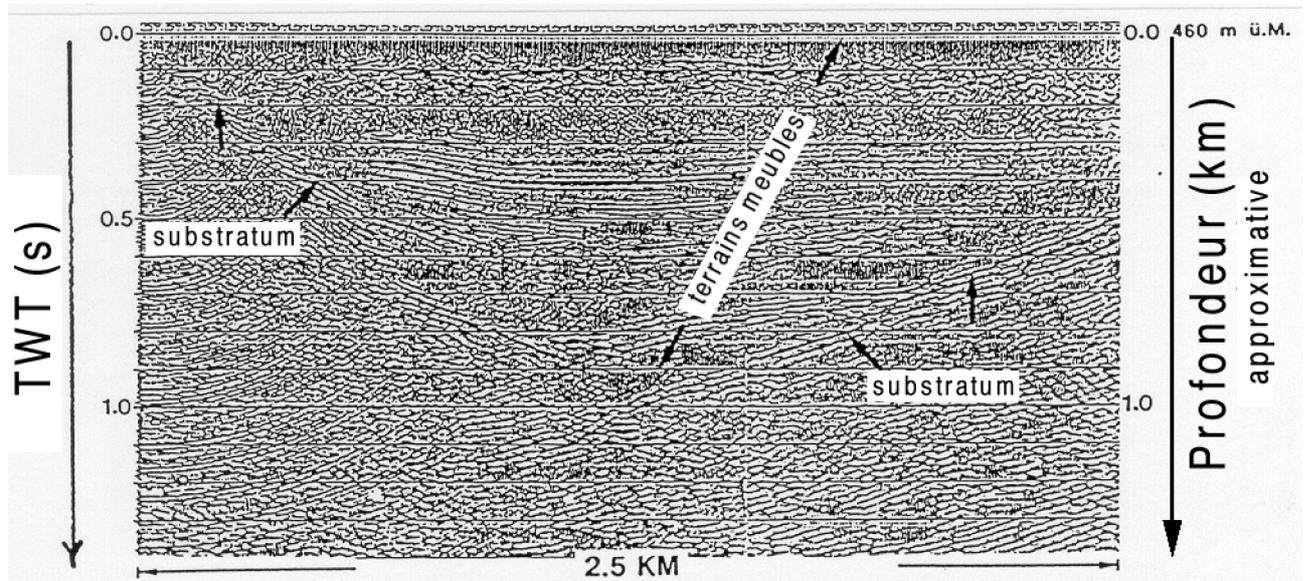


Figure 4.12: Exemple de profil sismique réflexion dans la vallée du Rhône au droit de Martigny, tiré de Frey et al, VSP no 133, 1992. L'ordonnée porte le TWT (two way time) en s à gauche et un calage en profondeur approximatif à droite. La forme de l'auge glaciaire apparaît nettement ainsi que la discordance angulaire entre le substratum rocheux et les dépôts quaternaires.

4.1.2.1.5. Usage de la sismique en hydrogéologie

La sismique réfraction va être limitée à la détermination des contacts proches de la surface, par exemple le contact entre les terrains meubles et le rocher. Ceci est important pour connaître l'épaisseur d'un aquifère dans les terrains meubles sur un fond rocheux étanche, ou à l'inverse, pour connaître l'épaisseur de la couche filtrante sur un aquifère rocheux. La performance est bonne si les milieux sont bien contrastés et pas trop discontinus.

La petite sismique réflexion permet d'investiguer des structures plus profondes, en particulier le remplissage des grandes vallées alluviales qui jouent un grand rôle pour les ressources en eau souterraine. Elle peut aussi mettre en évidence la structure d'un massif rocheux et ses discontinuités si ces dernières ne sont pas trop proches de la verticale.

Dans des configurations pas trop complexes, les résultats sur la profondeur des contacts sont assez précis. On identifiera donc bien la structure géologique du sous-sol. Un handicap fondamental de la sismique en hydrogéologie, en particulier en comparaison avec la géoélectrique, est le manque de contraste de vitesse dans les formations quaternaires entre les terrains aquifères et les aquitards. Par exemple, une moraine peu perméable aura une vitesse de l'ordre 2000 à 2500 m/s, comme un gravier alluvial aquifère. La sismique sera donc avantageusement couplée aux mesures électriques qui apporteront ce complément dans la discrimination du caractère hydrogéologique des horizons rencontrés.

4.1.2.2 Méthodes géoélectriques

Bien que des progrès récents aient été faits dans l'application des méthodes à champs "naturels" (polarisation spontanée, électromagnétisme Very Low Frequency), nous ne retiendrons pour ce cours que les méthodes à courant artificiel qui demeurent les plus couramment employées.

Le principe de cette méthode consiste à faire passer par un courant électrique dans le sol et de mesurer ainsi la résistance R (Ω) par la loi d'Ohm puis, en tenant compte de la géométrie du dispositif de mesure, la résistivité électrique ρ (Ωm) du milieu parcouru par le courant.

4.1.2.2.1. Notion de résistivité électrique des terrains

La résistivité électrique est une caractéristique intrinsèque d'un terrain qui intègre les caractéristiques de ses différentes composantes :

- nature minéralogique de la phase solide (\pm isolant)
- la quantité d'eau d'imbibition et sa composition (\pm conducteur)
- la quantité d'air (isolant)

Ces composantes sont intégrées d'une manière complexe dans la résistivité du terrain qui dépend de l'arrangement spatial des composantes : c'est la structure du milieu géologique.

Les autres caractères du milieu comme la température et la pression ne jouent pas de rôle significatif dans les configurations hydrogéologiques courantes. Ils agissent sur la charge minérale de l'eau (équilibre thermodynamique

eau - roche - gaz). La prospection des eaux fortement thermales et de régions volcaniques actives nécessite de tenir compte de ces facteurs.

On voit de ce qui précède qu'un terrain peut devenir conducteur s'il contient beaucoup d'eau et si cette eau est riche en ions. L'eau d'imbibition est appelée par les géophysiciens "eau de formation". "Formation" est pris ici dans son sens géologique de milieu lithologique. En milieu saturé, la quantité d'eau correspond à la porosité totale. La résistivité de l'eau de formation va être d'autant plus faible qu'elle contiendra beaucoup de ions en solution. Par exemple, une nappe d'eau séléniteuse contiendra de l'eau 2 à 3 fois plus conductrice (env. 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à

20°C) qu'une nappe d'eau bicarbonatée calcique ordinaire.

Archie a défini la notion de facteur de formation F qui est le rapport entre la résistivité de la roche et la résistivité de l'eau. Il intègre toutes les composantes du solide, mais prioritairement la porosité de l'arrangement particulaire.

$$\rho_{roche} = \rho_{eau} \cdot F$$

On peut calculer la résistivité théorique des formations détritiques saturées, à porosité d'interstices et de composition minéralogique usuelle, pour des porosités croissantes et différentes résistivités de l'eau de formation (figure 4.13 page 56).

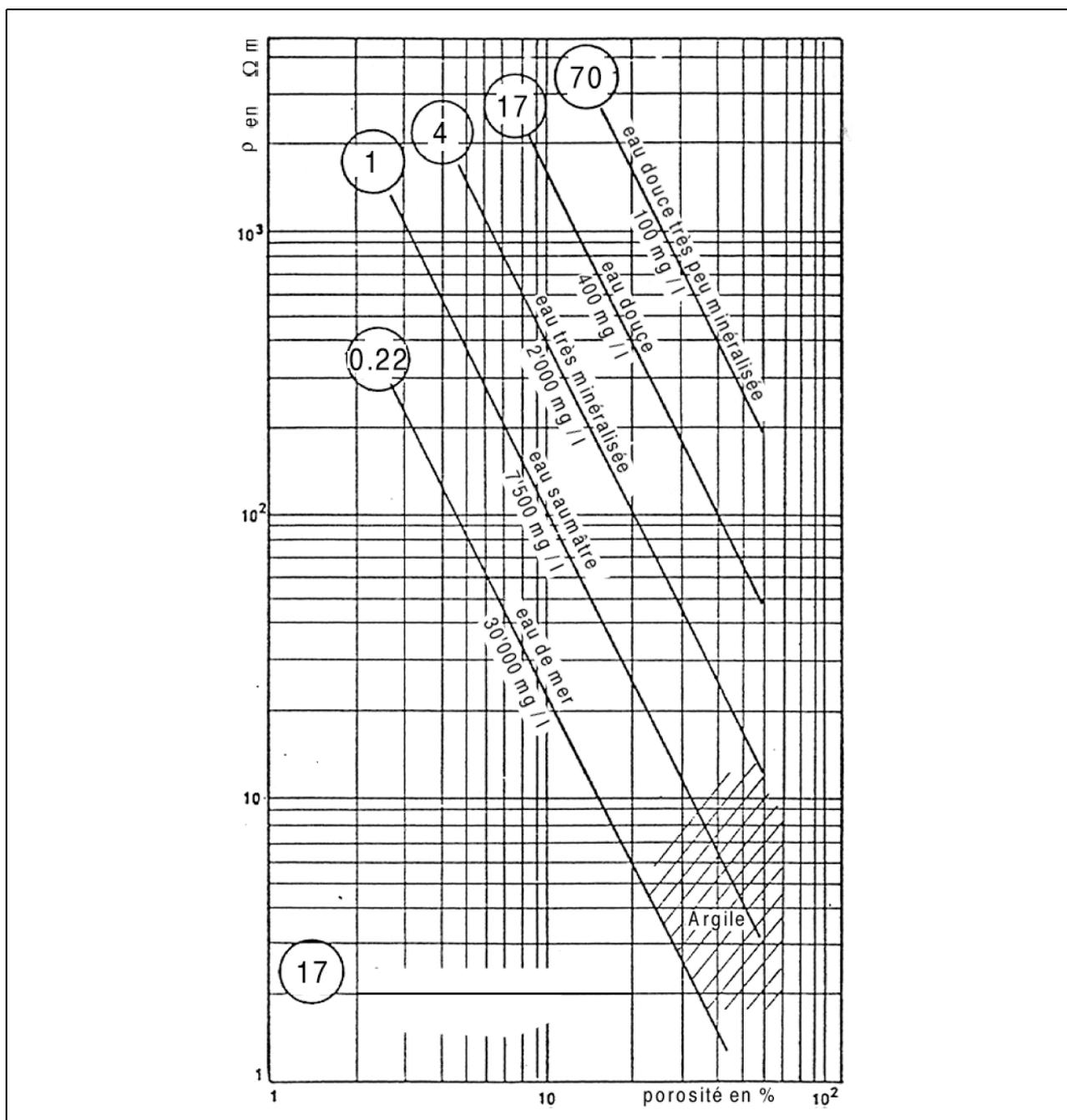


Figure 4.13: Abaque donnant la résistivité de la formation à porosité d'interstices saturée en fonction de la porosité totale pour des eaux différemment minéralisées. Tiré de Bertrand 1967, LCPC.

On voit aussi sur la figure 4.13 page 56 que la relation linéaire bien déterminée devient très floue pour les porosités élevées (>25%), surtout dans le cas d'eaux très minéralisées. Ceci s'explique par le comportement très particulier des argiles et de leurs interactions avec les ions des eaux de formation. On met sous le mot général d'argile des minéraux très divers qui ont des relations eau - roche complètement différents. Par exemple, la kaolinite n'a rien de commun avec les smectites. Cette zone de complexité n'est pas très grave en hydrogéologie de prospection d'eau car on s'intéresse surtout aux terrains aquifères qui sont pauvres en argile. Elle prend en revanche toute son importance en hydrogéologie des faibles perméabilités comme dans le domaine de prospection de sites de stockage géologique de déchets.

Lorsqu'on fait intervenir la saturation partielle du terrain, la relation entre les variables constitutives et la résistivité du terrain devient très complexe. La résistivité croît très rapidement avec la diminution du degré de saturation. La relation doit être établie pour chaque type de terrain d'une région considérée par étalonnage in-situ et par l'expérience du géologue - géophysicien. Par exemple, une alluvion graveleuse sèche sans limon ni argile, atteint des résistivités de plusieurs milliers d' Ωm alors qu'à l'état saturé, la résistivité reste inférieure à 500 Ωm (figure 4.14 page 57).

Terrains meubles	Non saturés	Saturés
Moraine de fond	80-150	50-100
Gravier sableux	500-3000	150-400
Sable moyen	200-1000	100-200
Limon argileux	100-300	30-80
Tourbe	40-100	15-40

Roches	
Roches cristallines	1000-10'000
Calcaires	500-5000
Marnes mésozoïques	50-200
Molasse conglomératique	100-1000
Molasse gréseuse	80-150
Molasse marneuse	20-50

Figure 4.14: Résistivités électriques (Ωm) de quelques terrains courants en Suisse. La résistivité des terrains saturés est donnée pour une eau à minéralisation habituelle (conductivité électrique env. 500 $\mu S/cm$ à 20°C).

4.1.2.2.2. Circulation du courant électrique dans le sous-sol

Bien que de nature différente, le courant électrique circule dans le sous-sol d'une manière analogue aux eaux sou-

terraines en écoulement permanent. En particulier, il existe une analogie entre :

- le potentiel électrique et le potentiel hydraulique
- la chute de potentiel électrique et la perte de charge hydraulique
- la conductivité électrique et la conductivité hydraulique
- le courant électrique et le débit d'eau souterraine

Notamment, deux principes aident à comprendre la répartition des équipotentielles électriques dans le sous-sol :

- pour faire passer un courant donné, la chute de potentiel sera proportionnelle à la résistance
- plus la section d'écoulement est étroite, plus la chute de potentiel est élevée (à débit constant).

A la lumière de ces deux principes, examinons la répartition du potentiel dans le sol autour d'une électrode hémisphérique A de rayon r_A appliquée au sol (figure 4.15 page 58). On obtient en pratique cette configuration en mettant l'électrode de reprise de courant très loin du système (électrode dite "à l'infini").

Les deux lois d'Ohm donnent pour un conducteur à résistance ohmique :

$$V = Ri \quad \text{et} \quad R = \rho \frac{l}{S}$$

avec

V = potentiel

R = résistance ohmique du milieu

i = intensité traversant le tube de courant

r = résistivité électrique

l = longueur de la ligne de courant

S = section du tube de courant

Si on applique ces lois au tube de courant BD-CE, on peut écrire que le potentiel varie de BC à DE de la valeur dV. La 2e loi d'Ohm, on l'exprime

$$-dV = \rho \frac{dr}{dS} di$$

Pour l'hémisphère complet, on a

$$-dV = \rho \frac{dr}{2\pi r_l^2} i$$

On voit ainsi que l'espacement entre deux équipotentielles croît avec le carré de la distance à l'électrode.

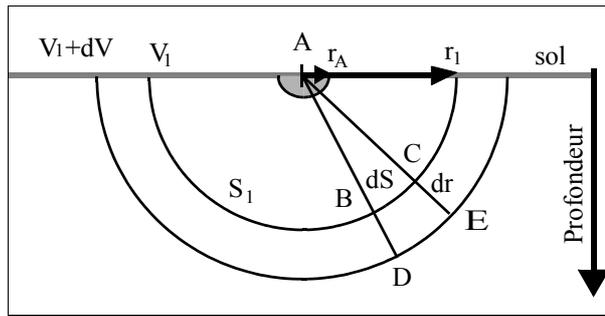


Figure 4.15: Répartition du potentiel autour d'une électrode A de rayon r_A , dans un milieu de résistivité homogène et isotrope ρ . Les équipotentielles sont des hémisphères centrés sur l'électrode. Les lignes de courant leur sont orthogonales.

Pour obtenir la chute de potentiel totale $V_A - V_1$ depuis la bordure de l'électrode à une distance r_1 , on obtient par intégration

$$\int_{V_A}^{V_1} -1dV = \frac{\rho i}{2\pi} \int_{r_A}^{r_1} \frac{1}{r^2} dr$$

soit

$$V_A - V_1 = \frac{\rho i}{2\pi} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_1} \right)$$

D'une manière plus générale, on calcule la fonction de potentiel V autour d'une électrode par l'intégrale non définie

$$\int -1dV = \frac{\rho i}{2\pi} \int \frac{1}{r^2} dr$$

qui vaut

$$V = \frac{\rho i}{2\pi} \frac{1}{r} + V_0$$

On pose comme condition à la limite que

$$V = 0 \text{ pour } r \rightarrow \infty \text{ donc } V_0 = 0$$

donc
$$V = \frac{\rho i}{2\pi r}$$

Si on considère maintenant un circuit avec la deuxième électrode B à une distance finie de la première A, on obtient un dipôle (figure 4.16 page 59). Le courant continu généré entre A et B est injecté en A (électrode positive), circule dans le sol de A à B et ressort en B (électrode négative). A et B sont des électrodes hémisphériques de petite taille appliquées au sol.

Les équipotentielles proches des deux électrodes restent pratiquement hémisphériques et leurs traces dans le plan de la surface du sol sont des cercles. Dès que l'on s'éloigne, en revanche, la symétrie de révolution s'altère en rai-

son de l'effet de la deuxième électrode. A mi-distance entre A et B, l'équipotentielle est un plan perpendiculaire à la ligne des électrodes. C'est un plan de symétrie dans le dessin des lignes équipotentielles entre A et B. Il résulte de cette forme du champ des potentiels que les lignes de courant sont radiales près des électrodes. Elles s'incurvent pour former un faisceau à haute densité de lignes de courant dans la zone comprise entre A et B. Le tracé des équipotentielles et des lignes de courant dans un plan cette fois vertical passant par AB serait tout à fait semblable à la moitié de l'image dans le plan horizontal (voir figure 4.18 page 61).

Examinons maintenant plus en détail la répartition du potentiel dans le circuit d'émission AB et en particulier sur l'axe liant les deux électrodes.

La chute de potentiel dans la partie hors-terre du circuit est négligeable (fils de cuivre). Le circuit dans le terrain entre A et B peut être décomposé en trois segments (figure 4.17 page 59):

- zone 1 : très proche de l'électrode A
- zone 2 : le sous-sol sans les zones 1 et 3
- zone 3 : très proche de l'électrode B

Dans les zones 1 et 3, les équipotentielles sont presque des hémisphères si AB est grand. Nous avons vu plus haut que les filets de courant sont fortement resserrés en raison de la faible taille de la section de passage. C'est le cas notamment du terrain qui est directement en contact avec l'électrode métallique. Tout le courant doit traverser un hémisphère de sol de quelques cm^2 de section. La chute de potentiel étant inversement proportionnelle à la section, on aura à cet endroit un gradient de potentiel extrêmement important. Au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'électrode, la section croît avec le carré du rayon. Le gradient va donc décroître selon la même fonction.

Dans la zone 2, les équipotentielles ne sont plus des hémisphères. Ce sont des cônes sans symétrie de révolution qui sont toujours plus ouverts lorsqu'on se rapproche du centre du dipôle. Au milieu, l'équipotentielle est un plan vertical. La forme de ces surfaces guide la répartition des filets de courant. Ces derniers sont focalisés en prédilection dans un large fuseau reliant A à B. Les sections de passage du courant sont sans commune mesure avec celles des zones 1 et 3. Pour des dispositifs de plusieurs dizaines de mètres comme on utilise en géophysique, la section de passage est de plusieurs dizaines de m^2 . La chute de potentiel due au passage du courant dans le corps principal du terrain est donc infiniment plus faible que près des électrodes.

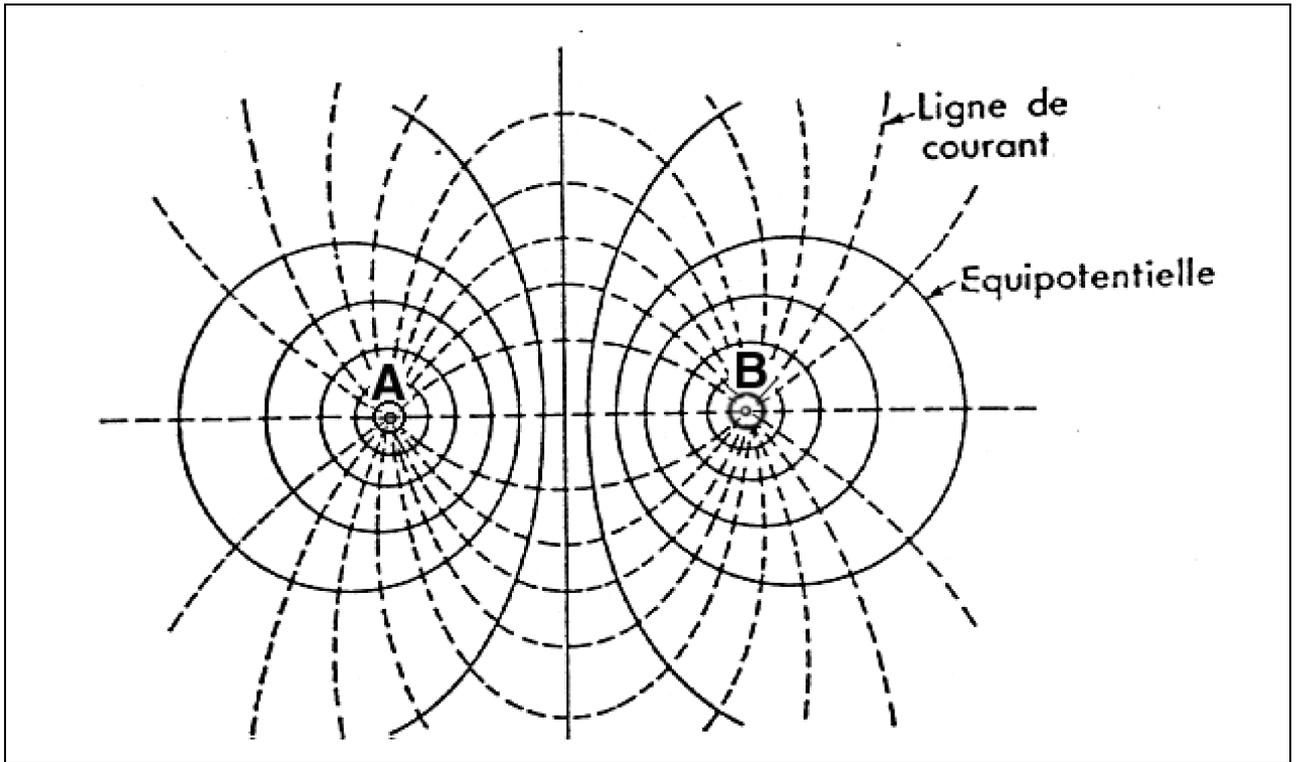


Figure 4.16: Répartition du potentiel d'un dipôle AB à la surface d'un terrain homogène et isotrope, tiré de Astier.

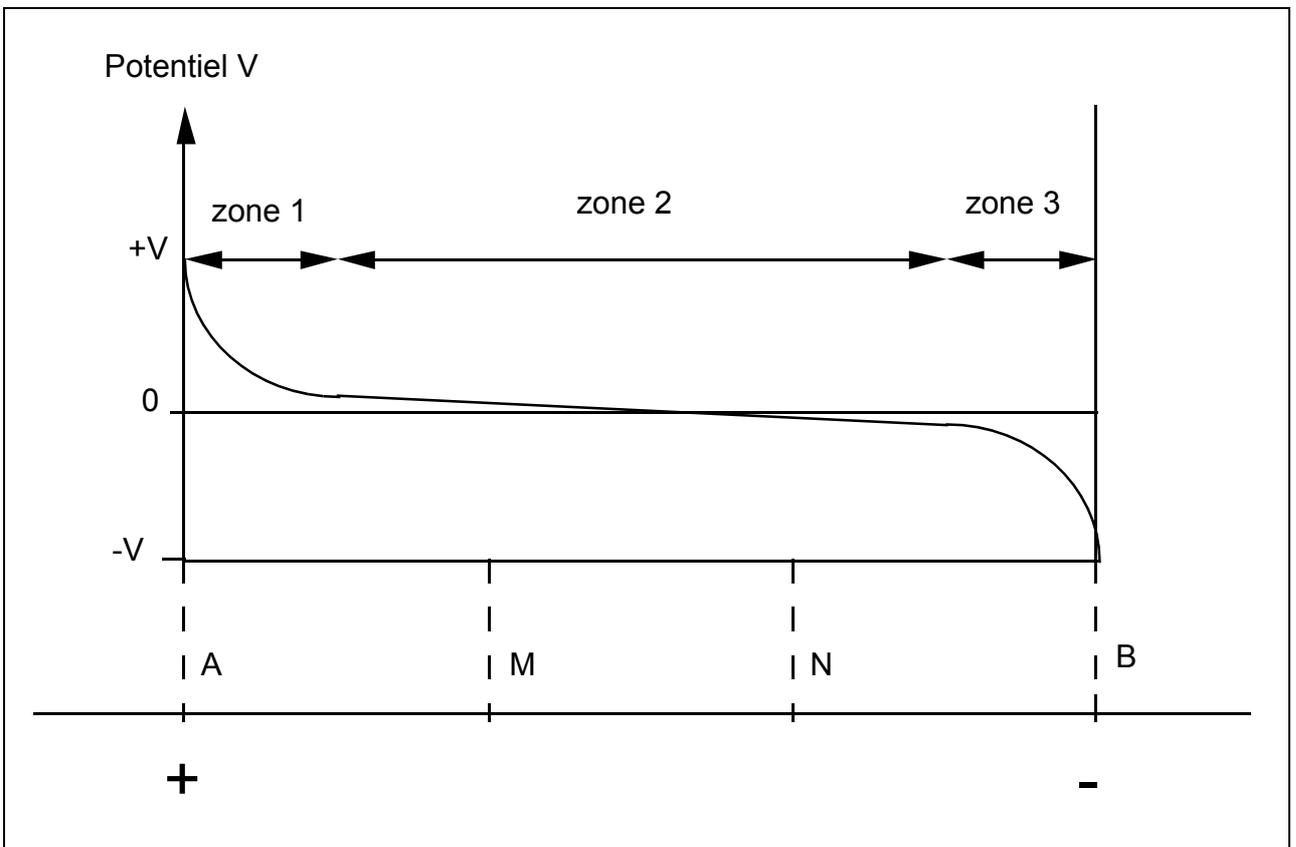


Figure 4.17: Profil de potentiel entre les électrodes d'émission de courant A et B. Position des électrodes de mesure de la différence de potentiel MN.

On obtient donc une répartition du potentiel entre A et B selon la figure 4.17 page 59. Il faut noter qu'il n'y a pas de discontinuité entre les zones 1, 2 et 3. Leur distinction est didactique pour montrer quels sont les phénomènes qui prédominent dans chacune d'entre elles.

Pour utiliser la comparaison avec l'hydraulique, on peut associer cette configuration à celle d'un tuyau d'arrosage qu'on plante dans le sol. La perte de charge majeure aura lieu au contact tuyau - terrain et non pas dans l'écoulement souterrain dans le massif.

La mesure électrique du sous-sol faite par un dipôle AB sur lequel on mesurerait l'intensité et la chute de potentiel serait peu intéressante puisqu'elle n'indiquerait pratiquement que la somme des résistances d'électrodes en A et B. Ce n'est pas ce que veut le géophysicien. Au contraire, on veut s'intéresser à la chute de potentiel dans le corps du terrain pour en déterminer la nature de manière indirecte. Pour ce faire, on associe au dipôle d'émission AB un dipôle de mesure de différence de potentiel MN de plus petite taille qui est centré sur la partie non influencée par les électrodes (figure 4.17 page 59).

On obtient ainsi un quadripôle AMNB qui permet de mesurer la résistance due au corps du terrain. Le dispositif Schlumberger qui est utilisé en Suisse fixe $MN=AB/5$. On y mesure l'intensité i sur le dipôle émission AB et la différence de potentiel γV sur le dipôle MN. On obtient une résistance du sous-sol qui est transformée en résistivité électrique en la multipliant par un facteur géométrique k propre à la configuration du quadripôle.

Dans un milieu dont le champ électrique est généré par 2 électrodes d'émission, le champ en tout point est égal à la somme géométrique des champs dus à chaque électrode. Le potentiel est la somme algébrique des potentiels. Lorsque les deux électrodes sont de signe opposé, les potentiels se retranchent.

Dans tout point de la droite portant le quadripôle AMNB, le potentiel positif dû à l'électrode A doit être diminué du potentiel négatif dû à B. Le potentiel dû à chaque électrode est calculé par la fonction $V=f(1/r)$.

Pour les électrodes M et N, cette relation devient

$$V_M = \frac{\rho i}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right)$$

$$V_N = \frac{\rho i}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)$$

La différence de potentiel mesurée par le dispositif MN est donc

$$V_M - V_N = \Delta V = \frac{\rho i}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

On peut ainsi calculer la résistivité électrique r d'un terrain homogène et isotrope avec un quadripôle AMNB en mesurant l'intensité i sur le circuit d'émission AB et la différence de potentiel sur le circuit de mesure MN, sans être influencé par la résistance aux électrodes d'émission, par l'équation

$$\rho = k \frac{\Delta V}{i} = \frac{\Delta V}{i} \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

k est le facteur géométrique du quadripôle.

Dans le cas d'un seul terrain, on obtient la résistivité vraie du terrain. En réalité, on a plutôt une succession de terrains superposés dont la résistivité propre n'est pas égale. Par exemple, le sol au sens pédologique puis un matériel détritique sec et enfin une couche saturée. La valeur de résistivité mesurée est une fonction complexe des différents terrains qui dépend de la taille du quadripôle et de l'épaisseur des terrains. C'est pourquoi on l'appelle la résistivité apparente (ρ_{ap}).

On appelle profondeur d'investigation la profondeur sur laquelle les terrains influencent significativement la résistivité apparente. Elle est liée en tout premier lieu à la longueur du quadripôle.

Avec un dispositif très court (p ex $AB=1m$), on comprend facilement que le fuseau de filets de courant est essentiellement contenu dans la couche pédologique. La valeur mesurée sera donc très proche de la résistivité vraie du sol. Avec un dispositif long, par exemple $AB=100m$, il est évident que le courant à travers le sol est négligeable par rapport à celui qui transite par le sous-sol. Ce dernier sera influencé par tous les terrains jusqu'à une profondeur de quelques décamètres. En d'autres termes, plus le quadripôle devient long, plus des terrains profonds influencent la résistivité mesurée. D'où le principe du sondage électrique.

4.1.2.2.3. Le sondage électrique

Le principe de cette technique est de pénétrer fictivement en profondeur en allongeant progressivement la longueur de la ligne quadripôle en surface (figure 4.18 page 61). Lorsque le dispositif est de petite taille, la résistivité électrique mesurée est surtout influencée par le ou les terrains très proches de la surface ; en effet, les lignes de courant sont essentiellement contenues dans ces couches superficielles. Avec un dispositif long, au contraire, la plupart des lignes de courant sont contenues dans les terrains profonds et la valeur de résistivité mesurée sera proche de la résistivité de ces formations.

En pratique, on procède au sondage électrique en allongeant la ligne par une succession discrète d'étapes de longueur AB choisie. A chaque étape (notée par la demi-longueur $OA=OB$), on mesure la résistivité électrique ap-

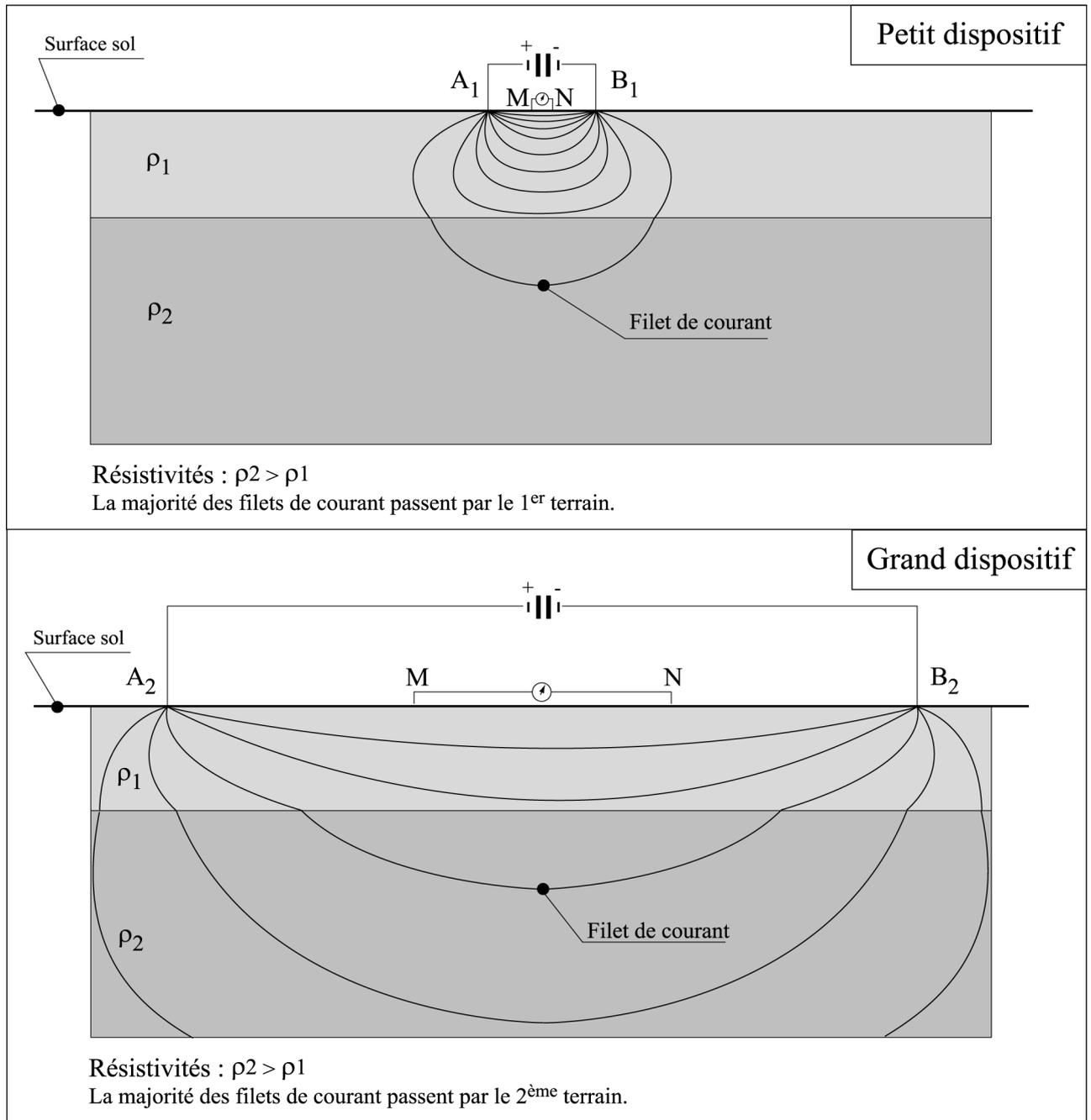


Figure 4.18: Effet de la longueur du dispositif géoélectrique quadripolaire sur la profondeur d'investigation. Cas d'un substratum à deux terrains de résistivité différente.

parente en prenant en compte la géométrie du dispositif propre à cette étape (facteur géométrique k).

On reporte sur un graphique en abscisse le log de la demi-longueur, en ordonnée la résistivité apparente mesurée pour chacune des étapes (figure 4.19 page 62). On obtient ainsi une courbe qui montre de gauche à droite la contribution croissante des terrains profonds au détriment des terrains superficiels.

Même pour des milieux homogènes isotropes stratifiés horizontalement, il n'est pas possible d'interpréter direc-

tement une courbe de sondage électrique mesurée sur le terrain (courbe expérimentale). En effet la théorie physique de la répartition du potentiel dans une telle succession de milieux est excessivement complexe et dépasse l'objectif du présent cours.

Pour l'interprétation, on procède plutôt en sens inverse. Depuis l'invention de cette méthode, les géophysiciens ont calculé des abaques pour des successions de terrain horizontaux allant jusqu'à trois couches. L'interprétation consistait à chercher dans les abaques la courbe théorique qui ressemblait le plus à la courbe expérimentale. Cette

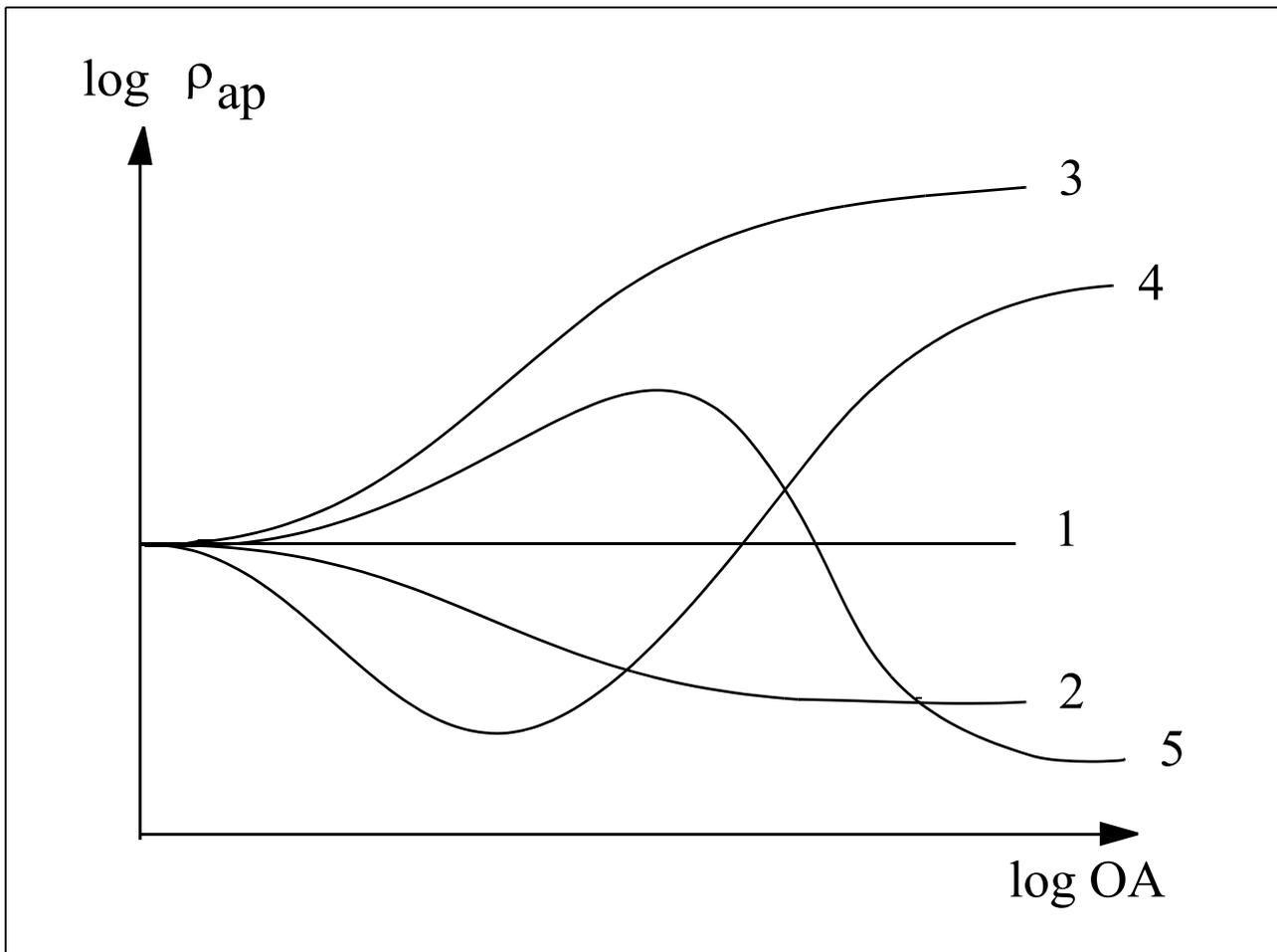


Figure 4.19: Quelques exemples de courbes de sondages électriques pour diverses configurations. 1: un seul terrain. 2 : terrain moyen sur terrain conducteur. 3 : terrain moyen sur terrain résistant. 4 : terrain moyen sur terrain conducteur (partiellement réalisé) puis terrain résistant. 5 : terrain moyen sur terrain résistant (partiellement réalisé) puis terrain conducteur.

technique était fort limitée par le nombre maximum de terrains et une forte imprécision. Plus récemment, des logiciels permettent de calculer une courbe théorique pour des configurations jusqu'à une dizaine de terrains. Ces outils ont fortement facilité l'interprétation. Certains logiciels vont même jusqu'à une recherche automatique de la configuration théorique la mieux ajustée à la courbe expérimentale.

La plus grande prudence s'impose dans l'interprétation des sondages électriques. Il est recommandé de proposer au calculateur une première configuration déterminée par les abaques en tenant compte des ordres de grandeur de résistivité des terrains issus de l'expérience du géologue et de sa connaissance de la structure de la région d'étude. Par itérations, on affinera l'ajustement des deux courbes en modifiant les épaisseurs et les résistivités des terrains dans une mesure vraisemblable. La figure 4.20 page 63 donne un exemple d'un sondage électrique réel sur lequel on a ajusté une courbe théorique calculée par ordinateur.

Il existe souvent des circonstances qui compliquent l'interprétation. Dans certaines situations géologiques, deux configurations différentes peuvent donner la même courbe de sondage électrique. De plus, les programmes de calcul sont limités à des milieux homogènes isotropes à contact horizontal d'extension infinie en plan. La réalité est la plupart du temps différente. Dans les cas où elle ne s'écarte pas trop du cas idéal, les résultats sont utilisables bien que toujours peu précis. Dans les autres cas, on peut obtenir des résultats franchement faux.

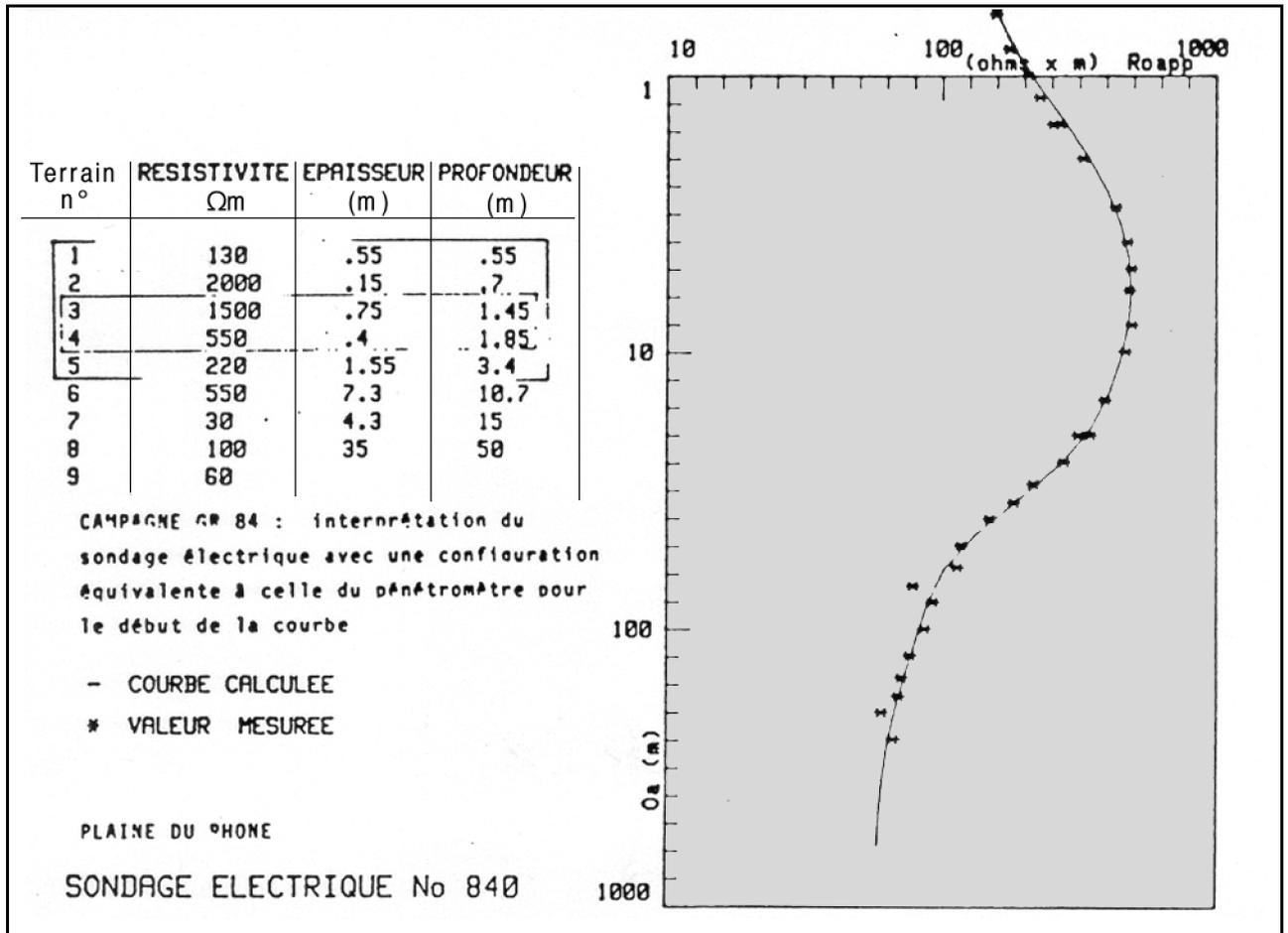


Figure 4.20: Exemple de sondage électrique dans la Plaine du Rhône dans la région de Collombey (VS). Les astérisques sont les mesures de terrain. La courbe calculée correspond à une configuration à 9 terrains qui est donnée à gauche de la figure. Elle épouse bien les points de mesure.

4.1.2.2.4. traîné électrique

Le traîné électrique est un dérivé du sondage électrique. Il consiste à choisir une longueur de ligne fixe qui est la mieux adaptée à faire ressortir des variations géophysiques à une profondeur donnée dans une région d'étude. Le quadripôle ainsi choisi sera déplacé dans le territoire. Les valeurs de résistivités apparentes seront reportées sur une carte topographique. On obtient ainsi une carte des résistivités électriques apparentes pour la longueur de ligne choisie. On tracera dans ce champ de valeurs les courbes d'équirésistivité judicieusement choisies pour faire ressortir les anomalies. Les surfaces comprises entre les lignes d'équirésistivités seront affectées d'une couleur ou d'une trame. Cette cartographie géoélectrique permet de mettre en évidence certains traits de la structure régionale.

Le choix de la longueur de ligne du traîné dépend de la cible qu'on veut étudier. La figure 4.21 page 65 illustre ce procédé par un exemple dans une région fictive correspondant à une plaine alluviale.

Trois sondages électriques SE1, SE2 et SE3 ont été effectués pour reconnaître la succession des terrains alluviaux dans 3 sites jugés représentatifs de la région d'étude : le milieu du cône de déjection (SE3), la plaine en aval (SE1) et en amont (SE2). Les courbes de sondage électrique sont données dans la partie supérieure de la figure. Ces courbes montrent une succession similaire d'un terrain moyennement conducteur sur un terrain résistant puis un terrain très conducteur. Le premier terrain correspond aux sédiments superficiels, riches en matière organique. Le deuxième représente des graviers alluviaux perméables qui sont le siège d'une nappe souterraine. Le fond est fait de limons lacustres très peu perméables. Ce qui différencie les trois sondages, c'est l'épaisseur du terrain aquifère. Elle est faible au SE2 car la résistivité élevée se réalise mal dans la courbe, prise entre les deux terrains conducteurs. Elle est un peu plus importante au SE1, la courbe montant nettement plus haut que dans le cas précédent. Au SE3, le terrain no 2 se réalise encore mieux par une valeur de résistivité maximale plus élevée et une descente de la courbe plus tardive.

Globalement, on a une situation hydrogéologique favorable au SE3, moins favorable au SE1 et encore moins au SE2. Cette conclusion au droit des sondages électriques est-elle généralisable ? Un traîné avec une longueur de ligne discriminant bien ces trois configurations électriques peut apporter la réponse. Dans ce cas, une longueur fixe $AB=100\text{m}$ ($OA=50\text{m}$) permet d'obtenir des résistivités électriques apparentes très différentes dans les trois sites.

Cette technique est extrêmement précieuse en hydrogéologie pour faire ressortir les extensions en plan des aquifères quaternaires. C'est la cas particulièrement des chenaux à haute perméabilité comme les sillons fluvio-glaciaires par exemple.

De telles cartes permettent d'implanter d'une manière optimale les sondages mécaniques de prospection d'eau.

On effectue parfois plusieurs traînés avec des longueurs de ligne différente. Par exemple, une ligne moyenne fera ressortir l'épaisseur de l'aquifère. Une ligne plus courte mettra en évidence la présence de couches protectrices. Une ligne très longue identifiera des différences dans la nature du plancher de la nappe, par exemple le passage d'un plancher étanche (molasse marneuse) à un plancher localement perméable (calcaires).

- l'interprétation doit être faite par un géologue - géophysicien expérimenté connaissant bien les ordres de grandeur possibles des paramètres et les structures vraisemblables
- l'interpréteur doit posséder un sens aigu de la modestie sur ses moyens par rapport à la complexité de la nature
- cette modestie doit l'amener à estimer objectivement l'incertitude sur les résultats obtenus.

Exercice 4.2: Carte des résistivités électriques apparentes (voir annexe Exercices).

4.1.2.3. Synthèse sur les méthodes géophysiques appliquées à l'hydrogéologie.

On constate que la géophysique est une science qui apporte des solutions élégantes à la reconnaissance hydrogéologique. Par de simples mesures à la surface du sol, on obtient des informations sur la profondeur. Leur coût est faible, surtout dans le cas de la géoélectrique.

Il ne faut toutefois pas perdre de vue que ce sont des méthodes indirectes qui livrent des indices et des présomptions. Le fait que la structure géologique soit souvent plus complexe que les configurations simplistes calculées par les modèles géophysiques explique l'incontournable incertitude qui accompagne ces techniques.

Quelques règles permettent de limiter ces incertitudes :

- les méthodes géophysiques et leur mode d'exécution ne doivent être choisis qu'après une reconnaissance géologique de la région
- une campagne doit comprendre un étalonnage sur des sondages mécaniques existants ou à faire

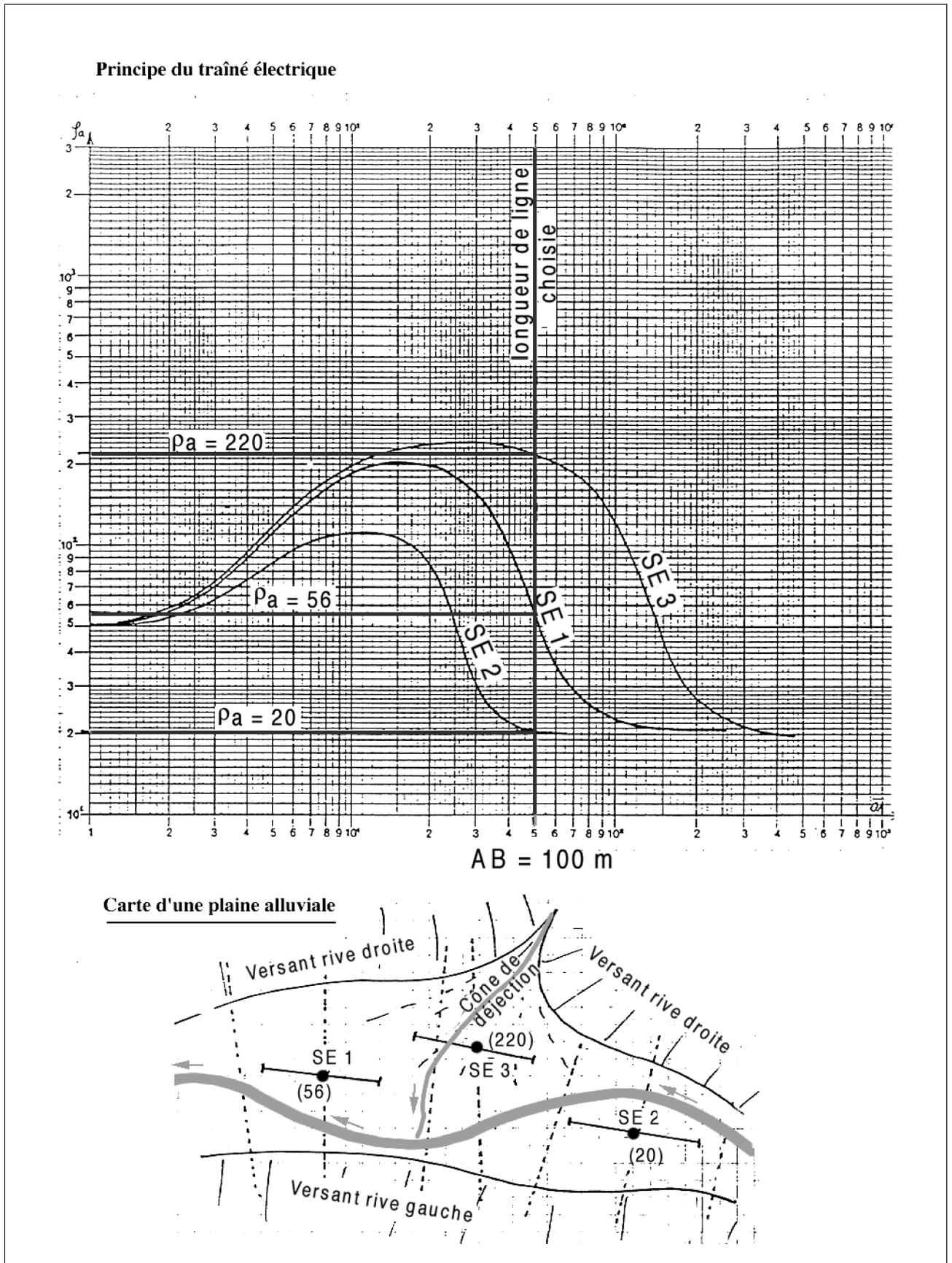


Figure 4.21: Choix d'une longueur de ligne de traîné pour la prospection d'un aquifère graveleux dans une plaine alluviale fictive, avec un cône de déjection. Voir explication dans le texte.

4.1.3. Sondages mécaniques avec essais de pompage exploratoires

La construction d'un captage doit immanquablement être précédée de sondages mécaniques pour confirmer les indices apportés par les méthodes de surface. Cette opération permettra de préciser la structure hydrogéologique du sous-sol, d'avoir une première indication tangible des débits exploitables et de vérifier la qualité générale de l'eau (surtout la composition chimique).

4.1.3.1. Techniques de sondage

On cherchera une méthode de sondage adaptée à la cible et la plus économique.

4.1.3.1.1. Sondages à la pelle mécanique

Avec une pelle rétro ou un grappin, on peut faire des reconnaissances dans le cas des aquifères très superficiels, jusqu'à des profondeurs de 6 m environ. On peut y implanter des tubes piézométriques d'au moins 100 mm de diamètre avant de refermer la fouille pour effectuer des essais de pompage.

Cette technique est très peu coûteuse. Mais elle souffre de nombreux défauts parmi lesquels :

- mauvaise stabilité des parois en zone aquifère empêchant d'atteindre le plancher de l'aquifère sans soutènement
- blessure sur une grande surface de la couche protectrice de l'aquifère
- les piézomètres mis en place ne sont généralement pas protégés contre la pénétration d'eau de surface.

4.1.3.1.2. Sondages carottés

La technique du sondage carotté consiste à faire pénétrer dans le terrain un tube portant à son extrémité un outil de découpe du sol ou de la roche. L'outil isole ainsi un cylindre de terrain (la carotte) qui pénètre à l'intérieur du tube au fur et à mesure de l'avancement. Le carottier une fois rempli est retiré pour recueillir la carotte.

L'opération est effectuée par un agrégat de sondage qui comprend plusieurs modules (figure 4.22 page 67) :

La sondeuse proprement dite:

Elle est montée sur un véhicule tout terrain. Elle est faite d'un moteur diesel principal qui met en pression les multiples circuits hydrauliques de la sondeuse. La pièce maîtresse est un bras à chaîne orientable qui va commander tous les mouvements verticaux du sondage (pénétration du carottier, du tubage, récupération et manoeuvres de tiges). Coulisse en haut du bras l'unité de pénétration qui est d'habitude une tête hydraulique de rotation, parfois un

marteau de battage, parfois les deux (roto-percussion). Viennent fixés sur cette tête les tiges de sondage et les tubages.

La partie en terre:

Elle comprend le carottier qui est placé en tête du train de tiges. En terrain meuble, on utilise normalement un carottier simple (figure 4.23 page 68) dont le tube sert à la fois de porteur de l'outil de coupe et de logement de la carotte. En rocher, on utilise plutôt un carottier double. Le tube de logement de la carotte est distinct du tube de rotation. Il reste fixe et à l'abri du fluide de forage (figure 4.23 page 68). En terrains meubles ou en rocher à mauvaise tenue, on fonce après une passe de carottage un tubage provisoire (casing) qui permet d'assurer la stabilité des parois pendant la foration. Le tubage est muni d'une couronne coupante qui permet de surforer le trou derrière le carottier tout en permettant le passage de ce dernier. La collecte de la carotte nécessite le démontage complet du train de tige. Dans les sondages à plus de 50 m en rocher environ, on utilise la technique du carottier à câble (wire line drilling) dont les tiges sont suffisamment larges pour pêcher la carotte sans les démonter (figure 4.23 page 68).

La pompe à fluide de forage:

On utilise en général de l'eau pour refroidir l'outil de coupe et évacuer la boue du fond du forage. On dispose d'une pompe à faible débit mais forte pression qui travaille en circuit fermé avec un bac de décantation (figure 4.22 page 67). L'eau est injectée dans les tiges en rotation par un pivot. Elle est amenée par l'intérieur des tiges en tête du carottier puis à la couronne. Elle remonte entre les tiges et la paroi du trou.

Cette technique est coûteuse mais donne les meilleures garanties :

- échantillons géologiques peu remaniés qui permettent une bonne identification du matériel et des essais en laboratoire (perméabilité, porosité, granulométrie), même dans la partie aquifère
- pose de tubes perforés avec bouchons d'étanchéité d'argile contre les eaux de surface et entre différents horizons aquifères (figure 4.24 page 69) et d'un petit massif filtrant dans les zones perforées.

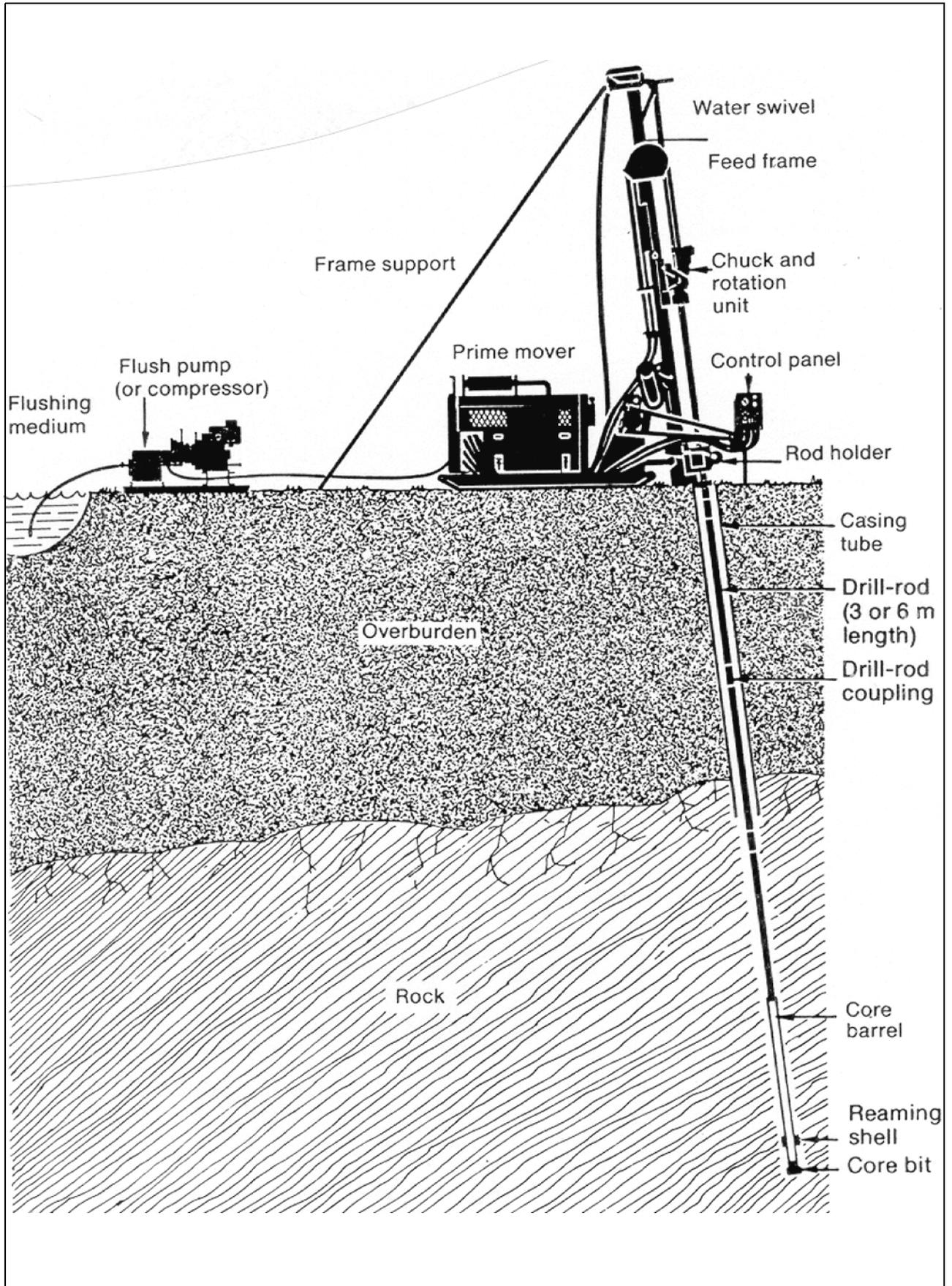


Figure 4.22: Schéma d'un agrégat pour sondages carottés en rotation (doc. Atlas Copco)

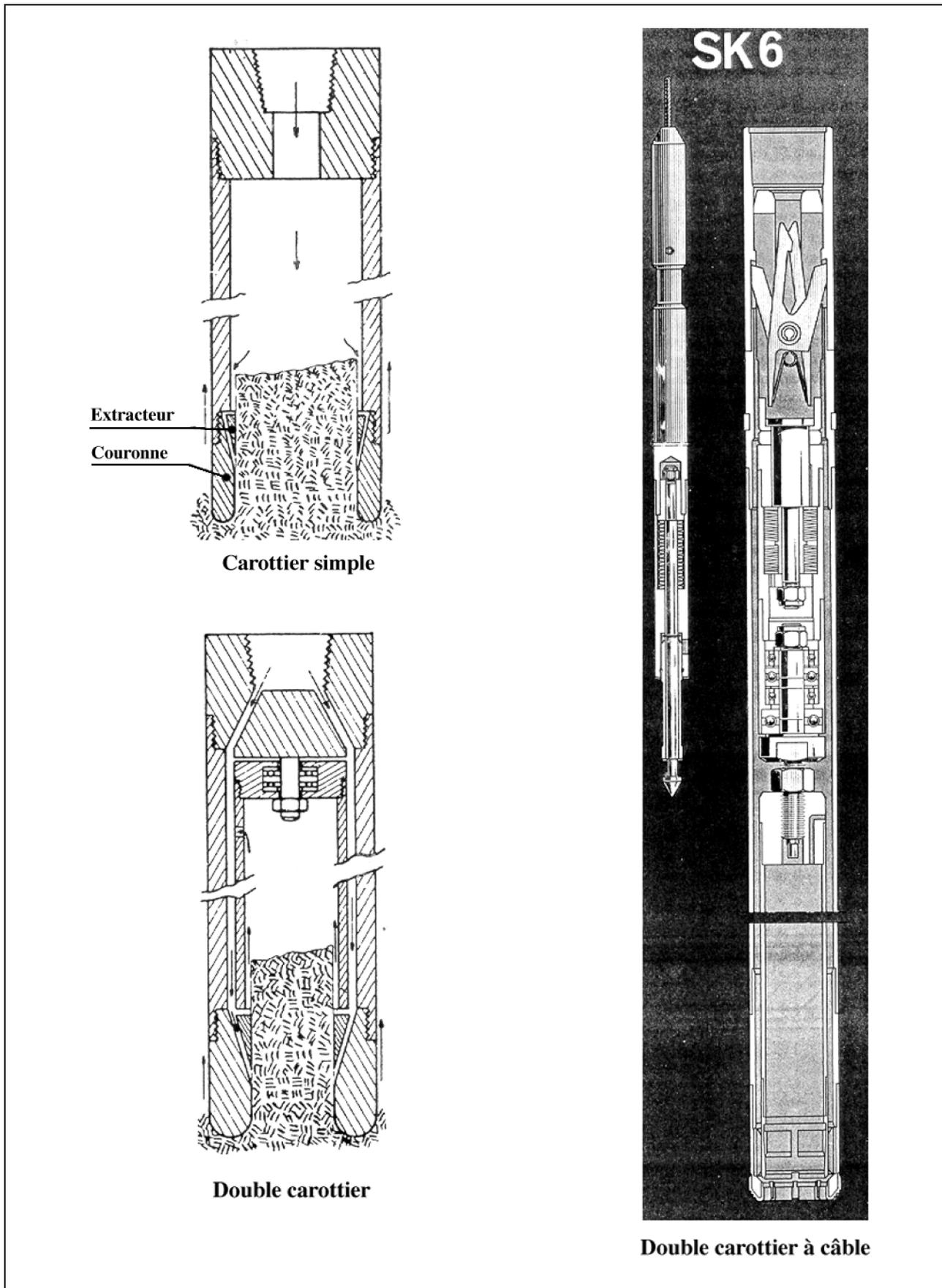


Figure 4.23: Carottier simple, double carottier et double carottier à câble (tiré de Cambefort et Atlas Copco).

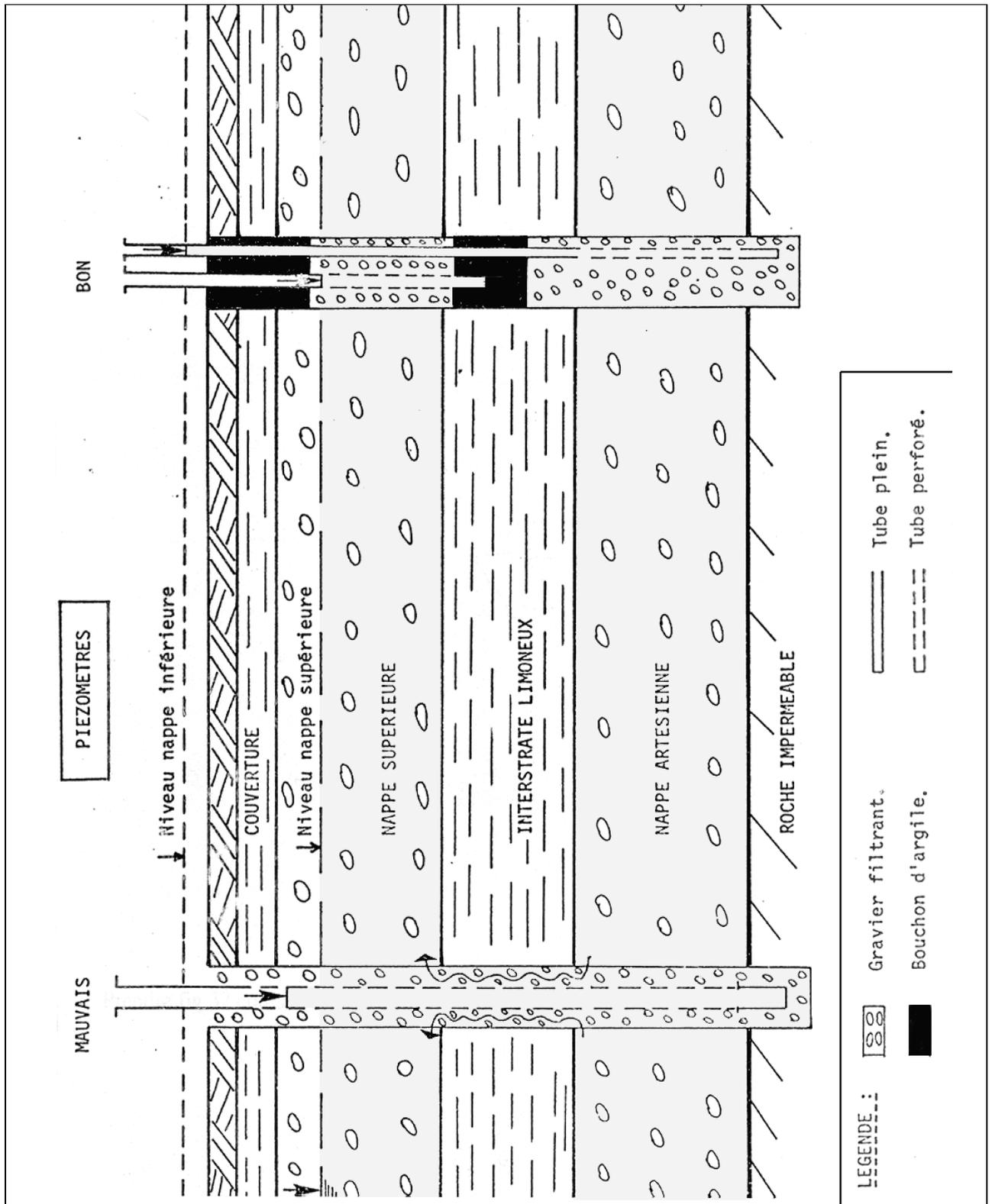


Figure 4.24: Tubes piézométriques dans les forages carottés tubés avec bouchons d'étanchéité.

4.1.3.1.3. Sondages au rotary à la boue

Cette technique s'impose pratiquement pour les aquifères très profonds où le sondage carotté s'avère trop coûteux. Le carottier est remplacé ici par un outil qui déchiquette la roche en débris (tricônes pour roches dures, trépan à

lames pour roches tendres) (figure 4.25 page 70). Les débris sont évacués par une circulation puissante de boue à base de bentonite (argile thixotropique à haute viscosité). La boue en surcharge par rapport à la pression des eaux souterraines crée un cake sur les parois du trou évitant la nécessité d'un tubage.

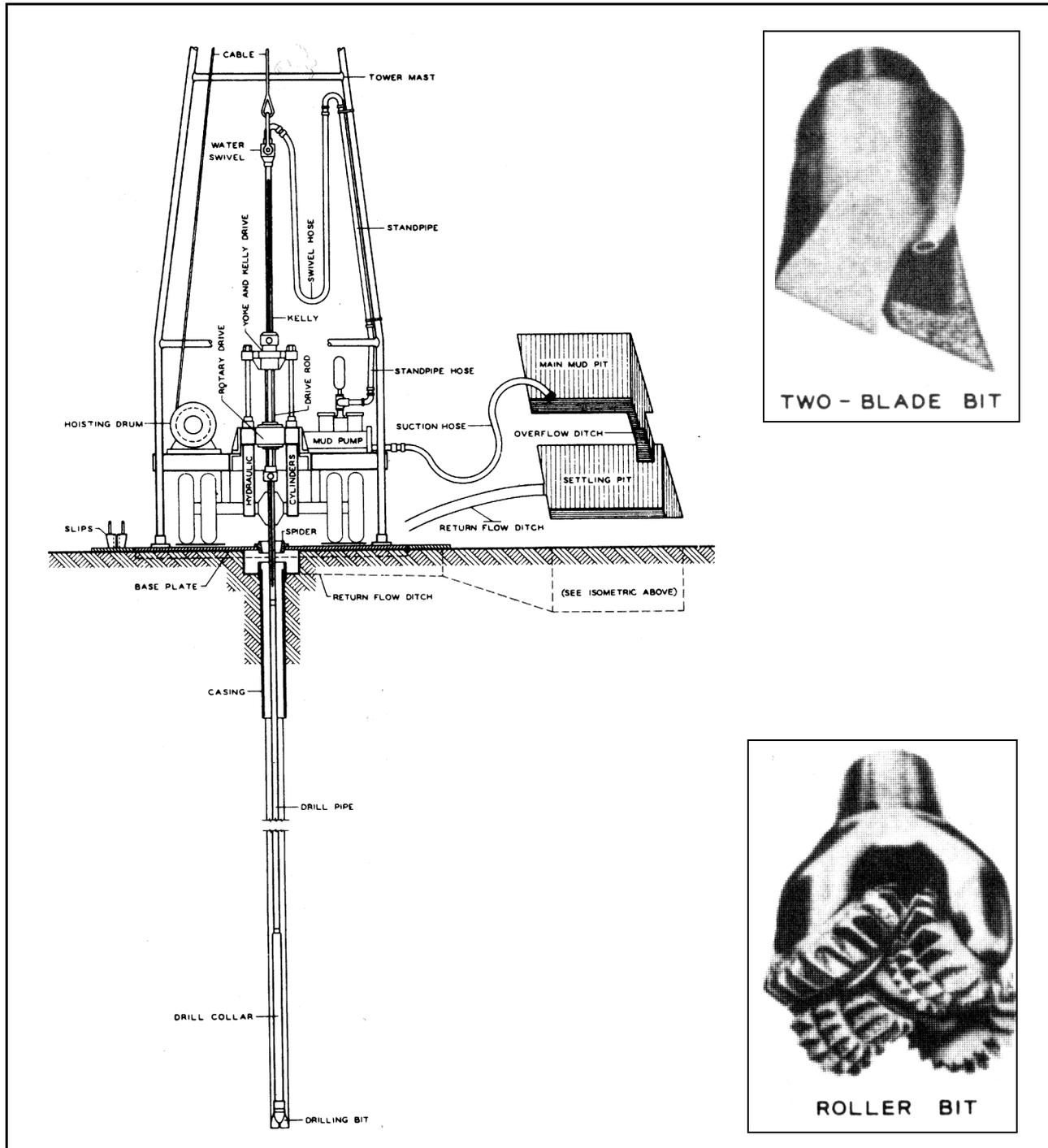


Figure 4.25: Sondage destructif au rotary à la boue (tiré de Hvorslev).

La méthode est très performante et rapide. Les tiges ne doivent être démontées que pour changer les trépan usés. Elle présente toutefois quelques désavantages :

- l'identification géologique est mauvaise, surtout dans les terrains granulaires
- désavantage lié à la boue. Celle-ci, en plus du cake, pénètre sur une certaine distance dans les pores de l'aquifère créant un colmatage. Avant le test de productivité, il faut arriver efficacement à décolmater ces pores ce

qui n'est pas toujours facile. Une fois le tube perforé mis en place, les opérations de décolmatage vont consister à créer une alternance de dépressions par air lift et de mises en pression pour déstabiliser les particules de boue dans les pores. On essaie de remplacer les boues à l'argile par des boues aux féculs organiques biodégradables (p ex REVERT) mais elles assurent mal la stabilité du trou.

- création de bouchons d'étanchéité difficile sans tubage.

Une autre technique de forage destructif s'est fortement développée récemment pour les forages en rocher jusqu'à quelques centaines de mètres de profondeur : le "marteau fond de trou". Comme son nom l'indique, la frappe s'applique par un marteau pneumatique directement sur l'outil de broyage de la roche qui est constitué de billes en métal dur. Elle est plus efficace que le battage classique car elle évite la déperdition d'énergie par flambage des tiges. Elle nécessite des très gros générateurs d'air comprimé. Comme la pression de l'air à la sortie du marteau doit être supérieure à la pression d'eau dans le forage, on peut difficilement travailler sous une charge supérieure à 200 m d'eau environ. Cette méthode est beaucoup utilisée dans la construction des captages à drains rayonnants en rocher (voir paragraphe 2.5.2).

4.1.3.2. Essais de pompage dans les sondages

La mise en place en sondage de tubes crépinés en PVC d'un diamètre intérieur au moins égal à 100 mm permet d'utiliser de petites pompes de forage immergées dont le débit atteint environ 100 à 200 l/mn selon la hauteur de refoulement. Cet équipement autorise des essais de pompage exploratoires de courte durée (quelques jours) pour déterminer quelques premières caractéristiques hydrogéologiques du site.

On n'insistera jamais assez sur la nécessité d'évacuer l'eau pompée dans une canalisation étanche pour qu'elle sorte du rayon d'action de l'essai.

4.1.3.2.1. Courbe caractéristique du sondage

Par une série de pompages en paliers de débit, dans la mesure où une stabilisation du rabattement est obtenue, on pourra tracer la courbe caractéristique rabattement en fonction du débit. La courbe indiquera si la nappe est libre (parabole) ou captive (droite).

On veillera à tenir compte de la zone de suintement qui est importante dans les sondages de petit diamètre. Elle peut être calculée approximativement par la formule de Ehrenberg :

$$h_s = \frac{\Delta h^2}{2H}$$

avec

h_s = hauteur de la zone de suintement

Δh = rabattement

H = épaisseur de la nappe libre

4.1.3.2.2. Détermination de la perméabilité

Par des essais de pompage en forage, on peut soit déterminer la perméabilité moyenne sur toute la hauteur de l'aquifère, soit par la méthode de courantométrie de forage établir un profil de perméabilité.

4.1.3.2.2.1. Perméabilité moyenne

Sur la base des mêmes valeurs utilisées pour dresser la courbe caractéristique, on calculera par les équations de Dupuit la valeur de la perméabilité de Darcy (figure 4.26 page 72). Dans les aquifères rencontrés dans la nature qui sont souvent hétérogènes, cette perméabilité unique ne correspond à aucun des horizons composant l'aquifère. C'est une perméabilité équivalente, c'est-à-dire que l'aquifère se comporte hydrogéologiquement comme s'il était fait d'une seule couche homogène et isotrope de perméabilité K et d'épaisseur H ou e . Dans un forage vertical, si on n'exerce que des rabattements faibles par rapport à l'épaisseur de la nappe, la perméabilité équivalente est égale à la moyenne de la perméabilité horizontale de chaque couche pondérées par l'épaisseur de la couche.

Dans le cas où on a plusieurs piézomètres à disposition, on calculera la perméabilité dans différentes direction par la méthode de Thiem (figure 4.26 page 72). Cette méthode donne une bonne image de l'hétérogénéité de la perméabilité dans le site. Elle fait ressortir par exemple la direction des paléo-chenaux qui ont constitué un aquifère alluvial.

DUPUIT

NL : $Q = \frac{\pi K \Delta h (2H - \Delta h)}{\ln(R/r)}$

NC : $Q = \frac{2\pi K e \Delta h}{\ln(R/r)}$

THIEM

NL : $Q = \frac{\pi K}{\ln(r_1/r_2)} (\Delta h_1 - \Delta h_2) (2H - \Delta h_1 - \Delta h_2)$

NC : $Q = \frac{2\pi K e}{\ln(r_1/r_2)} (\Delta h_1 - \Delta h_2)$

THEIS

Détermination de deux couples de valeur

$\Delta h, t/r^2$ sur la courbe expérimentale et $1/u, W_{(u)}$ sur la courbe caractéristique, valeurs coïncidant par la superposition des deux courbes.

On en tire $T = Ke = \frac{QW_{(u)}}{4\pi\Delta h}$ et $S = \frac{4T}{1/u} \cdot \frac{t}{r^2}$

La courbe caractéristique de Theis est calculée de manière exacte par

$$W_{(u)} = -0.5772 - \left(\ln(u) + \sum_{i=1}^{\infty} \left[-(-1)^i \cdot \frac{u^i}{i \cdot i!} \right] \right)$$

APPROXIMATION LOGARITHMIQUE

On reporte les couples $\Delta h, t/r^2$ sur un graphe semi-logarithmique $y_h = f \log(t/r^2)$.
Comme la fonction de Theis est résolue approximativement par l'équation

$$W_{(u)} = -0.5772 - \ln u$$

On obtient une droite dans ce type de graphique.

On mesure la pente a de la droite et l'abscisse à l'origine $(t/r^2)_0$

On calcule T et S par $T = \frac{2.3Q}{4\pi a}$ et $S = \frac{(t/r^2)_0 \cdot 4T}{1.78}$

NOTATIONS

Δh = rabattement

e = épaisseur nappe captive

H = épaisseur nappe libre au repos

h = potentiel hydraulique en pompage

K = perméabilité

NL = nappe libre

NC = nappe captive

Q = débit

r = rayon du puits (Dupuit) ou distance à un piézomètre (Thiem et Theis)

R = rayon d'action

S = coefficient d'emménagement

T = transmisivité

t = temps depuis début pompage

Figure 4.26: Equations usuelles pour l'interprétation des essais de pompage (Dupuit, Thiem, Theis, approximation logarithmique). Voir cours d'hydrodynamique.

4.1.3.2.2. Profil de perméabilité par courantométrie de forage

Cette technique moderne s'est beaucoup développée en hydrogéologie, que ce soit dans le domaine des hautes ou des basses perméabilités. Elle nécessite l'usage d'un moulinet de forage (flowmeter) qui permet de mesurer le débit vertical dans le sondage à différentes profondeurs. De la différence de débit vertical entre deux points, on tire le débit radial de la tranche, duquel on déduit sa perméabilité.

L'agrégat de courantométrie est composé de plusieurs parties (figure 4.27 page 73).

Le moulinet :

Le moulinet est similaire à un moulinet de rivière mais avec une géométrie propre au travail en forage (figure 4.27 page 73). Son diamètre permet de travailler dans des tubes de 100 mm, diamètre correspondant du reste au minimum nécessaire pour placer une pompe de forage ordinaire. Il possède un seuil de réponse très bas

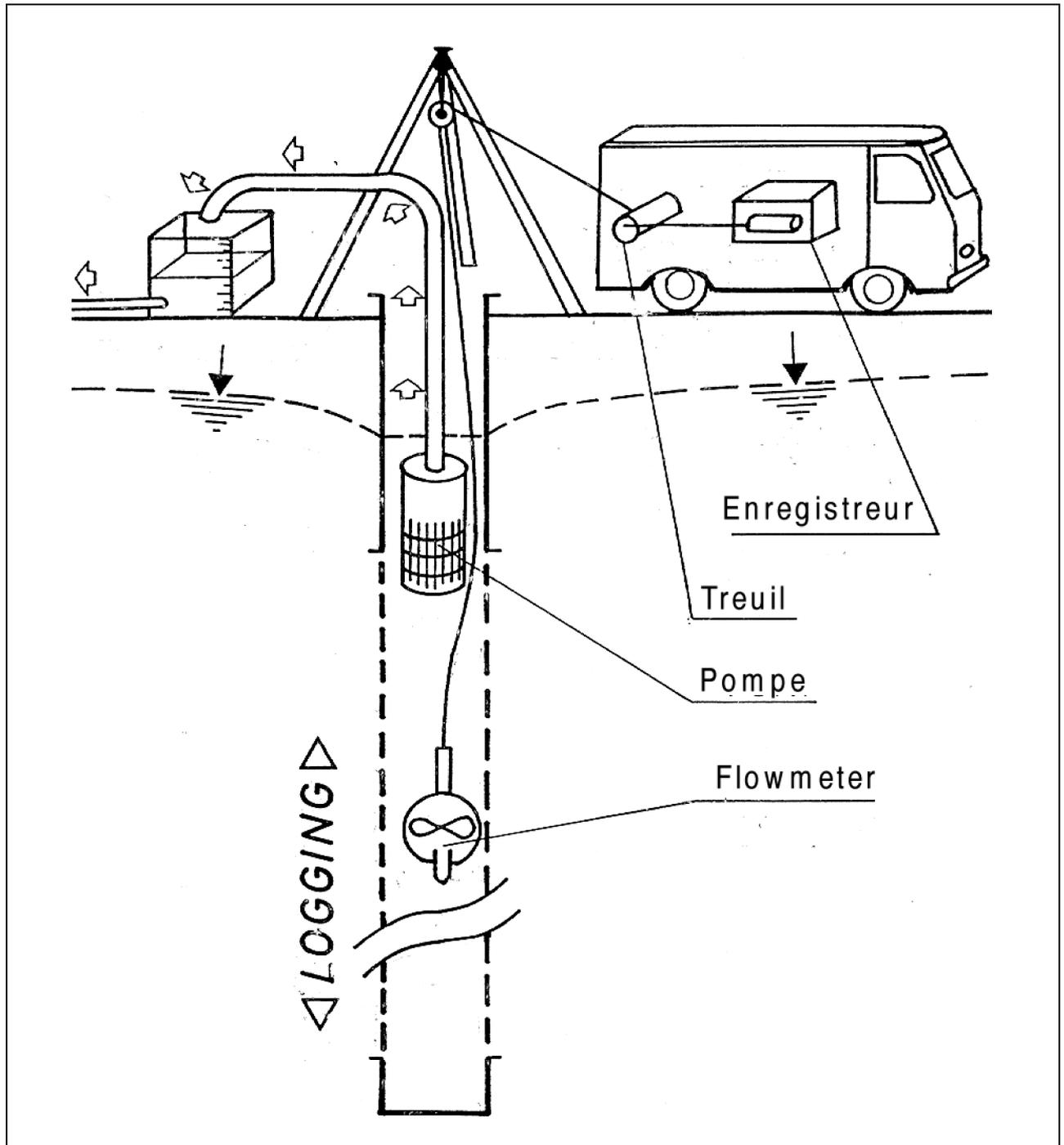


Figure 4.27: Dispositif de courantométrie de forage.

($v > 5 \text{ mm/s}$). Il est capable de mesurer des courants ascendants ou descendants. Il est suspendu à un câble porteur et envoié par ce câble à un moniteur en surface un signal correspondant à la vitesse de rotation de l'hélice.

Le moniteur :

Cet appareil permet de traiter le signal venant du moulinet et de l'enregistrer. La commande de la profondeur est faite par un treuil spécial à diagraphies qui garantit un déroulement à vitesse régulière pour les mesures de logging (mesures par balayage de la profondeur). Le moniteur enregistre les mouvements du treuil.

L'agrégat de pompage :

C'est un dispositif de pompage classique légèrement adapté à la mobilité de la manoeuvre. Il est fait d'une pompe immergée pour les nappes profondes et d'une pompe aspirante quand le niveau d'eau est proche de la surface. La crépine de la pompe est placée toujours le plus haut possible dans le forage (figure 4.27 page 73) pour garantir la zone d'accès du moulinet la plus grande possible (le moulinet ne peut croiser la pompe en raison de l'exiguité des forages).

L'essai de courantométrie comprend 3 étapes :

Étape I : mesures de débit sans pompage

Dans de nombreuses configurations hydrogéologiques et tout spécialement dans les zones de recharge ou d'exutoire, des horizons aquifères ont des potentiels hydrauliques différents. Lorsqu'un forage muni d'un tube perforé traverse ses séries, il est parcouru par un courant "au repos" qui est la résultante de l'équilibrage des potentiels. Le forage crée ainsi un court-circuit hydrogéologique (figure 4.28 page 75).

Le moulinet mesure les courants soit à des profondeurs discrètes, soit en balayage continu (logging). On en tire par une courbe d'étalonnage les débits entrant ou sortant du sondage pour les différentes tranches d'aquifères considérées (par exemple tranches de 1m).

Au-delà de sa contribution à la mesure de la perméabilité, cette première étape est très importante pour la compréhension des conditions hydrogéologiques du secteur, notamment sur l'indépendance hydrogéologique de formations et sur la répartition des potentiels naturels.

Étape II : Mesures en condition de pompage

On place la pompe légèrement au-dessous du niveau hydrostatique, suffisamment pour qu'elle ne dénoie pas pendant l'essai. On pompe ensuite avec un débit approprié aux performances du sondage. On attend que des conditions d'équilibre du débit et du rabattement soient atteintes. On répète alors l'opération de mesure de l'étape I.

Étape III : traitement des résultats.

Sur la base des mesures de débit vertical au repos, on calcule de débit radial q pour les différentes tranches i d'aquifère (figure 4.28 page 75).

Pour la tranche i allant de la profondeur P_1 à P_2 avec $P_2 > P_1$

$$q_i = Q_{P_1} - Q_{P_2}$$

avec

$$Q_{P_1} = \text{débit vertical en haut de la tranche } i$$

$$Q_{P_2} = \text{débit vertical en bas de la tranche } i$$

Ainsi, lorsque le débit croît de P_2 à P_1 , q_i est positif. De l'eau entre dans le forage entre P_2 et P_1 . Si q_i est négatif, de l'eau quitte de forage au droit de la tranche.

On fait de même pour les mesures en condition de pompage. On obtient pour chaque tranche une valeur de débit radial qui est la somme des effets "au repos" et du pompage.

Pour ne tenir compte que de l'effet du pompage, on doit déduire le débit "au repos" de celui mesuré en condition de pompage.

On calcule ensuite la perméabilité de la tranche i en appliquant l'équation de Dupuit en assimilant la tranche à une nappe captive d'épaisseur e_i . On utilisera le rabattement mesuré pendant le pompage pour toutes les tranches.

$$K_i = \frac{q_i}{2\pi e_i \Delta h} \ln(R/r)$$

On obtient ainsi le profil de perméabilité du forage. On calcule enfin la perméabilité moyenne du sondage en pondérant les effets des n couches

$$K_m = \frac{\sum_{i=1}^n K_i e_i}{\sum_{i=1}^n e_i}$$

La mesure de courantométrie permet ainsi de déterminer quelles sont les productivités des différentes parties de l'aquifère. Ce sera très utile pour fixer la profondeur des puits à construire. Par exemple, lorsqu'un gisement se compose de deux horizons aquifères, l'un près de la surface, l'autre nettement plus profond : il faut connaître la productivité de l'horizon profond pour décider si on construit un puits coûteux pour exploiter les deux niveaux.

Exercice 4.3 : Flowmeter (voir annexe II)

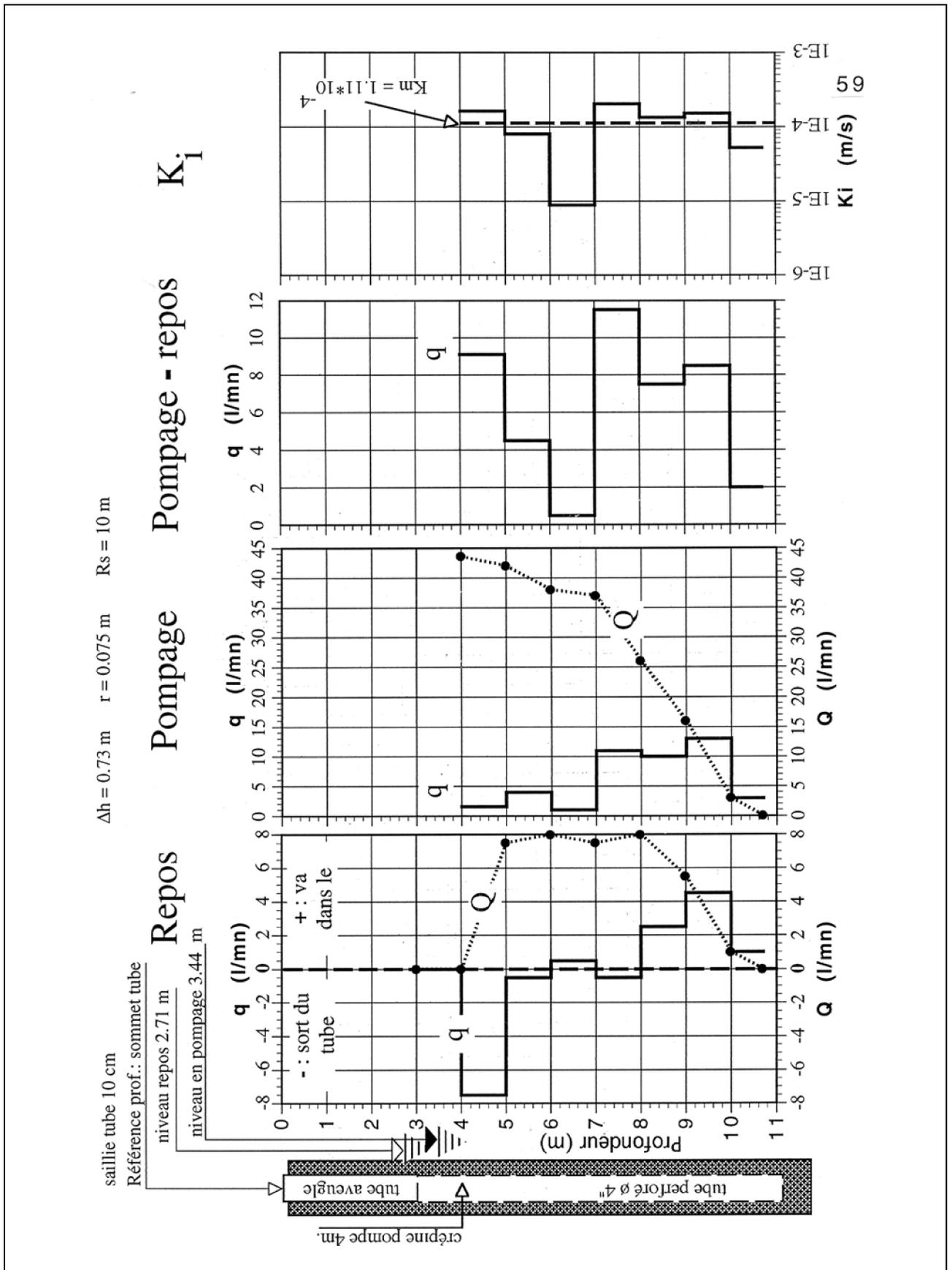


Figure 4.28: Résultat de courantométrie de sondage avec traitement des données et calcul du profil de perméabilité. Cas du sondage 2bis dans la décharge de la Lonza, Viège.

Contexte Document	SUISSE					MONDE	
	MSDA	OSEC		OEAUX an2		OMS	
Type d'eau	Eaux de boisson	Eau potable		Eaux souterr.	Cours d'eau	Eaux de boisson	
Paramètres (par ordre alphabétique)	Valeurs directrices (=objectif de qualité)	Valeur de tolérance mg/l	Valeur limite mg/l	Exigences ¹	Exigences T=total D=dissous	Valeur indicative	Remarques
Acide éthylène-diamine-tétracétique (EDTA)	-	0,005	0,2				
Acide nitrilotriacétique		0,003	0,2				
Acide silicique, adjonction de silicate lors du traitement de l'eau	-						
Agents tensio-actifs		0,1	-				
Aluminium	< 0.05 mg Al ³⁺ / l	0,2	-			0,2 mg / l	
Ammonium	< 0.05 mg NH ₄ ⁺ / l			Oxique : < 0.1 mg NH ₃ / l, Anoxique : < 0.5 mg NH ₃ / l	Si T > 10°C : < 0.25 mg NH ₃ / l, Si T < 10°C : < 0.5 mg NH ₃ / l		
AOX (X=alogénure)				< 0.01 mg / l par subst.			
Argent		0,1	-			non fixé	
Argent, adjonction lors du traitement de l'eau	-						
Arsenic	< 0.002 mg As / l	-	0,05			0,05 mg / l	
Bromo-dichloro-méthane		-	0,015				
Cadmium	< 0.0005 mg Cd ²⁺ / l	-	0,005		T < 0.2 mg/l, D < 0.05 mg/l	0,005 mg / l	
Calcium	Si > 200 mg / l => bcp dépôt calcaire						
Carbonate de calcium, indice de saturation	-						
Carbone organique dissous (DOC)	< 1 mg C / l			2 mg C / l	1 à 4 mg C / l		
Chlore combiné	-						
Chlore libre	-	0,1	-				
Chlorures	< 20 mg Cl ⁻ / l			40 mg Cl / l		250 mg / l	
Chlorobenzènes et chlorophénols	< 0.1 µg / l chlorophénols					Valeur non fixée	altér. gustat.
Chrome total					< 0.005 mg/l	0,05 mg / l	
Chrome (III)					< 0.002 mg/l		
Chrome (VI)	< 0.001 mg Cr ⁶⁺ / l	-	0,02		< 0.002 mg/l		
Coloration	incolore					15 (UVC)	
Consommation en acide à pH 4,3	-						
Consommation en KMnO ₄	< 3 mg KMnO ₄ / l						
Cuivre	< 0.02 mg Cu ²⁺ / l	1,5	-		T < 0.005 mg/l, D < 0.002 mg/l	Valeur non fixée	
Cyanures	-	-	0,05			0,1 mg / l	
Demande biochimique en oxygène (DBO ₅)					2 à 4 mg/l O ₂		
Dibromo-chloro-méthane		-	0,1				
Dichloro-1,1-éthylène		-	0,03				
Dichloro-1,2-éthane		-	0,003				
Dichloro-1,2-éthylène		-	0,05				
Dichlorométhane		-	0,02				
Dioxyde de chlore	-	0,05	-				
Dito (eau part. adoucie)							
Dureté						500 mg / l (CaCO ₃)	
Dureté totale (eau non-traitée)	-						
Fer ^{total}	-	0,3	-			0,3	
Fer, dissous	< 0.05 mg Fe / l						
Fluorures	< 0.5 mg F ⁻ / l	1,5	-			1,5 mg / l	nat. ou ajouté
Hydrazine	-	-	0,005				
Hydrocarbures aliphatiques				0,001 mg / l par subst.			
Hydrocarb. aromatiques polycycliques (PAH)	Somme < 0.1 µg / l Benzo (a)-pyrène < 0.01 µg / l	0,0002	-	0.1 µg / l par subst.			
Hydrocarbures halogénés volatils	< 0.1 µg / l équ. Cl / l par subst. Somme < 1 µg Cl ⁻ / l	0,025	-	0.001 mg / l par subst.			
Hydrocarbures hydrosolubles	< 0.1 µg / l						
Hydrocarbures monocycliques				0.001 mg / l par subst.			
Hydrocarbures peu solubles	< 2 µg / l	0,02	-				

Contexte	SUISSE					MONDE	
	MSDA	OSEC		OEaux an2		OMS	
	Eaux de boisson	Eau potable		Eaux souterr.	Cours d'eau	Eaux de boisson	
Document	Valeurs directrices (=objectif de qualité)	Valeur de tolérance mg/l	Valeur limite mg/l	Exigences ¹	Exigences T=total D=dissous	Valeur indicative	Remarques
Type d'eau							
Paramètres (par ordre alphabétique)							
Magnésium	-						
Manganèse "total"	-	0,05	-			0.1 mg / l	
Manganèse, dissous	< 0.02 mg Mn / l						
Matières dissoutes tot.						1000 mg / l	
Mercuré	< 0.0001 mg Hg ²⁺ / l	-	0,001		T<0.03 µg/l, D<0.01 µg/l	0.001 mg / l	
Nickel					T<0.01 mg/l, D<0.005 mg/ l	Valeur non fixé	
Nitrates	< 25 mg NO ₃ ⁻ / l	40	-	25 mg NO ₃ ⁻ / l	25 mg NO ₃ ⁻ / l si eau potable	10 mg N / l	
Nitrites	< 0.01 mg NO ₂ ⁻ / l	0,1	-			Valeur non fixée	
Odeur et goût	Néant (sans odeur), pas de goût détectable					Sans désagr.	
Oxygène	-					non fixé	
Ozone	-	0,05	-				
Pesticides organiques				0.1 µg / l par subst.	0.1 µg / l par subst.		
Pesticides et substances analogues		0.1 µg / l par substance, 0.5 µg / l au total	-				
pH	6.8 - 8.2					De 6.5 à 8.5	
Phénols	< 0.5 µg / l	0,005	-				
Phénols entraînés à la vapeur d'eau	< 5 µ C ₆ H ₅ OH / l						
Phosphates (calculé en PO ₄ dans l'eau chaude)		3	-				
Phosphates, adjonction lors du traitement de l'eau							
Phosphates, sans traitement	< 0.05 mg P / l						
Plomb	< 0.001 mg Pb ²⁺ / l	-	0,05		T<0.01 mg/l, D<0.001 mg/ l	0.05 mg / l	
Potassium	< 5 mg K ⁺ / l						
Radioactivité alpha						0.1 Bq/l	consom. 2 l/j
Radioactivité bêta						1 Bq/l	consom. 2 l/j
Radionucléides isotopes de Ra-224, Th-228, U-234, U-235, U-238			10 Bq/kg				
Résidu sec	-						
Sélénium	< 0.001 mg / l	-	0,01			0.01 mg / l	
Silicates		10	-				
Acide silicique, adjonction de silicates pour traitement							
Sodium	< 20 mg Na ⁺ / l					non fixé	
Substances tensio-actives	-						
Sulfates ²	< 50 mg SO ₄ ²⁻ / l			40 mg SO ₄ ²⁻ / l		400 mg / l	
Sulfures	non décelables organoleptiquement						
Sulfures d'hydrogène						Indécelable	
Température	8-15 °C					non fixé	
Tétrachloroéthylène		-	0,04				
Tétrachlorométhane		-	0,002				
Tribromométhane		-	0,1				
Trichloréthylène		-	0,07				
Trichloro-1,1,1-éthane		-	2				
Trichlorométhane		-	0,04				
Turbidité, sans traitement	< 0.5 UT / F					5 UNT (Unité Néphélomètre. Turbidité)	De préf. < 1 pour désinfection efficace
Turbidité, après filtration	< 0.2 UT / F						
Zinc	< 0.1 mg Zn ²⁺ / l	5	-		T<0.02 mg/l, D<0.005 mg/ l	5 mg / l	

Figure 4.29: Comparaison de différentes normes suisses (MSDA, OSEC, OEaux) et de l'OMS.

1. : Des conditions naturelles particulières sont réservées. Elles sont souvent géologiques, par exemple, les sulfates issus du gypse; elles peuvent justifier des teneurs supérieures.
2. : Des teneurs élevées en sulfates sont admissibles si la teneur en Mg reste inférieure à 50 mg/l. Pour des raisons techniques uniquement (corrosion des ouvrages), on recommande de ne pas dépasser 200 mg/l.

4.1.3.2.3. Détermination de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement

Les équations des écoulements non permanents permettent de tirer la transmissivité T et le coefficient d'emmagasinement S (figure 4.26 page 72). On aura intérêt pour ce faire d'utiliser un essai à débit constant. On aura avantage à faire les calculs aussi avec les piézomètres voisins du point de pompage, en pompage et en remontée.

Il est recommandé de grouper tous les piézomètres sur le même graphe en utilisant $\log t/r^2$ en abscisse. Ceci donne une image plus synthétique de l'essai (voir cours hydrodynamique). Le calcul avec la fonction complète de Theis est préférable à l'approximation logarithmique en raison des limites de validité de cette dernière (problème des points éloignés et des temps courts en nappe libre).

La pratique montre que la transmissivité est bien déterminée par ces méthodes. En revanche les résultats obtenus pour S sont souvent très imprécis voire franchement faux.

4.1.3.2.4. Analyse de la qualité chimique de l'eau souterraine

Ces premiers essais de pompage permettent de connaître les principales caractéristiques chimiques de l'eau souterraine. Un prélèvement sera effectué au minimum une fois avant l'arrêt du pompage.

Si l'aquifère est prospecté comme future ressource en eau potable, un accent particulier sera mis sur l'analyse des composants suivants, en regard des objectifs de qualité et des tolérances fixés par le Manuel suisse des denrées alimentaires (figure 4.29 page 77) ou les normes de l'OMS :

Minéralisation :

On cherche à éviter les eaux trop riches en sels minéraux. Notamment, il faut surveiller les teneurs en sulfates et en chlorures qui posent des problèmes techniques et alimentaires. Ces deux derniers anions peuvent être d'origine géogène et anthropique.

Saturation en oxygène

Beaucoup d'eaux souterraines profondes souffrent d'un déficit en oxygène. Elles engendrent des désagréments surtout techniques par la précipitation d'oxydes de fer et manganèse colloïdaux (taches colorées sur le linge etc). Elles peuvent être agressives vis à vis des métaux. On analysera la teneur en oxygène par électrodes spécifiques ou le potentiel redox. On dosera le fer et le manganèse sur un échantillon acidifié.

Oxydabilité

L'oxydabilité traduit la somme des composés organiques en solution dans l'eau. Elle doit rester très basse.

Nitrates

Ils sont sévèrement limités en raison du risque de méthémoglobinémie chez le nouveau-né et de formation de nitrosamines chez l'adulte. L'agriculture intensive en largue beaucoup dans le sous-sol et de nombreuses ressources dépassent les normes.

Nitrites et ammoniacque

Ils sont des indicateurs chimiques de pollution par des engrais de ferme. Ils sont alors corrélés avec le potassium. Dans les eaux chimiquement réduites, on obtient ces composés par réduction des nitrates.

Phosphates

Les phosphates sont fixés au sol. Si on en trouve en quantité importante dans les eaux souterraines, ils proviennent en général d'infiltrations d'eau usée domestique. Certaines roches peuvent toutefois en larguer par leur contenu fossilifère (grès coquilliers du Burdigalien)

Au vu des résultats chimiques, des prospections sont parfois abandonnées malgré d'excellents résultats quantitatifs car certaines substances ne peuvent être éliminées. Un excédent de minéralisation en sulfates et chlorures, s'il est fort, est d'origine géogène et ne peut être supprimé. Un déficit en oxygène et la présence de fer peut parfois se résoudre en accélérant la circulation et le renouvellement des eaux dans la nappe; ce n'est pas toujours un succès. Les substances typiquement anthropiques comme les nitrates, nitrites, ammoniacque et phosphates peuvent être diminuées par des mesures de protection dans le bassin. Elles sont cependant coûteuses financièrement et politiquement.

D'une manière générale, une eau souterraine devrait pouvoir être consommée comme eau potable sans aucun traitement.

4.1.3.2.5. Analyse de la qualité bactériologique de l'eau souterraine

Les normes de qualité bactériologique de l'eau de boisson se fondent sur le nombre de germes aérobies et sur la présence de micro-organismes non pathogènes en eux-même, mais servant d'indicateurs d'une contamination fécale, d'origine humaine ou animale. A cet égard, les germes test utilisés sont *Escherichia coli* et les entérocoques. Les eaux de boisson ne doivent pas contenir plus de 100 germes aérobies par ml (germes totaux), aucun *Escherichia coli*, ni entérocoques.

Le contrôle microbiologique d'une eau doit normalement se faire dans un captage construit comme tel. Un sondage de reconnaissance est loin de ce concept. C'est pourquoi on peut difficilement effectuer ce contrôle à ce stade de la prospection. Un résultat mauvais n'implique pas véritablement que la nappe est polluée. En revanche si le résultat est bon, c'est un élément très positif pour la suite de la

prospection.

Si on veut effectuer une analyse bactériologique dans un forage, on effectuera au début du pompage une javellisation des parois du sondage et de toute la quincaillerie d'évacuation de l'eau en déversant quelques litres de Javel diluée le long des parois du tube. L'oxydant parcourra ensuite la pompe et la conduite de refoulement. On contrôlera la teneur en chlore à l'exutoire pour éviter des dégâts écologiques. Les prélèvements ne seront faits qu'après plusieurs jours de pompage.

4.1.4. Puits d'essai avec essais de pompage de longue durée

Les sondages de petit diamètre ne permettent pas des pompages à débit important. Il n'est donc pas possible de tester le rendement d'une nappe souterraine sur une longue période avec une sollicitation massive. Il faut pour cela créer des puits d'essai de plus gros diamètre dans les-

quels on pourra placer des pompes à débit élevé. Les essais qui pourront être réalisés porteront sur une longue durée, testant ainsi la recharge de la nappe.

4.1.4.1. Les puits d'essai

En terrains quaternaires, ces ouvrages de diamètre en général supérieur à 1 m sont creusés par la technique Bénoto. On descend un tubage par un système de louvoyant hydraulique qui s'appuie sur une lourde dragueline (figure 4.30 page 79). Parallèlement, la machine excave le terrain dans le tubage avec un grappin cylindrique à coquilles. Dans les terrains compacts, on s'aide d'un lourd trépan qui est lâché répétitivement depuis le haut du tubage sur le fond. On télescope le tubage tous les 25 m environ. Le puits une fois excavé est muni d'une crépine en acier brut de diamètre nettement plus faible que le diamètre du trou pour mettre en place un épais massif filtrant. On utilise souvent pour ce genre de puits en aquifères quaternaires les crépines à nervures repoussées (figure 4.31 page 80).

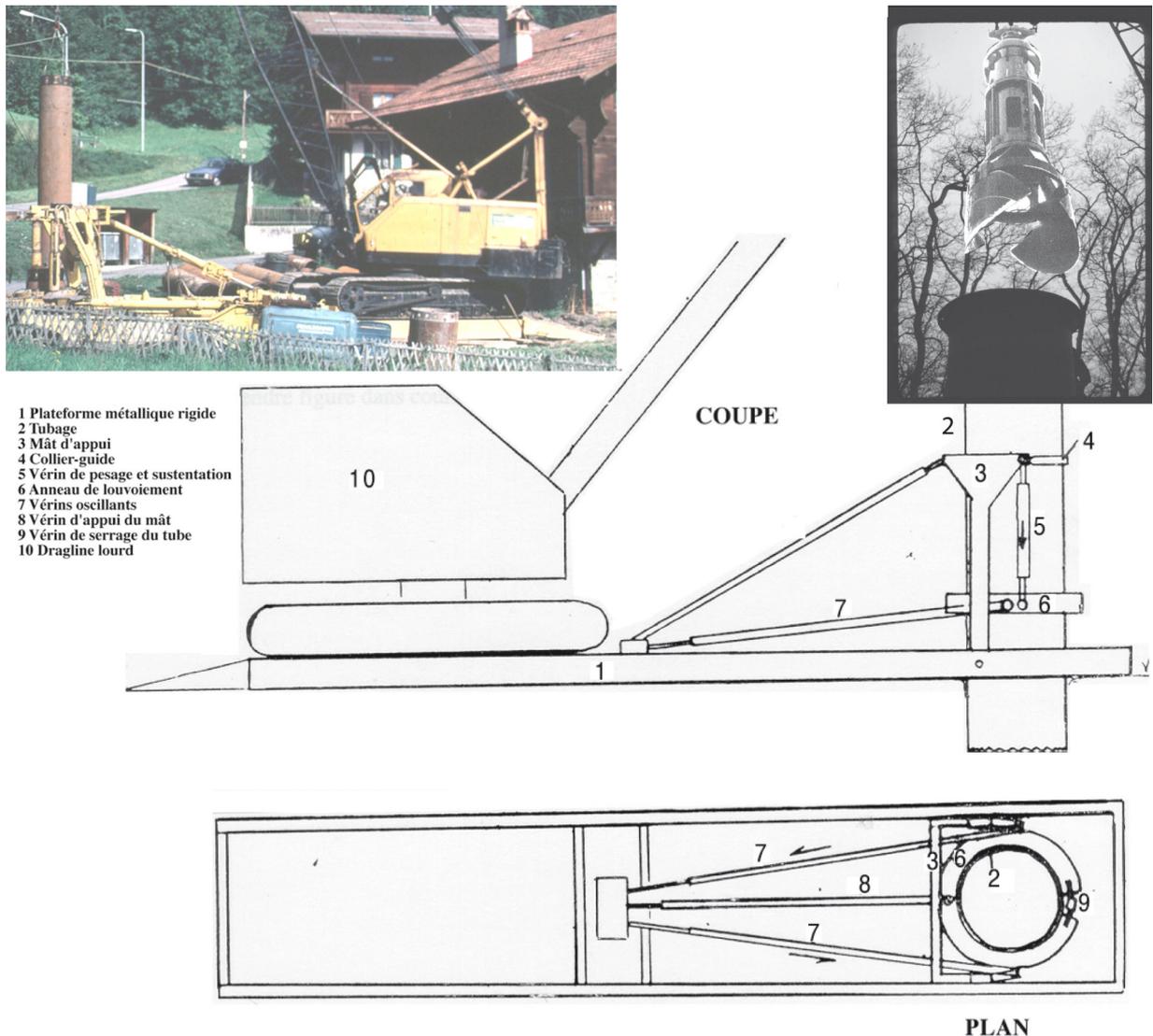


Figure 4.30: Schéma de la technique Bénoto pour le creusage des puits tubés en terrains meubles.

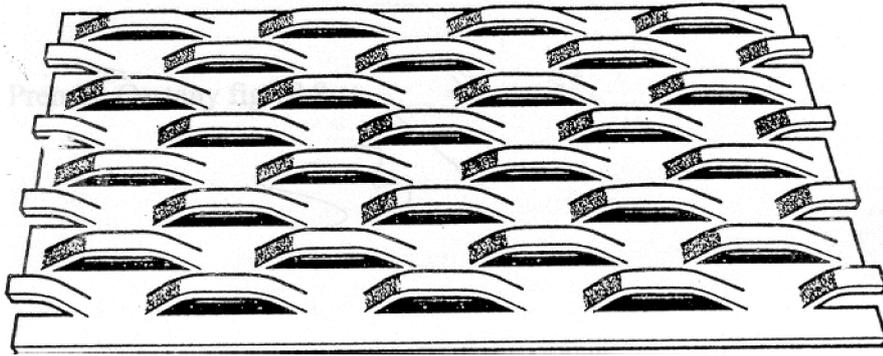


Figure 4.31: Crépines à nervures repoussées (tiré de Castany)

En rocher, on procède souvent par réalésage du forage pour en augmenter le diamètre, soit sur la totalité de la profondeur, soit uniquement dans la partie supérieure pour placer une pompe de capacité suffisante. Ces opérations sont coûteuses et la phase puits d'essai n'est pas toujours effectuée. Dans de nombreux cas, on utilise le forage de petit diamètre pour l'essai de longue durée pour passer directement à la construction du forage d'exploitation définitif.

4.1.4.2. Les essais de pompage de longue durée

Le but des essais de pompage de longue durée est bien différent de celui des petits essais en forage. Il s'agit ici de tester la nappe dans des conditions proches des futures conditions d'exploitation, souvent même plus drastiques. Les débits seront du même ordre de grandeur mais le pompage sera continu, jour et nuits, ce qui est rarement le cas dans l'exploitation d'un réseau d'eau.

La durée de l'essai sera la plus longue possible pour se rapprocher de la réalité. Alors que les essais de courte durée donnent des informations sur la perméabilité proche du sondage, les tests de longue durée nous renseignent sur la perméabilité globale de la nappe, sur son volume et sur ses conditions aux limites. Dans ces dernières, c'est surtout le débit et le régime de la recharge naturelle de la ressource (voir chapitre 3.3.2.).

Ces données sont nécessaires pour une demande de concession. Le promoteur doit d'une part justifier le besoin, d'autre part établir quelle est la ressource exploitable de la nappe. Ce dernier point nécessite des essais de pompage de longue durée. Même si la loi sur la demande de concession pour l'exploitation d'eau du domaine public prescrit un essai de trois semaines au minimum, il est vivement recommandé de tester l'aquifère beaucoup plus longuement, en tout cas dans les nappes de grande taille.

On a intérêt à procéder aux essais de longue durée en période estivale pour simuler une exploitation pendant les mois à haute consommation. Les essais devraient durer entre 3 et 6 mois selon les cas et les moyens financiers à disposition. Les mesures de débit et des niveaux piézométriques sur toute la nappe seront couplées à de nombreuses analyses chimiques et bactériologiques. En fin d'essai, on observera la vitesse de reconstitution de la réserve pour évaluer la recharge naturelle de l'aquifère.

Cette manière de procéder offre de nombreux avantages par rapport à des essais plus courts :

- bonnes garanties sur les débits exploitables à long terme et sur la gestion future de la réserve
- bonnes garanties sur la constance de la qualité de l'eau
- mise en évidence par un réseau d'impact hydrologique des effets du pompage sur les sources de la région, les ruisseaux et les biotopes humides.

Il est avantageux de procéder à ces essais sur des ouvrages provisoires. Ainsi, les ouvrages de captage définitifs, qui sont très coûteux, ne seront construits qu'une fois la concession obtenue.

4.2. Bilan quantité - qualité de la ressource

Par les essais de pompage de longue durée, on est en mesure de connaître l'ordre de grandeur de l'alimentation moyenne de la nappe sur un cycle hydrologique. On sait également quel régime de pompage intermittent on peut obtenir en construisant tel ou tel type d'ouvrage d'explo-

tation. Ceci constitue les bases de l'évaluation quantitative.

Les diverses analyses chimiques et bactériologiques définissent la qualité de l'eau qu'il est prévu d'exploiter. Là aussi, des essais de très longue durée augmentent la fiabilité de cette évaluation en décrivant les variations de la qualité au cours de la période d'exploitation.

Ces deux bases de données permettent de concevoir les ouvrages d'exploitation définitifs qui seront les mieux adaptés à l'exploitation et à la protection de la ressource.

4.3. Infrastructure d'exploitation

Nous distinguons ici les ouvrages qui permettent de faire sortir l'eau de l'aquifère en toute sécurité et les ouvrages de distribution. L'accent est mis sur les premiers en raison de les objectifs spécifiques à ce cours.

4.3.1. Ouvrages de captages

Le choix d'un dispositif de captage dépend de plusieurs facteurs : conditions hydrogéologiques, débit nécessaire, liaison à un réseau de distribution, utilisation de l'eau, régime d'exploitation, zones de protection, moyens financiers etc. L'adaptation du captage au type d'aquifère est le facteur dominant. Les informations données dans ce cours d'hydrogéologie insistent naturellement sur ce facteur. Elles viennent en complément aux notions données dans les cours de génie sanitaire. Nous décrirons ci-dessous le ou les types de captages les plus appropriés en fonction des conditions géologiques en prenant le modèle de la géologie de la Suisse. Ces divers cas sont illustrés d'exemples réels.

4.3.1.1. Aquifères quaternaires peu épais à faible profondeur

Dans cette catégorie, nous incluons les aquifères de moraines graveleuses, de placages fluvio-glaciaires, de dépôts de recouvrement de versants et dans une certaine mesure les alluvions (voir chap 1.3.1).

Le moyen le plus approprié est la tranchée captante. En effet, elle est peu coûteuse si sa longueur est limitée. Elle est construite avec des moyens conventionnels (pelle mécanique, boisage ou palplanches). Son extension peut facilement s'adapter aux zones les plus perméables rencontrées lors de l'exécution.

La tranchée doit être protégée contre les eaux de surface par un système de collecte superposé au tuyau de captage proprement dit (figure 4.32 page 82).

La tranchée exploite mieux la nappe qu'un puits vertical puisque la nappe est peu épaisse (rayon d'action plus important). La construction de galeries est difficile en raison de la mauvaise stabilité des terrains.

4.3.1.2. Aquifères des grès molassiques

L'exploitation des eaux souterraines contenues dans la partie décalcifiée des grès molassique (voir chap. 1.3.1.3) a été faite traditionnellement par des tranchées et des galeries. Aujourd'hui la technique de forage offre une meilleure solution avec les chambres de forages rayonnants subhorizontaux (figure 4.33 page 83). On creuse un puits de quelque 4 m de diamètre et de 6 à 7 m de profondeur pour être dans la zone saturée de l'aquifère. On y descend une foreuse. Plusieurs forages sont exécutés dans la molasse, sans tubage, d'une longueur pouvant atteindre une centaine de mètres. On adapte leur azimut à la direction d'écoulement de la nappe et aux directions de fissuration pour obtenir un rayon d'action maximal. On varie aussi leur inclinaison pour capter les eaux des joints de stratification.

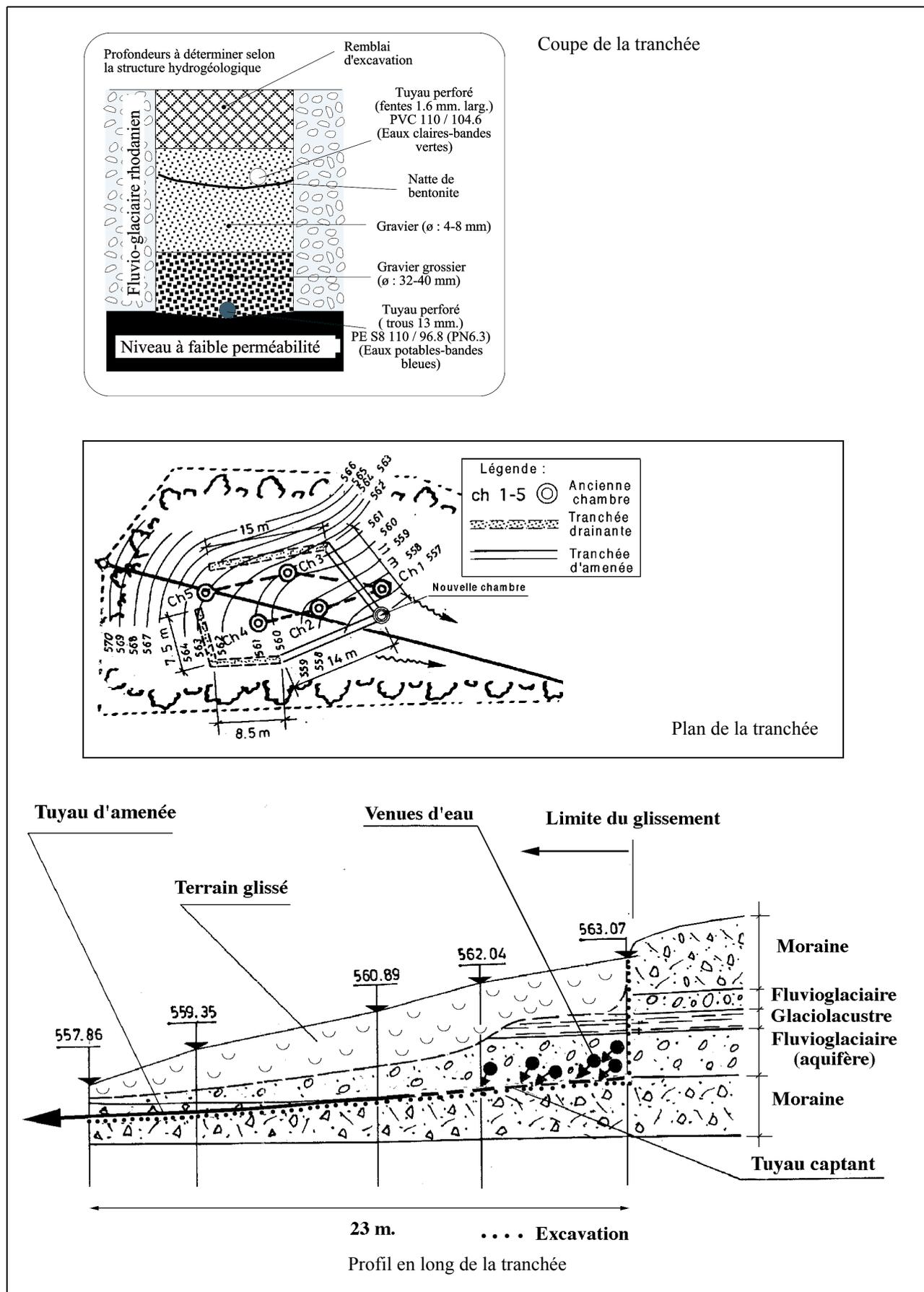


Figure 4.32: Exemple de tranchée captante en terrain meuble (source de Biscou, Begnins).

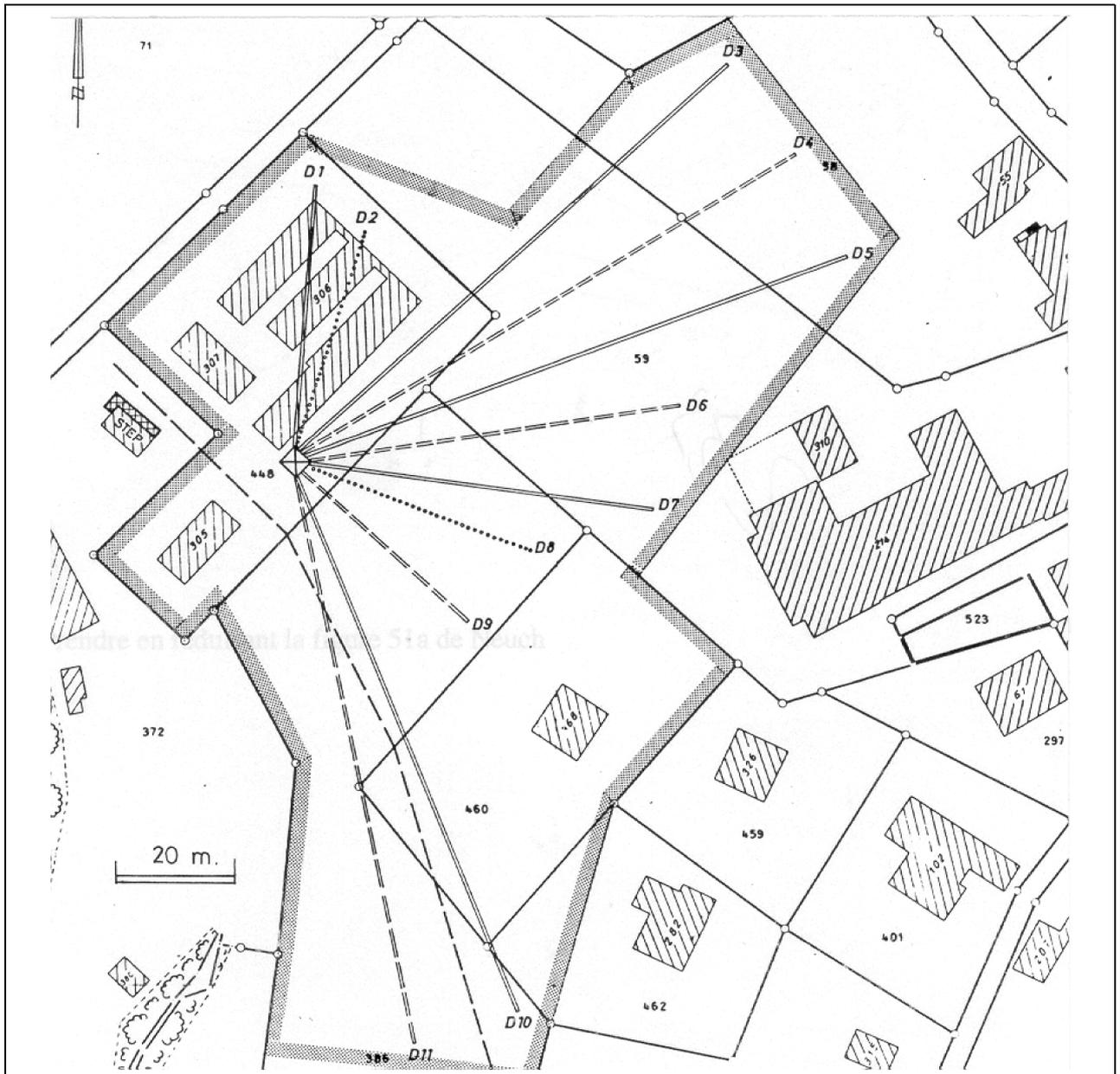


Figure 4.33: Exemple de captage par forages rayonnants en molasse : source Rossy à Froideville. Les forages rayonnants ont une grande souplesse d'adaptation à la géométrie du site de captage.

Le coût de ces dispositifs est supérieur aux tranchées mais le rendement est meilleur. On a avantage à exploiter ces captages par des vannes sur les forages pour ne prélever l'eau qu'en fonction de la demande. Sans cette mesure, leur rendement est tellement élevé qu'ils dépriment rapidement la réserve. Les forages verticaux sont peu efficaces en raison de la faible épaisseur et la faible perméabilité de la molasse. Les galeries sont aujourd'hui trop coûteuses pour les débits exploitables.

4.3.1.3. Aquifères quaternaires profonds ou épais

Ce sont les graviers et sables des plaines alluviales, des deltas, des sillons et terrasses fluvio-glaciaires (voir chap 1.3.1.1 et 1.3.1.2).

Seules les techniques de puits sont envisageables. Il faut distinguer deux systèmes qui ont des propriétés bien différentes.

4.3.1.3.1. Puits filtrants verticaux

Leur exécution est la même que celle des puits d'essai (voir chap 2.4.1). La différence est dans le diamètre qui en général un peu supérieur et dans l'équipement : crépine en matière noble (acier zingué, acier inox, métal recouvert de matière synthétique), avant-puits avec chambre de commande etc (figure 4.34 page 84).

Le puits d'essai exécuté, on procède aux opérations de développement du puits. Elles consistent à créer des conditions hydrauliques instables par de subites charges et

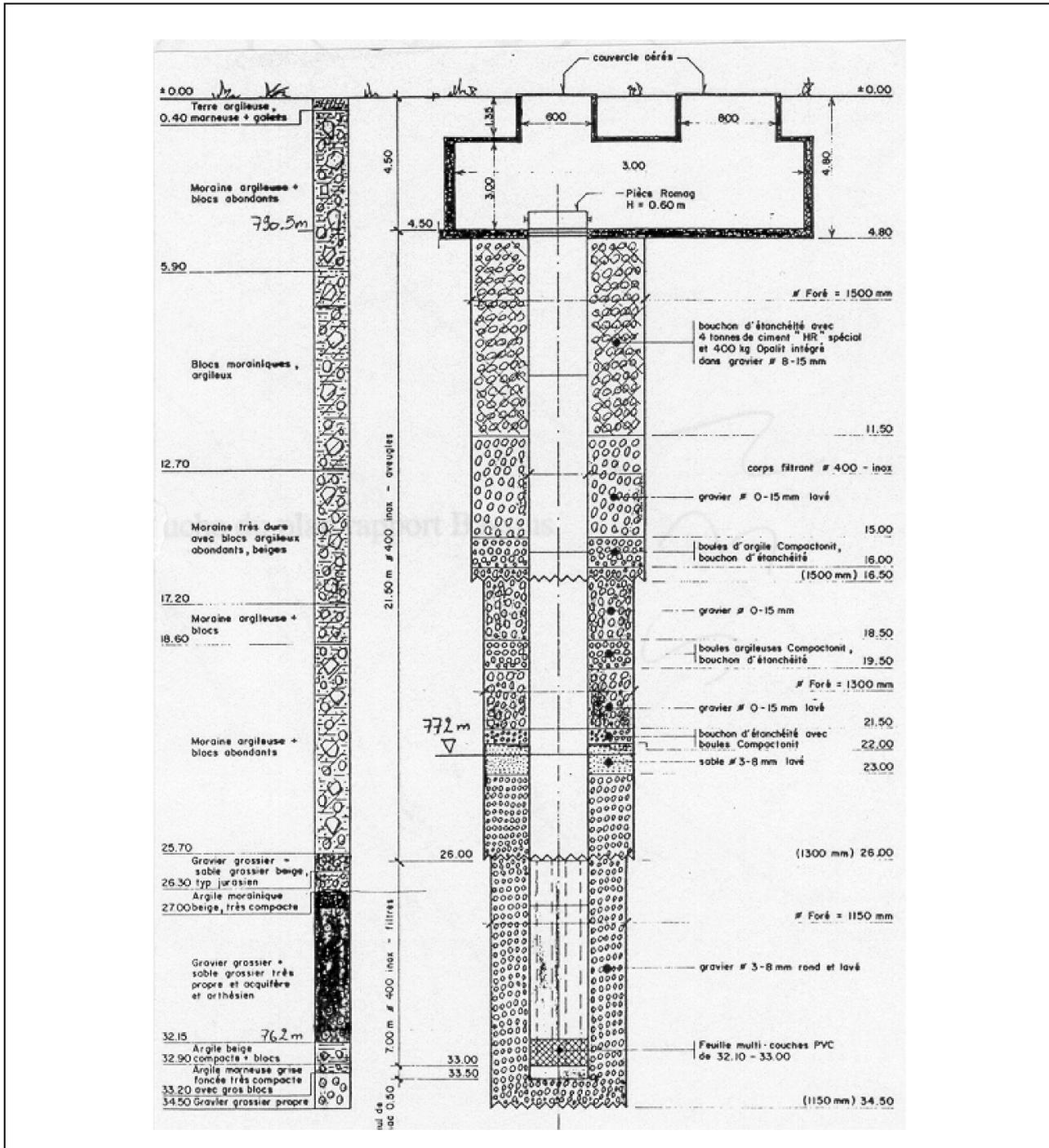


Figure 4.34: Exemple d'un puits filtrant vertical d'exploitation : puits artésien de Bassins (voir aussi figure 3.5 page 33)

décharges hydrauliques dans le puits ou dans un segment du puits. Plusieurs systèmes peuvent être utilisés comme par exemple le pistonage (figure 4.35 page 85). Ces opérations déstabilisent les particules fines de l'aquifère proches du massif filtrant qui sont entraînées dans le dépotoir du puits. Il se forme des ponts granulaires sur les fentes de la crépine ou au contact du massif filtrant. On arrive ainsi à augmenter de facto le rayon du puits en diminuant les pertes de charge près de l'ouvrage et à augmenter son rendement.

Ce genre de puits est adapté si l'aquifère est suffisamment épais et homogène. Il se prête à une exploitation de l'aquifère avec des débits instantanés peu différents du débit moyen.

Par son coût relativement peu élevé et sa faible emprise au sol, le puits vertical offre toute la souplesse nécessaire pour constituer des rideaux de puits qui exploitent complètement un large front de nappe comme par exemple dans les deltas (figure 4.36 page 85).

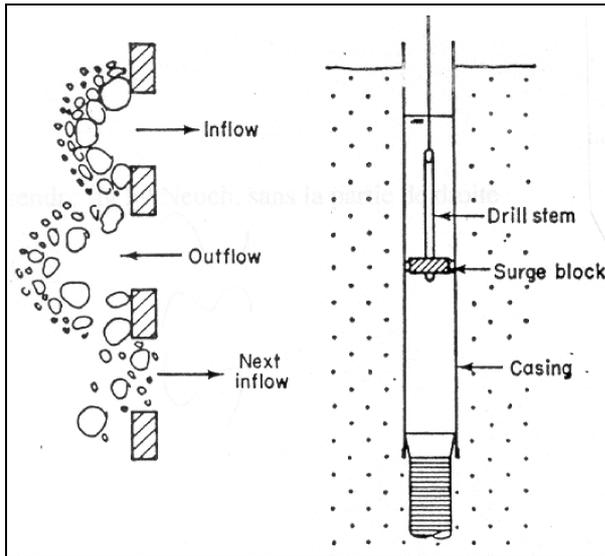


Figure 4.35: Développement des puits par pistonage

est ensuite vidé et on descend une puissante presse hydraulique qui va pousser des tubages subhorizontaux d'environ 30 cm de diamètre avec une tête perdue sur plusieurs dizaines de mètres. On introduit dans chaque drain une crépine faite de disques de polyéthylène à haut indice d'ouverture (brevet Fehlmann), dont les espacements sont adaptés à la granulométrie de l'aquifère. Le tubage est ensuite retiré et le terrain vient s'appuyer sur la crépine.

Les drains sont rayonnants. Ils s'adaptent à la géométrie de la couche aquifère. Ils sont souvent disposés en plusieurs étages. Chaque drain est muni d'une vanne qui permet de commander son ouverture.

Ce genre de puits est très performant dans le cas des aquifères relativement minces ou à géométrie complexe comme les alluvions chenalisées ou des panneaux cloisonnés (figure 4.38 page 87). Leur rayon d'action est très grand. Ils permettent des débits d'exploitation instantanés très élevés. Ils souffrent malheureusement d'un coût très important.

4.3.1.3.2. Puits à drains horizontaux

Les puits à drains horizontaux sont des ouvrages constitués d'un puits de gros diamètre (3 à 5 m) en béton armé qui est descendu dans l'aquifère par havage. L'élément de tête est muni d'une trousse coupante avec injection de bentonite. Une dragueline exploite le matériel avec un grappin au fur et à mesure de la descente, en veillant à maintenir une charge hydraulique plus élevée que dans la nappe pour éviter un claquage du fond. Une fois la profondeur atteinte, un homme grenouille nettoie le couteau et on bétonne un fond étanche. Le puits lui-même étanche

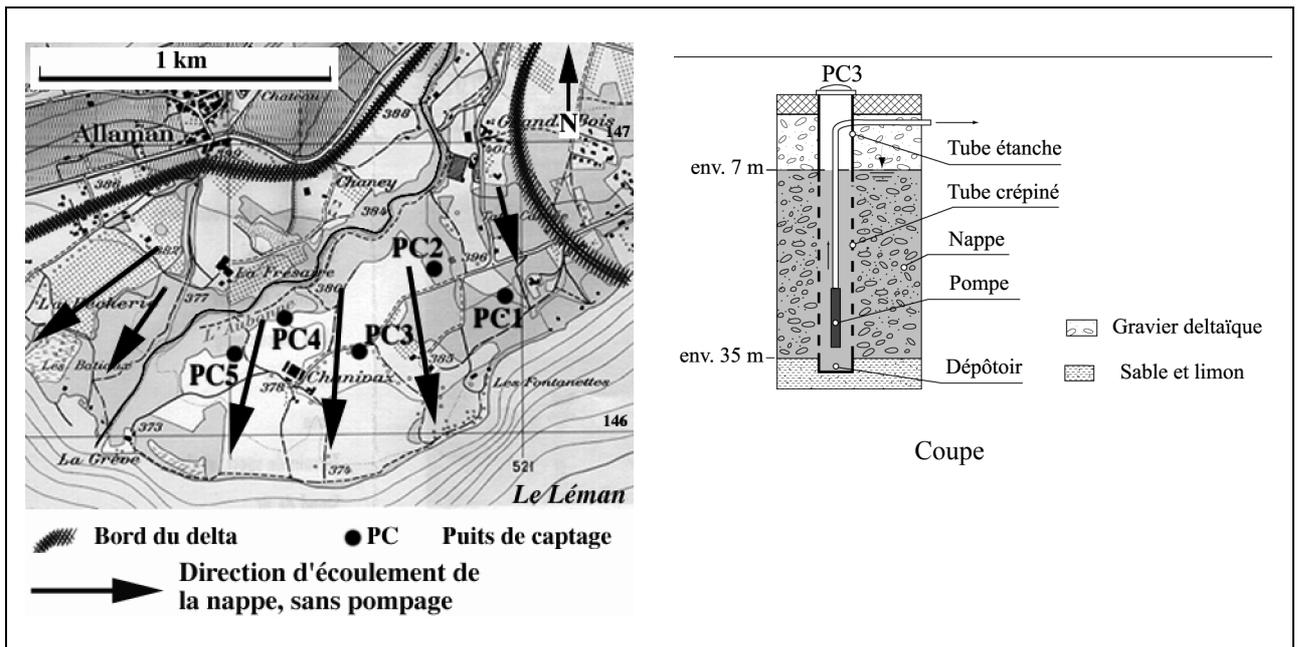


Figure 4.36: Rideau de puits exploitant la nappe dans le delta de l'Aubonne. Carte reproduite avec l'autorisation de l'Office fédéral de topographie du 19.2.1999.

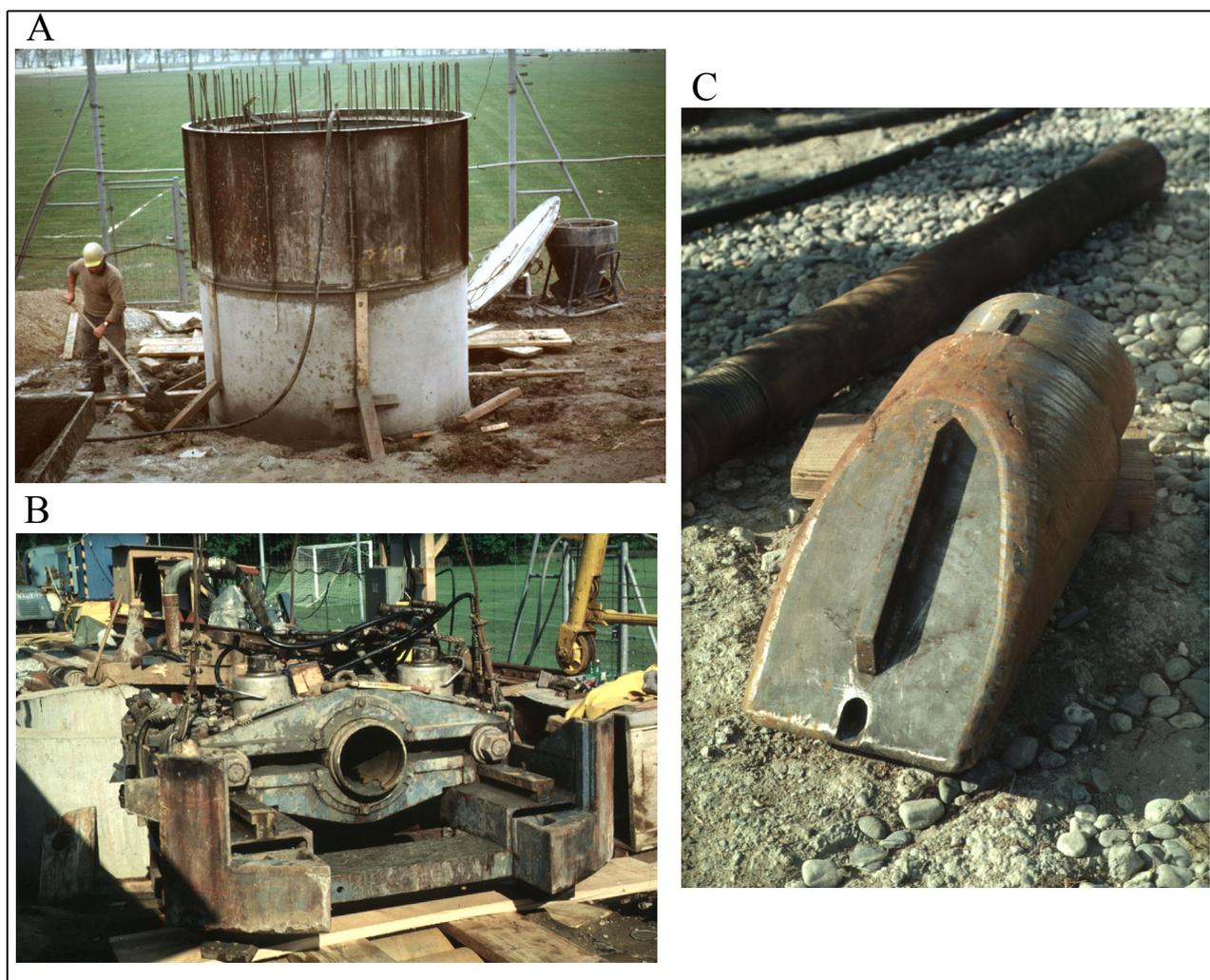


Figure 4.37: Puits à drains horizontaux du projet SPEOS (stockage d'eau chaude en nappe souterraine) dans le delta de la Chamberonne (Lausanne-Dorigny)

A: Puits en béton armé descendu par havage

B: Presse permettant le poussage du tube dans l'aquifère

C: «taupe» = tête en bout de tubage, percée pour laisser pénétrer les grains de l'aquifère. Abandonné en fin de poussage

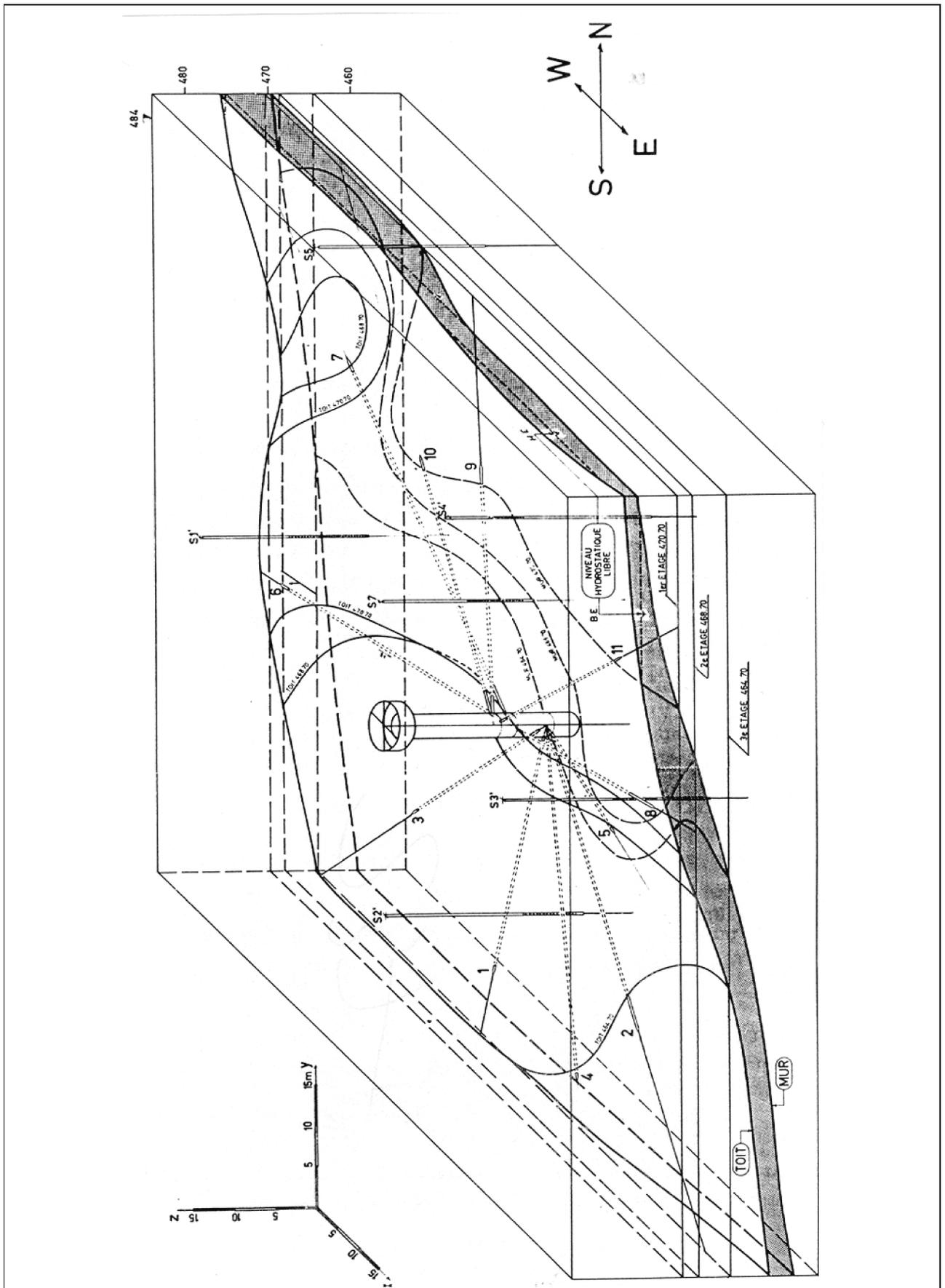


Figure 4.38: Puits à drains horizontaux dans les alluvions complexes de la Broye à Lucens.

4.3.1.4. Aquifères rocheux profonds ou épais

Ils comprennent aussi bien les aquifères karstique que fissuraux. Il faut distinguer ici la configuration en fond de vallée et celle en versant.

4.3.1.4.1. Aquifères de versant

Le système de forage rayonnants non tubés se prête bien

à l'exploitation de ces aquifères quand la cible n'est pas trop éloignée de la surface, notamment près des points d'exutoire (voir chap 2.5.2). La chambre de forage est placée au fond d'une courte galerie (voir fig 2.11 au chapitre 2.4.1.5).

Si la cible est plus profondément implantée dans le versant, il est indispensable de réaliser une galerie qui permet l'accès à la zone aquifère (figure 4.39 page 88).

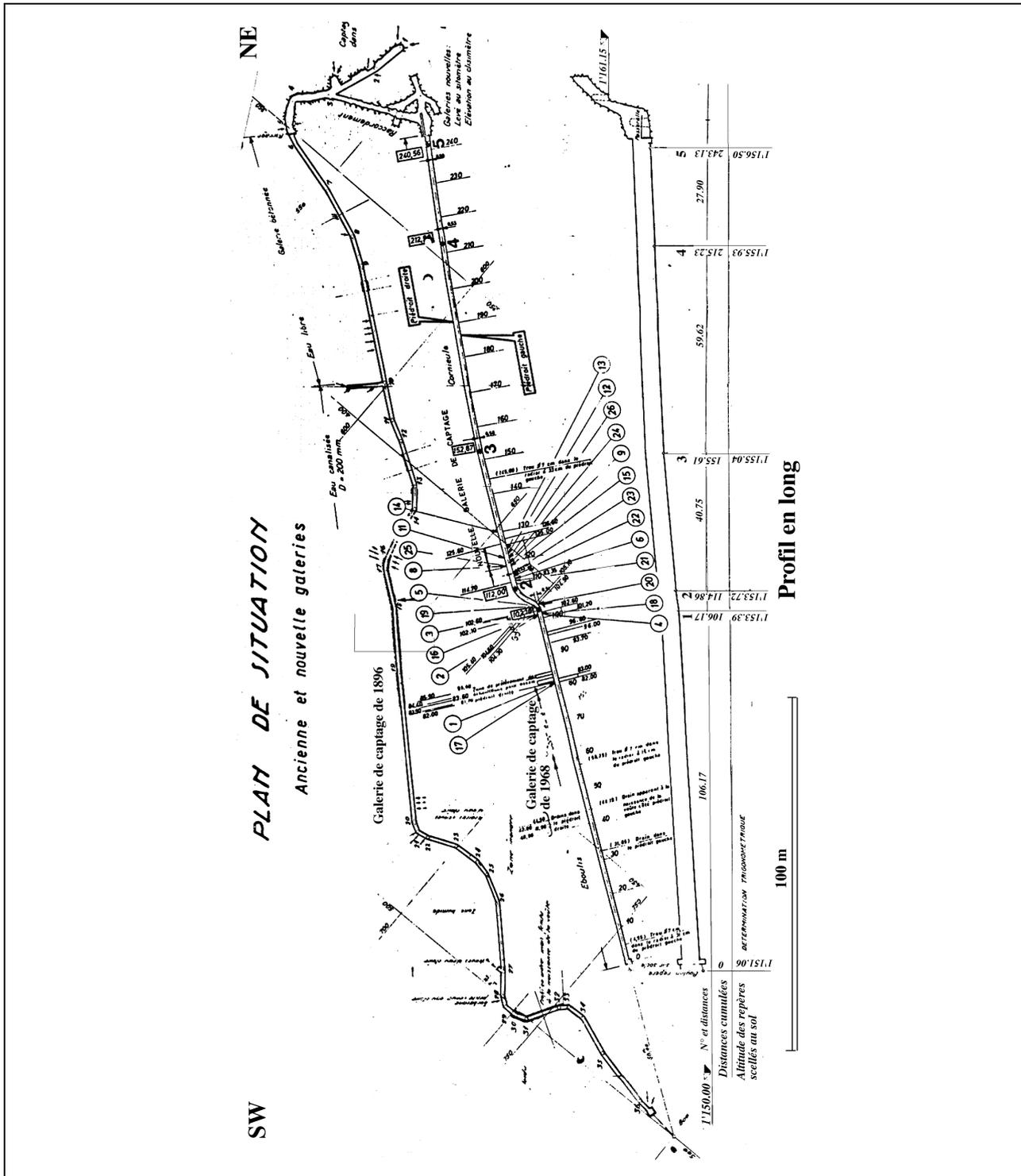


Figure 4.39: Galerie drainante de versant dans les calcaires de la nappe des Préalpes médianes rigides. Exemple de la galerie des Bornels, eaux de la Ville de Lausanne, L'Etivaz (VD), voir aussi la figure 2.12 page 21.

4.3.1.4.2. Aquifères de fond de vallée ou de plateau

La seule possibilité dans un tel cas est le puits foré profond vertical (ou parfois légèrement oblique). Il est exécuté par sondage au rotary (voir chap 2.3.1.3). Quelques puits de ce type ont été construits dans le Jura calcaire où les nappes karstiques sont à quelques centaines de mètres de profondeur (figure 4.40 page 89).

En aquifère rocheux, on utilise des techniques de développement qui peuvent augmenter la perméabilité de

l'aquifère à une certaine distance du forage :

La fragmentation mécanique

La technique à l'explosif est courante et bon marché. On peut obtenir un résultat analogue avec la fracturation hydraulique du rocher, avec ou sans ajout de billes d'acier dur qui maintiennent les fissures ouverte après le relâchement de la pression. Mais cette technique est coûteuse et peu courante.

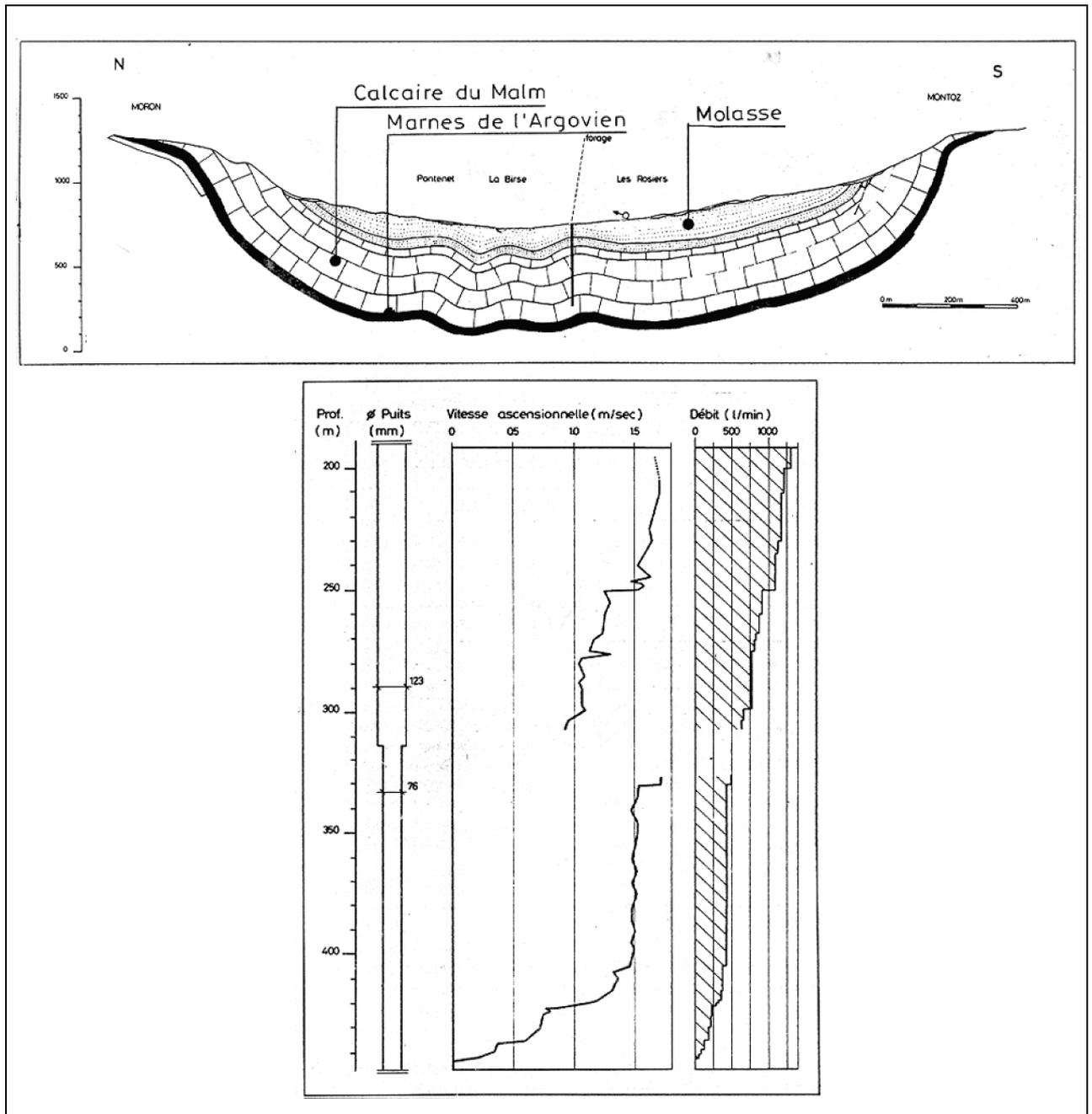


Figure 4.40: Puits foré profond dans le karst du Malm jurassien. Cas du puits artésien de Ponteney, Val de Tavannes (d'après Schindler et Mornod). Situation géologique du forage, diamètres utilisés et diagramme des vitesses et débit mesurés au flowmeter.

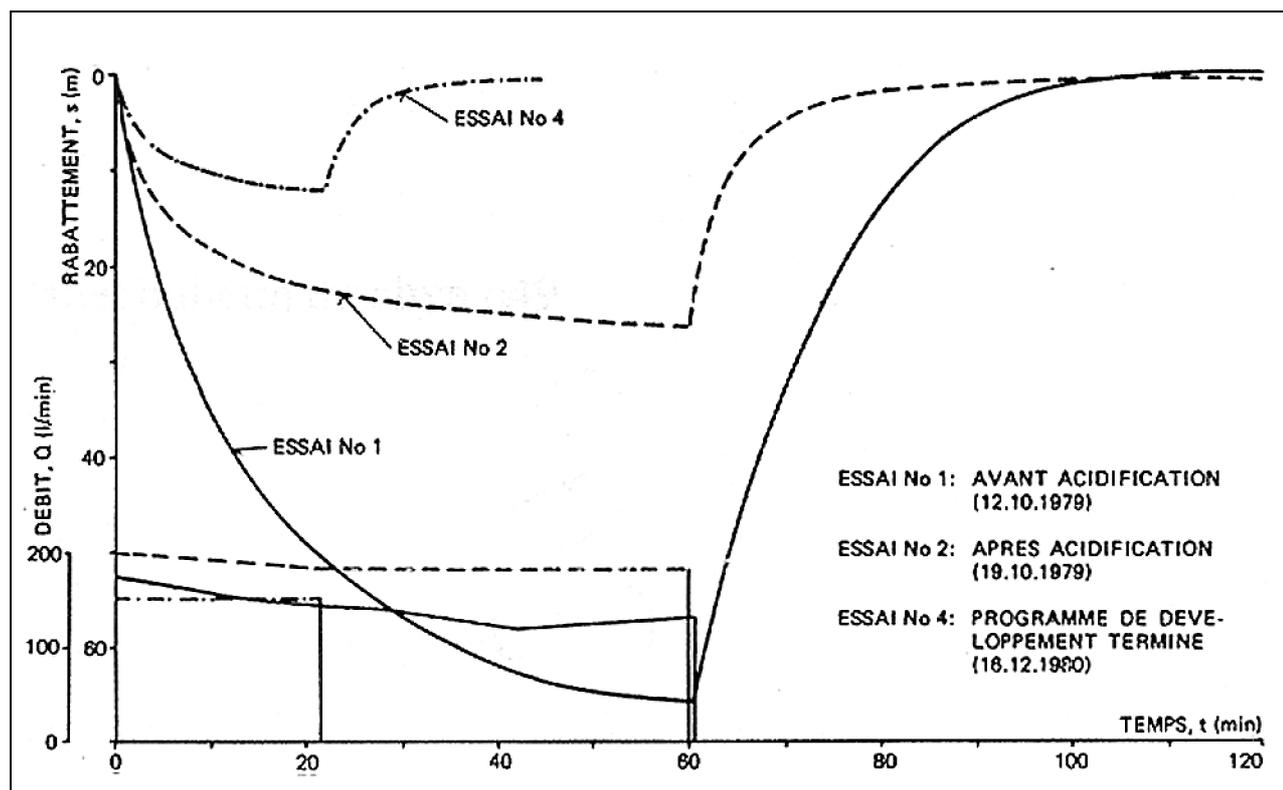


Figure 4.41: Exemple d'un gain de rendement de forage de Grellingen dans les calcaires du Dogger du Lauffonnais par acidification et développement hydraulique (tiré de Tripet).

Le traitement chimique

En aquifère à composante calcaire importante, on procède à une acidification à HCl par injection sous pression qui dissout les parois des diaclases et élargit ainsi le passage pour l'eau (figure 4.41 page 90). On couple ce traitement parfois avec l'injection de substances chimiques qui défont les agrégats argileux (tri-polyphosphates de sodium), complexent les gels d'hydroxydes de fer (acide citrique) et permettent le curage des pores envahis par des résidus insolubles.

4.3.2. Systèmes de distribution

Les ouvrages de distribution des eaux appartiennent à un système d'alimentation, dont la complexité peut être plus ou moins élaborée.

Système local autarcique

Les eaux arrivent gravitairement ou par pompage à un réservoir situé au minimum une dizaine de mètres au-dessus de la zone à alimenter. La taille de ce réservoir doit permettre la gestion journalière et hebdomadaire. Cet ouvrage contient un premier compartiment qui doit toujours être rempli qui correspond au volume nécessaire pour la défense incendie. Le second amène l'eau par le réseau gravitaire aux immeubles.

Système régional interconnecté

On tend à augmenter la sécurité d'alimentation en eau en créant des connexions entre les réseaux locaux. Ceci est très important en cas de pénurie d'un des captages ou en cas de pollution. Une véritable gestion demande - offre est obtenue grâce à une automatisation du système (figure 4.42 page 91)

Les agglomérations en forte pente ont intérêt à créer des sous-réseaux par paliers d'altitude, ce qui permet d'optimiser les économies d'énergie.

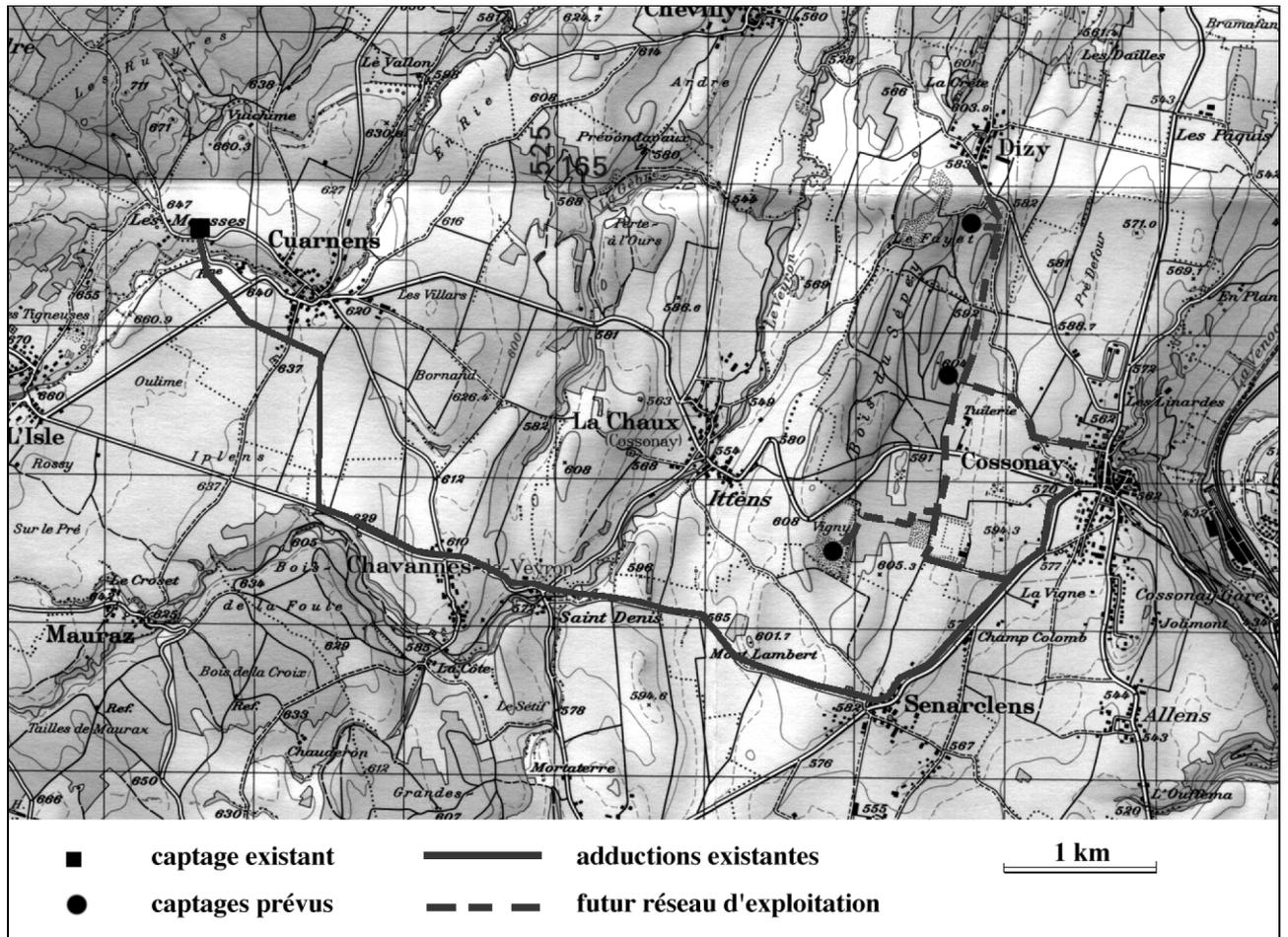


Figure 4.42: Futur réseau d'exploitation de la nappe souterraine du Bois du Sépey, Communes de Cossonay et Dizy.

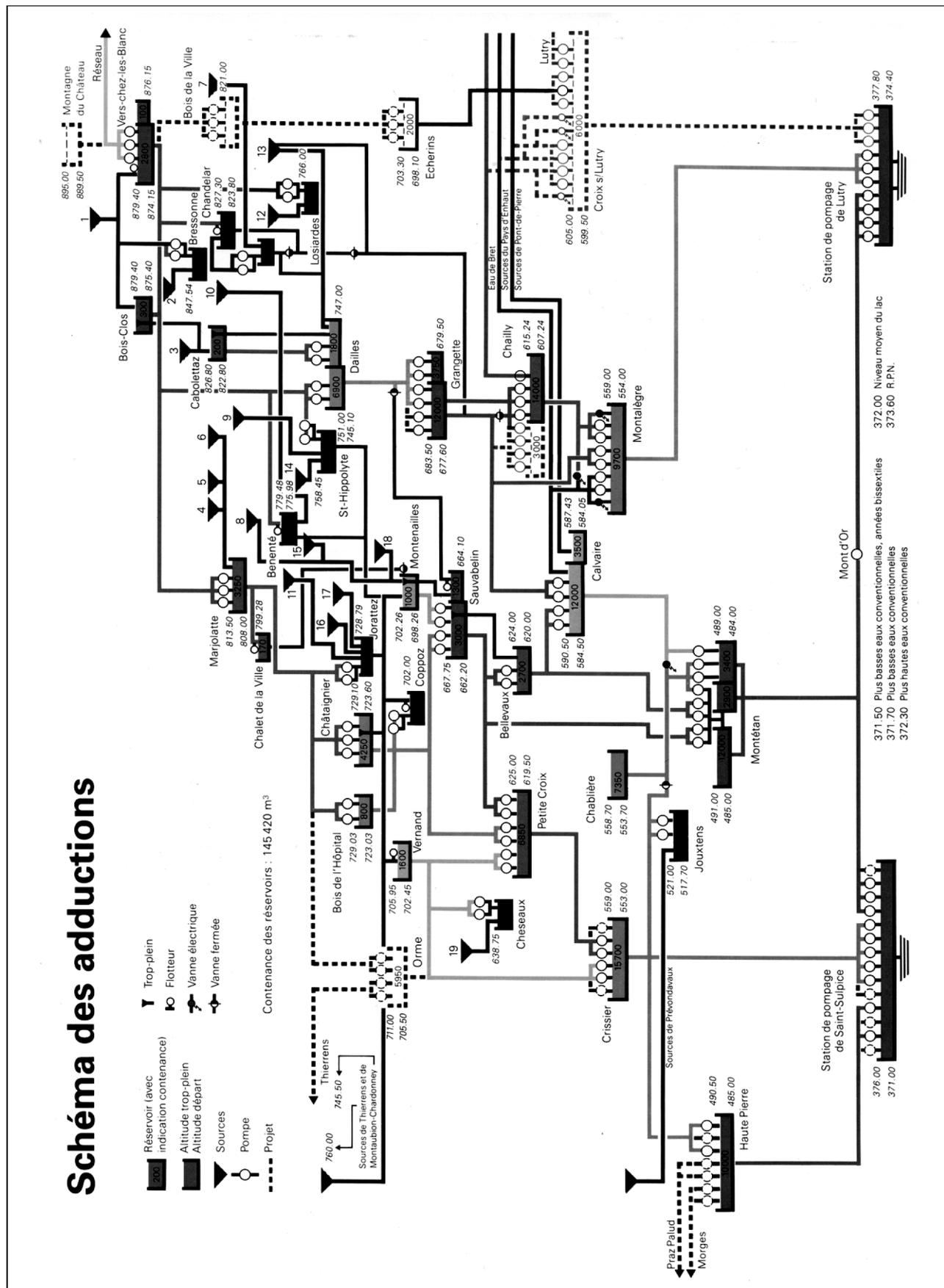


Figure 4.43: Schéma des adductions et de la distribution d'eau de boisson de la ville de Lausanne. Exemple de réseau complexe, à plusieurs étages.

4.4. Mesures de protection

En Suisse, la Loi fédérale sur la protection des eaux fixe le découpage du pays en régions de degré de protection différencié. Selon le critère eau souterraine, on distingue, de la servitude maximale à la servitude la plus basse (figure 4.44 page 93) :

Les zones de protection du captage (S1)

Cette zone correspond aux quelques mètres carrés qui entourent une source ou un puits livrant de l'eau au public. Tout usage du sol y est prohibé.

Les zones de protection rapprochée (S2)

En général de un à quelques hectares en amont d'un captage, cette zone doit garantir une épuration biologique naturelle des eaux d'infiltration et une éventuelle intervention en cas d'accident d'hydrocarbures. Elle est inconstructible. Dans les régions karstiques, sa taille peut être beaucoup plus importante.

Les zones de protection éloignée (S3)

Ce sont des zones de transition entre les zones S2 et les secteurs A. Leur extension est un peu plus élevée que la zone rapprochée. La construction y est possible avec des

mesures particulières concernant le stockage des hydrocarbures et la collecte des eaux usées.

Secteurs S

Il s'agit de la somme des zones S1, S2 et S3.

Périmètres

Ce sont des superficies qui servent de zones de protection provisoires avant la réalisation d'ouvrages de captage. On les utilise par exemple pour réserver des surfaces non construites pour pouvoir exploiter une nappe dans le futur.

Aires Z_u

Les captages qui souffrent de déficiences chimiques persistantes doivent être protégés spécialement contre ce genre de contaminant. Ce sont des substances d'origine agricole comme les nitrates ou industrielle (métaux lourds, hydrocarbures etc.). Des mesures tendant à limiter les émissions y sont appliquées.

Les secteurs A

Ces régions recouvrent les aquifères principaux du pays,

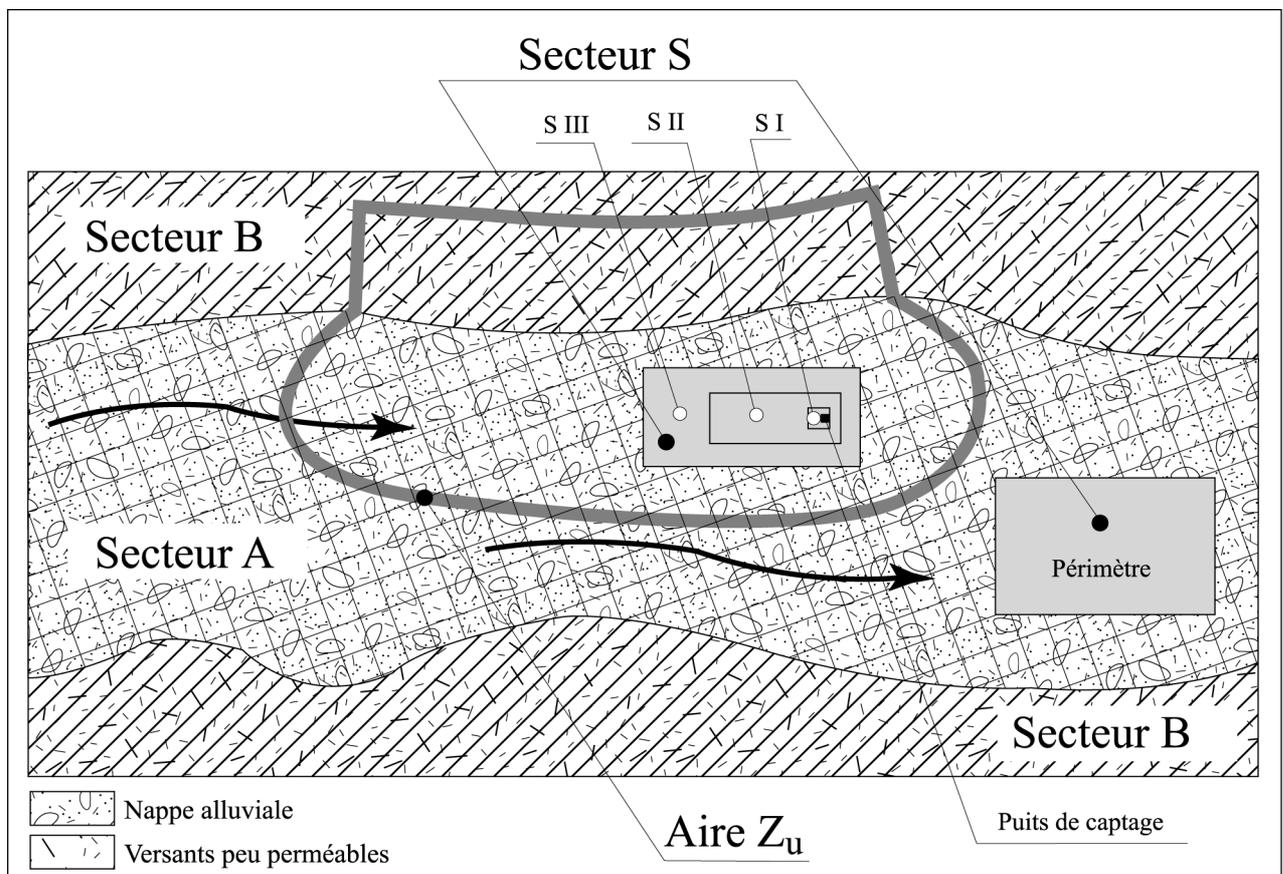


Figure 4.44: La zonification du territoire en fonction de la protection des eaux souterraines.

indépendamment de captages particuliers.

Les secteurs B

C'est le reste du territoire, dépourvu de ressources en eaux souterraines ou ne contenant que des aquifères de faible quantité ou de qualité médiocre.

Cette zonification est déterminée par des hydrogéologues. Elles sont basées sur des observations de terrain,

des analyses et des calculs de temps de transit des eaux dans la couverture des aquifères et dans les aquifères eux-mêmes.

Exercice 4.4 : Prospection de ressources en eau de boisson (voir annexe II).

4.5. Conclusion

La mise en valeur des ressources en eau souterraine est une longue chaîne d'étapes faisant intervenir des méthodes très diverses. Elle implique des investissements considérables et souvent plusieurs années d'études. Les maîtres d'ouvrage ont souvent de la peine à comprendre ce processus. Il est indispensable que ses conseils scientifiques et techniques, l'ingénieur et le géologue, travaillent ensemble dans le même esprit méthodique. C'est l'unique moyen d'obtenir les meilleures chances de succès pour découvrir de nouvelles ressources en eau de qualité et de mieux les gérer.

Annexe I : Principaux textes légaux.

Principaux textes législatifs suisses sur la protection des eaux souterraines

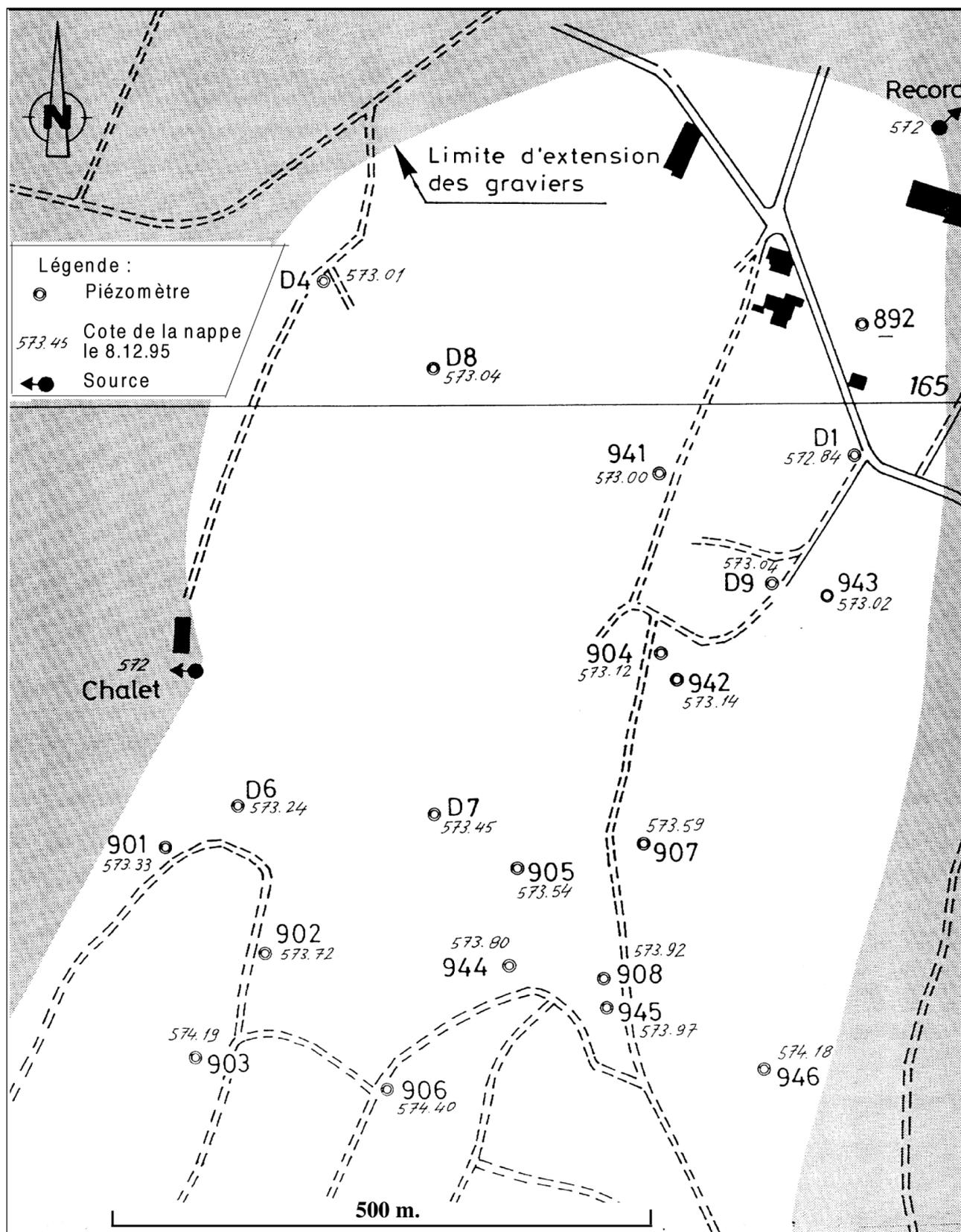
LEaux	Loi fédérale du 24.01.91 sur la protection des eaux
LPE	Loi fédérale sur la protection de l'environnement du 7 octobre 1983
OEaux	Ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998
OPAM	Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs du 27 février 1991
OPEL	Ordonnance sur la protection des eaux contre les liquides pouvant les altérer du 28 septembre 1981
OSEC	Ordonnance sur les substances étrangères et les composants dans les denrées alimentaires du 6.10.1989 (état le 11.8.1999)
OSOL	Ordonnance sur les polluants du sol du 9 juin 1986
OSUBST	Ordonnance sur les substances dangereuses pour l'environnement du 9 juin 1986, (état le 10.8.1999)

Annexe II : Exercices (hors cahier)

Exercices

Exercice 2.1. Délimitation d'un bassin hydrogéologique

On donne ci-dessous le réseau piézométrique implanté dans la gravière de Dizy qui exploite les graviers de la partie nord du sillon fluvio-glaciaire du Bois du Sépey à Cossonay. On a reporté à côté des piézomètres les cotes de la nappe souterraine à la date du 8.12.95. Les exutoires de la nappe sont deux sources figurées sur la carte (Record et Chalet). Dessiner par la méthode graphique le réseau d'écoulement (isopièzes et lignes de courant). En déduire la limite des bassins hydrogéologiques des exutoires naturels.



Réseau piézométrique implanté dans la gravière de Dizy.

Exercice 4.1 : Sismique.

Vous devez effectuer l'étude d'une zone de protection d'une source karstique dans le Jura. L'eau est captée directement dans le rocher. En amont du captage, le calcaire n'est plus affleurant et doit donc être recouvert de terrains quaternaires dont vous ignorez la nature et l'épaisseur.

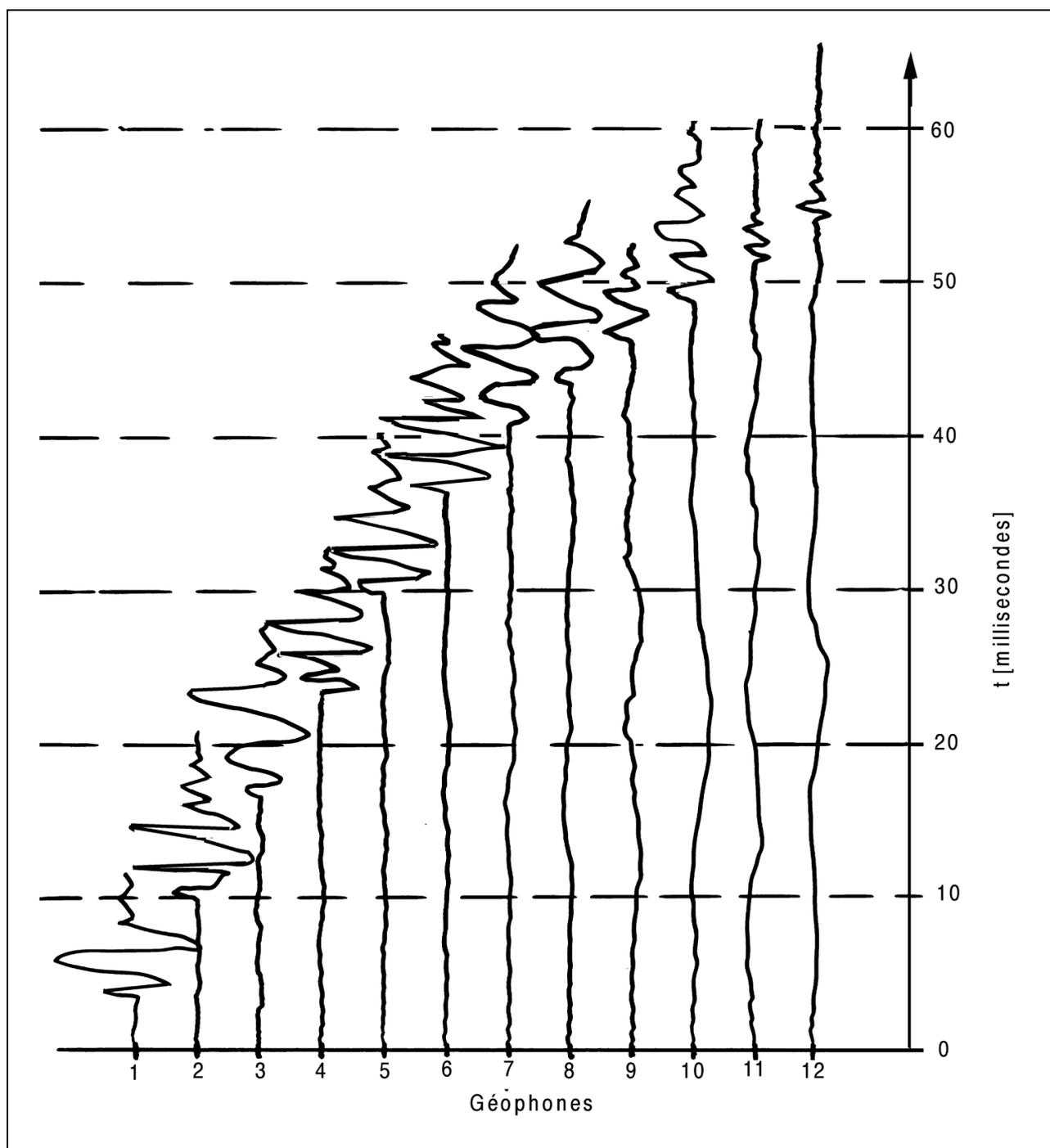
Vous avez réalisé dans ce secteur un sondage sismique pour préciser ce recouvrement. L'enregistrement du sismographe à 12 pistes est donné ci-dessous.

Veuillez interpréter ce résultat selon les méthodes données au cours. La distance entre géophones est de 10 m. Le tir est à 5 m. du premier géophone.

Déterminez la structure géophysique. On admet que les contacts sont horizontaux.

Quel modèle géologique en tirez-vous?

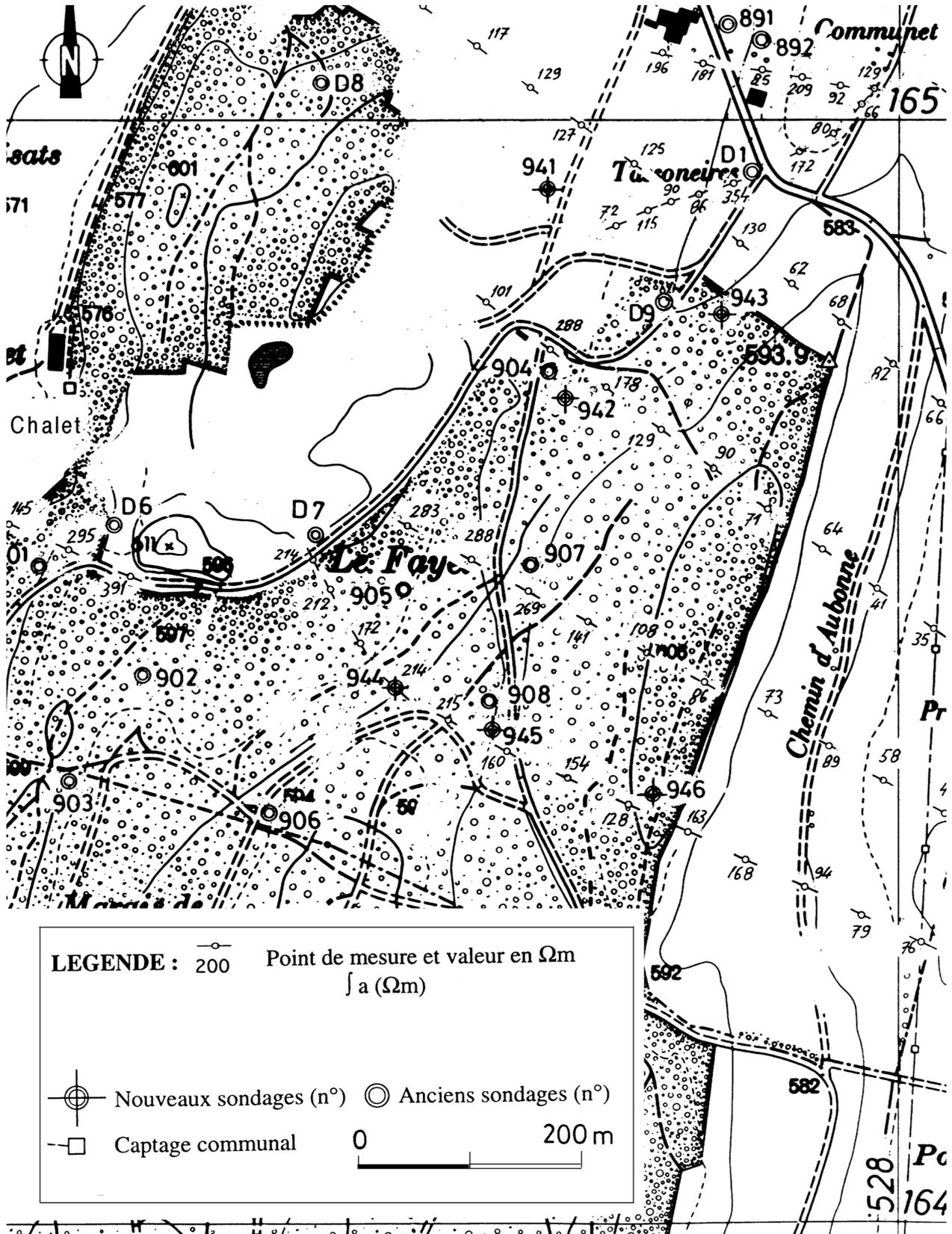
Qu'en déduisez-vous sur la zone de protection à définir?



Enregistrement du sismographe à 12 pistes

Exercice 4.2 : Carte des résistivités électriques apparentes.

On donne une carte portant les valeurs de traîné électrique dans la région de Dizey avec une ligne AB=60 m. Tracer des lignes choisies d'équirésistivité. Comparer cette carte avec celle de l'exercice 2.1. Que pouvez-vous en déduire sur la correspondance géophysique-hydrogéologie?



Exercice 4.3 : Sur les mesures au flowmeter de forage.

Des sondages implantés dans la zone de décharge de la Lonza, entre Visp et Brig sur la rive gauche de la plaine du Rhône, ont été testés au flowmeter afin de déterminer la répartition de la perméabilité sous la décharge et autour de la zone de déchets. L'un d'eux, le sondage 327, se situe en aval de la décharge, au pied d'un cône de déjection.

Je vous donne ci-dessous les mesures faites dans le sondage 327 que je vous demande d'interpréter.

Le profil géotechnique et l'équipement du sondage sont donnés en annexe. Le relevé des carottes est sommaire. Il faut traduire G = gravier, S = sable, l = limons. Géologiquement, ces dépôts sont des sédiments de cônes de déjection, au pied d'un versant de schistes carbonifères.

La courbe d'étalonnage pour les tubes 4 pouces est donnée en annexe.

Observations dans le sondage 327

Saillie du piézomètre : 1 m.

Niveau de repos : 3.88 m.

Fond du sondage : 10.80 m.

(les niveaux sont mesurés par rapport au sommet du tube piézométrique)

Mesure flowmeter au repos

Pas d'écoulement détecté ($Q_z < 1$ l/mn)

Mesure en pompage

Crépine de la pompe aspirante placée à 5 m. de profondeur

Un débit de 18.8 l/mn a été pompé durant 1 heure. Le rabattement s'est vite stabilisé à une valeur de 0.86 m.

Les mesures discrètes au flowmeter ont été faite durant ce pompage. On a obtenu :

Profondeur de mesure (m)	Période hélice (microsecondes)
10.5	3'080'000
10	1'860'000
9	546'000
8	490'000
7	421'000
6	373'000

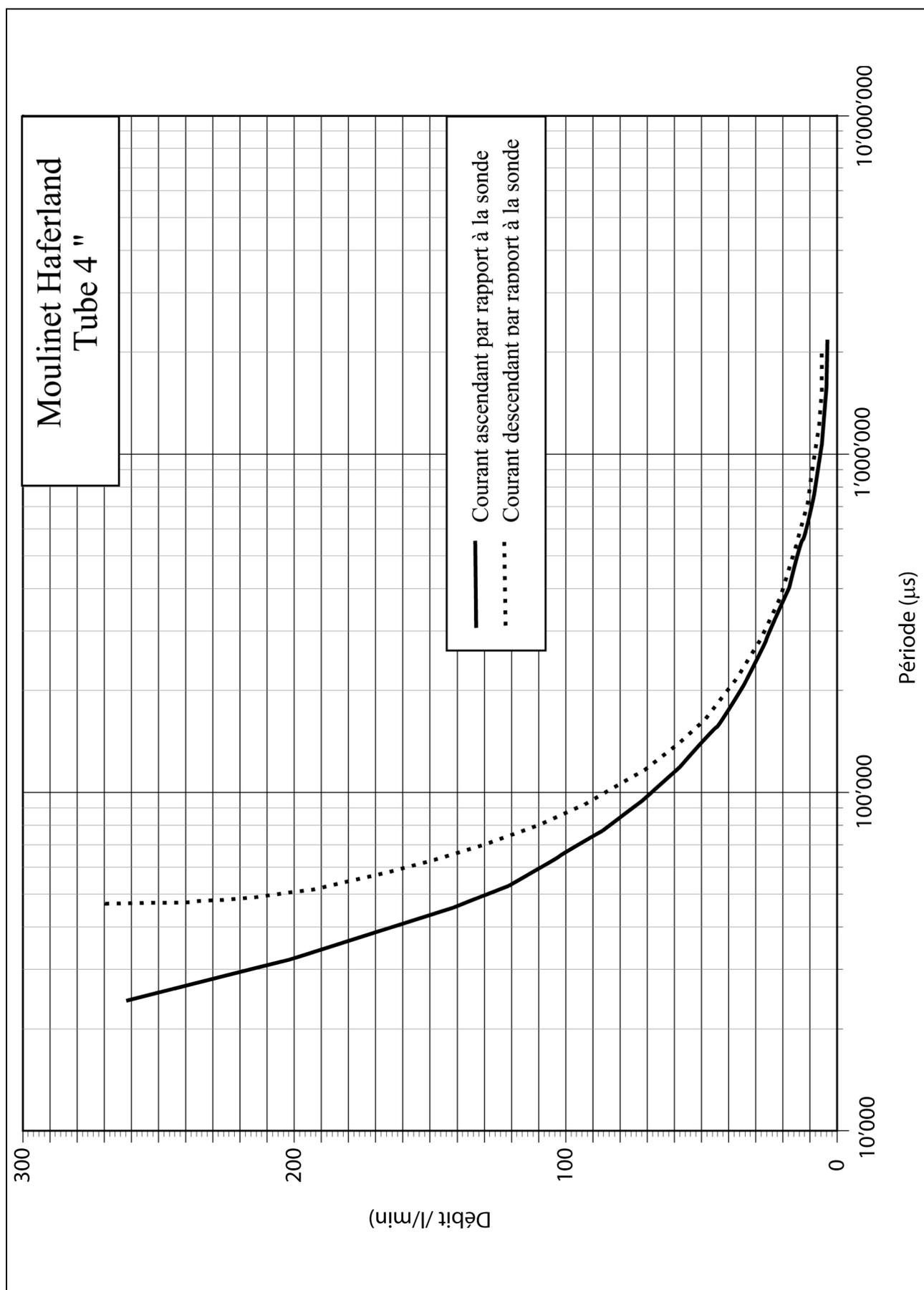
Veuillez calculer et représenter graphiquement le profil de perméabilité obtenu par ces mesures. Calculer la perméabilité moyenne sur toute la hauteur. Que peut-on dire des écoulements souterrains dans cette couche aquifère ?

Annexes : Profil géotechnique et équipement du sondage 327.

Courbe d'étalonnage du tube 4 pouces.

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne Laboratoire de Mécanique des sols Date d'exécution : 7-11.9.1984		Etude de la décharge de la Lonza SA à Viège Sondage n 327 Profondeur : 10.00 m						
Profondeur (m)	Profil	Eau nappe	Description lithologique		Equip.	Echantillon	Méth. sond	Ø carottier
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10			Terre végétale	gris-brun	Tube plein			
			S fin lg	gris				
			Gsl	gris				
			S fin + g l + pierres	gris-beige				
			Gsl + pierres	gris				
			Sf l g assez compact	gris				
			Gsl pierres	gris-beige				
			Blocs					
			Gsl + quelques pierres	gris-beige				
			Blocs					
			G + s.l	gris				
			G + sl + pierres et blocs + compact	gris				
			G + sl + pierres	gris-beige				
			Gsl + pierres	gris-beige				
			Sfin . g . l + pierres	gris-beige				
			Pierres et blocs					
S moyen - gros g + pierres	gris-beige							
Gsl + pierres	gris							
				Tube perforé		Rotation à sec	ø 145	

Profil géotechnique et équipement du sondage 327.



Courbe d'étalonnage tube 4 pouces

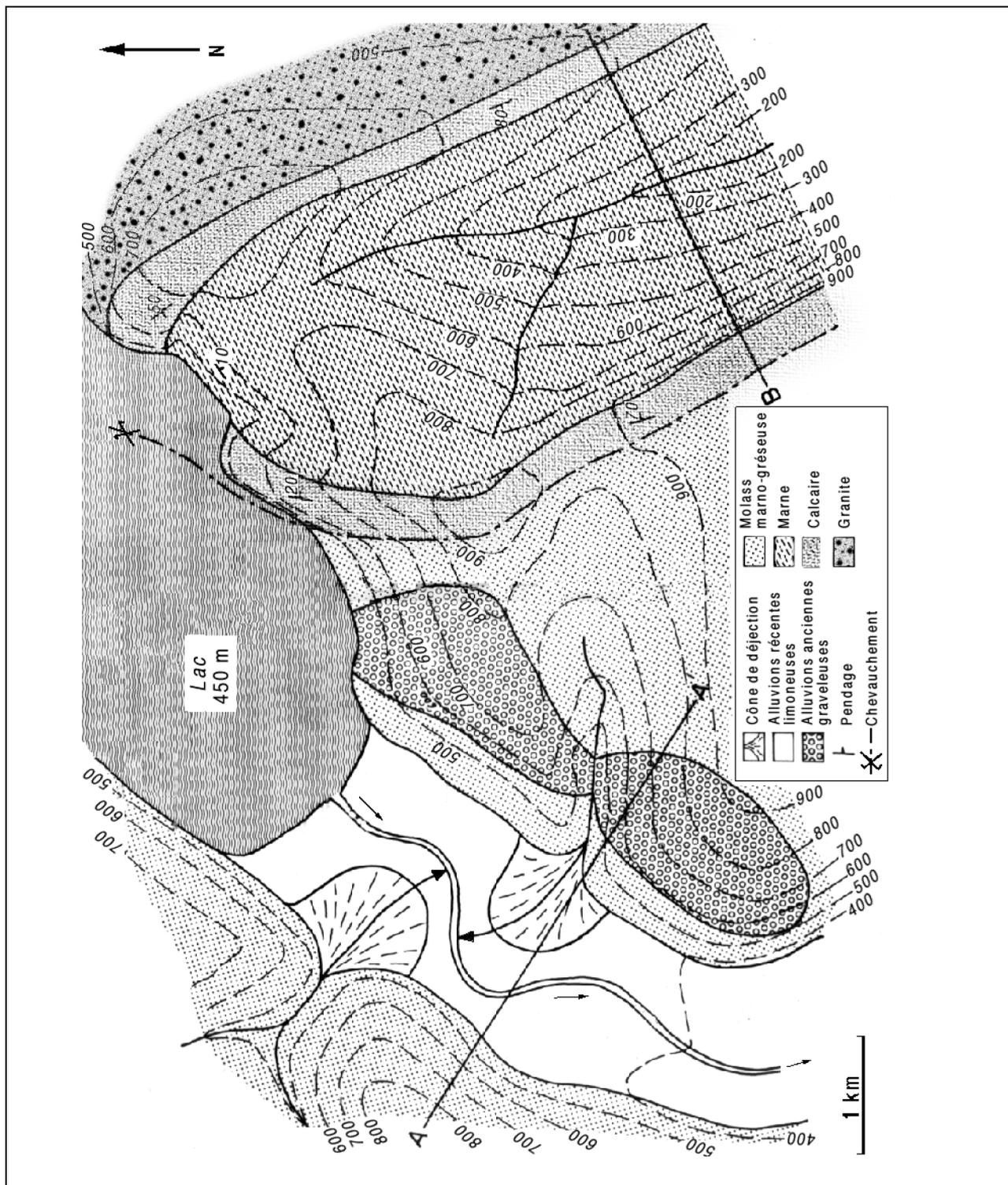
Exercice 4.4 : Protection de ressources en eau de boisson.

Vous êtes mandatés par une association de communes de la région figurée sur la carte ci-jointe. Vous êtes chargés de découvrir de nouvelles ressources en eau de boisson.

Pouvez-vous identifier des cibles hydrogéologiques à prospector ?

A priori, caractériser la quantité et la qualité des eaux que vous pensez découvrir dans chacune des cibles.

Convientront-elles comme eau de boisson et sous quelle condition ?



Index alphabétique des termes principaux.

A

Aar	37
Aarberg	36
abaissement	34
abaque	61
acceptabilité par la population	42
accident tectonique	43
accumulateur	13
accumulation	33
acide citrique	90
acidification	90, 90
agrégat de sondage	66
agricole	93
agriculture	78
aire Zu	93
alimentation	13, 32, 80
Allemagne	37
alluvion	81, 87
fluviale récente	15, 16
altération	7
ammoniac	37
ammoniaque	78
amortisseur	13
analyse	78, 81
analyse économique	42
anhydrite	19
anomalie	63
apport post-exploitation	33
approximation logarithmique	72, 78
aquiclude	8
aquifère	8
base de l'	31
de fond de vallée	89
de versant	88
des grès molassiques	81
fluvio-glaciaire	12
karstique	88
quaternaire	64, 81, 83
rocheux profond	88
toit de l'	31
type	15
aquitard	8
argile	57
thixotropique	69
artésien	33
artésienne	15

Arve	36
Atlas géologique	43
attraction terrestre	31
auge glaciaire	55
automatisation	90

B

banque de données	43
barrage	6
d'Assoua	6
souterrain	40, 40
basalte	24
bassin	10
d'alimentation des eaux souterraines	10, 11, 12
hydrogéologique	10, 11
karstique	42
topographique	10
Bénoto	79, 79
Berne	37
besoin	28
agricole	6
en eau	27
instantané	32
bétail	27
biens à protéger	5
bilan	34
hydrologique	13
quantité-qualité	80
biotope	32
biotope humide	5
bouchon d'étanchéité	66, 69
boue	69

C

cadre	
administratif	27
légal	27
cake	69
calcaire	11, 19
canton de Vaud	28, 29
capacité de la nappe	28
captage par forages rayonnants	83
caractéristique hydrogéologique	7
carotte	66
carottier	66
à câble	66
double	66

simple	66, 68	conglomérat	17
carte		connexion	90
de la qualité des eaux	43	consommation énergétique	27
de perméabilités	43	contexte naturel	7
de transmissivités	43	continental	
de vulnérabilité	43	intercalaire	34, 35
de zones de protection	43	contrainte effective	31
des résistivités	63	contraste de vitesse	55
des ressources	43	contrôle du bilan	13
géologique	43, 44	contruction d'un captage	29
hydrogéologique	43, 45	couche protectrice	64, 66
piézométrique	10	coulée de boue	6
cartographie		courant	
géoelectrique	63	artificiel	55
hydrogéologique	43	continu	58
casing	66	courantométrie	
cavité	19	de forage	73, 73
cencre	24	de sondage	75
champ		courbe	
de transmissivité	10	caractéristique	71
électrique	60	d'étalonnage	74
chlorures	78	couronne	
chute de potentiel électrique	57	coupante	66
cible	63	court-circuit hydrogéologique	74
de prospection	46	coût	42
cimentation	7	d'exploitation	42
circuit	58	d'investissement	42
coefficient d'emmagasinement	31, 78	couverture peu perméable	36
collectivité publique	27	crépine	79, 83, 85
colmatage	36	à nervures repoussées	79, 80
comparaison multifactorielle	42	creux	33
comportement hydrogéologique	7	critère	
composantes	55	de choix	42
composé organique	78	environnemental	32
composition		hydraulique	32
chimique des eaux	8	culture	24
pétrographique	8	cycle	
compressibilité	31	de l'eau	5, 13
compression		hydrologique	80
simple	48	D	
verticale du squelette	31	danger	
compte de l'eau	42	de pollution	42
concept hydrogéologique	30	naturel	6
concession	28, 80	Darcy	10
demande de	28	datation isotopique	34
condition		débit	
aux limites	80	entrant	13
géologique	81	exploitable	80
hydroclimatologique	13	instantané	32
conducteur	57	minimal	6
conductivité		radial	73
électrique	57	sortant	13
hydraulique	57	décantation	36
conduit	19	décolmater	70
Confédération suisse	28	décompression de l'eau	31
configuration		décontamination	5
hydrogéologique	14	défense incendie	32, 89
type	15		

déficience chimique	93	éboulement	6
déficit	27	échantillon	
hydrique	33	géologique	66
degré		écologie des ruisseaux	40
d'inertie	13	économie	6
de saturation	57	d'énergie	90
delta	83, 85	économique	32
du Boiron	37, 38	écoulement non permanent	78
demande	32, 32	élasticité	48
ponctuelle maximale prévisible	32	électrode	57
dépôt		négative	58
fluvio-glaciaire	15, 17	positive	58
quaternaire	55	énergie	32
dépotoir	84	engrais de ferme	78
développement	33, 85, 89	enrichissement en sel	24
du puits	83	entrée	14
durable	27	épurateur microbiologique	13
hydraulique	90	équations de Theis	31
diagenèse	7	équipotentielle électrique	57
diagraphie géophysique	46	essai	
diffluence	11	à débit constant	78
diminution de la consommation	27	de compression simple	48
dispersion	11	de pompage	34, 43, 66, 71
dispositif Schlumberger	60	de pompage de longue durée	79
dissolution	7, 19	de traçage	11
distribution	32	étage stratigraphique	43
doline	43	étude hydrogéologique	29
dolomie	19	Euphrate	6
domaine public cantonal	28	évaluation	
dossier de demande de concession	28	économique	42
double		quantitative	80
carottier	68	évaporation	24
carottier à câble	68	évaporite	19
dragueline	79, 85	évapotranspiration	34
drainage agricole	12	exploitation	81
drainer	6	rentabilité de l'	32
droit sur les eaux souterraines	27	explosif	89
dromochronique	51, 53	extension structurale	12
Dupuit	71, 72	extraction	
durée d'amortissement	42	ouvrages d'	32
		exutoire	10
E		F	
eau		facteur	42
ancienne	34	de formation	56
bicarbonatée calcique	56	géométrique	60
claire urbaine	13	humain	42
de boisson	6, 28	faible profondeur	81
de formation	56	fécule organique	70
de nappe	28	Fehlmann	85
de surface	27, 36, 81	fer	37
douce	26, 27	filtration	36
égouttable	30	fissuration	7
ferrugineuse	36	fissure	17
point d'	43	flowmeter	73, 89
salée	26, 34	fluide	
séléniteuse	56	de forage	66
souterraine	27	fonctionnement des aquifères	13
usée domestique	78		

fondation	6
fonte de neige	13
forage	
carotté	69
moulinet de	73
profond	34
rayonnant	87
foration	66
fossé d'infiltration	36
fracturation hydraulique	89
fragmentation mécanique	89
frais d'exploitation	42

G

galerie	81, 89
gêne	6
genèse	7
Genève	36
géoélectrique	46, 55
géologie	7
de la Suisse	81
géomatériaux	7
géométrie des pores	7
géophone	46
géophysicien	60
géophysique méthode	46
géotechnicien	7
géothermie	6
géothermique	23
géotope	5
gestion	27, 30, 80
à court terme	32
à long terme	32, 33
hebdomadaire	32
journalière	32, 90
saisonnaire	33
scientifique	27
Ghijben	26
glissement de terrain	6
gneiss	19
gradient du potentiel	10
granite	19
grappin	79
grès	17
guerre de l'eau	6
gypse	19

H

habitant	27
havage	85
Herzberg	26
High lands	27
Huygens	
principe de	50
hydrodynamique	7
hydrogéologie	7
hydrogéologue	93
hydrosphère	5

I

impact	
hydrologique	80
sur l'environnement	42
incertitude	34, 64
industrie	6
industrielle	92
inertie	14
hydraulique	33
infiltration artificielle	13
infrastructure	
d'exploitation	81
inhibition d'exutoire	40
instabilité des versants	6
intensité	57
investigation géologique	13
investissement	42
ion	56
irrigation	6, 24
isopièze	10
isotrope	10

J

javellisation	78
joint de stratification	17

K

karst	89
-------------	----

L

lac	37
Léman	38
levé géologique	43
ligne équipotentielle	10
limite de bassin	10
littoral	26
logging	74
logiciel	62
loi	
d'Ohm	57
de Snell-Descartes	50
longueur	
de ligne	63, 65
du quadripôle	60
louvoyant hydraulique	79
Low lands	27

M

macroporosité	9
manganèse	37
Manuel suisse des denrées alimentaires	78
marai d'importance nationale	5
marnes	19
marqueur géochimique	13
marteau	66
fond de trou	71
masse volumique de l'eau	31
massif filtrant	66, 79, 84

matière organique	37
matrice	7
ménage	27
mesure	28
de protection	92
méthémoglobémie	78
méthode	
géochimique	34
géophysique	46, 47
indirecte	64
sismique	46
microporosité	9
minéralisation	78
miroir sismique	53
mise en valeur	43
module	
de compressibilité	31
de compressibilité de l'eau	31
molasse	10, 17
moraine graveleuse	81
mouilles	6
moulinet de forage	73
MSDA	77
multifactorielle	27
N	
nappe	28
captive	30, 31
côtière	25
fossile	35
karstique	89
libre	30, 30
nitrate	24, 25, 78
nitrite	37, 78
nitrosamine	78
niveau hydrostatique	31
NOLD	80
noria	6
normes de l'OMS	78
nourriture	6
O	
objectifs	
de qualité	77, 78
des tolérances	78
OEaux	77
offre	32
Ohm	
lois d'	57
OMS	77
onde	
directe	50
front d'	50
P	50
primaire	46
rai d'	50
réfléchie	53
surface d'	50
orgue basaltique	24
origine	
anthropique	78
géogène	78
OSEC	77
oued	40
outil de coupe	66
ouvrage	
d'exploitation définitif	81
de captage	81
de distribution	81
provisoire	80
oxydabilité	78
oxyde	
de fer	78
de manganèse	78
oxygène	36, 78
P	
patrimoine	
environnemental	5
géologique	5
pays	
du Nord	27
du Sud	27
en voie de développement	34
pauvre	27
riche	27
pelle mécanique	81
pendage	43
percolation	13
pérennité	42
périmètre	93
perméabilité	8, 71
de Darcy	71
de fissure	11
de la tranche	74
équivalente	71
hétérogénéité de la	71
moyenne	71, 74
perte	13
de charge hydraulique	57
de la rivière	37
de rivière	13
naturelle	40
phosphates	78
piézomètre	66
pistonnage	84
placage fluvio-glaciaire	81
plaine	
alluviale	63, 65, 83
de l'Aar	37
du Rhin	15, 16
plancher de la nappe	64
Plateau suisse	17
pluie	13
point de brisure	51
politique	27

tarifaire	27
pompage	6
en paliers	71
pompe	66
aspirante	74
de forage	71
immergée	74
porosité	7, 9, 56
cellulaire	7
confinée	8
cylindrique	7
d'interstices	7
de fissure	8
efficace	30, 31
karstique	8
ouverte	8
planaire	7
primaire	7
secondaire	7
totale	7, 31
postgénétique	9
potassium	78
potentiel	57
électrique	57
hydraulique	57
hydrogéologique	30, 42
presse	
hydraulique	85
pression hydrostatique	31
Prévondavaux	41
principe de gestion	32
procédure	29
productivité	74
profil	
de perméabilité	73, 74
sismique	55
profondeur d'investigation	60
propriétaire du fond	28
propriété	
de la ressource	42
des eaux souterraines	28
hydrogéologique	43
prospection	27, 43
géophysique	46
protection	27
des eaux	28, 92
puits	13
à drains horizontaux	85, 87
artésien	33
d'essai	79
d'injection	36
de Belpau	37
de pompage	32
filtrant vertical	84
filtrants verticaux	83
foré profond	89, 89
tubé	79

Q	
quadripôle	60, 63
qualité	42
bactériologique	78
chimique	78
de l'eau	80
quantité	42
R	
réalésage	79
réalimentation	
artificielle	27, 36
induite	36, 37, 37, 38
provoquée	35
recharge interaquifère	27
réduction	36, 37
réflexion	50, 53, 53, 54
réfraction	50, 51, 52
régime	
de pompage	80
des eaux souterraines	32
transitoire	13
région	
aride	24
côtière	26
règle	64
réhabilitation	27
remédiation	5, 26
renouvellement	35
taux de	31
réseau	
de distribution	32
gravitaire	90
piézométrique	13, 34
réserve	
des tiers	42
renouvelable	31, 34
totale	30
réservoir	13, 32, 90
hydrogéologique	7
résistance	55
ohmique	57
résistivité	57
apparente	60
carte de	63
de l'eau	56
de la formation	56
électrique	55, 57
électrique apparente	60
ressource	43, 80
énergétique	6
exploitable	5, 32
naturelle	31
retenue hydroélectrique	33
Rhône	
vallée du	55
rideau	
d'étanchéité	26, 41

de puits	85	sortie	14
rivière	37	source	13, 28, 43
roche	7	karstique	19
carbonatée	8	sous-réseau	89
cristalline silicatée	19, 22	soutènement	66
élastique	48	stockage	
évaporitique	8	d'eau souterraine	40
karstique carbonatée	19, 20	géologique de déchets	57
karstique évaporitique	19, 21	structure	
molassique	17, 18	du milieu	55
siliceuse	8	hydrogéologique	33
volcanique	24, 24	Suisse	28
rotary	70	sulfate	19
rotation	66, 67	sulfates	19, 78
roto-percussion	66	surexploitation	26, 27, 34
ruissellement	34	surface d'onde	50
S		symbole	43
Sahara	34	syngénétique	9
salinisation	26	système	
saturation partielle	57	de distribution	90
Schlumberger		local autarcique	90
dispositif	60	régional interconnecté	90
secteur		T	
A	93	tampon	
B	94	hydraulique	14
S	93	journalier	32
section d'écoulement	57	tarissement de ruisseau	32
sécurisé	32	tassement vertical du squelette	31
sécurité publique	42	taux de renouvellement annuel	14
sels minéraux	78	technique de sondage	66
serpentine	19	tectonique	19, 24, 43
Service hydrologique et géologique national	43	télescope	79
servitude	93	température	24
de fouilles et captages	28	temps de transit moyen	14
seuil		terrain meuble	7
de tolérance	77	terrasse fluvio-glaciaire	83
sillon	83	Theis	72, 78
fluvio-glaciaire	64	Thiem	71, 72
graveleux	42	tige de sondage	66
sismique	46	Tigre	6
réflexion	53, 55	Timoshenko	48
réfraction	50, 55	topographique	43
sismographe	48	train de tiges	66
sismomètre	46	traîné	65
site contaminé	5	électrique	63
situation hydrogéologique	10	traitement chimique	90
Snell-Descartes		tranchée	37, 81
loi de	50	absorbante	36
sols	7	captante	81, 82
sondage	43, 71	de captage	39
au rotary	69, 88	transmissivité	78
carotté	66, 67	trépan	79
destructif	70	à lames	69
électrique	60, 63	tricônes	69
mécanique	66	tri-polyphosphates de sodium	90
technique de	66	Tritium	34
sondeuse	66	tubage	66, 79

provisoire	66
subhorizontal	85
tube	66
crépiné	71
de courant	57
perforé	66
piézométrique	66, 69
tuyau de captage	81
two ways time	53

U

unité de gros bétail (UGB)	27
usage	6
utilisateur	28

V

valeur	
limite	28
validité	
conditions de	8
vallée du Rhône	55
variante	42
volume	
d'eau	30
d'eau accumulé	32
de l'aquifère saturé	31
vulnérabilité	42

W

wire line drilling	66
--------------------------	----

Z

zone	
de protection	42
de protection du captage	93
de protection éloignée	93
de protection rapprochée	93
de suintement	71
thermale	24
zonification	93, 94