

THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur

Délivré par **UNIVERSITE MONTPELLIER 2**

Préparée au sein de l'école doctorale **Systèmes
Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences,
Hydrosciences et Environnement**

Et de l'unité de recherche G-EAU et HSM de l'IRD

Spécialité : **Eaux Continentales et Sociétés**

Présentée par **Carla Manciatì J.**

**ETUDE DE L'INTERACTION SURFACE –
SOUTERRAIN DU SYSTEME AQUIFERE
TUMBACO – CUMBAYA EN EQUATEUR,
AVEC UN APPROCHE HYDRODYNAMIQUE
ET GEOCHIMIQUE**

Soutenue le 7 juillet 2014

Devant le jury composé de

Mme. Sophie VIOLETTE	Maître de Conférence	Université Paris 6	Rapporteur
M. Moumtaz RAZACK	Professeur	Université de Poitiers	Rapporteur
M. Séverin Pistre	Professeur	Université Montpellier 2	Examineur
M. Yves Travi	Professeur	Université d'Avignon	Examineur
M. Christian Leduc	Directeur de recherche	IRD	Directeur de thèse
M. Jean-Denis Taupin	Chercheur	IRD	Co - Directeur de thèse

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	5
ABSTRACT.....	6
RESUMEN.....	7
REMERCIEMENTS.....	9
1. CHAPITRE 1 : CONTEXTE GÉNÉRAL.....	12
1.1. INTRODUCTION.....	12
1.2. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA THÈSE.....	14
1.3. SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE	15
1.3.1 LIMITES DE LA ZONE D'ETUDE	17
1.4. CLIMAT	18
1.5. COUVERTURE VÉGÉTALE	21
1.6. VOLCANS DANS ET AUTOUR DE LA ZONE D'ÉTUDE	23
1.7. HYDROGRAPHIE	25
1.8. DEMARCHE SCIENTIFIQUE ET MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE	27
2. CHAPITRE 2 : GEOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	29
2.1 GEOLOGIE REGIONALE	29
2.1.1 UNITÉS MORPHOLOGIQUES DE L'EQUATEUR CONTINENTAL	29
2.1.2 CADRE GÉODYNAMIQUE DE L'EQUATEUR	30
2.1.3 EVOLUTION DE LA CHAÎNE ANDINE	31
2.1.3.1 De l'Eocène moyen à l'Oligocène inférieur (43 Ma à 30 Ma)	31
2.1.3.2 Du Miocène inférieur au Miocène moyen (21-23 Ma à 12-14 Ma).....	31
2.1.3.3 Du Miocène moyen au Miocène supérieur (12-14 Ma à 9-10 Ma).....	31
2.1.3.4 Du Miocène supérieur au Pliocène (9-10 Ma à 5-6 Ma).....	34
2.1.3.5 Du Pliocène à l'Actuel (5-6 Ma à nos jours)	34
2.2 GEOLOGIE LOCALE	34
2.2.1 BASSIN DE L'AQUIFÈRE TUMBACO – CUMBAYÁ – LOS CHILLOS DANS LE CONTEXTE DES BASSINS INTRA-MONTAGNEUX	34
2.2.1.1 Localisation du bassin de l'aquifère Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos.....	34
2.2.1.2 Lithologie et sédimentologie du bassin Quito – Guayllabamba	37
2.2.2 RELATIONS STRATIGRAPHIQUES ENTRE LES FORMATIONS ILALÓ, CHICHE ET GUAYLLABAMBA	40
2.2.2.1 Information bibliographique sur les relations stratigraphiques des formations Chiche et Ilaló	41
2.2.2.2 Inventaire des points d'eau sur la zone d'étude	43
2.2.2.3 Extension de la Formation Ilaló	54
2.2.2.4 Observation de terrain.....	55
2.2.2.5 Conclusion	57
2.2.3 COUPES GEOLOGIQUES ET CONFIGURATION GEOLOGIQUE GÉNÉRALE DE LA ZONE D'ETUDE.....	58
2.3 CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	65
3. CHAPITRE 3 : DONNÉES DISPONIBLES, DESCRIPTION ET CRITIQUE.....	72

3.1	DONNÉES HYDRODYNAMIQUES	72
3.2	CRITIQUE DES DONNÉES HYDRODYNAMIQUES	74
3.2.1	CRITIQUE DES DONNEES DES MESURES PIEZOMETRIQUES MANUELLES	74
3.2.2	CRITIQUE DES DONNEES DES MESURES AUTOMATIQUES DE NIVEAUX PIEZOMETRIQUES	76
3.2.3	CRITIQUES DES DONNEES DES ESSAIS DE POMPAGES	81
3.2.4	CRITIQUE DES DONNEES DE PERMEABILITE A PARTIR DES ESSAIS LEFRANC	83
3.2.5	CRITIQUE DES DONNEES DES JAUGEAGES SUR LES SOURCES	86
3.3	DONNÉES PHYSICO - CHIMIQUES	88
3.4	CRITIQUE DES DONNÉES CHIMIQUES	90
3.4.1	CRITIQUES DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU	90
3.4.2	CRITIQUES DES ANALYSES DE IONS MAJEURS	91
3.4.3	CRITIQUES DES ANALYSES DES ELEMENTS TRACES	92
3.5	DONNÉES ISOTOPIQUES.....	94
3.6	CRITIQUE DES DONNÉES D'ISOTOPES STABLES.....	96
3.7	DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES : DESCRIPTION ET CRITIQUE	96
3.8	DONNÉES HYDROLOGIQUES : DESCRIPTION ET CRITIQUE.....	97

4. CHAPITRE 4 : INTERPRETATION DES RÉSULTATS 102

4.1.	ANALYSES DES RÉSULTATS HYDRODYNAMIQUES.....	102
4.1.1	CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES	102
4.1.2	VARIABILITÉ PIÉZOMÉTRIQUE	109
4.1.2.1	VARIABILITÉ TEMPORELLE DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES	109
4.1.2.2	VARIABILITÉ SPATIALE DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES.....	121
4.1.3	CONCLUSION SUR LES RESULTATS HYDRODYNAMIQUES	134
4.2.	INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS CHIMIQUES	136
4.2.1	VARIATION TEMPORELLE DES PARAMÈTRES PHYSIQUES DE L'EAU	136
4.2.2	VARIATION SPATIALE DES PARAMÈTRES PHYSIQUES DE L'EAU	148
4.2.3	INTERPRETATIONS DE LA CHIMIE DES IONS MAJEURS.....	153
4.2.3.1	Conclusion sur les analyses des paramètres physiques de l'eau et ions majeurs	160
4.2.4	ELEMENTS TRACES	161
4.2.4.1	Etat de l'art.....	161
4.2.4.2	L'arsenic dans l'aquifère Chiche et l'aquifère Ilaló.....	164
4.2.5	CONCLUSIONS SUR LA CHIMIE.....	176
4.3	INTERPRETATIONS DES RESULTATS ISOTOPIQUES.....	177
4.3.1	BASE THÉORIQUE DES ISOTOPES STABLES.....	177
4.3.2	BASE THÉORIQUE SUR LES ISOTOPES RADIOACTIFS.....	178
4.3.3	INTERPRETATIONS DES ISOTOPES STABLES	179
4.3.3.1	Isotopes stables de la pluie.....	179
4.3.3.2	Isotopes stables dans l'aquifère de Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos. Calcul de l'altitude de la zone de recharge	184
4.3.3.3	Conclusion sur les isotopes stables	189
4.3.4	INTERPRETATIONS DES ISOTOPES RADIOACTIFS	189
4.3.4.1	Tritium	189
4.3.4.2	Carbone 14.....	191
4.3.4.3	Conclusions sur les isotopes radioactifs.....	199
4.4	MODELE CONCEPTUEL DU SYSTÈME AQUIFÈRE	200
4.4.1	ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES GEOCHIMIQUES.....	200
4.4.2	BILAN HYDRIQUE.....	202
4.4.2.1	Calcul 1: Volume d'aquifère et âges ¹⁴ C.....	202
4.4.2.2	Calcul 2: Loi de Darcy et ³ H.....	203
4.4.2.3	Calcul 3: Variables en surface : précipitation, débit de rivières.	206
4.4.3	MODELE CONCEPTUEL DE L'AQUIFÈRE CHICHE NORD	208

5.	<u>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE LA THÈSE</u>	<u>212</u>
5.1	CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	212
5.2	PERSPECTIVES ET RECHERCHES FUTURES	214
6.	<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</u>	<u>216</u>
	<u>ANNEXE 2A</u>	<u>232</u>
	<u>ANNEXE 2B</u>	<u>234</u>
	<u>ANNEXE 2C</u>	<u>240</u>
	<u>ANNEXE 2D</u>	<u>244</u>
	<u>ANNEXE 3A</u>	<u>264</u>
	<u>ANNEXE 3B</u>	<u>269</u>
	<u>ANNEXE 3C</u>	<u>271</u>
	<u>ANNEXE 3D</u>	<u>286</u>
	<u>ANNEXE 3E</u>	<u>287</u>
	<u>ANNEXE 3F.....</u>	<u>302</u>
	<u>ANNEXE 3G</u>	<u>305</u>
	<u>ANNEXE 3H.....</u>	<u>335</u>
	<u>ANNEXE 4A</u>	<u>336</u>
	<u>ANNEXE 4B</u>	<u>347</u>
	<u>ANNEXE 5A</u>	<u>358</u>
	<u>ANNEXE 5B</u>	<u>366</u>
	<u>ANNEXE 6A</u>	<u>381</u>
	<u>ANNEXE 6B</u>	<u>383</u>

RÉSUMÉ

Les aquifères volcano-sédimentaires se forment dans les ceintures orogéniques et les points chauds présents autour du monde. Ils se caractérisent par une géologie complexe puisque les formations sont issues de plusieurs éruptions qui ont été modifiées par des facteurs tels que le type d'éruption, la topographie, la distance à la source ou l'érosion. Dans ces zones tectoniquement actives, les failles et fractures vont influencer la configuration géologique. Ces éléments modifient directement le fonctionnement hydrogéologique. Ainsi, les processus géothermiques vont causer des anomalies de température, mais aussi la dissolution cinétique ou la teneur de certains minéraux et éléments traces qui peuvent causer des problèmes sur la santé publique, comme l'arsenic.

Ces aquifères représentent fréquemment la seule source d'eau pour les populations qui sont obligées de les exploiter parce que les eaux de surface ont été fortement contaminées. Le système aquifère Tumbaco – Cumbayá, sujet de la présente étude, se situe dans ce contexte. Cet aquifère se localise dans la Vallée Interandine, à 15 Km à l'Est de Quito. L'aquifère principal est la formation volcano-sédimentaire Chiche. Il est limité horizontalement par la rivière Chiche et San Pedro au nord, à l'est et l'ouest et le volcan Pasochoa au sud. Le volcan Ilaló se trouve au milieu de la zone d'étude. Ce volcan forme un second aquifère essentiellement volcanique soumis à géothermalisme, dont la partie enterrée du cône est apparemment au-dessous de la formation Chiche. La couche géologique en surface est appelée Cangahua. Elle recouvre toute la zone et elle est imperméable. L'exploitation des aquifères situés dans les formations Chiche et Ilaló a été théoriquement suspendue à partir de 2006, quand des teneurs en arsenic supérieures à la norme de 10 µg/l ont été détectées. Notre objectif principal est d'améliorer la connaissance du fonctionnement intégral de ce système aquifère en utilisant trois axes principaux de recherche : i) l'hydrodynamique, ii) la géochimie et, iii) les isotopes stables, ^{18}O et ^2H , et radioactifs, ^3H et ^{14}C .

L'hydrodynamique montre que le système aquifère Tumbaco – Cumbayá a une saisonnalité très faible. Nous avons confirmé, par ailleurs, que l'aquifère est actuellement exploité pour un usage industriel et probablement domestique, contrairement à ce qui a été pensé au début. Le volcan sépare les parties Sud et Nord de l'aquifère dans la Formation Chiche et il semble fonctionner comme une barrière hydraulique du flux. Les rivières Chiche et San Pedro sont des grands axes de drainage de l'aquifère Chiche, au Nord et au Sud respectivement.

L'analyse des paramètres physiques de l'eau ont suggéré l'existence de deux aquifères : l'aquifère Chiche qui a des conductivités électriques et des températures plus basses que l'aquifère Ilaló. La chimie des ions majeurs a révélé un faciès de l'eau qui évolue d'un pôle bicarbonaté magnésien à un pôle bicarbonaté sodique, dans l'aquifère Chiche et aussi dans l'aquifère Ilaló, alors que l'aquifère Chiche Sud est plus magnésien. Les teneurs en arsenic sont plus élevées dans l'aquifère Ilaló que dans l'aquifère Chiche, où les teneurs baissent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du volcan. Cet élément est d'origine naturelle, mais aucune corrélation significative n'a pas été trouvée pour l'aquifère Chiche, ni avec les paramètres physiques, d'ions majeurs, ni d'autres éléments traces. Cependant, dans l'aquifère Ilaló, une corrélation de 54% a été trouvée avec le fer, suggérant une interaction avec les oxydes de fer présents dans la formation géologique.

L'isotope radioactif ^3H n'a pas été détecté dans l'eau des aquifères, à exception d'une source au Nord de la zone d'étude, dans la formation Chiche. Cette infiltration probable d'eaux récentes a été confirmée par le ^{14}C en ce point, qui a des teneurs supérieures à 100%. Le reste des points de l'aquifère Chiche a des activités ^{14}C qui varient entre 45,4 et 87,4 pmc. Pour l'aquifère Ilaló les activités ^{14}C sont inférieures à 20 pmc. L'âge de l'eau a été calculé et corrigé à partir du ^{13}C qui montrait une contamination par le CO_2 profond, qui donne des âges plus anciens qu'en réalité. Malgré la correction, les âges de l'eau continuent à se montrer très élevés, pour Chiche entre 400 et 4000 ans et Ilaló entre 11000 et 44000 ans. Avec ces connaissances, les isotopes stables ont été utilisés pour identifier les zones de recharge. L'eau de l'aquifère Chiche a montré un comportement isotopique en ^{18}O et ^2H sous la droite météorique locale, avec une pente de 3,5, signal d'un fractionnement isotopique d'échange avec la roche chaude qui n'a pas été observé dans l'aquifère Ilaló. Le calcul de l'altitude de recharge a montré que l'aquifère Chiche s'alimente au pied du volcan Ilaló au Nord et au pied du volcan Pasochoa au Sud, en considérant des conditions climatiques similaires aux conditions actuelles. Par contre, pour l'aquifère Ilaló, la zone de recharge se trouverait sur les flancs du volcan, en supposant des conditions climatiques de recharge plus froides que les conditions actuelles. Mais cette zone ne serait plus fonctionnelle dû au dépôt de Cangahua pendant les derniers événements volcaniques que la zone a subi.

Le système aquifère a de très faibles variations piézométriques, ce qui suggère qu'il a atteint un équilibre malgré son exploitation. La présence de l'arsenic dans l'aquifère Chiche Nord, la distribution de la CE et la température, suggère que les eaux de l'Ilaló se mélangent avec l'aquifère Chiche.

Cette étude est la première recherche, à ce niveau de détail, qui a été faite en Equateur sur un tel aquifère, et donnera lieu à des nouveaux projets qui pourront se réaliser dans d'autres aquifères volcano-sédimentaires de montagne dans le pays.

Mots clés: aquifère volcano-sédimentaire, volcan Ilaló, Chiche, Equateur, eaux souterraines, isotopes stables, isotopes radioactifs.

ABSTRACT

Volcano-sedimentary aquifers can be found in orogenic belts and hotspots around the world. They have a complex geology because formations are the product of several volcanic eruptions and have been modified by various eruption types, topography, distance from the source and erosion. In these tectonically active zones, faults and fractures continue to influence geologic configuration. These elements modify directly the hydrogeological behaviour. Geothermal processes notably cause temperature anomalies, but also kinetic dissolution and high concentration levels of certain minerals and trace elements such as arsenic, which can be problematic for public health.

These aquifers often represent the only source of water for populations, who exploit it because surface waters are severely contaminated. This is the case in the Tumbaco – Cumbayá aquifer, the subject of the present study. This aquifer is located in the Interandean Valley, 15 km to the east of Quito. The principal aquifer is the volcano-sedimentary formation Chiche. It is horizontally limited by the Chiche and San Pedro rivers to the North, East, and West, and the Paschocha volcano to the South. The Ilaló volcano is in the middle of the study zone. This volcano constitutes a second essentially volcanic aquifer, and is therefore subject to geothermal influences. This volcanic formation appears to be below the Chiche formation. The geologic layer on the surface is called Cangahua, it covers the entire zone and is impermeable. The exploitation of the aquifers in Chiche and Ilaló formations was theoretically suspended in 2006, when arsenic concentrations greater than the WHO standard of 10 µg/l were found. Our principal objective is to improve the knowledge of the functioning of this aquifer system using three main research methods: i) hydrodynamics, ii) geochemistry as well as iii) stable isotopes, ^{18}O and ^2H , and radioactive isotopes, ^3H and ^{14}C .

The hydrodynamics study showed that the aquifer system Tumbaco – Cumbayá has a low seasonality. We revealed that the aquifer is currently exploited for industrial and probably domestic uses, contrary to what was known at the beginning. The Ilaló volcano divides the south and north parts of the Chiche aquifer, with the volcano apparently acting as a hydraulic barrier for flows. The Chiche and San Pedro rivers are the great drainage axes of the Chiche aquifer in the north and south respectively.

The analyses of the waters' physical parameters suggest the existence of two different aquifers, with the Chiche aquifer having lower electrical conductivity and temperature than the Ilaló aquifer. Major ions analysis revealed waters that vary between a magnesium bicarbonate pole and a sodium bicarbonate pole in both the Chiche and Ilaló aquifers. The waters of the Chiche south aquifer possess more magnesium bicarbonate water. Arsenic concentrations are higher in the Ilaló aquifer than in the Chiche aquifer. In the Chiche aquifer, arsenic concentrations also decrease as the distance from the volcano increases. Arsenic is of natural origin, but no significant correlations were found for the Chiche aquifer, between arsenic concentrations and physical parameters, major ions or trace elements. In the Ilaló aquifer a 54% correlation with iron was found, which suggests an interaction between arsenic and iron oxides present in the geologic formation.

Radioactive isotope ^3H was not detected in groundwater from either aquifer, except in one spring in the north of the study area in the Chiche formation. The likely infiltration from recent waters was confirmed by ^{14}C analysis this spring, which showed concentrations superior to 100 pmc. Other sampling points in the Chiche aquifer have ^{14}C activities between 45.4 and 87.4 pmc. The Ilaló aquifer has ^{14}C activities lower than 20 pmc. Water ages were calculated and corrected using ^{13}C isotopes, which reveal a contamination from geogenic CO_2 , making water seem older than it is in reality. Despite the age correction, groundwater ages remain very old: Chiche groundwaters are between 400 and 4,000 years old and Ilaló groundwaters are between 11,000 and 44,000 years old. Based on this result, stable isotopes were used to identify recharge areas. Groundwaters from Chiche aquifer show an isotopic ^{18}O and ^2H signature below the Local Meteoric Water Line, with a slope of 3.5. This was interpreted as isotopic fractionation resulting from hot rock and water interactions, which was not observed in the Ilaló aquifer. Recharge altitude calculations show that the Chiche aquifer is fed on the Ilaló volcano piedmont in the north, and on the Paschocha volcano piedmont in the south, if we consider that climatic conditions over the recharge period are close to current conditions. However, for the Ilaló aquifer, recharge areas appear to be located on the flanks of the volcano, assuming colder recharge climatic conditions than today. This recharge area should no longer be functional because of the Cangahua deposits during the last volcanic events.

The aquifer system reveals very low piezometric variations. This suggests that it has reached equilibrium despite its exploitation. The presence of arsenic in the Chiche north aquifer, the electrical conductivity and temperature distributions, all suggest that Ilaló groundwaters are being mixed with Chiche groundwaters.

This research is the first to have been done with this level of detail in Ecuador on this type of aquifer and will provide new opportunities for projects in others volcano-sedimentary aquifers in the country.

Keys words: volcano-sedimentary aquifer, Ilaló volcano, Chiche, Ecuador, groundwater, stable isotopes, radioactive isotopes.

RESUMEN

Los acuíferos volcano-sedimentarios se forman en los cinturones orogénicos y los puntos calientes alrededor del mundo. Se caracterizan por tener una geología compleja pues las formaciones son producto de varias erupciones y que la han modificado por factores tales como el tipo de erupción, la topografía, la distancia a la fuente o la erosión. En estas zonas tectónicamente activas, las fallas y fracturas van a influir en la configuración geológica. Estos elementos repercuten directamente sobre el funcionamiento hidrogeológico. Así también procesos geotérmicos van a causar además anomalías de temperatura, la disolución cinética o la concentración de ciertos minerales y elementos trazas en el agua que pueden causar problema de salud pública, como el arsénico.

Estos acuíferos representan frecuentemente la única fuente de agua a las poblaciones que se ven obligadas a explotarlas pues las aguas superficiales han sido fuertemente contaminadas. En este contexto se sitúa el acuífero Tumbaco – Cumbayá sujeto del presente estudio. Este acuífero se sitúa en el Valle Interandino, a 15 Km al Este de Quito. El acuífero principal está en una formación volcano-sedimentaria llamada Chiche. Está limitado horizontalmente por el río Chiche y San Pedro al norte, al este y al oeste, y el volcán Pasochoa al sur. En la mitad de la zona de estudio se encuentra el volcán Ilaló. Este volcán forma un segundo acuífero esencialmente volcánico sometido a geotermalismo, cuya parte enterrada del cono se encuentra aparentemente bajo la Formación Chiche. La capa geológica en superficie se conoce como Cangahua, recubre toda la zona y es impermeable. La explotación de los acuíferos Chiche e Ilaló fue teóricamente suspendida a partir de 2006, cuando concentraciones de arsénico superiores a la norma de 10 µg/l fueron detectadas. Nuestro objetivo principal es el de mejorar el conocimiento del funcionamiento integral de este sistema acuífero utilizando tres ejes principales de investigación: i) la hidrodinámica, ii) la geoquímica y iii) los isótopos estables, ^{18}O y ^2H , y radioactivos, ^3H y ^{14}C .

La hidrodinámica muestra que el sistema acuífero Tumbaco – Cumbayá tiene una estacionalidad muy débil. Se confirmó además que el acuífero está siendo explotado para uso industrial y tal vez doméstico, contrariamente a lo que se pensó al inicio. El volcán separa la parte sur y norte del acuífero Chiche y parece funcionar como una barrera hidráulica de flujo. Los ríos Chiche y San Pedro funcionan como grandes ejes de drenaje del acuífero, en el norte y en el sur respectivamente.

El análisis de los parámetros físicos y químicos del agua sugieren la existencia de dos acuíferos: el acuífero Chiche que tiene conductividades eléctricas y temperaturas más bajas que el acuífero Ilaló. La química de iones mayores reveló una facies del agua que evoluciona de un polo bicarbonatado magnésico a un polo bicarbonatado sódico, tanto en el acuífero Chiche como en el Ilaló, siendo el acuífero Chiche al sur más magnésico. Las concentraciones de arsénico son más elevadas en el acuífero Ilaló que en el acuífero Chiche que muestra un aumento de sur a norte. Este elemento es de origen natural, pero no se encontró ninguna correlación significativa para el acuífero Chiche ni con parámetros físicos, iones mayores u otros elementos trazas. Sin embargo, en el Ilaló presenta una correlación del 54% con el hierro, sugiriendo una interacción con los óxidos de hierro presentes en la formación geológica.

El isótopo radioactivo ^3H no fue detectado en el agua de ninguno de los acuíferos, excepto por un manantial al norte de la zona de estudio, en la Formación Chiche. Esta infiltración de aguas posiblemente recientes fue confirmada por el ^{14}C de este punto que tiene concentraciones superiores al 100%. El resto de puntos del acuífero Chiche tienen actividades de ^{14}C que varían entre 45,4 et 87,4 pmc. Para el acuífero Ilaló las actividades en ^{14}C son inferiores al 20 pmc. La edad del agua fue calculada y corregida a partir del ^{13}C que mostraba contaminación de CO_2 profundo, dando como resultado edades más antiguas de lo que en realidad son. A pesar de la corrección, las edades del agua siguen mostrándose muy altas para Chiche entre 400 y 4000 años e Ilaló entre 11000 y 44000 años. Con este conocimiento, los isótopos estables fueron usados para identificar las zonas de recarga. El agua del acuífero Chiche mostró un comportamiento isotópico en ^{18}O et ^2H bajo la Línea Meteorica Local con una pendiente de 3,5, señal de fraccionamiento isotópico de contacto con roca caliente que no se observó en las aguas del acuífero Ilaló. El cálculo de la altitud de zonas de recarga mostró que el acuífero Chiche se recarga al pie del volcán Ilaló en el norte y al pie del volcán Pasochoa en el sur, considerando condiciones climáticas similares a las actuales. En cambio, para el acuífero Ilaló, su zona de recarga se encontraría en los flancos del volcán, suponiendo condiciones climáticas de recarga más frías que las actuales, pero es una zona de recarga que ya no sería funcional debido al depósito de la Cangahua durante los últimos eventos volcánicos que ha sufrido la zona.

El sistema acuífero tiene poca variación piezométrica lo que sugiere que se ha alcanzado un equilibrio a pesar de ser explotado. La presencia del arsénico en el acuífero Chiche norte, la distribución espacial de la CE y la temperatura, sugiere que las aguas del Ilaló se mezclan en el acuífero Chiche.

Este estudio es la primera investigación que se realiza en Ecuador a este nivel de detalle y abre paso a que nuevos estudios se realicen en otros acuíferos volcano-sedimentarios de alta montaña en todo el país.

Palabras claves: acuífero volcano-sedimentario, volcán Ilaló, Chiche, Ecuador, aguas subterráneas, isótopos estables, isótopos radioactivos.

A mon ami, mon copain, mon amour, mon époux Orlandito
A mon fils, Danielito, pour être le moteur de ma vie

REMERCIEMENTS

Pour qu'une thèse arrive à sa fin, les efforts et le soutien de plusieurs personnes sont nécessaires. Je tiens à les remercier ici.

De tout mon cœur, je veux d'abord dire un énorme merci à mon époux qui a supporté tous les problèmes, les dépressions et les innombrables mauvais moments qu'on a vécus pendant ma thèse, toujours ensemble, et je n'aurais jamais fini sans son soutien.

Je veux remercier mes directeurs de thèse Christian Leduc et Jean-Denis Taupin pour tout le temps consacré à lire et re-lire et re-re-lire ma thèse pour avoir un document relativement propre et de bon niveau.

Un merci spécial aux rapporteurs de ma thèse, Mme. Sophie Violette et M. Moumtaz Razack, qui m'ont permis de la soutenir et de l'améliorer beaucoup grâce à leurs commentaires.

J'ai beaucoup apprécié et je tiens à remercier également les autres membres du jury, M. Séverin Pistre et M. Yves Travi, pour avoir participé à ma soutenance de thèse et pour m'avoir aidé pendant les interprétations des résultats et la rédaction de la thèse. Merci pour votre disponibilité et votre temps consacré à m'aider à avancer dans ce projet qui paraissait impossible.

Un grand merci à Corinne Casiot pour son temps, pour m'aider avec les interprétations des éléments traces et surtout pour m'écouter et m'encourager à continuer quand j'ai pensé que tout était perdu.

Je dois aussi remercier la SENESCYT, organisme équatorien qui m'a donné une bourse qui m'a permis de faire mes études de master et doctorat en France.

Il est important de remercier les personnes de l'Entreprise d'Eau Potable et d'Assainissement de Quito, spécialement les ingénieurs Oscar Larrea, Rafael Alulema, Nelson Arias, Teresita Muñoz, Daniel Polo et Mme. Mónica Romo pour leur intérêt et leur volonté que ce travail de recherche aboutisse. Je tiens également à remercier les personnes de cette même entreprise qui ont travaillé avec moi sur le terrain : M. Marco Morales, M. Patricio Cuaical, les chauffeurs Vinicio Naranjo, Segundo Quishpe et Guillermo Vallejo.

Je voudrais également remercier tous mes anciens professeurs et mes amis de l'École Polytechnique Nationale : Dr. Remigio Galárraga, Dr. Laureano Andrade, Ing. Germán Luna, Dr. Marcos Villacís, et Ing. Renán Cornejo qui ont toujours été disponibles pour me fournir les documents bibliographiques qui ont été très difficiles à trouver et pour m'aider parfois avec les interprétations compliquées et avec des démarches administratives très longues.

Je veux remercier les gens de l'IRD à Quito : María Dolores, Aida, Cristina, Iván pour votre temps et pour vos bonnes volontés. Ainsi que pour avoir été conciliants avec mes problèmes administratifs et m'avoir aidé à m'en sortir.

Mes amis de l'INAMHI, Bolívar, Luis pour être toujours là pour moi, je sais que je peux compter sur eux, pas seulement pour avoir des données, mais aussi pour m'écouter et pour leurs mots d'encouragement pour continuer mon travail de recherche.

Un grand merci aux amis géologues : Diego Villagomez, Pablo Samaniero et Miriam Ríos qui ont supporté mes innombrables questions et problèmes et pour avoir aidé à donner un modèle relativement crédible.

Maintenant je veux remercier les amis pour tous les moments partagés et les mots d'encouragement très opportuns. Ma très chère amie Marina, merci pour avoir été là pour moi à chaque fois que je voulais tout laisser tomber et pour tous les rires avec nos « moments mystiques » de la semaine.

A mes frères de thèse Paul, Ahmed et surtout à Salifou pour partager avec moi les problèmes qu'on a tous pendant la thèse, nos interminables discussions pour résoudre les questions des logiciels ou de données, un grand merci pour avoir été là.

Aux thésards et mes chers amis Sothéa, Ludivine, Rami, Brice, Andrew pour nos moments partagés et d'interminables discussions sur la thèse, mais aussi pour votre aide, votre soutien morale quand j'étais en train de rechercher la façon de rembourser ma bourse pour une thèse non aboutie...

Mes amis « latinos » de l'IRD Montpellier : Karina, Julie, Juan Pablo, Andrés, Roberto, Alessandra (Garotita) pour me faire rire et me soutenir quand j'en avais besoin, pour me faire voir le « bright side » de la thèse.

On est bien conscients que sans les secrétaires on ne pourrait pas vivre : Christine, merci pour toute ton aide, ta patience, tes solutions, tu as beaucoup allégé mon esprit pendant les moments compliqués.

Un grand grand merci à Patrick Le Goulven, pour son implication dans ma thèse, même s'il n'avait pas de relation directe avec mon travail, il a investi du temps pour aller sur le terrain et m'aider à faire avancer mes recherches. Pour sa bonne humeur et ses blagues, merci. Aussi je voudrais remercier l'équipe G-EAU à Quito : Roger, Jean-Christophe, et les étudiants Geova, David, José, pour leur aide sur le terrain ou avec les données, pour m'écouter quand j'avais besoin et pour être là pour moi.

Aux amis d'IRSTEA Montpellier : Andrea, Marie, Flavien, POM, David, Maxime, pour supporter mes interminables plaintes sur ma thèse, pour ma dépression constante et ma phobie aux insectes. Merci pour tous les rires, les jolis et amusants repas de midi.

Je veux aussi remercier mes amies doctorantes aux Pays-Bas : Verito Minaya et Fer Reyes Pérez, pour vos mots d'encouragement à chaque fois que je sentais que je voulais laisser tout tomber.

A mes amis, qui même loin, sont toujours là pour moi : Dani, Patty, Gus et Dri, je vous remercie pour votre amitié.

A mon étudiant Felipe Quijia, pour essayer de m'aider à avancer dans ma recherche trop compliquée et pour me poser les questions qui m'obligeaient à l'améliorer.

Un grand merci à mon père et à mon oncle Guido, pour me soutenir et pour être les garants de ma bourse.

A ma mère, pour être toujours là pour moi, pour avoir la solidarité féminine aussi ferme avec moi, pour ses mots opportuns à chaque fois que j'ai pensé que je ne pouvais plus. Pour

m'aider après avec mon petit et me permettre de continuer mes travaux de terrain et mes réunions. Pour supporter ma mauvaise humeur et la tristesse constante. Merci « mare querida ».

A ma famille, à tous, mes grands-mères, mes oncles, mes tantes, mes cousins pour avoir supporté la distance qui nous a séparé pendant ces longues années, et pour m'encourager à continuer et finir cette thèse.

Enfin, je veux remercier mon fils Danielito, parce que sans lui, je crois que je serais devenue folle. Il était toujours la motivation la plus forte pour continuer ce travail. Merci pour exister, je t'aime.

1. CHAPITRE 1 : CONTEXTE GÉNÉRAL

1.1. INTRODUCTION

Les aquifères volcaniques et volcano-sédimentaires ont souvent une géologie complexe (Faccenna 1994, Courteaud et al. 1997, Cabrera et Custodio 2004, Struckmeier et al. 2004, Bertrand et al. 2010) parce que les produits d'une éruption volcanique, primaires ou remaniés, ne sont pas répartis de manière uniforme tant spatialement que temporellement. La topographie, la tectonique, le type d'éruption, la distance depuis la source éruptive, la géométrie du dépôt, l'érosion et les autres remaniements post-dépôt affectent la géologie et l'hydrogéologie locale (Vsevolozhskii et al. 2003, Bisson et Lehr 2004, Custodio 2004, 2007).

La plupart des aquifères volcaniques sont d'extension limitée et liés au cône et à ses environs proches mais certains sont bien plus vastes comme les plateaux de laves du Deccan en Inde qui recouvrent environ 500.000 Km² (Kulkarni et al. 2000, Vanderkluysen et al. 2011) ou du Paraná, partagé entre le Brésil et Uruguay qui font environ 1.200.000 Km² (Arújo et al. 1999). Ces aquifères représentent souvent une ressource en eau importante facilement disponible et donc exploitée, notamment quand la croissance de la population est rapide ou que les eaux superficielles, souvent contaminées, ne suffisent plus, comme par exemple à Jakarta en Indonésie (Geyh et Söfner 1989, Fajar et al. 2008).

Les aquifères volcaniques de montagne ont des caractéristiques hydrogéologiques très variables, en degré de perméabilité comme en modes de circulation de l'eau, allant de milieux principalement poreux à des milieux essentiellement fracturés (Kulkarni et al. 2000, Cabrera et Custodio 2004). Cependant, cette hétérogénéité s'atténue fortement quand l'échelle d'observation dépasse la centaine de mètres (Custodio 2004). En conséquence il est nécessaire, à l'échelle du bassin versant, d'identifier des unités géologiques où il est possible de proposer des propriétés hydrauliques moyennes. Dans ces formations, comme dans les autres milieux, le réseau d'observation doit être assez dense pour que les variables et paramètres de l'aquifère étudié soient représentatifs.

Le volcanisme actif peut aussi influencer le fonctionnement hydrogéologique, à tel point que les zones de recharge peuvent être recouvertes par des nouveaux produits d'éruption, ce processus supplémentaire compliquant évidemment la compréhension de ces systèmes aquifères (Geyh et Söfner 1989). Souvent ces zones sont aussi tectoniquement actives, les fractures et les failles en zone de montagne vont déterminer également les zones de recharge et décharge de l'eau souterraine, mais aussi une possible compartimentation du système aquifère. Ces phénomènes ont été observés dans plusieurs systèmes aquifères volcaniques de montagne : à la Réunion où les structures géologiques et les failles se comportent comme des limites imperméables pour le flux et divisent le système aquifère (Violette et al. 1997), à Hawaï (Scholl et al. 1996) ou dans le Massif Central français où la fracturation fait que l'on retrouve des aquifères perchés continus ou des lentilles d'eau délimitées (Bertrand et al. 2010). Les failles peuvent aussi définir le type et la direction de circulation de l'eau souterraine (Comte et al. 2012) et fonctionner comme des axes de drainages (Scholl et al. 1996, Lachassagne et al. 2001, Dewandel et al. 2005). Les failles et fractures peuvent aussi permettre l'interconnexion hydraulique de niveaux aquifères (Geyh et Söfner 1989, Carreón-Díazconti et al. 2003, Otálvaro et al. 2006), ce qui peut affecter les caractéristiques physiques et chimiques de l'eau (White et Hedenquist 1995, Chenevoy et Piboule 2007) du fait

d'arrivées d'eaux thermales, souvent chargées de gaz dissous issus de l'activité volcanique. Dans ce contexte, la chimie de l'eau souterraine peut être fortement marquée, d'une part, par la dissolution des minéraux des matrices rocheuses et d'autre part, par des cinétiques accélérées du fait de température accrue par le volcanisme régional et/ou les flux géothermaux plus localisés (White et Hedenquist 1995, Chenevoy et Piboule 2007). Un exemple de ce type de processus a été observé au Japon, où les modèles suggèrent que les failles servent de passage latéral permettant l'alimentation d'un aquifère par des systèmes voisins et des connexions entre les aquifères superficiels avec des fluides géothermaux (Yasukawa et al. 2003). Au sud de l'Italie, par exemple, les failles du système aquifère du volcan Roccamonfina ont permis l'enrichissement des eaux souterraines par du CO₂ profond (Cuoco et al. 2010).

Ces aquifères peuvent aussi montrer des signaux géochimiques particuliers en relation avec la composition des roches et des processus engendrés aux hautes températures, notamment dans les zones de volcanisme actif. Ainsi, certains éléments traces peuvent se dissoudre plus facilement dans l'eau et constituer un risque pour la santé publique. Dans les Andes, les pays principalement confrontés à ce type de problèmes sont l'Argentine et le Chili dont un certain nombre d'aquifères montrent des teneurs élevées en fluor, uranium, sélénium, vanadium et arsenic dans l'eau.

Parmi ces éléments traces le fluor et l'arsenic ont été fréquemment observés en zones volcaniques (Bundshuh et al. 2010) et ont causé de graves problèmes de santé publique. Plusieurs études ont été menées pour comprendre leur comportement géochimique et localiser leur origine notamment au Chili (Mansilla et Cornejo 2002, Fernandez-Turiel et al. 2005, Sancha et O'Ryan 2008), en Argentine (Smedley et al. 2002, Bhattacharya et al. 2006, Nicolli et al. 2012a) et dans une moindre mesure, dans les pays andins tropicaux, où des recherches, notamment pour l'arsenic, sont menées sur les processus de concentration et de valence dans les eaux souterraines, avec des premiers résultats en Bolivie (Ramos et al. 2012), Pérou (Castro de Esparza 2009) et maintenant en Equateur (cette étude). Les auteurs de ces études mettent en évidence les relations entre les fortes teneurs en arsenic et les formations volcaniques ou volcano-sédimentaires mais les processus de minéralisation et la source de l'As n'obéissent pas à un schéma unique, celui-ci dépendant beaucoup des conditions environnementales locales.

Outre l'altération du chimisme des eaux souterraines, le géothermalisme modifie aussi les teneurs isotopiques, notamment en oxygène 18 et deutérium. Des eaux qui ont été en contact avec une source de chaleur, ou mélangées avec des eaux réchauffées, présentent une composition en ¹⁸O plus enrichie que les eaux d'origine météorique (Goff et al. 1987, Giggenbach et al. 1992a, Giggenbach et al. 1992b, Minissale et al. 1997, Geyh 2000, Goff et McMurtry 2000, Chiodini et al. 2001). Les isotopes stables de l'eau ne sont pas les seuls à être modifiés. Le ¹³C, marqueur de l'origine du carbone, peut présenter une gamme de valeurs très large (Barnes et al. 1984) dépendant de la provenance du CO₂ dissous dans l'eau (biogénique, minérale, magmatique). Ces différents processus peuvent perturber les âges calculés à partir du ¹⁴C, qui apparaîtront plus anciens qu'ils ne sont en réalité, notamment dans le cas d'une origine magmatique (Vogel et Ehhalt 1963, Geyh 2000). Pour éviter ce type d'erreur, il est nécessaire de corriger les résultats à partir de la connaissance approfondie de la géologie et des conditions environnementales locales. Pour dater des eaux thermales ou des eaux enrichies par des arrivées de CO₂ profond (Fontes et al. 1991, Carreira et al. 2008, Kebede et al. 2008) on utilise des modèles de mélanges comme celui proposé par Gonfiantini (Salem et al. 1980) ou la correction de Oeschger (Geyh 2000) ou de modèles basés sur une

approche du bilan de masse pour des systèmes à géochimie compliquée comme NETPATH (Plummer et al. 1994, Clark et Fritz 1997, Geyh 2000).

La présente thèse a été développée au cœur des Andes tropicales, dans une zone volcanique et tectoniquement très active, l'Equateur. Du fait des ressources en eau de surface très abondantes, on a longtemps négligé les études hydrodynamiques et géochimiques des eaux souterraines. Les eaux thermales ont été utilisées principalement pour l'activité balnéaire. Les eaux souterraines non perturbées par le thermalisme ont été exploitées par les villes où le réseau hydrographique présente une forte contamination (e.g. aquifère de Riobamba à 165 Km au sud de Quito). C'est ainsi le cas du système aquifère Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos, et de l'unité aquifère Ilaló, ce dernier localisé dans le cône du volcan du même nom qui se situe au milieu de la zone d'étude et qui présente des caractéristiques hydrothermales. Ce système aquifère complexe est le sujet de la présente étude.

1.2. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA THÈSE

En Equateur, peu d'études ont été menées sur les aquifères volcano-sédimentaires. Au niveau régional, à proximité de notre zone d'étude, le Système Aquifère de Quito (SAQ) a été le plus observé. Figueroa (2003), dans son rapport technique, a caractérisé sommairement la géologie de la vallée et a proposé des épaisseurs des formations, parfois en contradiction avec les mesures de terrain, ce qui a induit des interrogations sur la disposition des couches géologiques et la présence et le fonctionnement des failles dans la région. Une thèse de doctorat sur le SAQ a caractérisé la zone par géophysique, images satellites en les comparant avec des visites sur le terrain (Rios-Sanchez et al. 2012), incluant l'aquifère Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos, qui nous intéresse directement. Rios-Sanchez et al. (2012) suggèrent par leurs interprétations des sondages géophysiques que la fracturation et la géomorphologie jouent un rôle primordial dans l'hydrodynamique souterraine. Ils indiquent que dans le SAQ les failles fonctionnent comme des axes de drainage en aval et comme des zones de recharge dans les zones les plus hautes des bassins versants. Cependant, cette étude ne clarifie pas la disposition des couches qui forment actuellement la vallée de Quito, ni ne permet de connaître les relations entre les différents aquifères de la zone puisque le SAQ est traité comme un système aquifère unique. Une autre question sur le SAQ est la position de sa zone de recharge qui a été déterminée d'une manière imprécise par les géologues locaux. García (2004) a étudié les isotopes stables des eaux souterraines du SAQ dans un rapport technique, complété par Taupin (2004) qui propose une valeur de gradient altitudinal isotopique pour la vallée de Quito.

A partir des études sur le SAQ, des premières hypothèses ont pu être proposées pour le système aquifère de Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos, situé à 15 Km à l'est de Quito. Alulema et al. (2000) ont mis en doute la possibilité d'une connexion entre ce système aquifère et l'aquifère de Quito, en se basant sur la différence d'altitude entre les deux aquifères (Quito à 2850 m et Tumbaco à 2300 m) provoquée par la faille de Quito qui en même temps draine cet aquifère vers la rivière Machángara.

Il est bien connu que les systèmes aquifères volcaniques montrent des spécificités chimiques en relation avec les systèmes géothermaux, notamment pour les éléments traces. C'est le cas de notre zone d'étude où en 2006 l'Entreprise Publique Métropolitaine de l'Eau Potable et l'Assainissement de Quito (EPMAPS) a mis en évidence la concentration élevée d'As au-delà des normes OMS de 10 µg/l (OMS 2008) dans l'aquifère Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos, après 30 ans de distribution de l'eau à la population. Pour Alulema (2008) le

volcan Ilaló pourrait être la cause de la contamination de l'eau, mais cette hypothèse doit être validée.

Depuis l'arrêt des pompages pour la consommation humaine de la zone de Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos, un suivi spatio-temporel de l'aquifère (piézométrie et chimie) est maintenu parce que cet aquifère est toujours une réserve potentielle pour la population de Quito et les vallées proches. Dans ce cadre, Dreher (2001) a émis l'hypothèse, non prouvée, que l'eau souterraine pourrait être en étroite relation avec les eaux de surface. De cette façon, cet auteur considère nécessaire de reconnaître et de protéger les zones de recharge des possibles sources de contamination notamment anthropique.

Du à cette suggestions de Dreher (2001) d'une possible connexion hydraulique entre l'aquifère et les rivières, Arias (2008) propose un bilan hydrique sur la zone d'étude, mais dont des hypothèses, telles que l'organisation des couches géologiques, la relation du volcan Ilaló et l'aquifère de Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos, la relation entre l'aquifère et les rivières, l'évapotranspiration sur la zone et le volume stocké dans l'aquifère, restent à confirmer. Ces travaux constituent un premier pas dans la compréhension de cet aquifère, mais beaucoup reste à faire car aucune conclusion n'a été validée.

Ce travail propose donc de mieux comprendre les processus hydrodynamiques et hydrochimiques de l'aquifère Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos, en complétant voire en rectifiant les hypothèses antérieures. Les questions qui seront abordées portent notamment sur les modes de circulation de l'eau souterraine, la localisation des zones de recharge et de décharge, les temps de résidence, le stockage dans le système, et les variations dans le temps et l'espace de ces divers éléments.

Les processus hydrodynamiques vont influencer les processus et équilibres chimiques et isotopiques qui se produisent dans l'aquifère de Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos. L'interaction entre l'eau et les roches vont induire des caractéristiques, notamment chimique que l'on doit déterminer et qui renforceront et valideront les hypothèses sur l'hydrodynamisme. Parmi celles-ci la question particulière de la concentration de l'arsenic sera abordée à travers les caractéristiques chimiques du milieu, conditions de température, conductivité, pH et potentiel redox, paramètres qui ont été mesurés in situ.

La zone d'étude ayant subi une forte tectonisation depuis la fin du tertiaire jusqu'à l'actuel, les possibilités de connexions entre réservoirs géologiques à travers les failles et fractures seront aussi abordées : en particulier, les relations entre l'aquifère de vallée et la formation constituée par le volcan Ilaló ainsi que les autres couches volcano-sédimentaires plus anciennes et la quantification des échanges.

1.3. SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

L'Equateur a une surface totale de 272.045 Km², entre 1° de latitude nord et 5° de latitude sud et entre 81° et 75° de longitude ouest. La zone d'étude se trouve dans la Vallée Interandine (Figure 1.1).

Le système aquifère de Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos s'étend sur une surface de 645 Km². Ses eaux souterraines ont été distribuées à la population de diverses villes, dont les plus importantes sont Tumbaco, Cumbayá, San Rafael, Conocoto, Sangolquí, Pintag, Alangasí – La Merced (Figure 1.1 et Figure 1.2), soit un total de 322.000 personnes en 2011

entre population urbaine et rurale. Cette population a quasiment doublé depuis l'année 2001 (INEC 2010). L'augmentation forte et mal répartie de la population, la mauvaise gestion des sols cultivés et le développement du secteur industriel sans contrôle fort ont conduit à une dégradation de la qualité des eaux des rivières. Il a donc été nécessaire de chercher d'autres sources d'approvisionnement. L'aquifère de Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos constitue une réserve d'eau intéressante pour ces villes et aussi pour Quito. Il est ainsi impératif de connaître la disponibilité, la qualité de l'eau, le temps de renouvellement de cette ressource pour arriver à sa meilleure gestion.

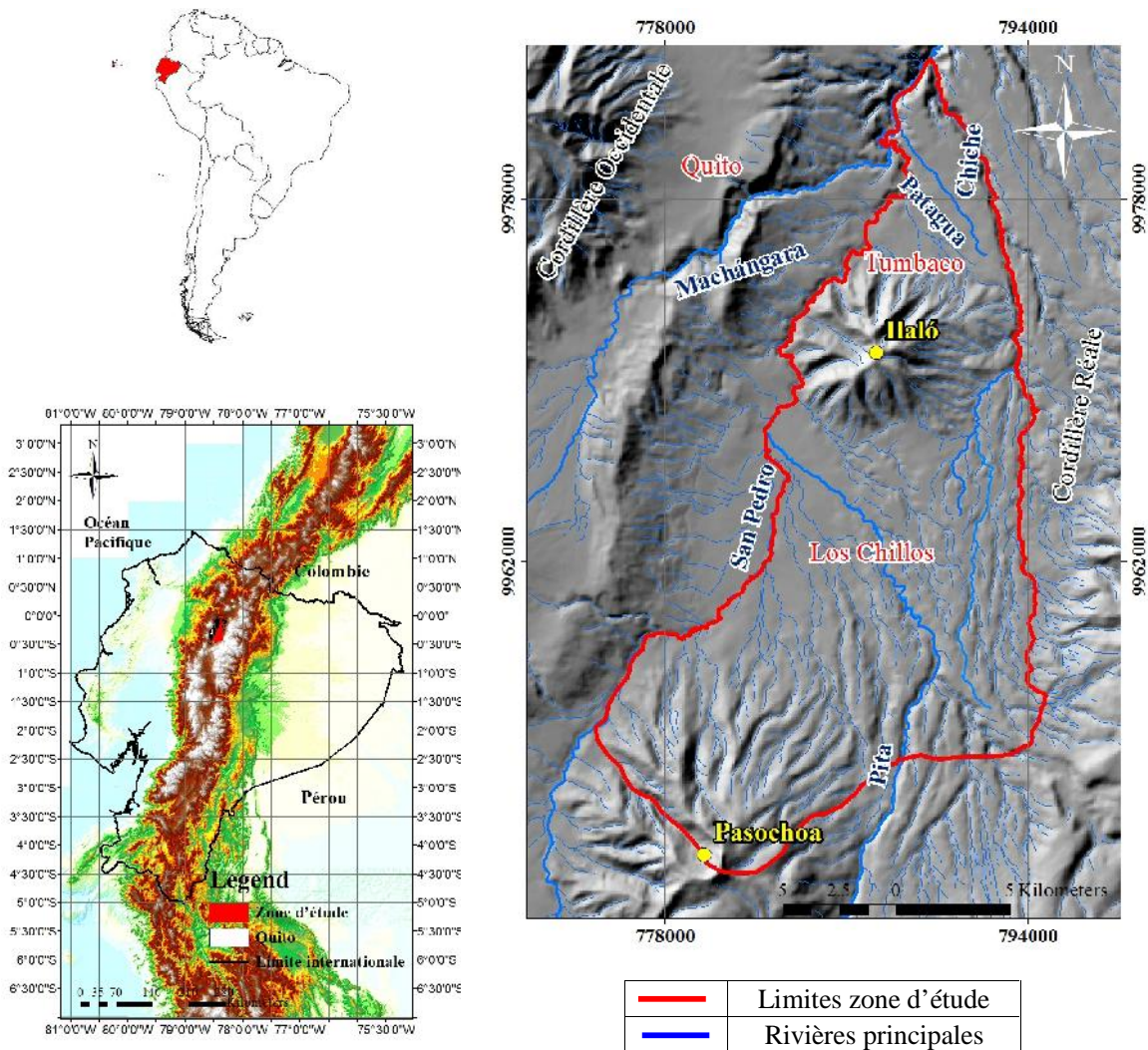


Figure 1.1. Localisation de la zone d'étude (à gauche) et bassin versant étudié (à droite).

La topographie est typiquement montagneuse, avec des différences d'altitude importantes : en moyenne 2300 et 2500 m dans les vallées de Tumbaco et de Los Chillos respectivement, les sommets des volcans Ilaló et Pasochoa étant à 3100 m et 3880 m respectivement.

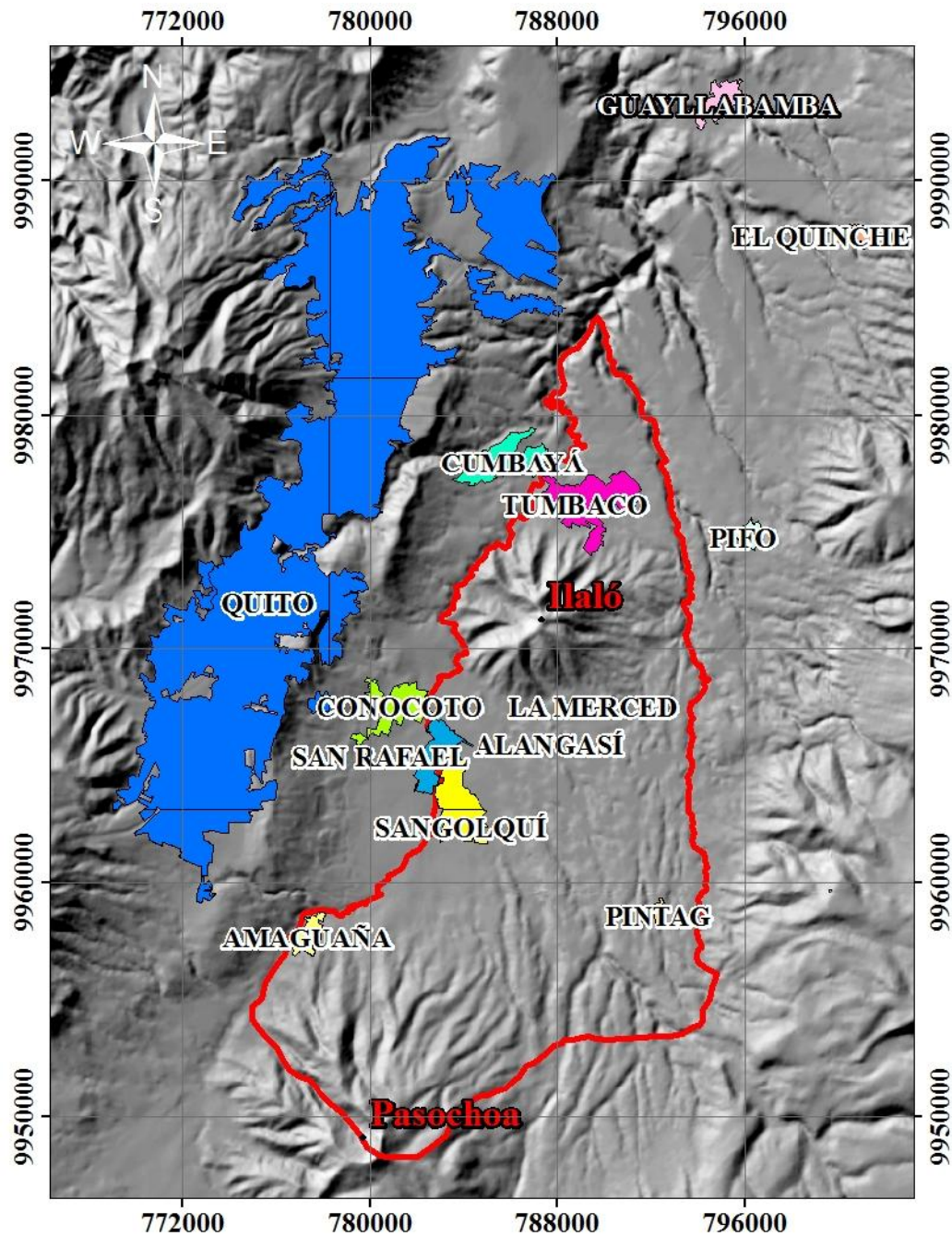


Figure 1.2. Localisation des villes et villages de la zone d'étude.

1.3.1 LIMITES DE LA ZONE D'ETUDE

Les limites de la zone d'étude ont été débattues car la formation géologique Chiche, la principale formation aquifère, a une extension beaucoup plus large (voir section 2.2.1.2.3). Elles sont fixées à partir de critères hydrauliques.

Au nord, les rivières Chiche et San Pedro forment des ravines très profondes, autour de 200 m, qui coupent totalement la Formation Chiche dont l'épaisseur est ici de près de 70 m (voir section section 2.2.1.2.3). Le tracé de ces rivières limite donc notre domaine.

Au sud, le volcan Pasochoa a été choisi comme limite. Ce volcan est une barrière naturelle, en surface et souterrain.

A l'est, dans la partie nord, la rivière Chiche coupe la Formation Chiche totalement, empêchant une connexion hydraulique souterraine entre les deux côtés de la rivière. Cependant dans la partie sud de la zone d'étude, la rivière Chiche n'est pas très profonde et elle coule sur la Formation Chiche mais il existe peu d'informations hydrodynamiques. Pour cette raison, nous allons faire l'hypothèse que la rivière Chiche constitue la limite est de la zone d'étude.

A l'ouest, la limite est la rivière San Pedro, du Pasachoa jusqu'à la jonction avec la rivière Machángara. Egalement, comme la rivière Chiche, la rivière San Pedro du côté sud n'est pas très profonde et elle coule sur la Formation Chiche, mais les informations disponibles sur l'hydrodynamique sont très rares. Le San Pedro s'approfondit vers le nord, dépassant le bas de la formation Chiche et forme une barrière hydraulique évidente.

L'information hydrodynamique au-delà des limites ainsi définies a également été considérée afin de replacer le secteur d'étude dans son ensemble géologique général.

Au milieu de cette zone, le volcan Ilaló sépare morphologiquement la vallée de Tumbaco (au nord) et la vallée de Los Chillos (au sud) et pourrait séparer les eaux souterraines en deux ensembles quasi-indépendants

1.4. CLIMAT

Selon Pourrut (1995), le climat de la Vallée Interandine est équatorial méso-thermique semi-humide à humide. Les données climatiques de 30 stations sur la période 1963 – 2006 ont été traitées et homogénéisées dans le cadre du projet AguAndes par Serrano (2011) en utilisant la méthode du vecteur régional. Pour la présente étude, ces données ont été complétées jusqu'en 2011.

Pour caractériser la variation de la précipitation de la zone d'étude, on a retenu six stations parmi les 30 stations les plus proches (Figure 1.4). La précipitation mensuelle de la Vallée Interandine présente une distribution typique influencée par le passage de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), soit deux saisons humides et deux saison plus sèches (Laraque et al. 2007, Espinoza et al. 2009). Les précipitations les plus importantes se produisent entre février et mai avec un total de 509 mm sur la période 1963-2011, moyenne de ces six stations, soit 45% de la pluie annuelle. L'autre saison humide est observée entre septembre et novembre, avec 315 mm soit 30% de la pluie annuelle. La saison « sèche » la plus marquée est observée entre juin et août avec un total de 107 mm (10% de la pluie annuelle). Les 15% restant de la pluie se distribuent entre les mois de décembre et janvier (Figure 1.3).

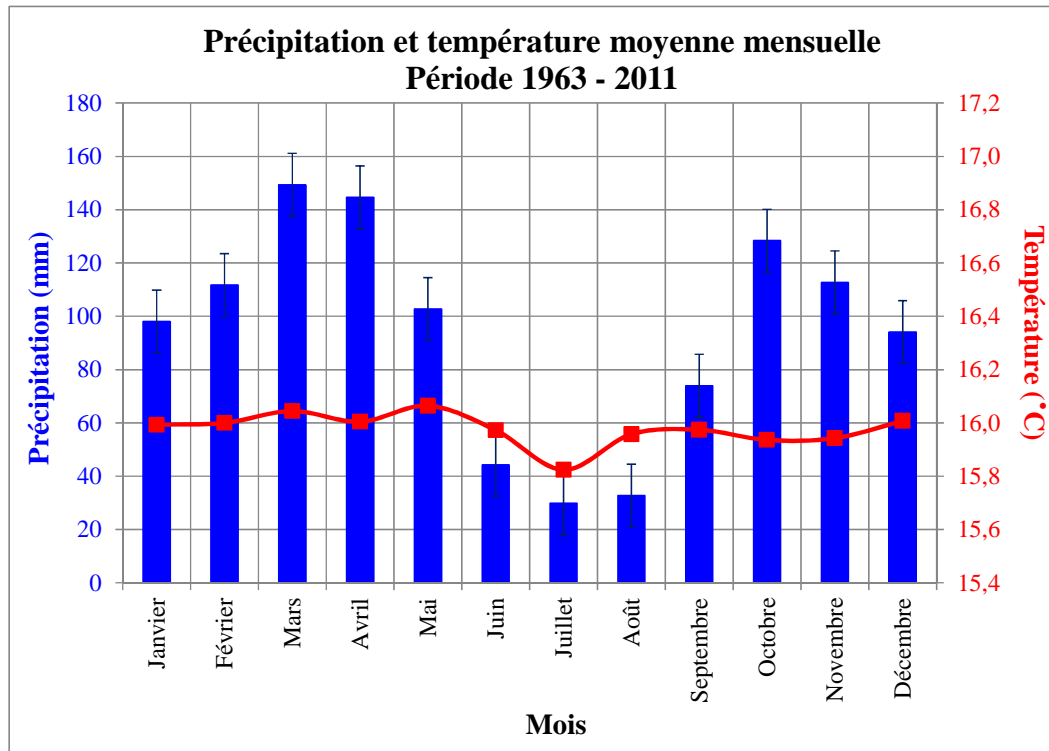


Figure 1.3. Variabilité mensuelle de la précipitation et de la température (moyennes de 6 stations proche à la zone d'étude sur la période 1963 – 2011).

Pour connaître la distribution spatiale de la pluie, il a été nécessaire d'utiliser les 30 stations dont on dispose pour avoir une vision régionale de la variabilité (localisation des stations sur la Figure 1.4). La distribution de la précipitation dépend principalement de l'effet orographique et de l'exposition aux vents des stations. Sur notre zone les pluies varient entre 739 mm au nord et 1652 mm au sud (Figure 1.4) cependant, l'effet d'altitude sur la précipitation reste difficile à distinguer (Figure 1.5), à l'exception des stations dans la zone de Quito qui pourraient refléter beaucoup plus les conditions générales de circulation du climat.

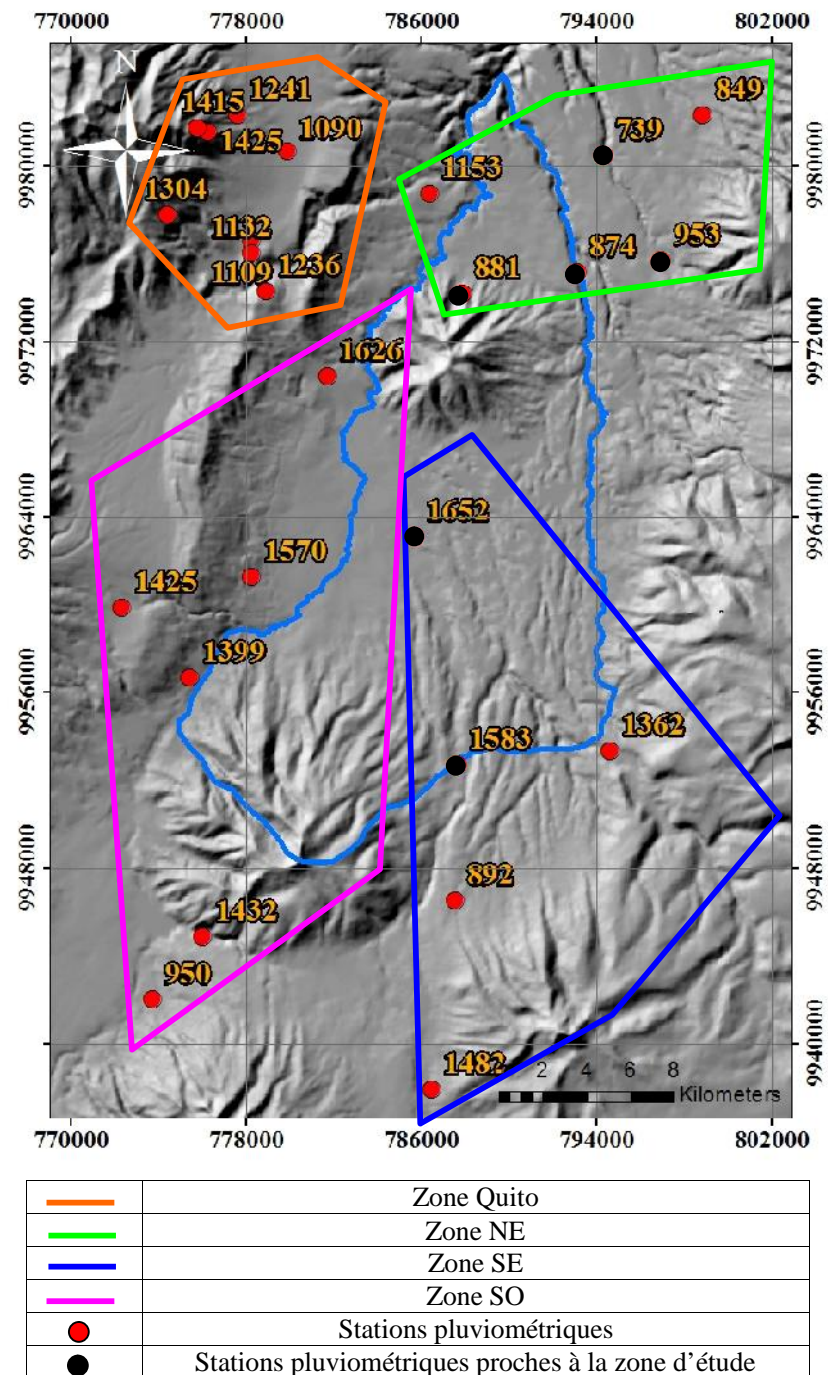


Figure 1.4. Distribution spatiale de la précipitation moyenne annuelle (en mm) sur la période 1963 – 2011.

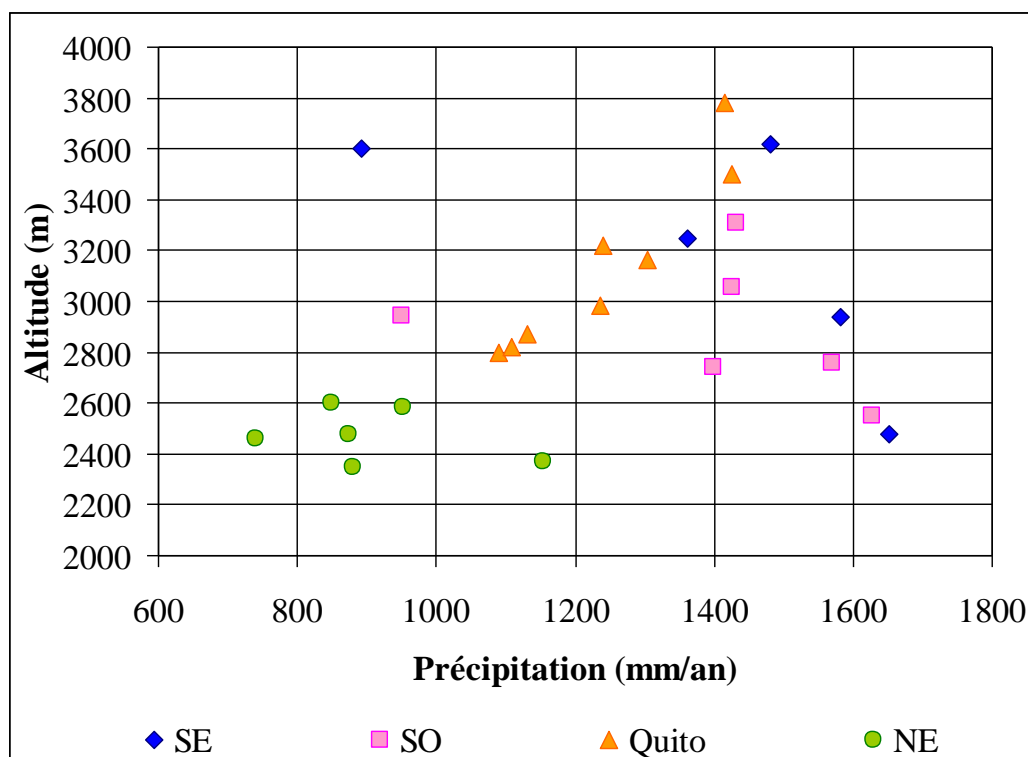


Figure 1.5. Corrélation entre la précipitation et l'altitude des stations.

La température (moyenne annuelle de 15,7 °C) montre une faible variabilité saisonnière,

La température (moyenne annuelle de 15,7 °C) montre une faible variabilité saisonnière, avec un maximum de 15,9 °C en mai et un minimum de 15,5 °C en août, période des vents les plus intenses (Figure 1.3). Un gradient altitudinal de -0,65°C / 100 m a été calculé pour la zone d'étude par Serrano (2011) à partir des données homogénéisées par la méthode du vecteur régional.

L'humidité relative moyenne mensuelle varie entre 75% (septembre) et 86% (février). Les vents généralement ont une direction sud-ouest avec des vitesses moyennes (mensuelles) qui varient entre 6,5 et 11 Km/h sur toute la zone d'étude. Les vents plus forts sont observés en août (30 Km/h) et les plus faibles en avril, de l'ordre de 6 Km/h.

1.5. COUVERTURE VEGETALE

La couverture végétale typique d'un climat semi-humide à humide est présente majoritairement dans la partie sud de la zone d'étude. En dehors des villes, les vallées sont essentiellement constituées de pâturages et forêts d'eucalyptus, cultures de haricots, patates, céréales, maïs. Dans la partie nord et aussi un peu à l'est du volcan Ilaló, des plantes de climat moins humide ont été trouvées comme des cactus et des forêts arbustives, en cohérence avec la distribution de la précipitation et la température. Les zones sans couverture végétale sont liées à l'érosion. Le Tableau 1.1 présente les pourcentages de chaque type d'usages de sols et la Figure 1.6 montre leur distribution.

Tableau 1.1. Pourcentages de surface utilisée pour les différents types d'usages des sols.

Code	Usages	Surface (Km ²)	% Surface Utilisée
	Pâturages	210,1	60,9%
	Forêts naturelles humides	51,8	15%
	Cultures	21,2	6,2%
	Zones urbaines	42,5	12,3%
	Forêts naturelles sèche	11,7	3,4%
	Surface sans couverture	7,5	2,2%
	Total	345	100%

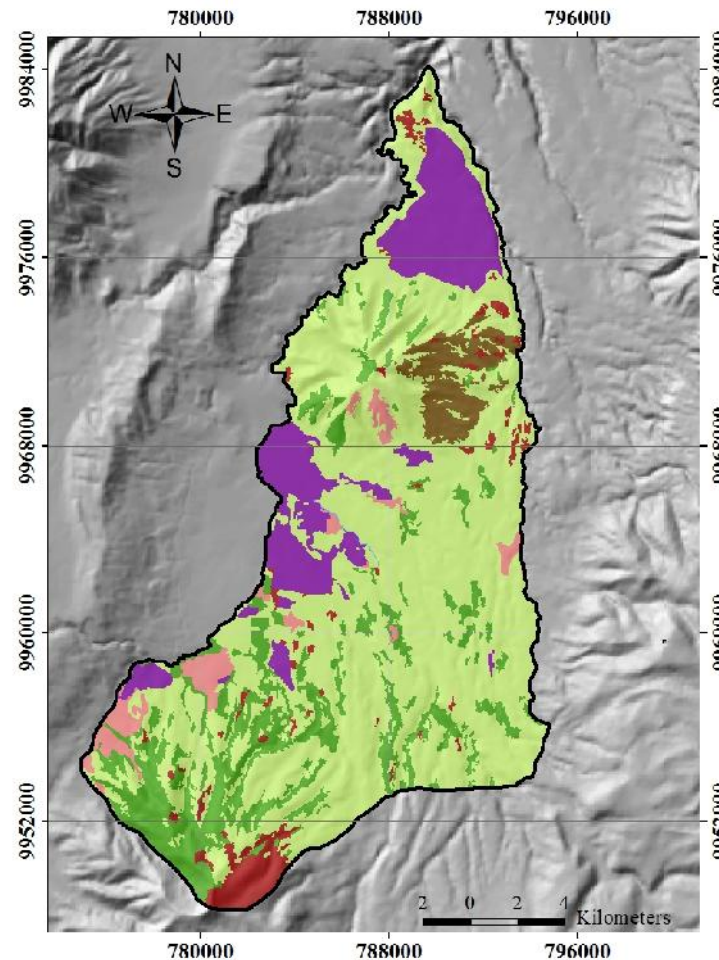


Figure 1.6. Usages des sols sur la zone d'étude.

L'identification des différentes végétations nous permet de reconnaître les types de photosynthèse prédominants (C3, C4 et CAM) qui alimentent en CO₂ les premiers mètres du sol, information indispensable pour décrire le cycle du carbone jusqu'à l'aquifère et pour corriger les données de carbone 14. Parmi les 610 Km² de forêts, généralement d'eucalyptus, pâturages et cultures, 95% de la surface est occupée par un type de végétation C3 et 5% par un mélange entre la végétation naturelle de climat moins humide comme des cactus et des plantes épineuses de types CAM et des cultures de maïs de type C4.

1.6. VOLCANS DANS ET AUTOUR DE LA ZONE D'ÉTUDE

Autour de la Vallée de Tumbaco - Los Chillos il y a 15 volcans, dont 3 sont actifs : Guagua Pichincha, Antisana et Cotopaxi (Figure 1.7 en rouge et Tableau 1.2). Ces volcans se trouvent à 20, 40 et 47 Km du volcan Ilaló, respectivement. En Equateur, le volcanisme est le produit de la subduction de la plaque de Nazca (12 – 22 Ma, Lonsdale (1978) à une vitesse moyenne de 58 mm/an dans une direction à peu près E – O (Trenkamp et al. 2002) en dessous du bloc andin nord (Pennington 1981, Kellogg et al. 1995).

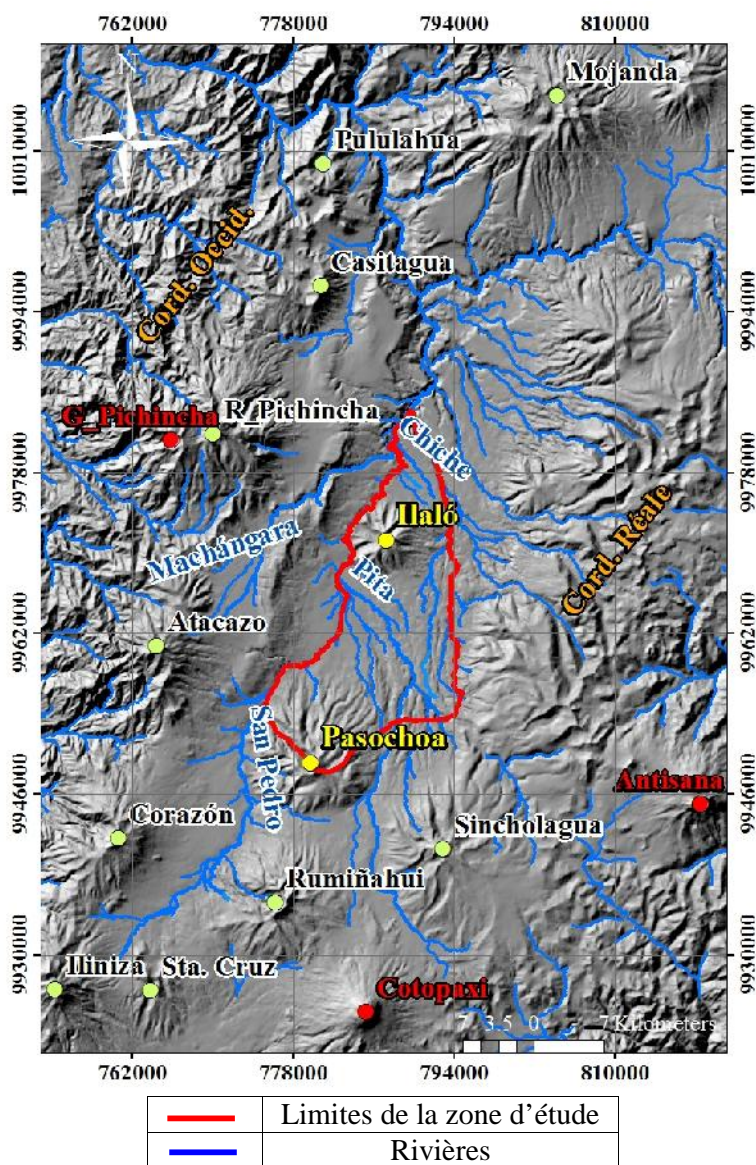


Figure 1.7. Volcans de la région étudiée.

L'apparition des chaînes volcaniques, par projection verticale de matériel pour la constitution du cône, puis l'érosion de plusieurs de ces volcans, de la Cordillère Occidentale ou de la Cordillère Réal, ont apporté de nombreux sédiments, donnant leurs formes actuelles aux vallées de Tumbaco et Los Chillos. Trois phénomènes associés aux éruptions volcaniques et ses produits ont affecté la Vallée Interandine :

- i) les flux pyroclastiques, caractérisés par des hautes températures ($> 500^{\circ}\text{C}$) et de grandes vitesses de déplacement (entre 200 et 500 Km/h). Couvrant des centaines ou des milliers de Km^2 , ils sont constitués de cendres, ponces et fragments de roches pouvant mesurer plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur (Hall et Mothes 1998) ;
- ii) les lahars et flux de boue sont des événements violents ayant souvent affecté la Vallée Interandine dans les temps historiques. De tels dépôts ont fréquemment 5 à 10 m d'épaisseur et constituent une formation trop consolidée pour être cultivable. Les flux pyroclastiques et les lahars peuvent s'écouler sur plusieurs kilomètres dans les fonds de vallée (Hall et Mothes 1998) ;
- iii) le transport par le vent et l'eau et le post-dépôt de cendres et lapilli volcanique qui ont couvert des centaines voire des milliers de Km^2 et atteignent plusieurs mètres d'épaisseur (Hall et Mothes 1998).

Ces surfaces frappées par ces phénomènes volcaniques deviennent provisoirement des zones stériles, poreuses, riches en ponce et cendres qui ne retiennent pas l'eau, et sont pauvres en éléments nutritifs (cas de la cendre et des flux pyroclastiques) ou rocheuses, avec 70% de sa structure formée par des blocs et galets de différentes tailles qui se compactent très rapidement étant à l'origine d'un pavement de pierres difficile à cultiver (cas des lahars) (Hall et Mothes 1998).

Tableau 1.2. Données sur les volcans proches de la zone d'étude. En rouge : volcans actifs.

Volcan	Altitude	Actif	Date dernière éruption	Référence	Eruption violente	Activité hydrothermale observée
	m		ans			
Ilaló	3169	non	1620000	(Barberi et al. 1988)		oui
Paschoa	4199	non	non datée			non
Rumiñahui	4712	non	non datée			non
Rucu Pichincha	4698	non	850000 - 810000	(Le Voyer et al. 2008), (Barberi et al. 1988)		non
Guagua Pichincha	4784	oui	1660 AD	(Hall et Mothes 1998)	oui	non-data
Casitagua	3200	non	non datée			non-data
Pululahua	3356	non	350 AD	(Hall et Beate 1991, Mothes et Hall 1991)	oui	oui
Mojanda	4263	non	500000 - 590000	(Barberi et al. 1988)		oui
Sincholagua	4873	non	non datée			non-data
Cotopaxi	5897	oui	1877 AD	(Hall et Mothes 2008)	oui	oui
Iliniza	5126	non	non datée			oui
Santa Cruz	3950	non	non datée			non-data
Corazón	4790	non	non datée			non-data
Antisana	5758	oui	non datée	(Bourdon et al. 2002)		oui
Atacazo	4457	non	400 - 450 AD	(Barberi et al. 1988)	oui	

D'autres informations sur les volcans, issues d'études scientifiques menées en raison de la particularité de cet écosystème et sa fragilité sont disponibles, telle le type de végétation et l'hydrologie de surface. C'est le cas pour le volcan Pasochoa (Valencia et Jorgensen 1992, Stern 1995) et Antisana (Williams et al. 2001, Sklená et Laegaard 2003, Favier 2004, Villacís 2008, Jacobsen et al. 2010). Ces études sont importantes dans le cadre de la présente thèse car elles permettent d'améliorer les connaissances sur les conditions d'écoulement et d'infiltration de l'eau sur ce type de formation.

Une autre caractéristique importante est l'activité hydrothermale. Les deux volcans les plus proches, Pasochoa et Ilaló, ne sont plus en activité. Cependant, le volcan Ilaló a eu sa dernière éruption au cours du Pléistocène et sur ses flancs, plusieurs sources d'eau chaude ont fait l'objet d'analyses et d'interprétations dans le présent travail.

1.7. HYDROGRAPHIE

Dans les vallées de Tumbaco et Los Chillos, de nombreuses rivières naissent sur les flancs des volcans (Figure 1.7). La synthèse de l'information hydrographique présentée ici est tirée du projet AguAndes (Pouget 2007).

La zone est parcourue par de petites rivières, qui ont des débits de l'ordre de quelques litres par seconde, et qui alimentent les grandes rivières, San Pedro, Pita, Chiche et Machángara (Figure 1.8).

La rivière San Pedro prend naissance à 4480 m d'altitude sur le volcan Iliniza, au sud de la zone d'étude, dans la Cordillère Occidentale. Avant sa jonction avec la rivière Chiche (à 2080 m d'altitude) pour former la grande rivière Guayllabamba, elle draine un bassin versant de 920 Km². Le cours d'eau principal a une longueur de 80 Km et il coule en direction sud – nord. Ses eaux sont utilisées pour l'irrigation de la vallée, bien au sud, qui a une vocation agricole pour près de 80% de sa surface. Au passage des villes de la vallée, cette rivière récupère toutes les eaux usées, devenant un véritable égout aux odeurs pestilentielles. Plus au nord, cette rivière est utilisée pour la production d'électricité.

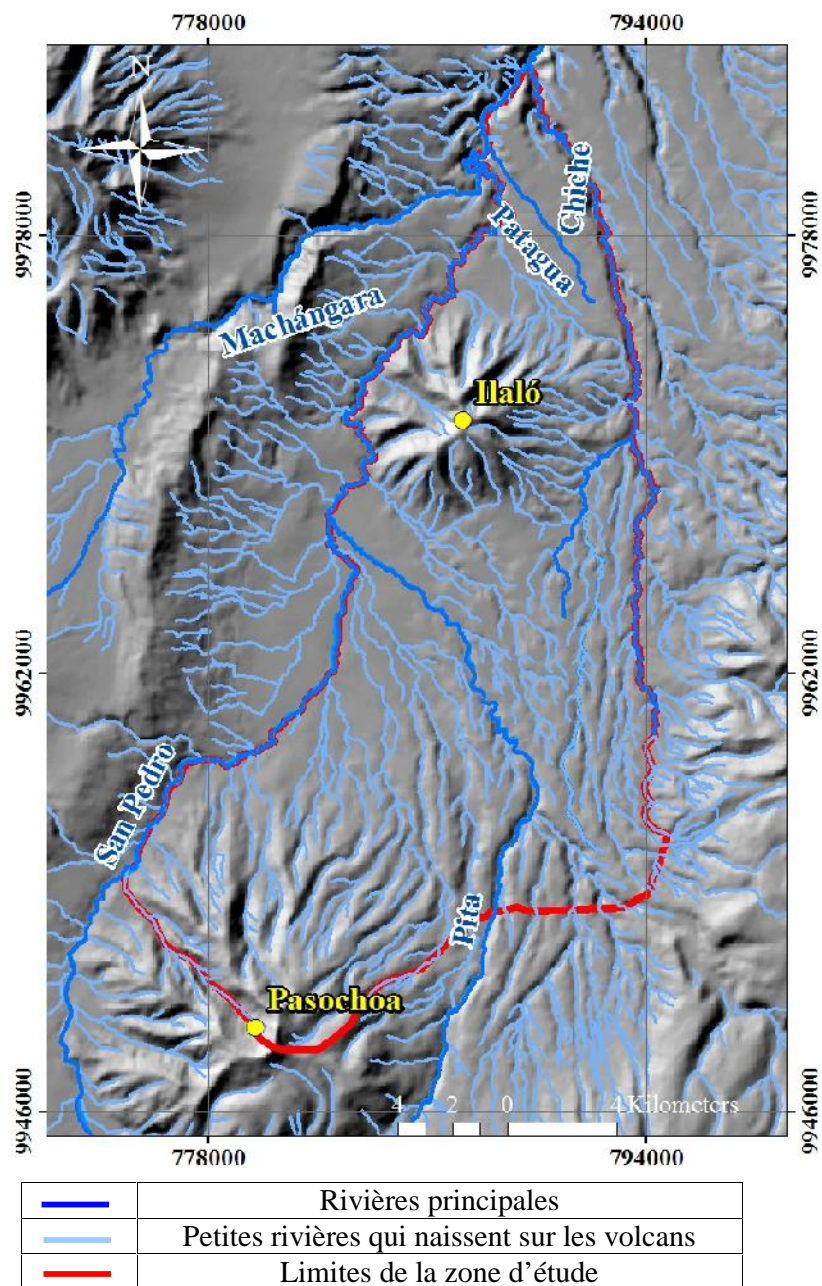


Figure 1.8. Hydrographie de la zone d'étude. Les noms des rivières et des volcans principaux sont indiqués sur la figure.

La rivière Pita naît de la fonte du glacier du volcan Cotopaxi au sud de la zone dans la Cordillère Réal. De sa naissance à sa jonction avec la rivière San Pedro, son altitude a varié entre 4760 m et 2440 m et son bassin versant fait 645 Km². La longueur de la rivière atteint 50 Km et son cours principal va du sud au nord dans sa partie haute puis de SE à NO au milieu de la Vallée de Los Chillos. Les eaux de cette rivière sont aussi utilisées pour l'irrigation de la zone est de la vallée qui a une activité économique essentiellement agricole.

La rivière Chiche est alimentée par plusieurs affluents qui prennent leur source dans les zones d'altitude de la Cordillère Réal. Son bassin versant a une surface de 400 Km² et varie en

altitude entre 3020 m et 2080 m. Le cours d'eau principal s'étend sur près de 40 Km et il a une direction d'abord nord – sud, puis SE – NO quand il arrive près du volcan Ilaló.

La rivière Machángara prend naissance sur le volcan Atacazo, dans la Cordillère Occidentale, traverse Quito et rejoint finalement la rivière San Pedro à 2200 m, constituant un bassin versant de 230 Km². Elle naît à une altitude de 3760 m et a une longueur d'environ 33 Km et une direction préférentielle SO – NE. Cette rivière récupère les eaux usées de la ville de Quito et les eaux des industries souvent peu traitées avant leur rejet. La rivière Machángara est donc très contaminée.

Au fur et à mesure que les rivières descendent vers le nord, elles creusent de profonds ravins qui traversent plusieurs formations géologiques. C'est un élément important qui sera développé par la suite afin de connaître les interactions possibles entre les systèmes hydrologiques superficiel et souterrain.

1.8. DEMARCHE SCIENTIFIQUE ET METHODOLOGIE PROPOSÉE

Chaque chapitre décrira les différentes méthodes (hydrodynamique, géochimie, approche isotopique) permettant d'affiner le diagnostic et proposer un modèle conceptuel de circulation de ce système aquifère. Le plan général est le suivant :

- **Chapitre 2 : Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de la zone**

Ce chapitre aborde le contexte géologique et géomorphologique général de la Vallée Interandine et des Cordillères qui l'entourent, afin d'expliquer la mise en place des volcans Ilaló et Paschoa. Dans une seconde phase, nous passerons à l'échelle de la zone d'étude, afin de mettre en évidence la relation entre les différentes formations et les sédiments qui ont rempli les vallées de Tumbaco et Los Chillos à partir des coupes géologiques établies à partir des données de terrain et de forages. Enfin, le contexte hydrogéologique sera présenté.

- **Chapitre 3 : Disponibilité et critiques des données sur la zone d'étude**

Les différentes données, antérieures ou obtenues dans le cadre de ce travail, comprennent d'une part des mesures mensuelles dans les forages, sources ou dans les stations pluviométriques, et d'autre part les diverses campagnes de mesures chimiques, isotopiques faites au cours de cette thèse. En supplément, on a utilisé les chroniques des données météorologiques des stations proches de la zone, qui ont été déjà traitées et homogénéisées dans le cadre du projet AguaAndes.

En complément on présentera les données météorologiques, les débits de surface et d'isotopes stables de l'eau (D, ¹⁸O) issus des travaux académiques antérieurs : rapports d'ingénieurs, rapports locaux de différentes entités telles que l'EPMAPS ou le Ministère de Ressources Non-Renouvelables, ou quelques publications sur l'aquifère Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos ou sur les eaux thermales de l'Ilaló.

Ces données ont fait l'objet d'une critique poussée, afin d'analyser leur représentativité.

- **Chapitre 4 : Interprétation des résultats**

Nous présenterons en premier lieu les caractéristiques hydrodynamiques obtenues à partir de nos mesures de terrain. Ces résultats seront ensuite confrontés aux caractéristiques géologiques et topographiques du chapitre 2. Il est toujours intéressant de connaître les interactions possibles en terme de circulation horizontale et verticale dans l'aquifère volcanique et son environnement immédiat. A partir de cette information, on proposera un bilan hydrique grossier du système aquifère afin de mettre en évidence les interactions surface – souterrain, mais aussi les interactions ou connexions possibles, qui sont très méconnues, avec les aquifères proches de la zone d'étude.

En second lieu, nous allons proposer des interprétations sur l'acquisition du faciès chimique des eaux souterraines en utilisant les données de conductivité, pH, potentiel redox, température de l'eau, teneurs en ions majeurs. Un sous - chapitre sera dédié à l'arsenic, élément important dans ces eaux, pour tenter d'expliquer son origine et son comportement et ses relations avec d'autres éléments traces.

En troisième lieu, les mesures d'isotopes stables (D, ^{18}O) de la pluie des 4 stations que nous avons installées dans la zone d'étude vont nous donner la possibilité d'appréhender la variabilité spatio-temporelle et déterminer un gradient local d'altitude. Leur comparaison avec les données d'isotopes stables de l'eau de l'aquifère va permettre de proposer une altitude et des zones probables de recharge. On essayera aussi de différencier les origines de ces eaux et les processus qui les affectent au cours de leur parcours souterrain, et définir si elles sont d'origine météorique ou géothermale.

De la même manière, les mesures d'isotopes radioactifs (tritium et ^{14}C) vont permettre de déterminer le temps de résidence ou le taux de renouvellement de l'eau dans le système aquifère.

Enfin, nous allons confronter tous ces résultats et proposer un modèle conceptuel du système.

- **Chapitre 5 : Conclusions et perspectives de la présente thèse**

Ce dernier chapitre synthétise les conclusions partielles de chaque chapitre amenant à une conclusion générale, des recommandations et perspectives pour continuer et approfondir ce travail.

2. CHAPITRE 2 : GEOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.1 GEOLOGIE REGIONALE

La zone d'étude est dans une région tectoniquement active du fait de la subduction de la plaque Nazca sous le bloc nord andin, constituant une micro plaque indépendante localisée au nord-ouest de l'Amérique du Sud (Pennington 1981, Kellogg et al. 1995).

2.1.1 UNITÉS MORPHOLOGIQUES DE L'EQUATEUR CONTINENTAL

Morphologiquement, l'Equateur continental est divisé en trois régions naturelles : Zone côtière, Vallée Interandine, Amazonie, séparées par le relief de la Cordillère Andine (Pourrut 1995).

- La côte actuelle est constituée d'une bande littorale de 40 à 180 Km de largeur (100 Km en moyenne) limitée à l'ouest par l'Océan Pacifique et à l'est par la Cordillère Occidentale (Figure 2.1). L'altitude varie entre 0 et 500 m depuis la mer jusqu'aux flancs des cordillères : Jama au nord et Chongón et Colonche au sud. Ces cordillères constituent une division morphologique naturelle formant trois bassins qui sont du nord au sud : Esmeraldas ou Borbón, Manabí et Progreso (Pourrut 1995).
- La Vallée Interandine est la dépression constituée par des bassins intra-montagneux dont la largeur varie entre 100 et 140 Km et elle est limitée par les cordillères Occidentale et Orientale (appelée aussi Réal), (Correa 2002). Du Nord au Sud, elle comprend trois unités :
 - i) depuis la frontière colombienne jusqu'à environ 2°30' S, les bassins intra-montagneux se trouvent entre les deux cordillères bien individualisées, de direction générale NNE-SSO, toutes les deux couronnées par des volcans dont l'altitude varient entre 4300 et 6300 m. Encadrée par les deux cordillères, cette unité a une largeur inférieure à 40 Km et est constituée d'une série de « hoyas » (vallées) séparées par des reliefs transversaux connus localement comme « nudos » (nœuds, Figure 2.1) (Pourrut 1995) ;
 - ii) de 2°30' S à 3°40' S, les volcans sont remplacés progressivement par de vastes plaines qui s'étendent entre 3000 et 4300 m (Figure 2.1) ;
 - iii) au Sud de 3°40' S, les deux cordillères perdent définitivement leur individualité et l'altitude ne dépasse pas 3500 m (Figure 2.1).
- La région amazonienne de l'Equateur appartient au grand Bassin Amazonien qui fait partie du craton guyanais. Son altitude fluctue entre 500 et 2000 m de la Cordillère orientale vers les basses plaines. L'Amazonie équatorienne a été divisée en deux régions morphologiques bien définies : la Zone Sous-andine et la Plaine Amazonienne équatorienne (Correa 2002) :
 - i) La Zone Sous-andine, parallèle aux Andes, est constituée par une cordillère d'environ 50 Km de largeur (Pourrut 1995). Elle est limitée à l'ouest par la cordillère Réal et à

- l'est par les reliefs du Napo et Cutucú dont l'altitude est comprise entre 500 et 3900 m. Elle est divisée dans la zone centrale par le relief tabulaire profondément érodé constitué par l'important cône de déjection de la rivière Pastaza (Figure 2.1) ;
- ii) La Plaine amazonienne, à l'est de la Zone sous-andine, correspond aux terrains qui forment de vastes plaines légèrement ondulées à reliefs doux, de grandes vallées souvent marécageuses à végétation dense, avec une altitude moyenne de 350 m (Pourrut 1995).

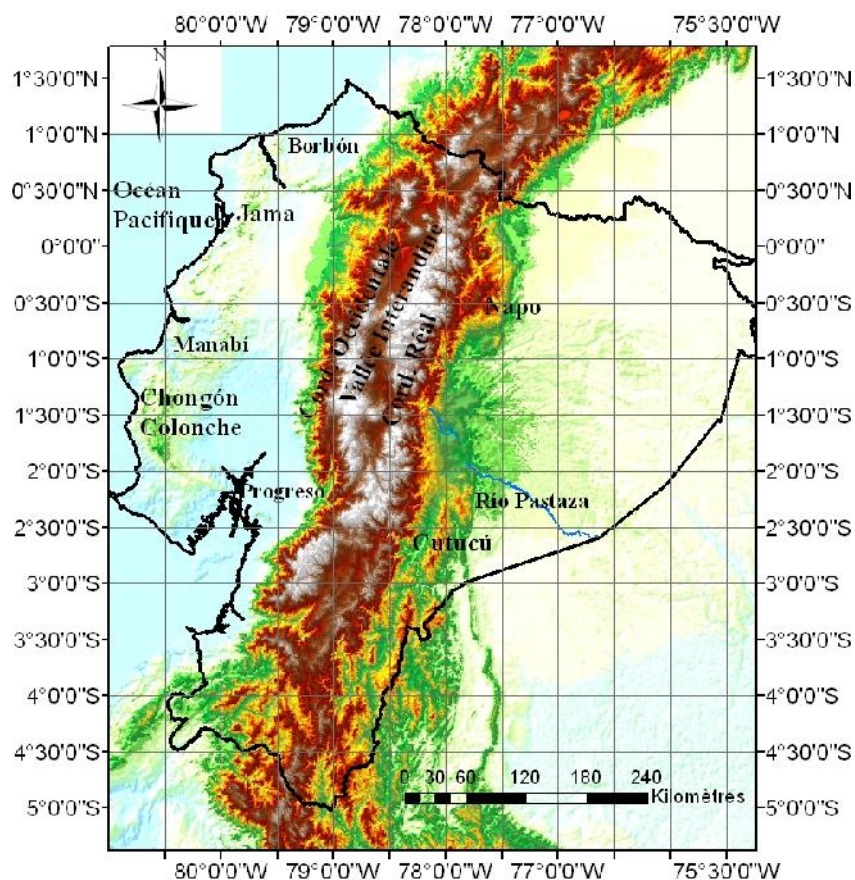


Figure 2.1. Régions géomorphologiques de l'Equateur continental.

2.1.2 CADRE GÉODYNAMIQUE DE L'EQUATEUR

La subduction de la plaque de Nazca sous le continent sud-américain est communément considérée comme le moteur de l'évolution géodynamique de la Cordillère Andine depuis l'Eocène moyen. L'évolution de cette subduction pendant le Néogène a joué un rôle très important à l'origine de tous les terrains sédimentaires de l'Équateur (Deniaud 2000) et est aussi à l'origine du volcanisme actif et de l'activité sismique évidente en Equateur (Correa 2002).

Dans les bassins intra montagneux, la déformation est intense, qui peut être accompagnée de modifications importantes du registre sédimentaire qui sont des caractéristiques des crises tectoniques. Elles sont ici définies par les discordances angulaires, l'érosion et les modifications de la granulométrie ainsi que l'origine du matériel sédimentaire qui sont liées à la proximité de « zones sources » à haut relief (Deniaud 2000).

2.1.3 EVOLUTION DE LA CHAÎNE ANDINE

Plusieurs modèles d'évolution de la chaîne des Andes ont été proposés ces dernières années (Baudino 1995, Deniaud 2000). Ils expliquent l'évolution des Andes à partir du Paléogène moyen au Néogène, en interprétant les données sismiques existantes ainsi que les contours cartographiques des formations géologiques. Il en résulte la description temporelle suivante :

2.1.3.1 De l'Eocène moyen à l'Oligocène inférieur (43 Ma à 30 Ma)

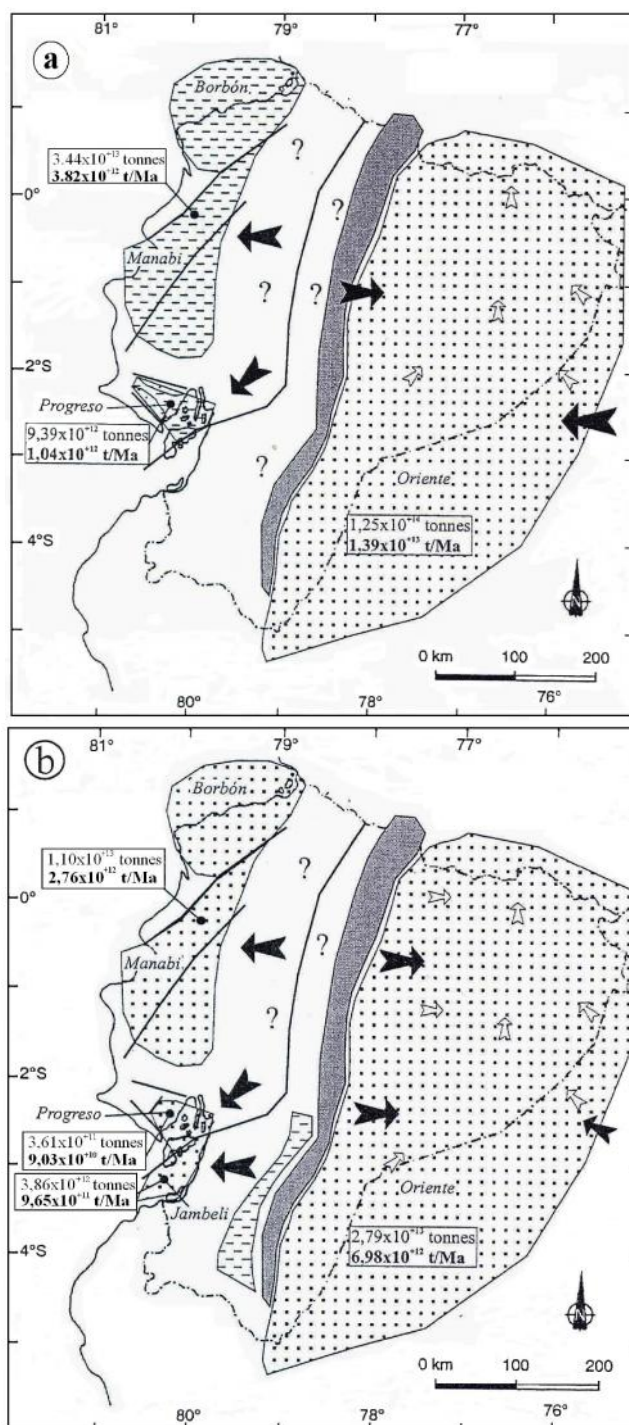
Durant l'Eocène les dépôts conglomératiques de la zone sous-andine et de la côte marquent probablement le début de l'élévation des Andes équatoriennes (Winter 1990), coïncidant avec une accélération de la convergence des plaques Nazca et sud-américaine (Nur et Ben-Avraham 1983, Pilger 1983, Pardo-Casas et Molnar 1987, Soler 1991). Cette époque constitue la période principale de structuration de la Cordillère Orientale. L'arc volcanique, créé à la suite de l'accrétion du bloc côtier, est totalement constitué à partir de la fin de l'Eocène (Baudino 1995). Les dépôts résultants, les plus anciens, constituent plusieurs formations des Andes équatoriennes qui ont été anciennement regroupées dans la Formation Macuchi (Baldock 1982).

2.1.3.2 Du Miocène inférieur au Miocène moyen (21-23 Ma à 12-14 Ma)

Les sédiments et dépôts volcaniques provenant de la proto-cordillère andine s'accumulent dans les bassins côtiers ou le bassin oriental, conséquence de l'obliquité de la subduction entre la plaque de Nazca et la plaque sud-américaine (Figure 2.2a) (Deniaud 2000). Durant cette période, la première crise tectonique correspond au début de la mise en place de bassins intra-montagneux, autour de 14 Ma. Le développement de dépôts sédimentaires à partir de cette période correspond à une modification structurale permettant l'ouverture de ces bassins (Deniaud 2000).

2.1.3.3 Du Miocène moyen au Miocène supérieur (12-14 Ma à 9-10 Ma)

Au cours du Miocène moyen, l'activité tectonique induite en Colombie par la collision du bloc de Chocó avec la plaque sud-américaine (Duque-Caro 1990) conduit à une réactivation de la proto-cordillère orientale provoquant un mouvement décrochant avec une composante en extension (transtension) qui a permis l'ouverture des bassins intra-montagneux du sud de l'Équateur. Les premiers dépôts sédimentaires néogènes alimentés par les volcans de la proto-cordillère orientale apparaissent dans ces bassins (Deniaud 2000). Partout, une augmentation de l'apport volcano-clastique témoigne d'une activité volcanique explosive (Figure 2.2b) (Baudino 1995).



23 – 14 Ma

Mégaséquences côtières M1-M2
(Formations Zapotal, Dos Bocas,
Subibaja, Villingota, Tosagua, Viche)

Séquence Oriente N1
(Formation Arajuno)

- Ouvertures de bassins d'avant-arc
néogènes

- Dépôts conglomératiques
- Dépôts argileux
- Proto-cordillère orientale (Réal)
- ⇨ Sens du drainage
- ➡ Flux sédimentaires

14 – 10 Ma

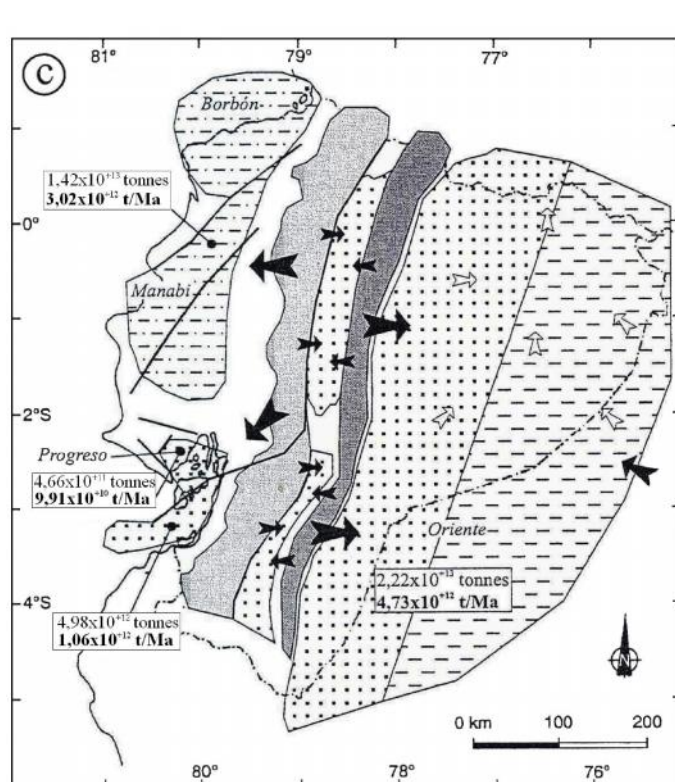
Mégaséquence côtière M3
(Formations Progreso - Angostura)

Séquence Oriente N2
(Formation Arajuno)

- Premiers dépôts sédimentaires dans
les bassins intramontagneux.
- Réactivation de la Proto-cordillère
Orientale.
- Développement dans le bassin
Oriente du système de drainage et
des flux sédimentaires provenant de
la cordillère orientale

- Dépôts conglomératiques
- Dépôts argileux
- Proto-cordillère orientale (Réal)
- ⇨ Sens du drainage
- ➡ Flux sédimentaires

Figure 2.2. Evolution de la chaîne andine de l'Équateur pendant le Néogène selon Deniaud (2000).



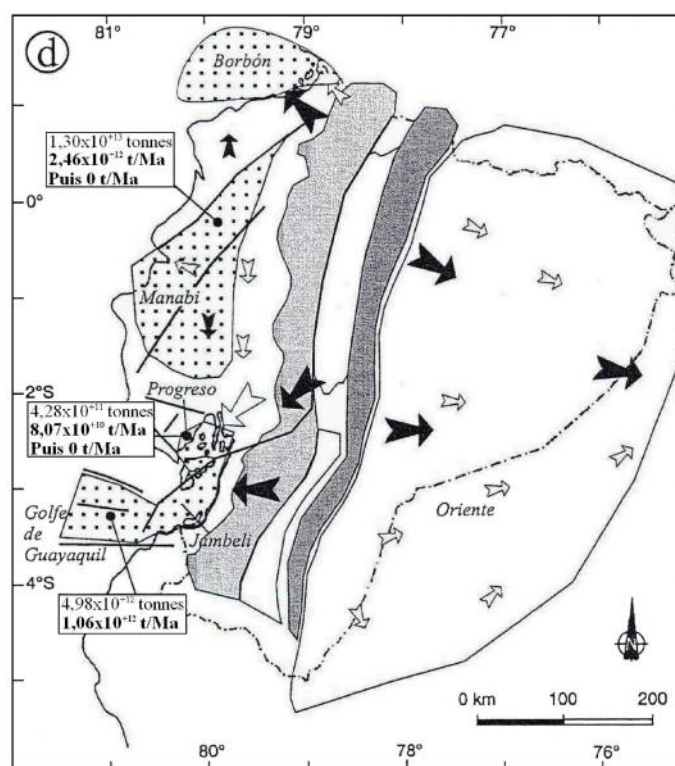
10 – 5 Ma

Mégaséquence côtière M3
(Formations Progreso – Onzole inférieur)

Séquence Oriente N3
(Formation Chambira-Curaray)

- Inversion des bassins intramontagneux.
- Individualisation de la vallée interandine.
- Subsidence du bassin Oriente.
- Surrection de la cordillère Occidentale.
- Réactivation de la cordillère Orientale.

- Dépôts grésio-conglomératiques
- Dépôts grésio-argileux
- Dépôts argileux
- Cordillère orientale (Réal)
- Cordillère Occidentale
- Sens du drainage
- ➔ Flux sédimentaires



5 Ma - Actuel

Mégaséquence côtière M4
(Formations Puná-Súa-Onzole supérieur-Borbón)

- Emersion progressive des bassins avant-arc de Manabí et Progreso.
- Ouverture et subsidence du bassin du Golfe de Guayaquil.
- Subsidence de la partie NE du bassin du bassin de Borbón.
- Surrection et érosion des bassins intramontagneux.
- Surrection et érosion du bassin Oriente
- Mise en place du système de drainage amazonien.

- Dépôts gréseux
- Cordillère orientale (Réal)
- Cordillère Occidentale
- Sens du drainage
- ➔ Flux sédimentaires

Figure 2.3. Evolution de la chaîne Andine de l'Équateur pendant le Néogène (suite) selon Deniaud (2000).

2.1.3.4 Du Miocène supérieur au Pliocène (9-10 Ma à 5-6 Ma)

La seconde crise tectonique est datée du Miocène supérieur. Elle correspond à la phase de déformation majeure des bassins intra-montagneux du sud de l'Équateur. Cette époque est caractérisée par des plis, chevauchements et dépôts en discordance angulaire de sédiments continentaux plus grossiers. Cette époque correspond aussi au début, plus au nord, de la surrection de la Cordillère Occidentale, à l'individualisation topographique de la Vallée Interandine et au début de l'activité tectonique de la chaîne andine (Deniaud 2000).

L'accélération du déplacement de l'Amérique du Sud vers le NO à partir de 10 Ma (Brozena 1986) et l'accrétion définitive du bloc de Chocó en Colombie à la même époque (Duque-Caro 1990) provoquent un épisode compressif E-O, parallèle à la direction de la convergence des plaques de Nazca et sud-américaine (Baudino 1995). Les bassins intra-montagneux sont inversés et ils se ferment en compression. Les bassins sont maintenant alimentés par le matériel grésio-conglomératique fluvial provenant des Cordillères Orientale et Occidentale qui s'élèvent progressivement (Steinmann et al. 1999). En parallèle, dans la Cordillère Orientale l'activité volcanique s'intensifie (Baudino 1995). Cette élévation simultanée des deux cordillères amène l'individualisation topographique de la Vallée Interandine (Figure 2.3c) (Ego et al. 1996, Lavenu et al. 1996).

2.1.3.5 Du Pliocène à l'Actuel (5-6 Ma à nos jours)

La troisième crise tectonique commence au Pliocène et continue jusqu'à l'Actuel. Le Pliocène et le Pléistocène constituent la période orogénique majeure des Andes équatoriennes (Deniaud 2000). L'accélération de la déformation dans le territoire intra-montagneux conduit à l'élévation rapide des cordillères (Steinmann 1997, Poulenard 2000). Cette époque se caractérise par le début des processus d'érosion des bassins intra-montagneux et localement par le dépôt de coulées volcaniques de l'arc quaternaire (Baudino 1995, Ego et al. 1996, Lavenu et al. 1996). L'activité tectonique maintient les contraintes compressives sur les bassins de la Vallée Interandine (Figure 2.3d) (Deniaud 2000).

2.2 *GEOLOGIE LOCALE*

Dans un premier temps, nous allons décrire et commenter la mise en place du bassin de Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos, dans le cadre des bassins intra-montagneux, les époques de formation et les relations stratigraphiques des différentes unités géologiques. Nous signalerons alors les problèmes rencontrés pour distinguer les formations sur le terrain et leurs positions relatives. Dans un deuxième temps, avec les données issues de la bibliographie, des forages et des observations de terrain, nous allons synthétiser l'information géologique.

2.2.1 BASSIN DE L'AQUIFÈRE TUMBACO – CUMBAYÁ – LOS CHILLOS DANS LE CONTEXTE DES BASSINS INTRA-MONTAGNEUX

2.2.1.1 Localisation du bassin de l'aquifère Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos

En Equateur, la Dépression Interandine, de direction nord – sud, s'étend sur 350 Km de long et 40 Km de large depuis la frontière colombienne au nord jusqu'à la ville d'Alausí au

sud (Figure 2.4). La transition est brutale avec les contreforts des cordillères qui présentent une pente moyenne de 28% à 30% à l'ouest et 18% à l'est (Lavenu et al. 1995). Au bord de la dépression, et un peu à l'intérieur, se sont développés quelques édifices volcaniques plio-quadernaires (Baudino 1995).

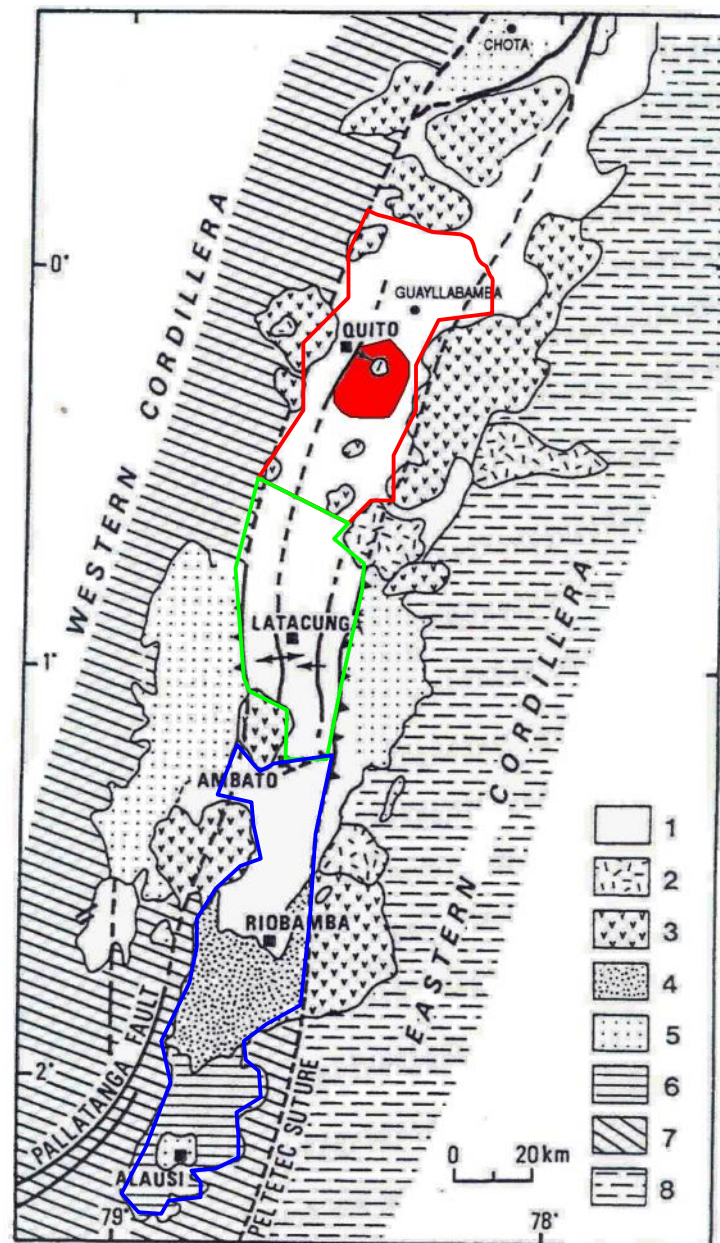
La topographie relativement plane du fond de la vallée a été perturbée par la mise en place de cônes volcaniques et par les produits des éruptions qui ont formé des zones plus hautes. Ces zones limitent, du nord au sud, quatre grands bassins où les altitudes varient entre 2500 m et 3000 m :

- le bassin du Chota
- le bassin Quito – Guayllabamba
- le bassin Ambato – Latacunga
- le bassin Alausí - Riobamba

L'aquifère de Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos est situé au nord de la Vallée Interandine, à l'intérieur du bassin Quito – Guayllabamba (Figure 2.4).

Les limites de ce bassin sont : au sud, les complexes volcaniques des volcans Cotopaxi, Rumiñahui, Santa Cruz ; au nord, la limite avec le bassin du Chota est constituée par un groupe de failles de direction NE-SO où le substratum du bassin peut être observé. Ce substratum est connu comme la Formation Macuchi. Elle est constituée par un micro-gabbro avec intercalations de niveaux schisteux d'âge crétacé supérieur à éocène (Lavenu et al. 1996). Latéralement, il est limité par deux segments de zones de sutures résultant d'accrétions successives : la suture de Peltetec à l'est et la suture de Pallatanga – Calacalí – Palenque à l'ouest (Aspden et Litherland 1992, Baudino 1995, Correa 2002) (Figure 2.4).

La plupart des dépôts de remplissage du bassin de Quito – Guayllabamba, comme le reste de la Vallée Interandine, sont recouverts par des produits volcaniques du Pléistocène supérieur à l'actuel qui se déposent sur la Formation Macuchi sans une discordance apparente (Baudino 1995, Lavenu et al. 1996).



1	Sédiments quaternaires
2	Volcaniques quaternaires
3	Volcaniques pliocènes
4	Sédiments pliocènes
5	Sédiments et volcaniques du Miocène
6	Sédiments de l'Oligocène
7	Cordillère Occidentale
8	Cordillère Orientale
	Zone d'étude
	Bassin Quito – Guayllabamba
	Bassin Ambato – Latacunga
	Bassin Alausí - Riobamba

Figure 2.4. Carte géologique simplifiée de la Dépression Interandine et limites des grands bassins (Baudino 1995, Lavenu et al. 1995).

2.2.1.2 Lithologie et sédimentologie du bassin Quito – Guayllabamba

A partir de l'Eocène moyen, le début de la surrection des Andes est accompagné par le début du volcanisme et de la fracturation qui perdurent jusqu'à présent. Les événements éruptifs et les processus de sédimentation sont à l'origine des formations volcano-sédimentaires, recouvertes par des couches successives de tuf volcanique.

Sur la zone Quito – Guayllabamba l'érosion des formations géologiques par les rivières Pisque et Guayllabamba permet d'étudier une grande partie des dépôts de la Dépression Guayllabamba (Figure 2.5). Les affleurements les plus représentatifs ont été observés sur son bord nord, tandis que le centre de cette dépression est formé par plusieurs glissement récents produits de l'érosion de la rivière Pisque (Baudino 1995).

Bien exposée dans le lit de la rivière Guayllabamba apparaît la Formation Macuchi, d'âge Crétacé supérieur à Éocène. Au-dessus de cette formation, cinq autres formations principales constituent le « remplissage » récent de la Dépression Interandine (Figure 2.5). Du bas vers le haut ce sont : la Formation Pisque, la Formation San Miguel, la Formation Guayllabamba, la Formation Chiche et les dépôts pyroclastiques en surface connus comme la Formation Cangahua (Baudino 1995). Dans la Vallée de Tumbaco, on observe aussi la Formation Ilaló, dépôt constitutif du cône du volcan du même nom. Au nord de la zone d'étude, la présence de profonds ravins, permet d'observer la succession des 3 dernières couches de bas en haut, Guayllabamba, Chiche, Cangahua, où rien n'indique une géométrie particulière, comme la présence de discontinuités géologiques ou de plissements.

Les formations Pisque et San Miguel ont été observées en affleurement plus au nord, en dehors de la zone d'étude. Ces formations ont des âges Pliocène à Pléistocène inférieur. La Formation Pisque est volcano-sédimentaire constituée de flux de boue intercalée avec des tufs et vers le toit de la formation, de conglomérats dans une matrice sableuse et de blocs andésitiques. La Formation San Miguel est aussi volcano-sédimentaire, caractérisée par des grès à gros grain, des tufs et des lutites tufacés. Elles pourraient être présentes dans notre zone sous les formations étudiées, mais aucun forage ne les atteint. Par conséquent, elles ne seront pas prises en compte dans notre conceptualisation géologique. Les deux formations Pisque et San Miguel et la Formation Guayllabamba ont été souvent définies par les géologues locaux comme le groupe Pré-Chiche.

2.2.1.2.1 Formation Ilaló (Pléistocène inférieur)

Le volcan Ilaló est une structure volcanique de forme imparfaite culminant à 3170 m. Il est creusé par de profonds ravins distribués radialement. Aucune moraine ni trace d'anciens glaciers n'y a été observée et toutes les caractéristiques morphologiques du volcan indiquent qu'il a subi des processus d'érosion très importants (Cornejo 1983).

Le volcan Ilaló a donné son nom à une formation constituée par 60% de brèches et 40% de laves qui forment le cône volcanique (Cornejo 1983). Les brèches, de couleur gris sombre, ont été observées sous forme de couches mesurant entre 1 et 30 m. La granulométrie de ces brèches est très variée : brèches fines composées d'éléments de quelques centimètres, ou brèches très grossières avec des blocs jusqu'à 1,3 m (Cornejo 1983). Ces blocs sont en général angulaires. Les laves sont de couleur gris sombre à noire, prenant avec l'altération des tonalités rougeâtres, marron-rougeâtre ou marron-jaunâtre. Les coulées de laves ont entre 0,4 et 3 m d'épaisseur et une composition chimique intermédiaire entre basalte et andésite

(Cornejo 1983). L'épaisseur précise de la Formation Ilaló est inconnue ; à partir des éléments géologiques connus elle a été estimée par Cornejo (1983) à quelques centaines de mètres. Son extension est aussi inconnue.

Cette formation est généralement recouverte par des dépôts pyroclastiques récents (formation Cangahua détaillée dans la section 2.2.1.2.4), et sa relation avec les formations volcano-sédimentaires Chiche ou Guayllabamba a fait l'objet d'une étude bibliographique extensive, que l'on discutera par la suite. On note cependant que la carte géologique « Sangolquí », publiée par la Direction Générale de Géologie et des Mines de l'Equateur (DGGM 1980), montre des incohérences d'âge avec différentes études de terrain autour de ce volcan. .

2.2.1.2.2 La Formation Guayllabamba (Pléistocène inférieur à moyen)

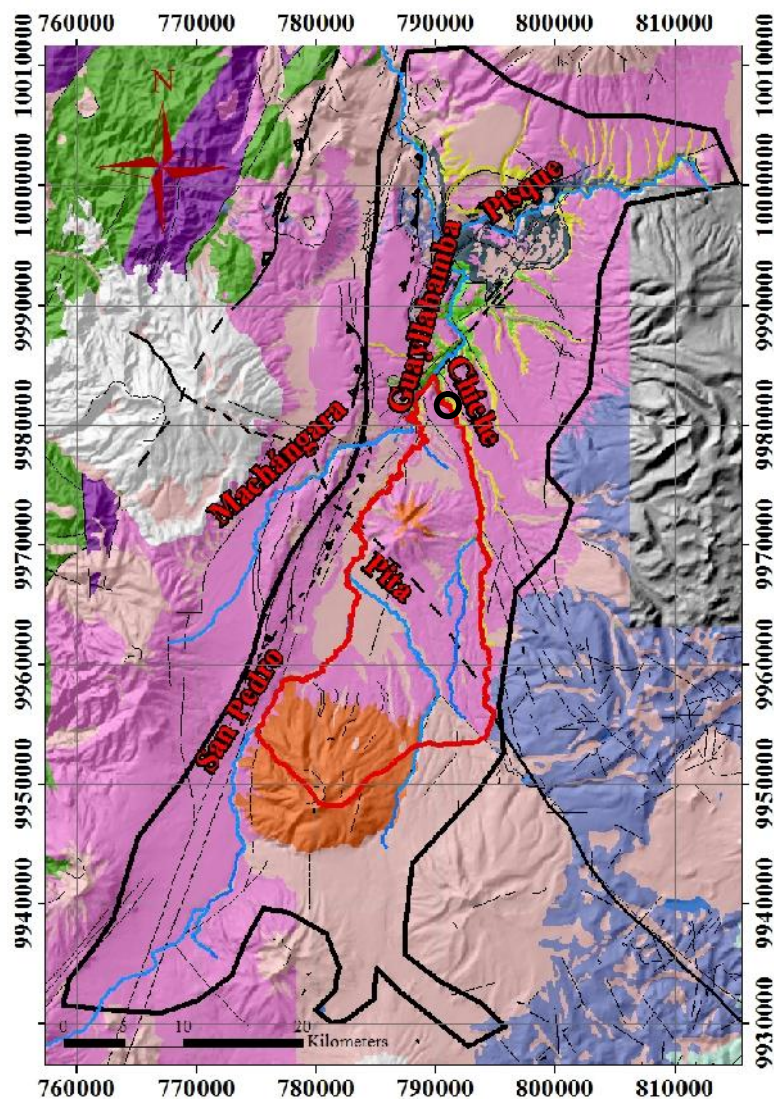
Cette formation est composée de bancs métriques de lahars vers le nord, et de produits volcaniques comme des flux pyroclastiques et coulées de lave vers le sud. Ces produits proviennent des volcans Ilaló, Puntas ou Pichincha (Villagómez 2003). Vers le haut, la formation Guayllabamba a une lithologie alluviale de matrice sableuse très érodée (Villagómez 2003). Son épaisseur dans l'actuelle Dépression Guayllabamba varie entre 120 et 400 m (Villagómez 2003). Sa réelle extension est inconnue mais des affleurements existent au nord de la zone d'étude (cercle noir Figure 2.5).

Selon Descloitres (1985) cette formation présente des lahars déposés directement sur la surface érodée de la Formation San Miguel ainsi qu'un système de failles normales de direction peu identifiable. Ces lahars sont situés à 5 Km au nord de la zone d'étude, où n'est pas notifiée la présence de la Formation volcanique Ilaló. En complément, Johnson et al. (1980), Descloitres (1985), affirment que l'érosion de la Formation Guayllabamba a été très importante puisque l'extension de la Formation Chiche s'étend jusqu'à 15 Km au nord de la zone d'étude, déposée directement sur la Formation San Miguel, en l'absence de la Formation Guayllabamba.

2.2.1.2.3 La Formation Chiche (Pléistocène moyen à supérieur)

Ces dépôts essentiellement volcano-sédimentaires ont une épaisseur qui varie dans la zone d'étude entre 140 m au nord et 230 m au sud. Baudino (1995) a constaté que ces dépôts sont composés de matériaux volcano-clastiques déposés en milieu lacustre où s'intercalent, dans la partie supérieure, des niveaux fluviaux. Un banc de ponce d'environ 5 m d'épaisseur sert de couche guide (Baudino 1995). Les 30 à 50 mètres les plus récents sont constitués par des bancs de cendre plus fins où l'on peut distinguer des paléosols. Ces paléosols sont constitués de grès massifs avec des teneurs basses en argile et sans horizons pédogénétiques bien marqués, comme souvent en zones volcaniques actives où ces sols sont rapidement recouverts par une nouvelle éruption (Smith 1987). Parfois le sommet de la Formation Chiche peut être confondu avec les dépôts pyroclastiques de la Formation Cangahua qui la recouvre, puisqu'ils ont des faciès similaires. Son extension correspond aux limites noires sur la Figure 2.5.

Selon Vera (1983), Villagómez (2003), les produits des éruptions des volcans Cotopaxi, Pasochoa et Rumiñahui, situés plus au sud, sont à l'origine de la Formation Chiche.



	Dépôt récents	Holocène
	Cangahua – dépôts pyroclastiques récents	Pléistocène supérieur à Holocène
	Volcano-sédiments Chiche	Pléistocène supérieur
	Volcano-sédiments Guayllabamba	Pléistocène moyen
	Volcano-sédiments San Miguel	Pléistocène inférieur
	Formation Volcanique Ilaló – Pasocha	Pléistocène inférieur
	Volcan Pichincha	Plio – Pléistocène
	Formation Macuchi	Crétacé supérieur – Eocène
	Cordillère Occidentale	Crétacé inférieur – Oligocène
	Cordillère Réale	Paléozoïque – Crétacé inférieur
	Limites de la Formation Chiche	
	Zone d'étude	
	Rivières principales	
	Contact Chiche - Guayllabamba	

Figure 2.5 Géologie du bassin Quito-Guayllabamba, englobant la zone d'étude et les rivières principales.

La Formation Chiche présente des failles normales dans toute son extension, avec une direction N – S, conséquence de la seconde étape tectonique régionale (Descloîtres 1985). De plus cette formation a été érodée par les rivières San Pedro et Chiche qui vont la creuser totalement vers le nord de la zone d'étude.

2.2.1.2.4 Formation Cangahua (Pléistocène supérieur à Holocène)

Du matériel pyroclastique va se déposer et constituer le dépôt d'origine volcanique le plus récent, la Formation Cangahua. Elle provient de plusieurs sources de cendres volcaniques locales et régionales qui se sont mélangées, issues principalement de la Cordillère Réal (avec un apport mineur de la Cordillère Occidentale), des volcans les plus actifs pendant les dernières centaines de milliers d'années, mais sans que cela soit assuré précisément (Clapperton et Vera 1986). Au moins 17 sources probables ont été identifiées : El Soche, Chachimbiro, Cerro Negro, Imbabura, Mojanda, Ninahuilca, Pululagua, Chacana, Antisana, Cotopaxi, Tungurahua, Quilotoa, Guagua Pichincha, Sangay, Chimborazo, Cayambe y Chalupas (Hall et Mothes 1996). Ces dépôts sont caractéristiques d'émissions de volumes faibles de matériaux fins. Ce matériel a subi une météorisation très importante qui rend son identification difficile. La Cangahua a souvent une texture consolidée et est composé de tufs, de cendres volcaniques indurés avec une texture de limono sableuse. Elle présente une série des paléosols en profondeur similaires à ceux qui sont rencontrés au sommet de la Formation Chiche ; ils sont parfois ré-sédimentés par le vent.

Son épaisseur varie de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Pour Baudino (1995), dans la zone de Quito – Guayllabamba, la formation Cangahua est composée d'une succession de niveaux fins, centimétriques à décimétriques, plus rarement métriques. Dans la zone d'étude son épaisseur reconnue est de 3 à 50 m. La Formation Cangahua couvre près de 20.000 Km² du couloir interandin (Iriondo et Kröhling 2007).

Hall et Mothes (1996) proposent un âge inférieur à 0,5 Ma pour la Cangahua de la Vallée de Tumbaco. Ils ont daté plusieurs couches de cendres et lapilli qui font partie de cette formation : entre 230.000 et 260.000 ans pour la cendre localisée à une profondeur entre 33 et 37 m (Annexe 2A, événement éruptif « Potrerillos ») et 165.000 ans pour la couche guide des lapilli et ponce Pifo, à 22 m de profondeur (Annexe 2A, événement éruptif « Lave callejones »). D'autres âges sont fournis en Annexe 2A pour des couches plus superficielles. Il est évident que la Formation Cangahua résulte d'un processus continu durant le Pléistocène tardif, interrompu fréquemment par des chutes plus importantes de lapilli et cendres grossières.

2.2.2 RELATIONS STRATIGRAPHIQUES ENTRE LES FORMATIONS ILALÓ, CHICHE ET GUAYLLABAMBA

Dans ce sous-chapitre, nous allons discuter et analyser les relations stratigraphiques entre les formations géologiques Chiche et Ilaló d'une part, Guayllabamba et Ilaló d'autre part. Une recherche bibliographique extensive a donc été menée.

2.2.2.1 Information bibliographique sur les relations stratigraphiques des formations Chiche et Ilaló

La coupe de la carte géologique « Sangolquí » (DGGM 1980) montre la Formation volcanique Ilaló reposant au-dessus de la Formation volcano-sédimentaire Chiche (Figure 2.6). La légende de la carte géologique explique que la disposition de ces deux formations n'est pas claire parce que la formation Ilaló est totalement couverte par la Cangahua mais qu'elle semble plus jeune que Chiche. Je n'ai pas pu accéder à la notice de cette carte géologique ni aux rapports qui ont servi à son élaboration (cette disparition des documents de base étant la conséquence probable de la restructuration de l'INIGEMM dans les années 1990).

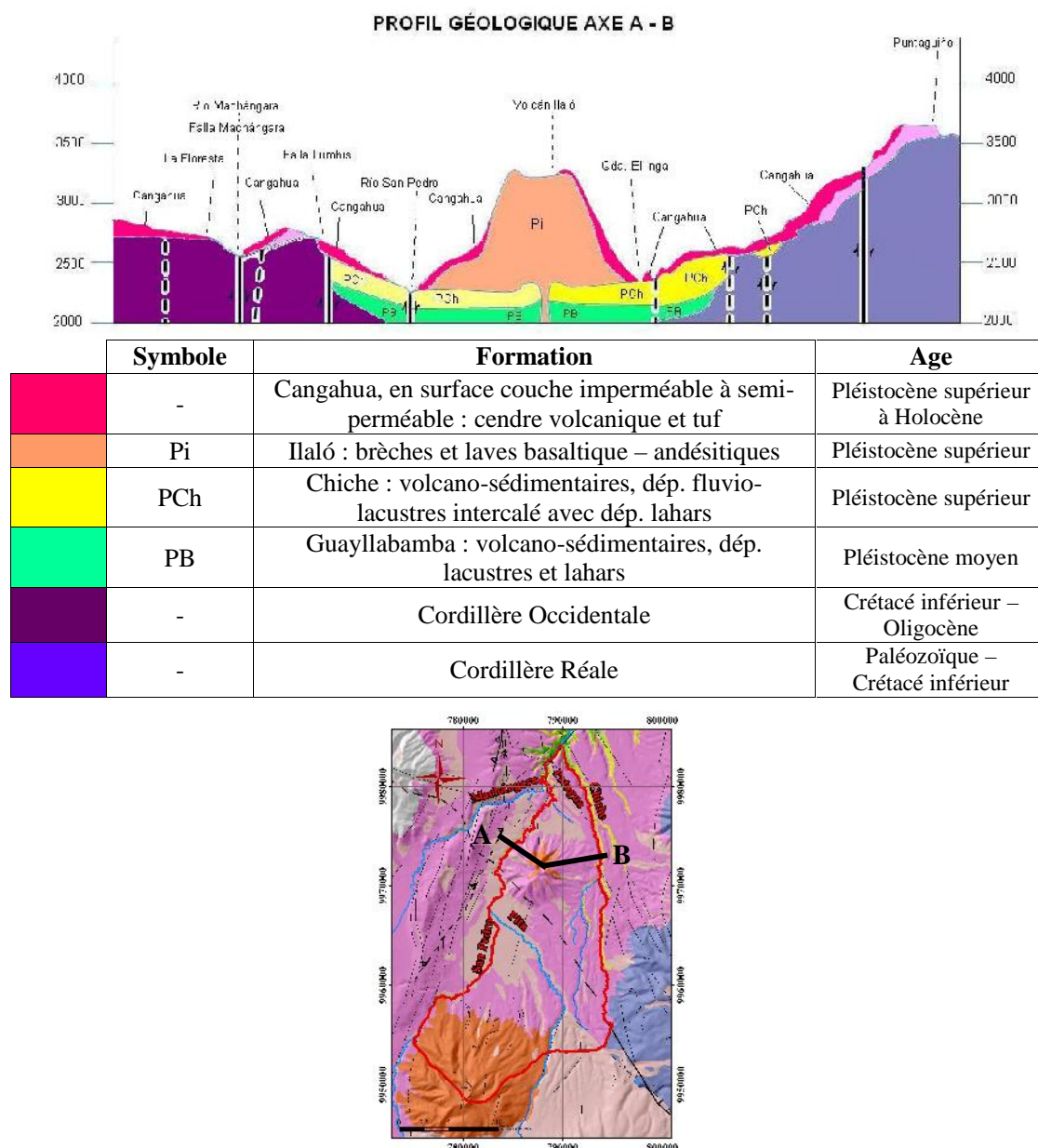


Figure 2.6. Profil géologique de l'axe A-B considérant Ilaló plus jeune que Chiche (d'après la carte géologique de Sangolquí).

La même hypothèse figure dans le mémoire de stage d'ingénieur de Correa (2002) pour qui la formation Ilaló est apparemment plus jeune que Chiche, mais sans mentionner de vérification sur le terrain.

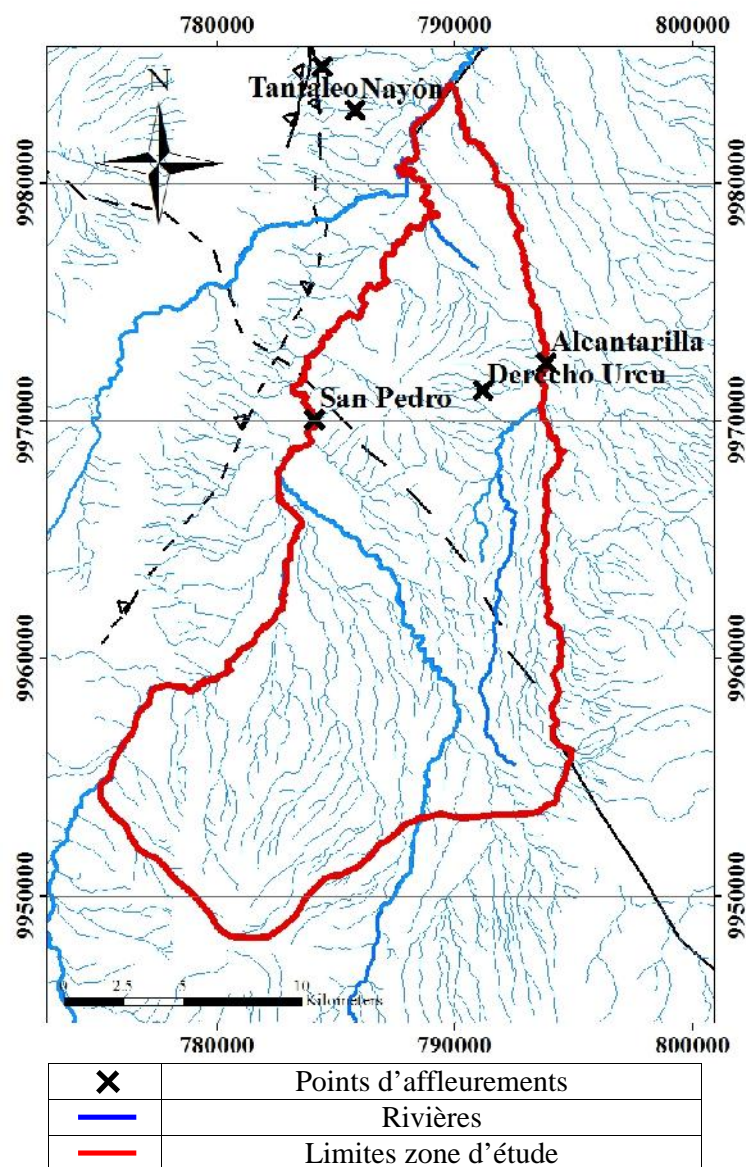


Figure 2.7. Localisation des points d'étude des affleurements des Formation Chiche et Formation Ilaló.

Par contre, Cornejo (1983), dans le cadre du projet géothermique de la Vallée de Los Chillos, a étudié la minéralogie et la pétrologie de la Formation Ilaló dans les quebradas Nayón et Alcantarilla (Figure 2.7) où affleure la séquence complète de la Formation Chiche déposée sur la partie supérieure du groupe Pré-Chiche (partie haute de Guayllabamba). Il n'a pas observé de produits volcaniques qui pourraient être attribués à l'activité du volcan Ilaló. Ce commentaire de Cornejo (1983) peut être considéré juste puisque Ilaló devrait être plus vieux qu'au moins, la partie supérieure de Pré-Chiche. Pour lui, aucune observation de terrain ne démontre que la Formation volcanique Ilaló soit plus jeune que la Formation Chiche et Guayllabamba. Au contraire, dans la rivière San Pedro, à l'ouest, au pied de l'Ilaló, il note la présence de brèches volcaniques, que cet auteur attribue à la Formation Ilaló situées en

dessous des sédiments Chiche (Figure 2.7). Dans la pente du volcan il observe que la Formation Chiche repose directement sur Ilaló. Cependant, cet auteur ne donne pas de localisation précise ni de photo de ce contact.

Acosta (1985), pendant son stage d'ingénieur, a vérifié les observations de Cornejo (1983) sur les quebradas Alcantarilla et Tantaleo (Figure 2.7) où il a aussi observé en dessous de plusieurs niveaux de conglomérats, assimilés au mur de la formation Chiche, une formation volcano sédimentaire de lithologie alluviale dans une matrice sableuse qui pourrait correspondre au groupe Pré-Chiche, à la partie supérieure de la Formation Guayllabamba.

Finalement, Barberi et al. (1988) ont daté une andésite basaltique de l'Ilaló par la méthode K/Ar, à environ $1,62 \text{ Ma} \pm 0,16$, sans préciser l'endroit de prélèvement. . Pour la Formation Chiche, il n'existe pas d'âge radiométrique, mais Lavenu et al. (1996) rapportent la présence d'un fossile de *Glossotherium* du Pléistocène au toit de la Formation Chiche à 15 Km au nord de la zone d'étude, dans la rivière Guayllabamba. Winkler et al. (2005) signalent que ce fossile a été couramment interprété pour indiquer un âge autour de 0,5 Ma. D'autre part, Villagómez (2003) a observé sur le terrain le contact stratigraphique entre la Formation Chiche et la Formation Mojanda, à 30 Km au nord de notre zone d'étude, à la limite nord de la Formation Chiche (Figure 2.5). La Fm Mojanda a été datée par Barberi et al. (1988) entre $0,50 \pm 0,06$ et $0,59 \pm 0,06$ Ma.

Dans la littérature on trouve peu d'informations sur les liens entre les formations Guayllabamba et Ilaló. Villagómez (2003) pendant son stage d'ingénieur a fait un important travail de terrain et ses analyses pétrographiques ont permis de corréler la formation Guayllabamba avec ses possibles sources et de proposer des âges probables de dépôt. Les datations avec la méthode K/Ar donnent à la Formation Guayllabamba un âge entre 1,0 et 1,3 Ma, donc plus jeune que la Formation Ilaló.

Pour confirmer ces interprétations, des données géologiques complémentaires étaient nécessaires. La géologie de la zone d'étude est complexe et, sur le terrain, les différentes formations ont été souvent difficiles à distinguer. Nous avons donc aussi utilisé des descriptions lithologiques des forages et les sondages électriques verticaux. Toute cette information a été récupérée sur des points d'eau recensés dans la zone d'étude que nous allons présenter de manière détaillée.

2.2.2.2 Inventaire des points d'eau sur la zone d'étude

On a recensé 164 points d'eau (forages, puits et sources) à partir des vieux rapports techniques et académiques qui atteignent les formations Chiche, Ilaló et Cangahua. Parmi eux, 40 points sont localisés dans des propriétés municipales gérées par l'EPMAPS (Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento) ou bien sur la voie publique. Les autres points sont dans des propriétés privées avec un accès difficile voire impossible où on n'a obtenu que quelques informations peu précises.

Parmi les 164 points, 37 puits n'ont pas plus de 50 m de profondeur et concernent uniquement la Fm Cangahua (voir section 2.2.1.2.4 « La Formation Cangahua »). Cette information provient de la SENAGUA (Secretaría Nacional del Agua).

Tous les points d'eau sont localisés sur la Figure 2.8 ; en Annexe 2B figurent des cartes avec les codes des ouvrages qui atteignent et captent l'aquifère Chiche ou Ilaló (124 points).

Les caractéristiques de ces ouvrages (nom des forages de plus de 50 m de profondeur, coordonnées dans le système UTM WGS 84, altitude et code d'identité, et s'ils présentent des conditions jaillissantes) sont données dans le tableau de l'Annexe 2B.

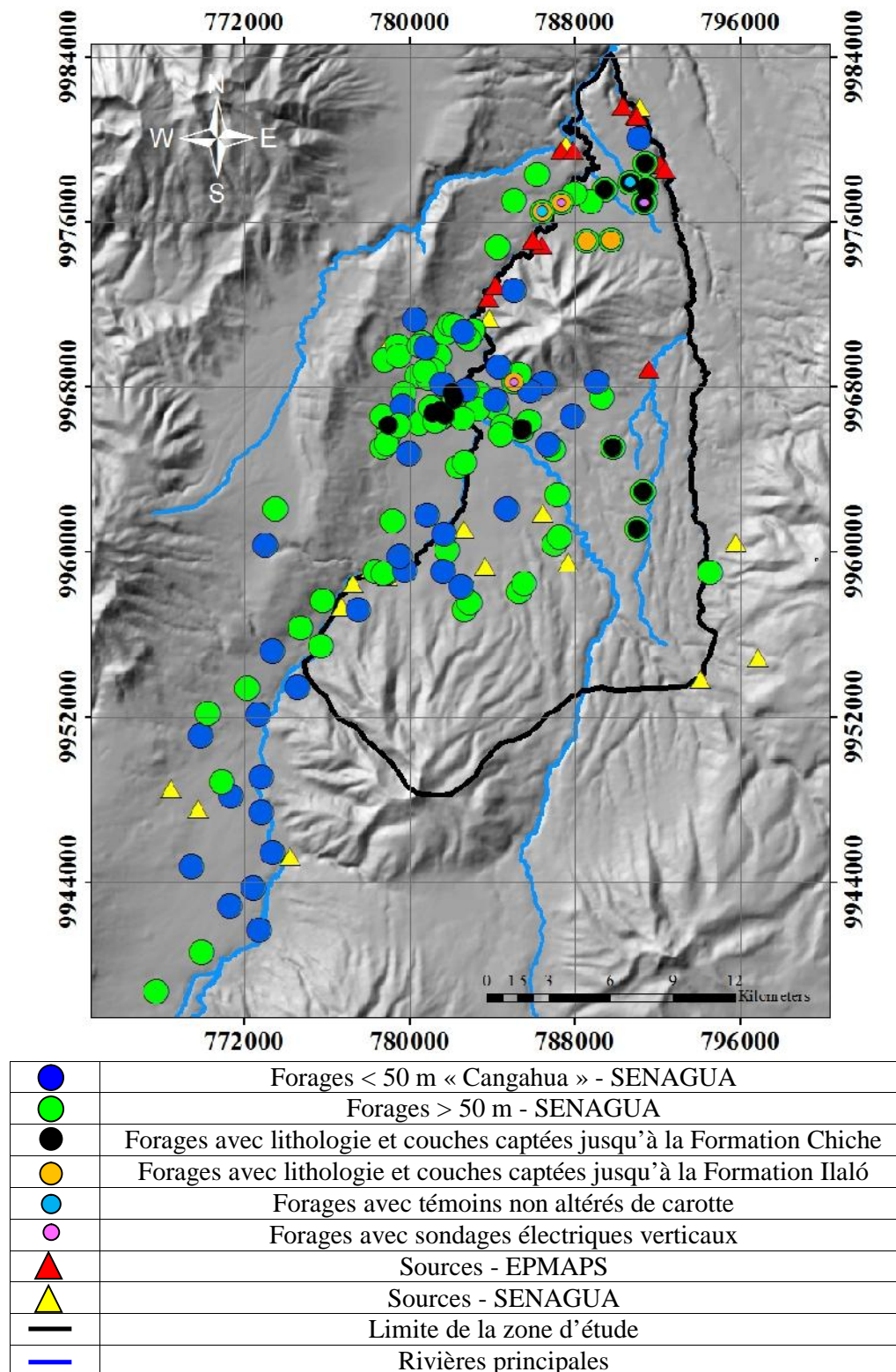


Figure 2.8. Localisation des forages et sources.

Les données géologiques des forages ont été récupérées à partir de travaux académiques ou de vieux rapports techniques concernant surtout l'aquifère de Quito mais aussi les autres aquifères proches, dont celui de la zone de Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos, où on dispose de 19 transects géologiques régionaux dont 10 sur la zone d'étude (Torres 1975, Acosta 1985, Coello 2002, Paredes et Zanafria 2002, Figueroa 2003, Muñoz 2005, Arias 2008, Delgado 2008, Peñafiel 2009). Ces données ont été confrontées à la carte géologique.

La lithologie de 24 forages réalisés entre 1981 et 2008 sur la zone de Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos a été récupérée dans des rapports de l'EPMAPS. D'autre part, 23 forages supplémentaires aux descriptions lithologiques assez imprécises viennent de la SENAGUA (Figure 2.8). Pour ces 47 forages sont connues leurs profondeurs, les formations géologiques traversées et les couches productrices d'eau. L'information EPMAPS indique aussi les profondeurs des crépines, indice des niveaux aquifères (Figure 2.8) et différencie les forages qui captent seulement la Formation Chiche (18 forages, points noirs sur la Figure 2.8) et les forages qui atteignent la Formation Ilaló (6 forages, points orange sur la Figure 2.8).

En 2008, l'EPMAPS a réalisé deux forages carottés qui ont été photographiés et dont la lithologie a été décrite (Figure 2.8). Sur les photos (Annexe 2C) il est très difficile de différencier réellement les formations géologiques.

Au nord de la zone de Tumbaco, l'EPMAPS a aussi réalisé en juillet 2008 25 sondages verticaux de résistivité électrique et potentiel spontané (Figure 2.8). Les résultats ont pu être récupérés sur 3 forages seulement, ce qui a permis de compléter la description lithologique.

2.2.2.2.1 Description et critique des données lithologiques

Les différents rapports de forage de l'EPMAPS ont des auteurs différents et les descriptions lithologiques ne sont donc pas toujours très cohérentes. De plus l'analyse a été faite sur un broyat, ce qui peut être en décalage sensible avec la réalité des formations géologiques (texture, structure...) traversées au moment du forage. C'est le cas en particulier pour discriminer le contact Cangahua – Chiche (Figure 2.9 à Figure 2.12 de l'annexe 2D). Après une large recherche bibliographique, et en comparant ce que les différents géologues ont noté sur ces deux formations, nous avons défini, souvent arbitrairement, le contact Cangahua – Chiche. La description des tufs avec des sables fins à très fins, des cendres volcaniques avec de ponce, ou de limon – sableux a été le critère utilisé pour reconnaître la Cangahua.

Dans le cas du contact Chiche – Ilaló : le forage La Primavera 1A situé à 4 Km au nord du volcan (M303, Figure 2.10 Annexe 2D) conforte l'hypothèse d'une Formation Chiche plus jeune que la Formation Ilaló, les conditions de dépôt déterminées par Cornejo (2003) du côté ouest de la rivière sont vérifiées avec l'absence de la formation Pré-Chiche dont le dépôt n'a pas atteint les zones les plus proches du volcan et un dépôt du Chiche directement sur Ilaló. On reconnaît la Formation Chiche par sa description lithologique constituée de blocs andésitiques mélangés à des laves andésitiques mais aussi des tufs, sable ou des graviers, puis en dessous de cet ensemble on trouve des « laves andésitiques fracturées » qui pourraient correspondre à la Formation Ilaló. La même description a été trouvée à Rumihuayco 1, un forage qui se trouve au nord, au pied du volcan Ilaló (M305, Annexe 2D) et El Tingo Nuevo au sud du volcan (I102, Figure 2.12).

Nous avons aussi discuté directement avec les foreurs qui ont participé au forage El Nacional (M302, Figure 2.11). Leur rapport n'indique aucune variation de lithologie mais ils avaient noté à partir de 120 m de profondeur que l'eau était devenue plus minéralisée, plus chaude et artésienne. Malheureusement, ces informations restent très subjectives et floues, mais elles apportent cependant des éléments de réponse à la question du contact Chiche – Ilaló, l'Ilaló ayant des caractéristiques hydrothermales et étant en pression se trouve sous le Chiche dans ce forage.

L'information donnée par la SENAGUA est une série de descriptions générales dont l'origine n'est jamais mentionnée (observations sur le terrain, rapports préliminaires, autres). Cette information inclut une description géologique et hydrogéologique (diamètre du forage, profondeur, débit d'exploitation, pH, alcalinité, conductivité électrique, potentiel redox, température, oxygène dissous, usage, source de contamination, entreprise foreuse, propriétaire et usagers). Mais elle n'indique pas les profondeurs des formations ou les couches productrices d'eau, ni les profondeurs des crépines. Cette information limitée va seulement aider à confirmer d'une manière subjective l'extension de la formation Chiche, mais elle ne pourra pas être utilisée pour répondre à la question des relations stratigraphiques entre les formations géologiques.

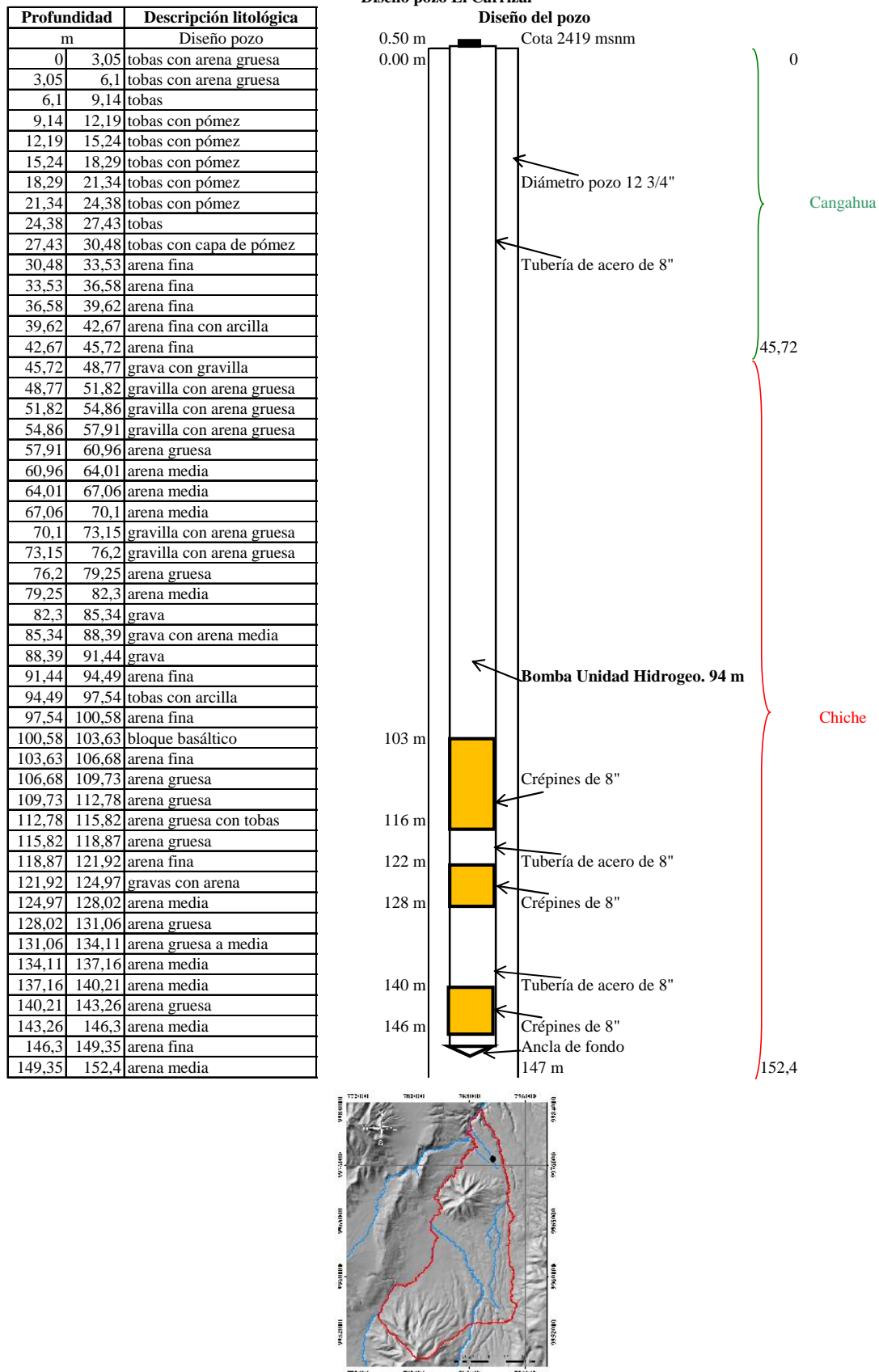


Figure 2.9. Description lithologique et localisation des crépines du forage El Carrizal.

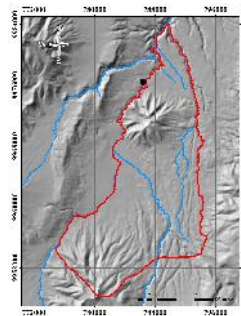
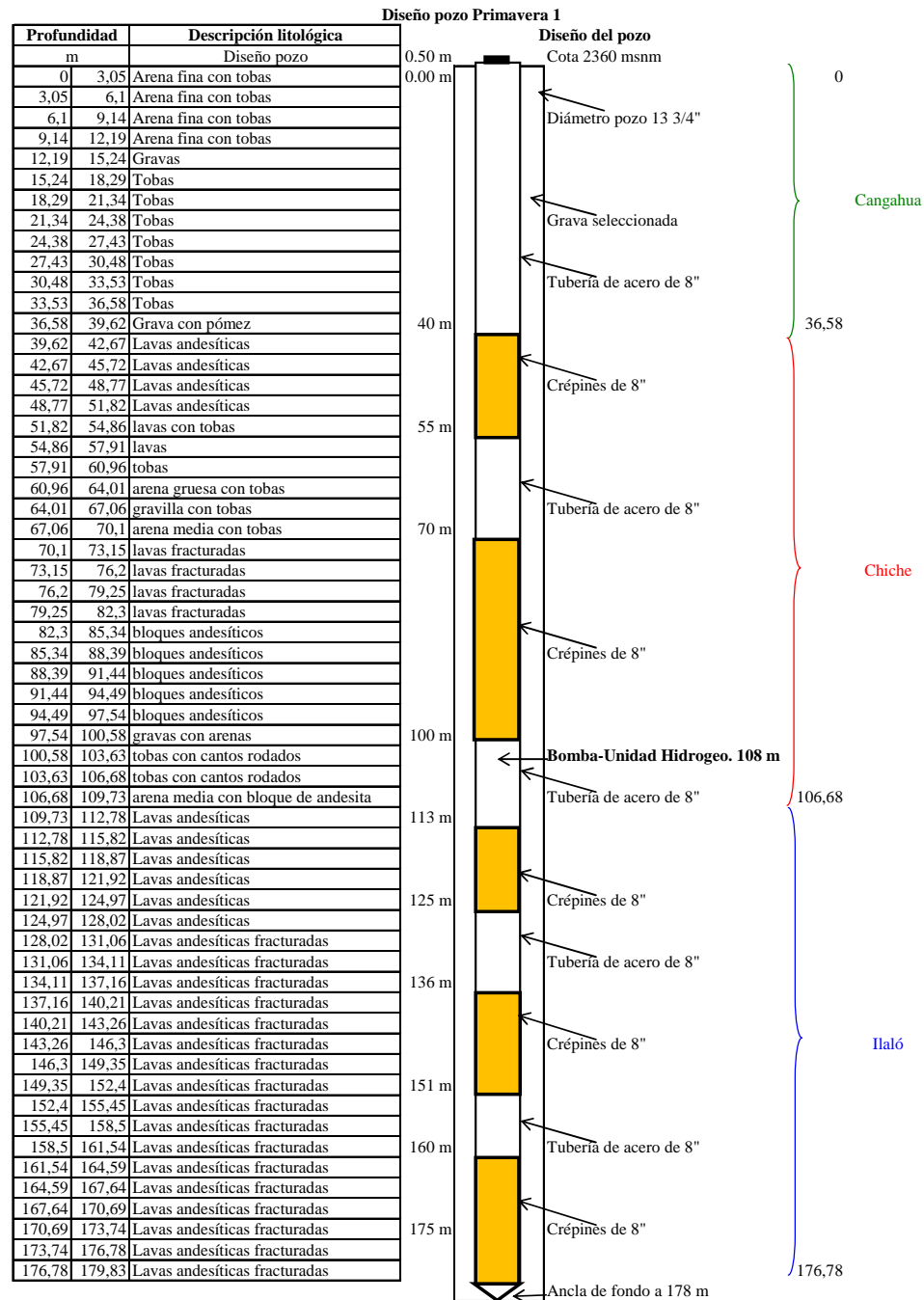


Figure 2.10. Description lithologique et localisation des crépines du forage La Primavera 1.

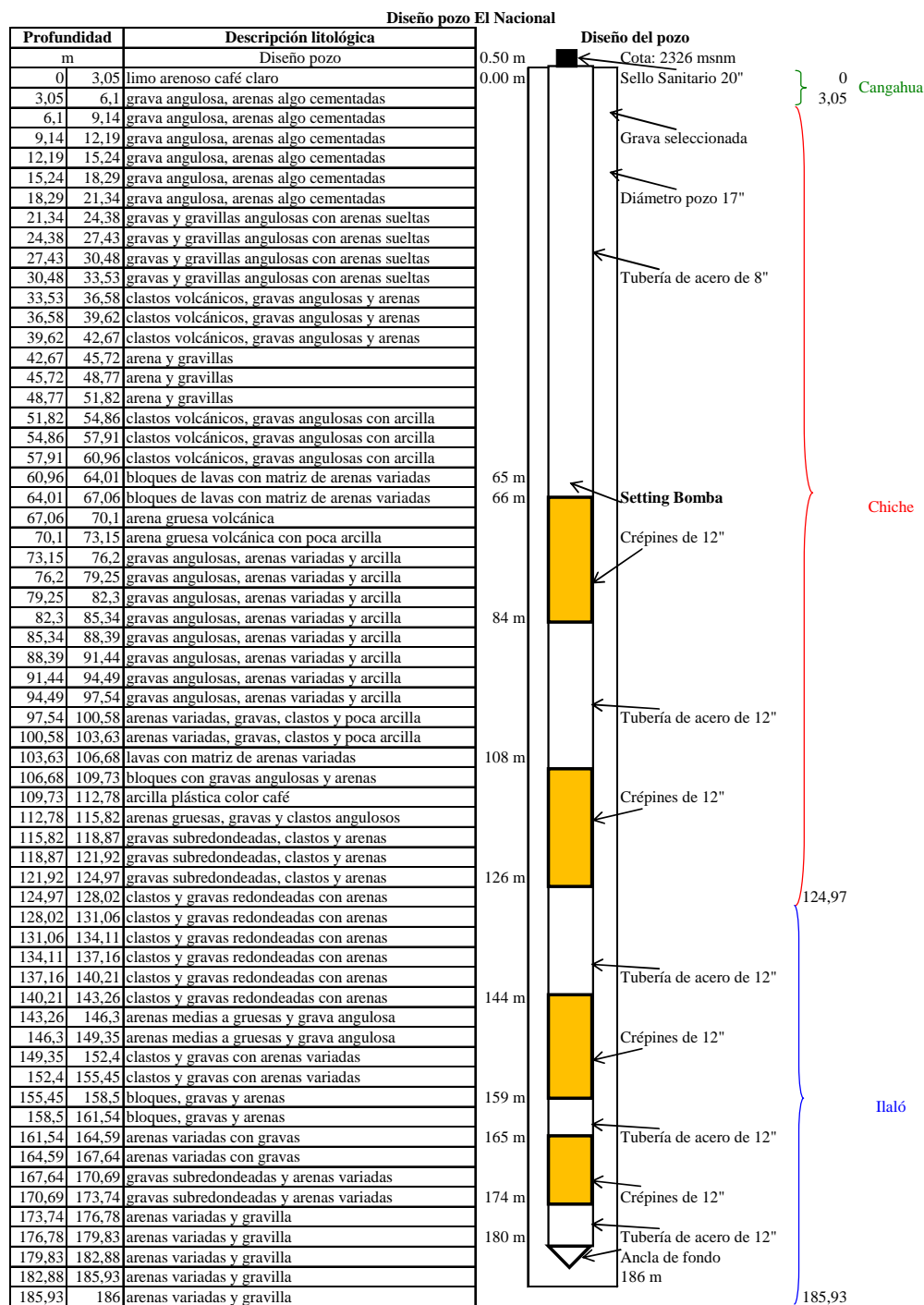


Figure 2.11. Description lithologique et localisation des crépines du forage El Nacional.

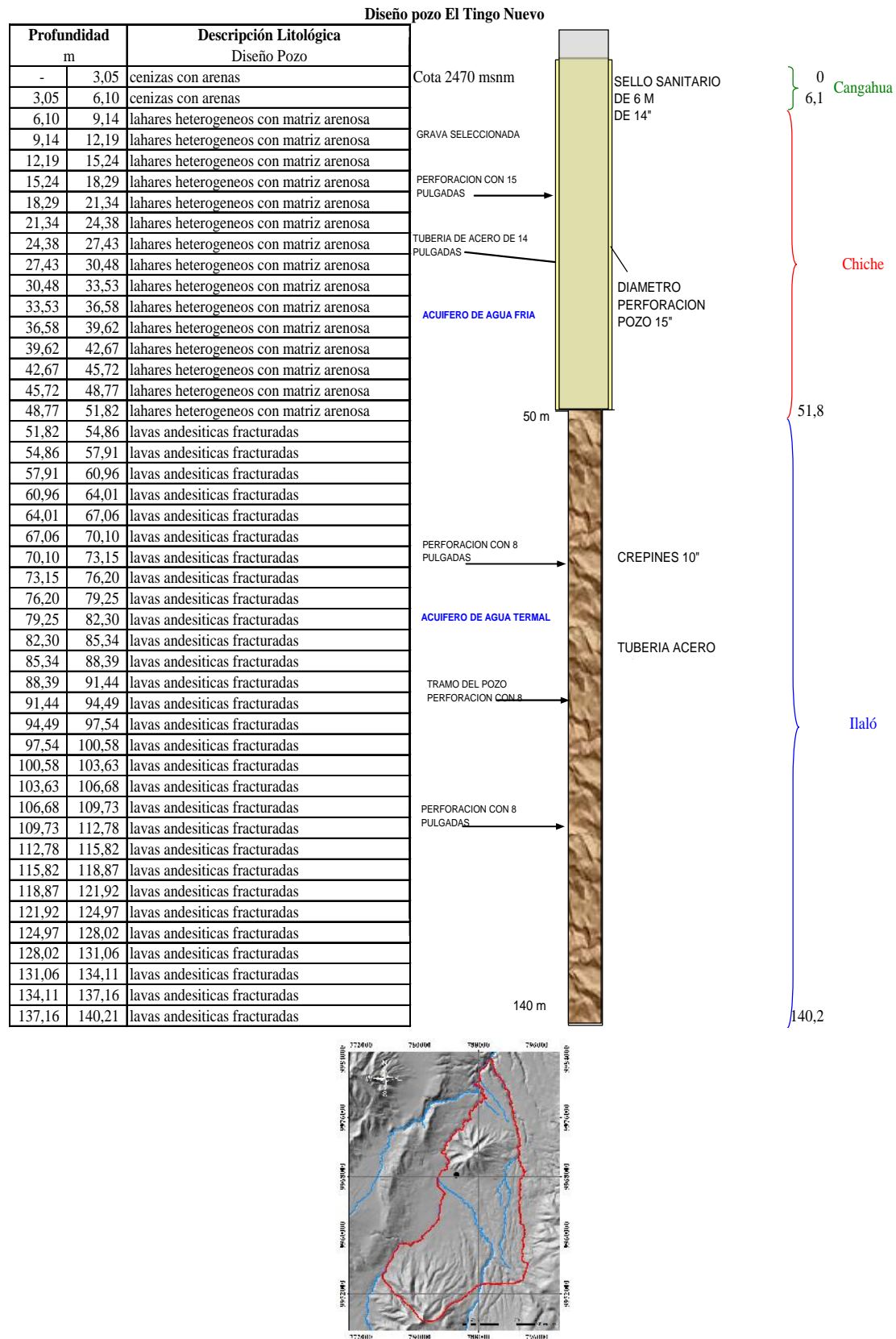


Figure 2.12. Description lithologique et localisation des crépines du forage El Tingo Nuevo.

2.2.2.2.2 Description et critique des données des sondages électriques verticaux

Les trois profils verticaux de résistivité électrique (RE) et potentiel spontané (PS) des forages de la vallée de Tumbaco (Figure 2.8, points roses) sont utilisés pour comprendre la relation entre les formations Chiche et Ilaló. Ils ont été faits par l'EPMAPS peu après la foration : El Carrizal en janvier 1991, El Nacional en novembre 2005 et El Tingo Nuevo en mars 2007.

Les méthodes de prospection électrique regroupent des méthodes actives, basées sur l'injection d'un courant dans le sous-sol pour mesurer la résistivité électrique, et des méthodes passives utilisant les courants électriques naturels présents dans le sous-sol, comme la mesure de potentiel spontané.

Pour la plupart des roches, la conductivité électrique est de nature électrolytique. En effet, les ions contenus dans l'eau porale transportent des charges sous l'effet du champ électrique et en conséquence la roche conduit le courant électrique. La surface des minéraux est le siège de phénomènes électrochimiques. Ceux-ci sont responsables d'une conductivité électrique dite de surface au voisinage de l'interface entre l'eau porale et les minéraux. Cette conductivité joue un rôle majeur lorsque la surface spécifique de la roche est importante, comme dans le cas de minéraux argileux. Le passage du courant peut également se faire par déplacement d'électrons. La résistivité électrique (RE) du sous-sol dépend essentiellement de la porosité et de la saturation, de la salinité de l'eau interstitielle et de la teneur en argile des roches.

Le potentiel spontané (PS) est la différence du potentiel électrique existant naturellement sans injection de courant. Ce potentiel électrique naturel est associé à des mécanismes de polarisation de charges électriques dans le milieu poreux. Ces mécanismes sont dus à l'existence de gradients de potentiel chimique des porteurs de charges. Ainsi, selon le type de porteur de charges, le phénomène à l'origine du courant source sera de nature différente. Ces différences de potentiel électrique sont mesurées entre une électrode de référence fixe, placée en surface, et une électrode mobile qui parcourt toute la longueur du forage. Le PS permet :

- de mettre en évidence les bancs poreux et perméables,
- de localiser certains niveaux imperméables,
- de calculer le pourcentage d'argile contenu dans la roche réservoir,
- de calculer la résistivité de l'eau d'imbibition, ce qui permet d'obtenir la salinité et donc la qualité chimique de cette eau.

Dans le cas présent, les données de RE et PS ont été comparées avec les descriptions lithologiques et les profondeurs des crépines afin de voir s'il y avait changement simultané de ces diverses informations.

Les trois forages où l'on dispose des données de sondage sont : i) El Carrizal (C103, Figure 2.9) où la description lithologique correspond surtout à la Formation Chiche ; ii) El Nacional (M302, Figure 2.11), où même si les descriptions correspondent uniquement à la Formation Chiche, il peut traverser les deux formations ; iii) El Tingo Nuevo (I102, Figure 2.12) qui, selon la description lithologique, traverse aussi deux formations différentes.

Le forage El Carrizal C103 a des valeurs de RE très élevées entre 500 et 1500 Ωm (Figure 2.13) correspondant à la gamme de valeurs des tufs, amphiboles, grès, certains conglomérats et des conducteurs intermédiaires comme la plupart des oxydes et quelques

sulfures. Les valeurs positives de PS, entre 20 et 60 mV, peuvent s'interpréter comme des intercalations de formations perméables (valeurs les plus faibles) avec des formations riches en argiles. Vers le fond, les valeurs de PS diminuent comme la RE, ce qui peut être interprété comme un niveau aquifère plus productif.

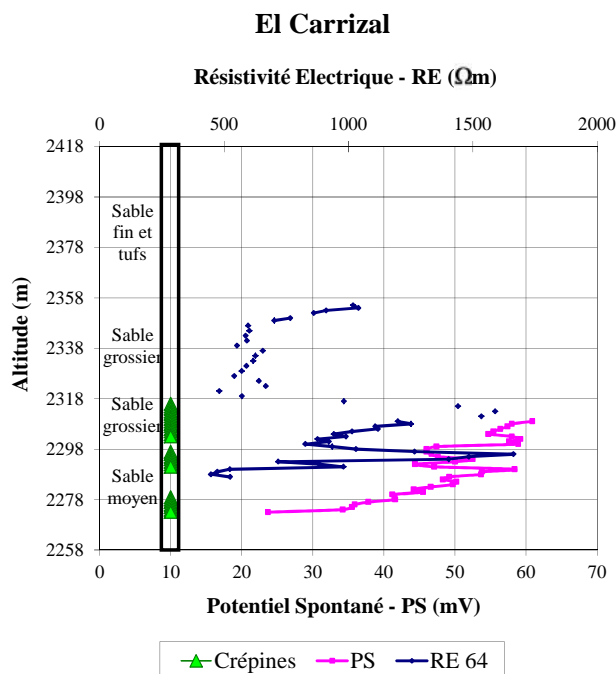


Figure 2.13. Résistivité électrique et potentiel spontané du forage El Carrizal, considéré comme captant l'aquifère Chiche.

Le forage El Nacional M302 comporte deux sections (Figure 2.14). La première section de 2320 à 2240 m montre des variations de RE assez brusques entre 150 et 250 Ω m intercalées avec des valeurs plus faibles, entre 50 à 150 Ω m. Les premières valeurs correspondent au grès et aux sables contenant des oxyde de fer, les secondes valeurs correspondent à la gamme de l'eau douce contenue dans des milieux sédimentaires que l'on peut supposer être contenue dans la Formation Chiche, spécialement dans la partie proche de 2240 m où les valeurs deviennent plus basses. Les pics de PS dans les premiers mètres pourraient être interprétés comme une couche argileuse, mais ensuite les variations de PS sont très faibles, et il y a des pics justement où la RE diminue, ce qui ferait plutôt penser à des couches sableuses intercalées avec des couches d'argile. Les valeurs de PS sont négatives dans une gamme de valeurs « normales » pour des sols sableux, sols poreux et perméables. Dans la seconde section, à partir de 2240 m jusqu'à 2140 m, la RE baisse à 30 et 75 Ω m, s'apparentant aux valeurs de l'eau douce contenue dans les roches ignées, en contradiction avec la description lithologique de ce forage, mais, cette information pourrait confirmer notre hypothèse de la présence de la Formation volcanique Ilaló captée par ce forage. De plus ces valeurs peuvent être interprétées comme une augmentation de la température et de la minéralisation de l'eau. La PS dans cette section présente un changement important de pente entre 2220 et 2200 m, avec des valeurs plus négatives suggérant une couche plus perméable et moins argileuse.

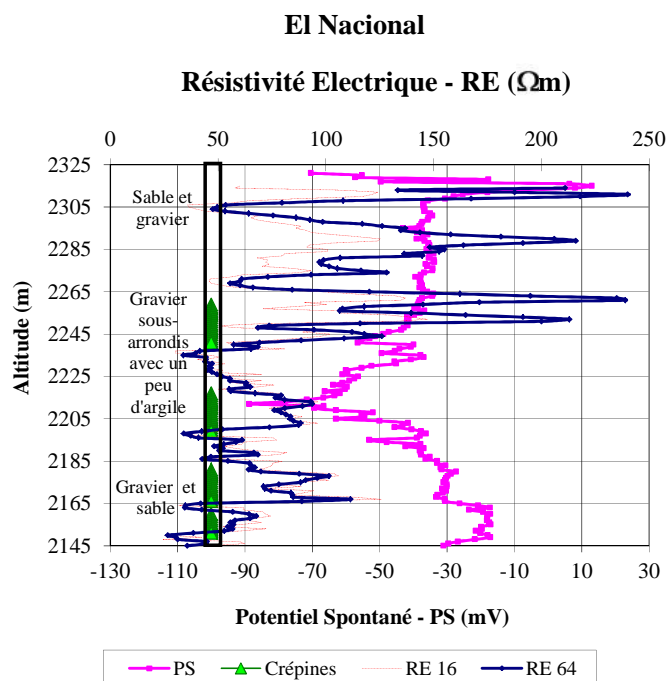


Figure 2.14. Résistivité électrique et potentiel spontané du forage El Nacional, considéré comme captant les deux formations Chicla et Ilaló.

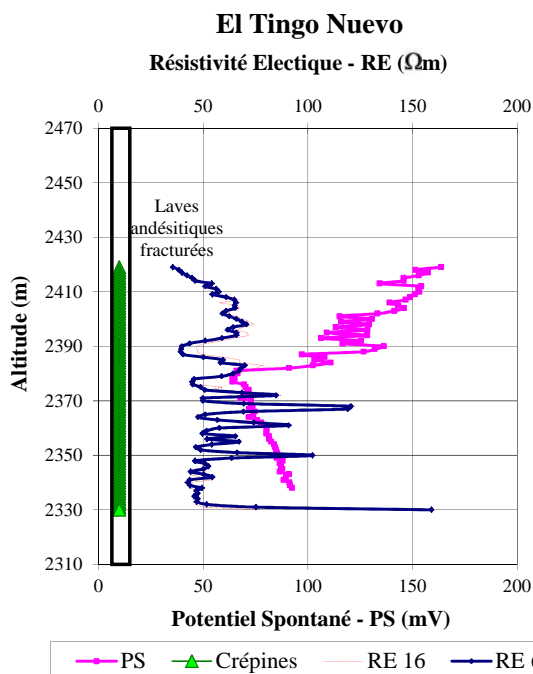
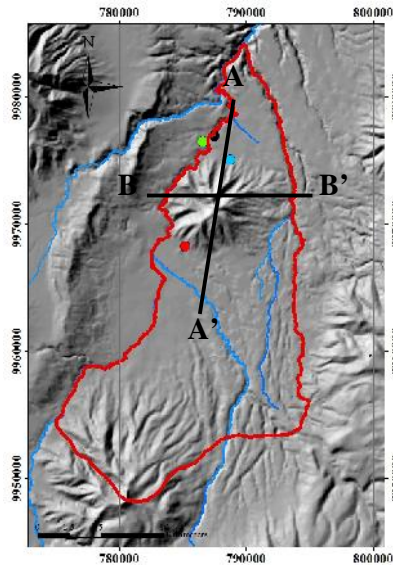
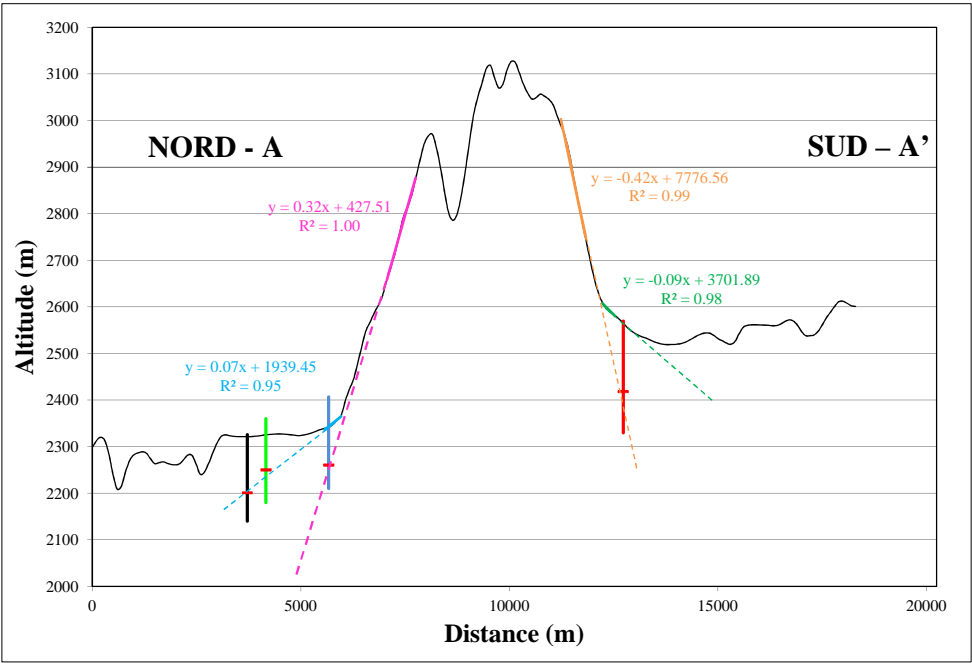


Figure 2.15. Résistivité électrique et potentiel spontané du forage El Tingo Nuevo, captant l'aquifère Ilaló.

Le troisième forage (El Tingo Nuevo I102) montre des valeurs de RE entre 30 et 160 Ωm , dont 65% des mesures entre 50 et 100 Ωm pouvant correspondre à un milieu igné (Figure 2.15). Les mesures de PS assez élevées sont peut-être dues à la présence de sulfures. Sur la

Figure 2.15 les valeurs de PS montrent un changement de pente important à 2380 m, et la courbe vers le bas devient rectiligne, ce qui pourrait être interprété comme une couche très compactée mais contenant de l’eau.

2.2.2.3 Extension de la Formation Ilaló










	Graphique	Profil topographique
	Graphique	Forage qui atteint la Formation Ilaló
	Carte	Forage qui atteint la Formation Ilaló
	Graphique	Pentes du volcan Ilaló et prolongation en pointillé
	Graphique	Niveau de la Formation Ilaló selon descriptions lithologiques
	Carte	Limite de la zone d'étude
	Carte	Rivières importantes

Figure 2.16. Profil topographique sur l'axe A-A'.

Afin de préciser l'extension et la profondeur de la Formation Ilaló, un profil géologique a été réalisé. Nous avons prolongé les pentes du volcan selon les données topographiques actuelles, en imaginant qu'en profondeur le volcan garde ces mêmes pentes (Figure 2.16). Ces résultats ont été confrontés avec la profondeur de la Formation Ilaló selon les coupes lithologiques des forages qui l'atteignent. Les pentes roses et orange de la Figure 2.16 correspondent à la pente actuelle du volcan, qui est très érodée. En prolongeant ces pentes, on obtient des niveaux de profondeur plus importants par rapport aux valeurs de profondeur données par les registres lithologiques. Du côté nord les différences varient entre 40 et 600 m, et du côté sud de 50 m (Tableau 2.1).

Tableau 2.1. Profondeur de la Formation Ilaló selon les différentes pentes du volcan. Les couleurs des pentes correspondent à Figure 2.16.

Code	Forage	Pente rose 32%	Pente bleu 7%	Pente orange 42%	Pente verte 9%	Profondeur selon lithologie
M302	El Nacional	720	121	-	-	125
M303	La Primavera 1	620	124	-	-	110
I103	Planta de Tratamiento	190	63	-	-	146
I102	El Tingo Nuevo	-	-	102	8	52

Il est possible que la pente soit moins prononcée au pied du volcan et vers la vallée, donc, deux autres possibilités ont été choisies au nord et au sud. Au nord, la pente en bleu sur la Figure 2.16 nous permet de calculer une profondeur de la Formation Ilaló à 4 Km de distance entre le volcan et les forages La Primavera (en vert) et El Nacional (en noir). Les profondeurs ainsi obtenues sont plus cohérentes avec les registres lithologiques (Tableau 2.1). Par contre, du côté sud, la pente en verte, semble sous-estimée, dans ce cas la Formation Ilaló serait considérablement plus superficielle que la profondeur indiquée par la lithologie du forage El Tingo Nuevo (en rouge sur la Figure 2.16, voir comparaison des pentes sur le Tableau 2.1).

Selon ces deux calculs, la Formation Ilaló se trouverait au moins à une profondeur de 60 m au pied du volcan (forage Planta de Tratamiento sur le Tableau 2.1). Si l'on pense à la proposition de la disposition des couches de la carte géologique où la Formation Ilaló est plus jeune que la Formation Chiche (voir Figure 2.6), la Cangahua recouvrirait l'Ilalo sur une épaisseur d'au moins 60 m. La description lithologique des forages au pied du volcan indique qu'à cette endroit la Formation Cangahua ne fait que 35 m (voir Annexe 2D, forage Planta de Tratamiento I103, Rumihuayco 1 M305 et Rumihuayco 2 I104). De ce fait la profondeur indiquée au-dessus de l'Ilaló concernerait la Cangahua sur les premiers 35 m et une autre formation, évidemment Chiche, sur les niveaux plus profonds jusqu'à la profondeur supposée d'Ilaló, ce qui confirmerait les analyses terrains anciennes et chronologiques mentionnées précédemment. Pour confirmer cette hypothèse et la relation Chiche – Ilaló nous avons essayé de la valider sur le terrain.

2.2.2.4 Observation de terrain

Au pied du volcan, aucun affleurement de la Formation Ilaló n'a pu être déterminé lors de nos sorties terrain. Cependant, à partir des rapports de terrain déjà mentionnés (Cornejo 1983, Acosta 1985) (Figure 2.7), nous sommes allés à la « Quebrada Derecho Urcu » situé à

l'Est, au pied du volcan Ilaló, où les sédiments Chiche sont au-dessus de tufs et de grès tufacés fins qui appartiennent au groupe Pré-Chiche (Figure 2.17). Dans ce secteur on n'observe pas de produits qui pourraient correspondre à l'érosion qui a suivi la mise en place de matériel issu de l'activité volcanique de l'Ilaló. On peut penser qu'après une période d'activité volcanique, le cône est exposé à l'érosion, engendrant son démantèlement sous la forme de dépôts clastiques grossiers. Sur la Figure 2.17 ces sédiments du Groupe Pré-Chiche correspondent à la partie supérieure de la Formation Guayllabamba. Ainsi, les dépôts grossiers qui sont en relation avec la période d'érosion de l'Ilaló devraient se trouver dans un niveau stratigraphique plus profond auquel nous n'avons pas eu accès.

Il n'existe pas d'affleurement du contact Guayllabamba – Ilaló. Au nord de la zone d'étude, dans le ravin de la rivière Chiche, qui a une profondeur proche de 200 m, il est possible de voir toute la Formation Chiche au-dessus de Guayllabamba, dont celle-ci affleure sur une épaisseur de 30 m à cet endroit (Figure 2.5, cercle noir), mais la Formation Ilaló n'affleure pas là, ce qui semble logique puisque les calculs d'hypothèse de pente conduit à situer Ilaló entre 300 et 1900 m de profondeur. De plus, on ne dispose pas de données de forages captant les trois formations. Un schéma du contact Chiche – Guayllabamba et la description caractéristique de chaque formation à partir de la description lithologique est montré sur la Figure 2.18 (localisation sur la Figure 2.5, cercle noir).

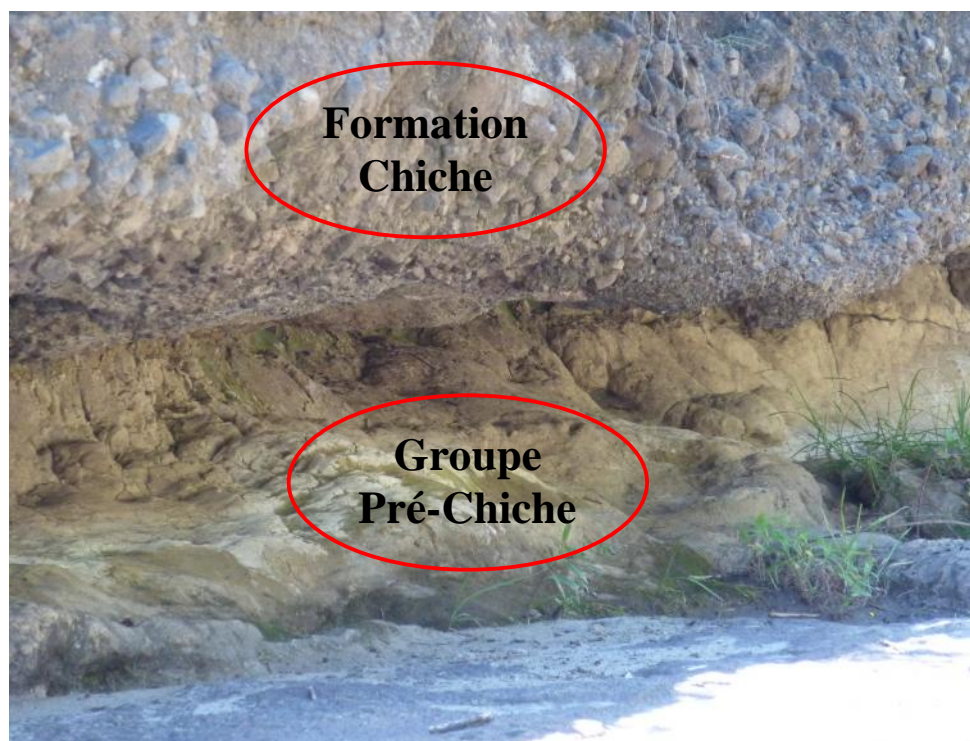


Figure 2.17. Contact entre les Formations Chiche et Pré-Chiche. Photo prise à la "Quebrada Derecho Urcu".

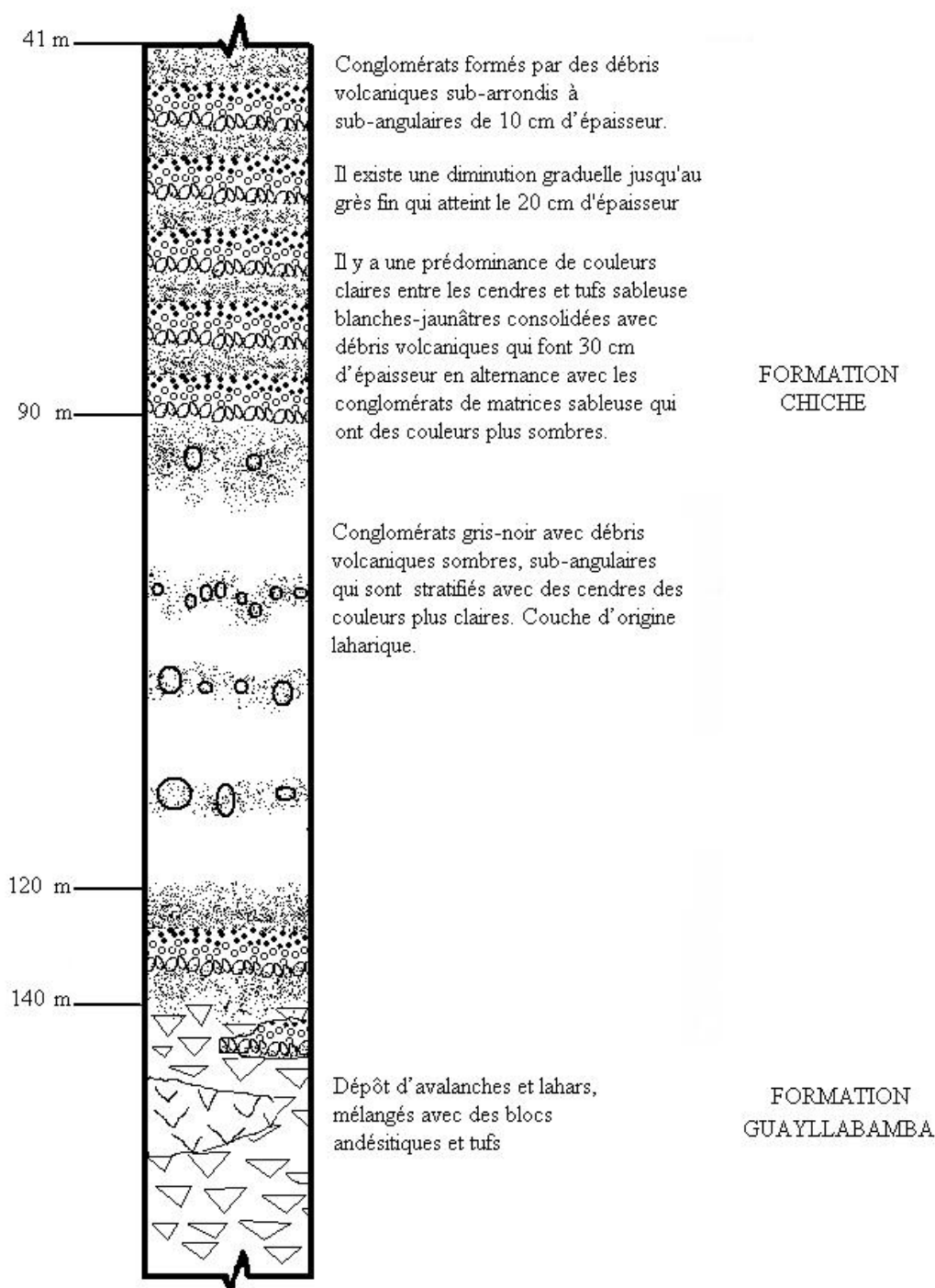


Figure 2.18. Colonne stratigraphique schématique de la Formation Chiche selon Clapperton et Vera (1986) pour la partie supérieure de la colonne et Villagómez (2003) pour le détail de la partie inférieure.

2.2.2.5 Conclusion

En résumé, la succession stratigraphique des couches de la plus ancienne à la plus jeunes semble être : Ilaló, Guayllabamba, Chiche et Cangahua. Pour la carte géologique, la description succincte de la Formation Ilaló donnée par les auteurs (séquence de laves et de

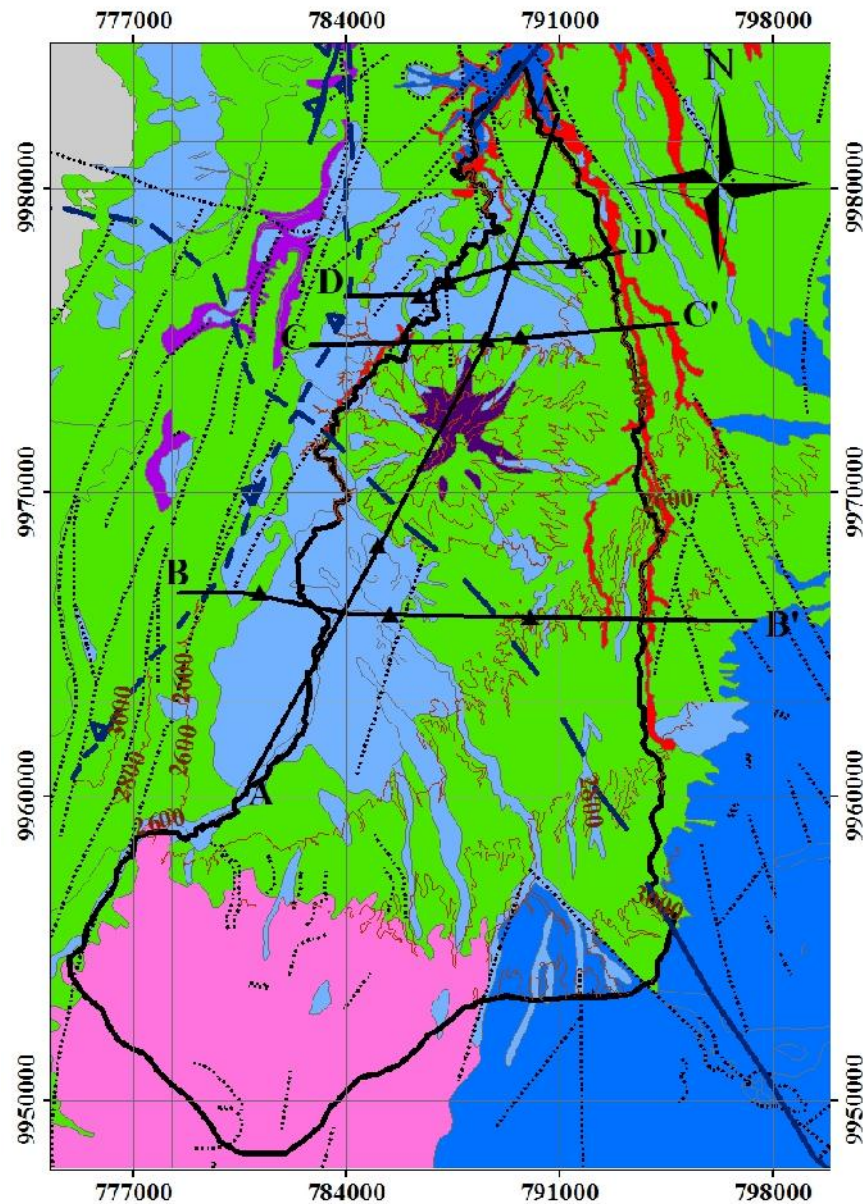
conglomérats formée par des éléments de 0,5 m de diamètre dans une matrice tufacée) ressemble à la description de la Formation Chiche présente sur les flancs du volcan. Dans les forages, la Formation Ilaló a été rattachée aux laves fracturées perforées, tandis que les conglomérats ont été toujours associés à la Formation Chiche. Probablement les géologues qui ont tracé la carte ont confondu les deux formations et Correa (2002) dans son mémoire a repris ces erreurs sans vérification.

Il reste cependant que l'âge plus récent de la Formation Chiche par rapport à la Formation Ilaló n'est pas formellement prouvé sur le terrain pour le manque d'un contact entre les deux formations. La description lithologique du forage La Primavera 1A n'a pas pu être prouvée avec les carottes de perforation, souvent ces descriptions sont subjectives et peu précises. Les données géophysiques ne sont pas concluantes puisque les valeurs de RE et PS ne sont pas comparables d'un forage à l'autre. De même les prolongements des pentes du volcan avec la coupe topographique reste seulement des hypothèses (voir section 2.2.2.3), mais selon nos calculs il est probable de trouver la Formation Ilaló à 100 m de profondeur à 2 Km du volcan au moins du côté nord-ouest de la zone d'étude, de l'autre côté du volcan on ne dispose pas d'information de forages qui captent la formation volcanique. Si l'on considère que la Formation Ilaló est antérieure à la Formation Chiche, la conséquence hydrodynamique sera l'indépendance de parties sud et nord de l'aquifère Chiche, le volcan constituant alors une barrière à l'écoulement.

Sur le terrain, les contacts Chiche – Ilaló ont été impossibles à trouver en raison de l'inexistence d'affleurement. Le fait à la Quebrada Derecho Urcu d'avoir reconnu la partie supérieure de la Formation Guayllabamba en contact avec Chiche aux abords du volcan permet de penser que la Formation volcanique Ilaló est plus vieille que l'ensemble volcano-sédimentaire Chiche-Guayllabamba ou du moins plus vieux que la partie supérieure de la formation Guayllabamba. Le manque d'information bibliographiques et direct de terrain sur le contact Ilaló – Guayllabamba, reste cependant une question en suspens que des études futures pourront documenter. Cependant, les âges radiométriques de ces deux formations (Figure 2.5) entre la Formation Chiche, Guayllabamba et Ilaló permettent de penser là aussi que la Formation Guayllabamba est plus jeune que la Formation Ilaló. C'est ainsi que nous allons le présenter sur les coupes géologiques que nous avons faites sur la zone d'étude.

2.2.3 COUPES GEOLOGIQUES ET CONFIGURATION GEOLOGIQUE GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

Plusieurs coupes géologiques ont été construites à partir des interprétations précédentes en tenant compte aussi des failles observées sur le terrain ou sur les photos aériennes. Il a été établi 3 coupes O-E et 1 coupe SO – NE (Figure 2.19).



Dr	Dépôt récent	Holocène
Qc	Cangahua	Pléistocène supérieur à Holocène
PCh	Volcano-sédiments Chiche	Pléistocène supérieur
PB	Volcano-sédiments Guayllabamba	Pléistocène moyen
Pi	Volcan Ilaló	Pléistocène inférieur
Pps	Volcan Pasochoa	Pléistocène inférieur
CO	Cordillère Occidentale	Crétacé inférieur - Oligocène
CR	Cordillère Réal	Paléozoïque – Crétacé inférieur
—	Limite de la zone d'étude	
.....	Failles supposées montrées sur la carte géologique	
- - -	Failles observées sur les photos aériennes	
—	Courbes de niveaux topographiques	

Figure 2.19. Localisation des coupes géologiques sur la zone d'étude.

Profil A-A'

Ce profil SO – NE (Figure 2.20) commence au pied du volcan Pasochoa et arrive jusqu'à la limite de la zone d'étude dans la partie nord, là où le contact Chiche – Guayllabamba a été observé. Ce profil se base sur l'information lithologique de 3 forages et la stratigraphie observée dans la Rivière Chiche.

Profil B-B'

Cette coupe O – E est localisée au sud du volcan Ilaló, dans la Vallée de Los Chillos (Figure 2.21). Elle commence à la limite ouest du bassin, où l'on peut observer la faille de Quito, et elle se termine à la Cordillère Réal. Construite à partir de l'information lithologique de 3 forages, elle illustre la limite de la Formation Chiche au niveau de la Cordillère Réal.

Profil C-C'

Ce profil O – E est localisé au nord du volcan Ilaló, dans la Vallée de Tumbaco (Figure 2.22). Il a été créé à partir de l'information lithologique de 2 forages et des colonnes stratigraphiques des rivières San Pedro, Alcantarilla ainsi que de la petite « Quebrada Chupaguaycu ». Sur ce profil on peut observer le contact des Formations Chiche et Guayllabamba avec la Formation Ilaló basé sur la description des forages au pied du volcan.

Profil D-D'

Ce profil O – E dans la partie la plus au nord de la zone d'étude a été établi à partir de 4 forages (Figure 2.23). Sur ce profil on propose un contact discontinu entre la Formation Ilaló et la Formation Guayllabamba, basé sur l'hypothèse que la Formation Guayllabamba est plus jeune que la Formation Ilaló.

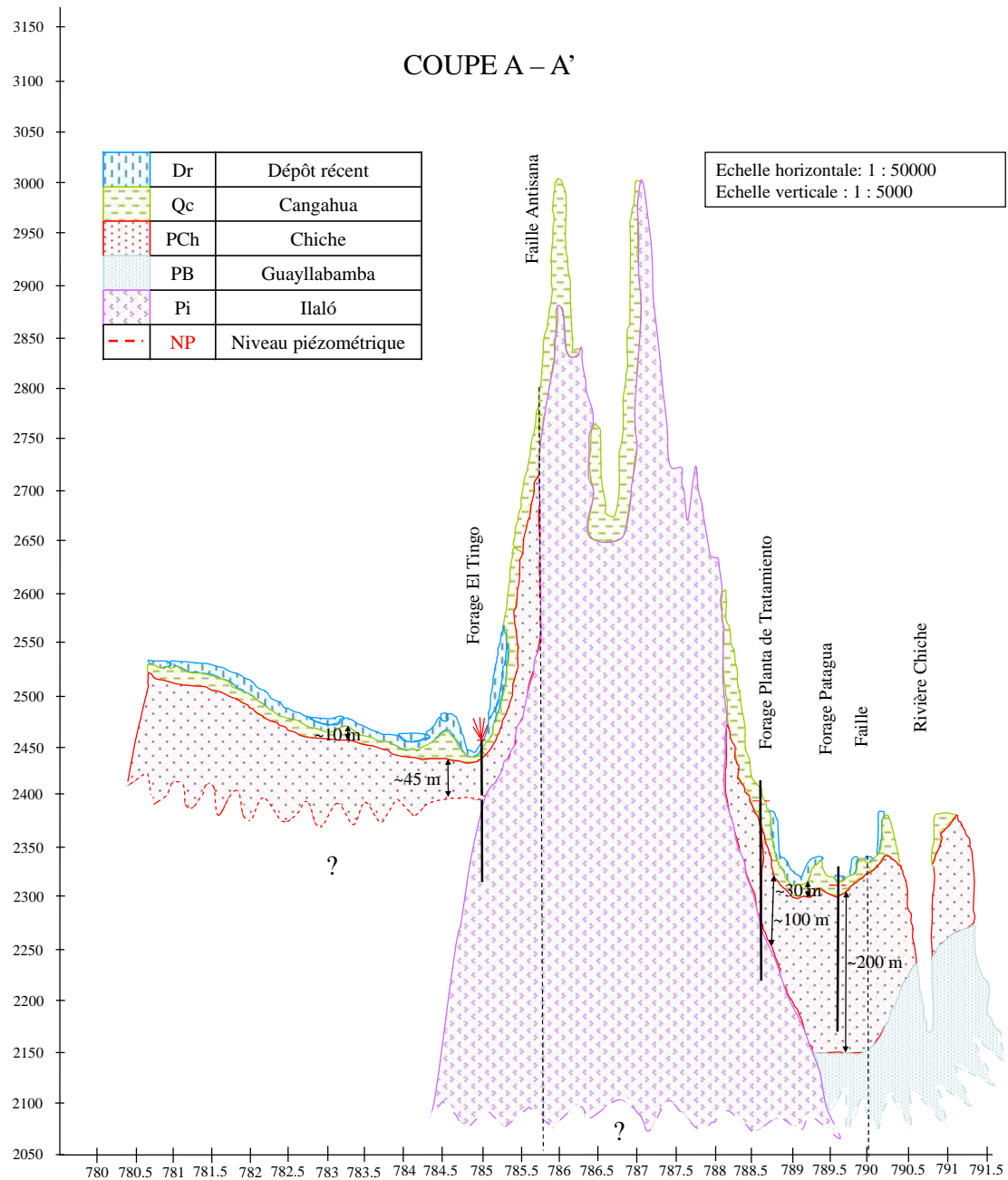


Figure 2.20. Profil géologique sur l'axe A-A'. L'échelle horizontale est exprimée en Km (latitude du système UTM WGS84). L'échelle verticale est exprimée en mètres sur le niveau de la mer.

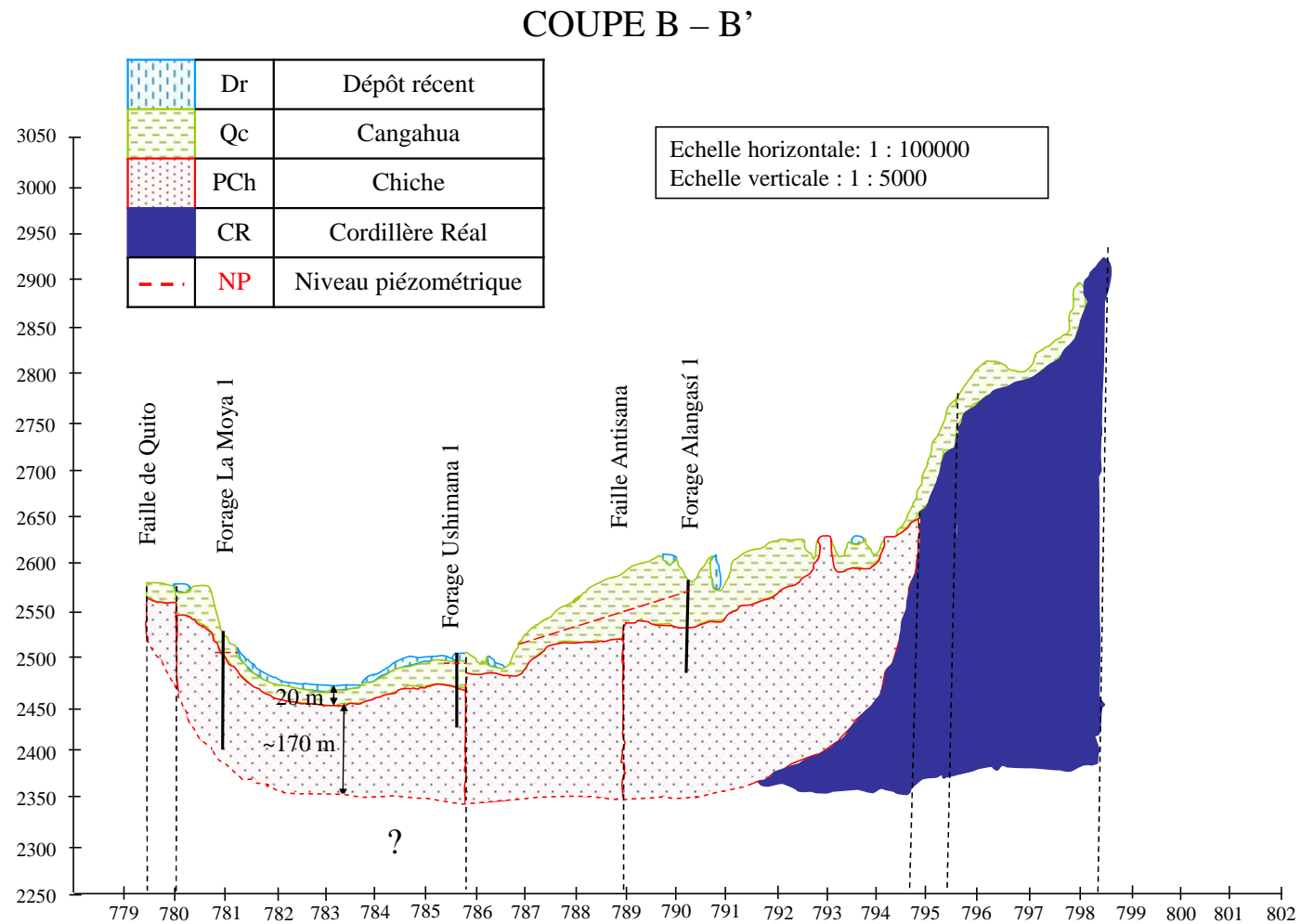


Figure 2.21. Profil géologique sur l'axe B-B'. L'échelle horizontale est exprimée en Km (latitude du système UTM WGS84). L'échelle verticale est exprimée en mètres.

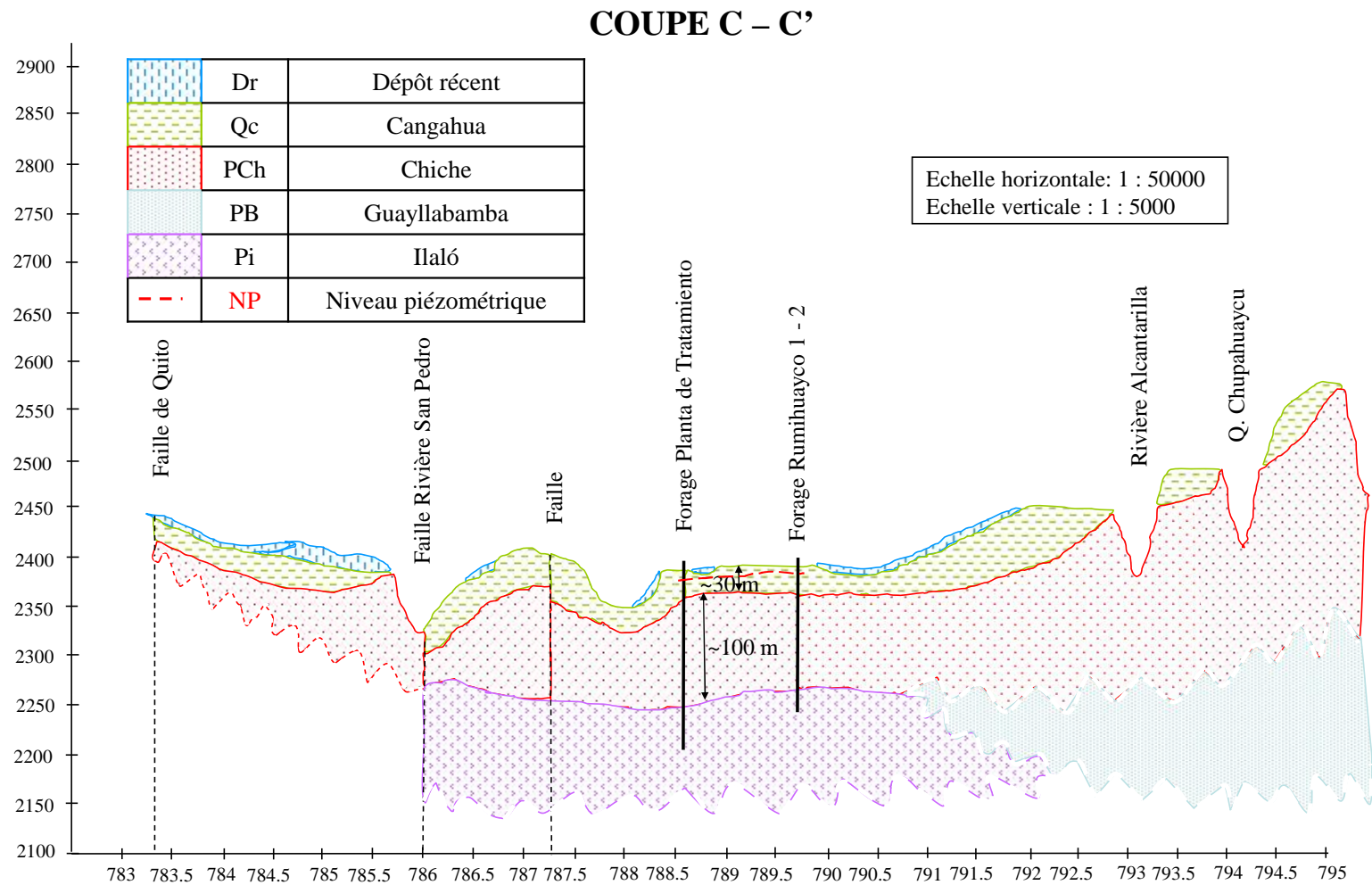


Figure 2.22. Profil géologique sur l'axe C-C'. L'échelle horizontale est exprimée en Km (latitude UTM WGS84). L'échelle verticale est exprimée en mètres au-dessus du niveau de la mer. NP = niveau piézométrique.

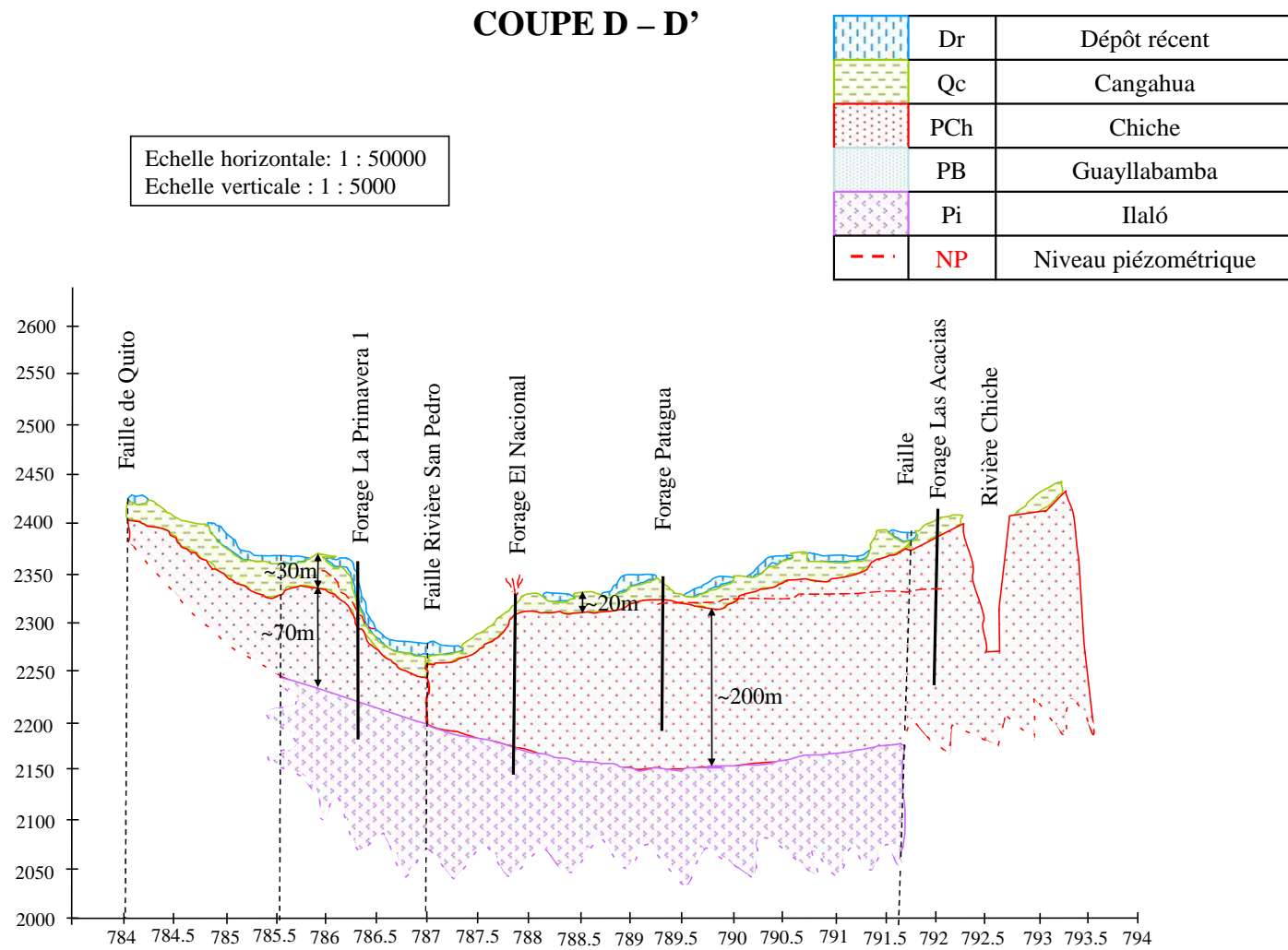


Figure 2.23. Profil géologique sur l'axe D-D'. L'échelle horizontale est exprimée en Km (coordonnées en latitude sur le système UTM WGS84). L'échelle verticale est exprimée en mètres au dessus du niveau de la mer.

2.3 CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Trois formations sont identifiées comme aquifères : Ilaló, Guayllabamba et Chiche. Cependant, le comportement hydraulique de la couche Cangahua qui recouvre toute la zone est aussi une importante question.

- **La Formation Ilaló :** Composée de laves andésitiques fracturées, cette formation constitue un aquifère géothermal qui est en contact avec la source de chaleur de la chambre magmatique du volcan Ilaló dont la profondeur précise est inconnue. La dernière éruption de ce volcan a été datée de 1,6 Ma, cependant les sources d'eau chaude repérées sur les flancs suggèrent qu'il reste une activité latente. Cet aquifère est en pression. Son épaisseur est inconnue et ses limites sont définies par l'étendue et les dimensions du cône volcanique.
- **La Formation Guayllabamba :** deux études effectuées au nord, hors de la zone d'étude, à 2 Km en rive droite de la rivière Chiche, montrent que cette formation est aquifère (Delgado 2008, Rios-Sanchez 2012) avec des caractéristiques hydrodynamiques et surtout géochimiques très similaires à la Formation Chiche ce qui les rendrait difficiles à distinguer. La lithologie typique de cette formation est composée de blocs de laves fracturés, sable, sédiments pyroclastiques et agglomérats volcaniques dans une matrice limoneuse. Cependant, aucun forage ne l'a atteint dans notre zone d'étude et cet horizon ne sera donc pas étudié.
- **La Formation Chiche :** cette formation contient des couches de tufs mélangés à des couches de graviers, du sable et un peu d'argile, ou des couches de sables moyens à grossiers. L'épaisseur varie entre 140 m et 230 m. L'aquifère est limité par le volcan Pasocha au sud et va jusqu'à la dépression de Guayllabamba au nord, et depuis la Faille de Quito à l'ouest jusqu'à la Cordillère Real à l'est. La Formation Chiche est un aquifère important exploité depuis trois décennies.

Les limites de l'aquifère de la Formation Chiche dans notre zone d'étude et les possibles interactions hydrodynamiques d'une part la formation Chiche située en dehors et d'autre part les autres formations aquifères proches ont été définies précédemment (voir section 1.3.1).

Parmi ces études, les plus pertinentes et précises sont celles de Muñoz (2005), Procel (2008), Peñafiel (2009), Rios-Sanchez (2012), qui ont porté sur les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère de Quito et qui ont analysé les possibles interactions avec d'autres aquifères. L'aquifère de Quito se trouve 500 m plus élevé que l'aquifère Chiche, avec une limite nette qui sépare les deux aquifères constituée par la grande faille de Quito ne permettant pas l'interconnexion (Figure 2.24). Cette faille a contrôlé la sédimentation de la formation qui constitue l'aquifère de Quito (appelée Formation Machángara) différente de la Formation Chiche (Villagómez 2003). Cette faille est par contre associée à la décharge de l'aquifère de Quito où plusieurs sources ont été repérées qui coulent vers la rivière Machángara, et elle pourrait permettre une interconnexion avec des aquifères situés plus au nord de la zone d'étude dont l'aquifère Pusuquí – San Antonio (Figure 2.24).

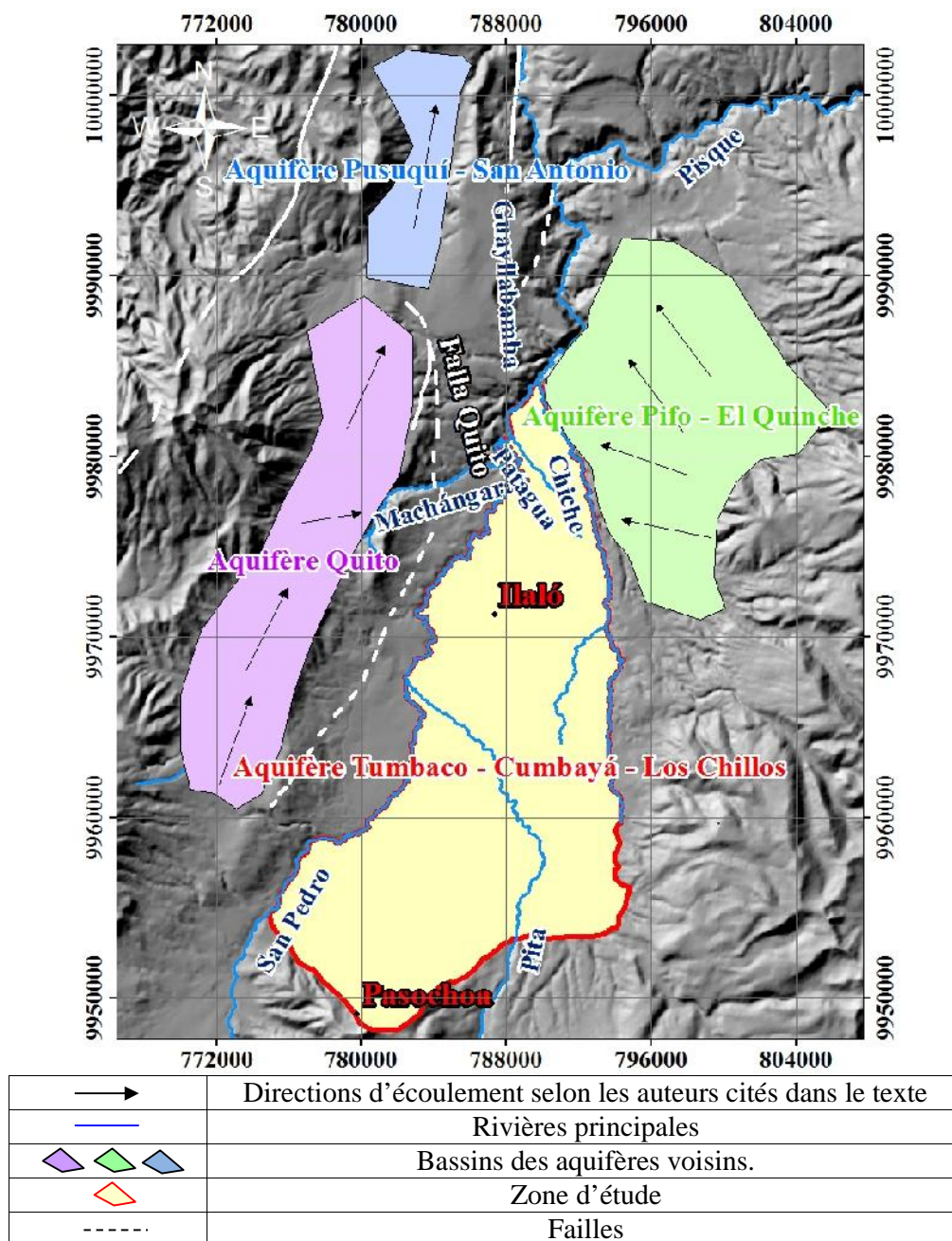


Figure 2.24. Contexte hydrogéologique de la zone d'étude..

Au nord-est de l'aquifère Chiche se situe l'aquifère Pifo – El Quinche, constitué par les Formation Chiche et Guayllabamba captées par au moins 6 forages décrits par un rapport académique (Delgado 2008). Selon cette étude, la limite qui sépare notre zone d'étude et l'aquifère Pifo – El Quinche est la Rivière Chiche et la nappe du Pifo – El Quinche se trouve à peu près à la même altitude que l'aquifère de Tumbaco. Cependant, son analyse préliminaire du sens du flux montre que la rivière Chiche se comporte comme un axe de drainage de l'aquifère Pifo – El Quinche (Figure 2.24). Sur le terrain, nous avons constaté que sur cette rivière plusieurs sources sortent du côté de l'aquifère Pifo – El Quiche. En aval, la rivière Chiche coupe la Formation Chiche du sud au nord et au nord coupe aussi la Formation Guayllabamba. De cette façon, la rivière Chiche constitue une limite de

potentiel pour les deux aquifères en amont, et en aval elle est aussi une limite de flux.

Pour observer la relation entre la Formation Chiche et les rivières, on a utilisé l'information topographique et lithologique afin de proposer trois coupes (Figure 2.25), deux de direction O - E (une au nord (Figure 2.26) et une au sud (Figure 2.27) et une N - S (Figure 2.28). Sur chaque coupe sont signalés les fonds des « quebradas » (ravines) afin d'observer leur position par rapport à la base de la Formation Chiche.

La carte géologique ne permet pas de différencier s'il y a affleurement de la Formation Chiche dans le lit des petites rivières. Cependant, au fond des « quebradas », la Cangahua a été érodée par le cours d'eau, et il est possible d'envisager que les rivières coulent sur la Formation Chiche, induisant une recharge localement. Cette hypothèse devrait pouvoir être confirmée par les résultats hydrodynamiques. Ainsi, on a corrélié les données de profondeur des forages avec l'information de la profondeur des lits de rivières. Les résultats de cette analyse permettent de constater que le mur de la Formation Chiche, au sud du volcan Ilaló (Figure 2.27), dans la Vallée de Los Chillos, est en dessous du lit de la rivière San Pedro (Figure 2.27), avec une épaisseur sous la rivière allant jusqu'à 100 m.

Au nord de l'Ilaló au pied du volcan (Figure 2.26), dans la Vallée de Tumbaco, les « quebradas » des rivières Chiche et San Pedro deviennent plus profondes, et le mur de la Formation Chiche serait seulement à 40 m au-dessous des lits des rivières (Figure 2.26).

Au milieu de la vallée de Tumbaco, où la rivière Patagua et la « quebrada » El Común rivières prennent leur source, une seule rivière (Patagua) creuse la Formation Chiche sur quelques mètres et l'épaisseur de la formation au-dessous de la rivière est de 100 m (Figure 2.26).

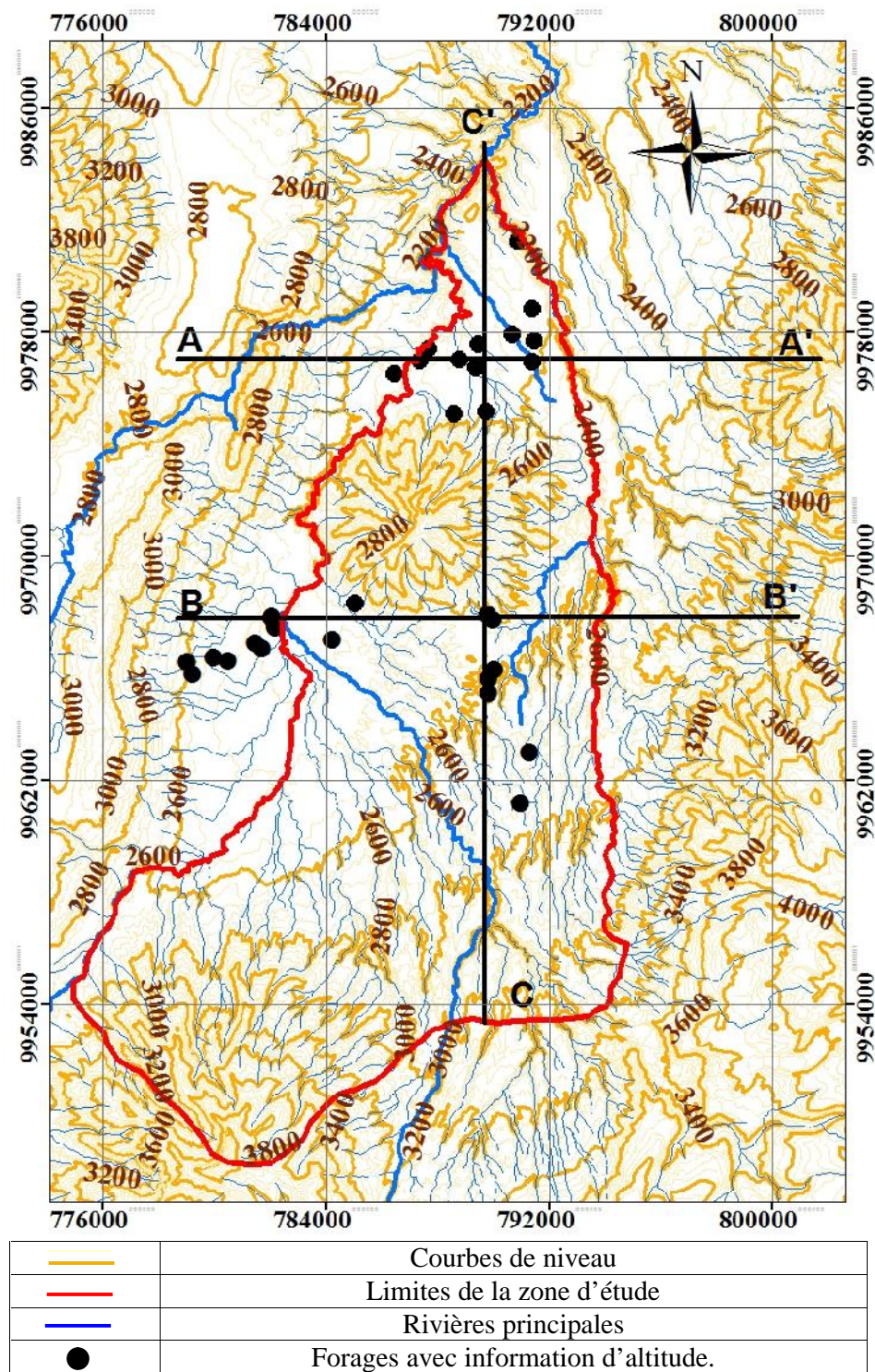
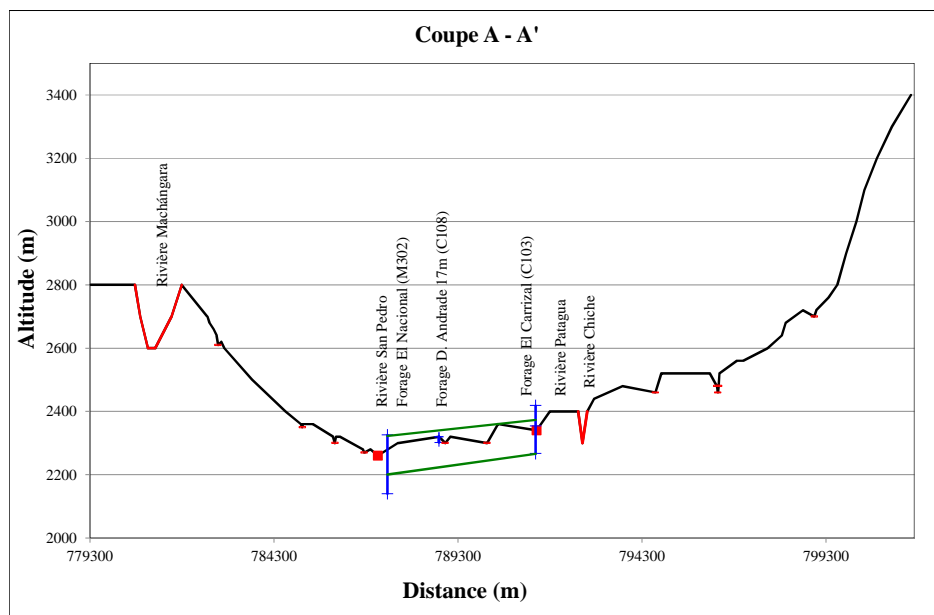


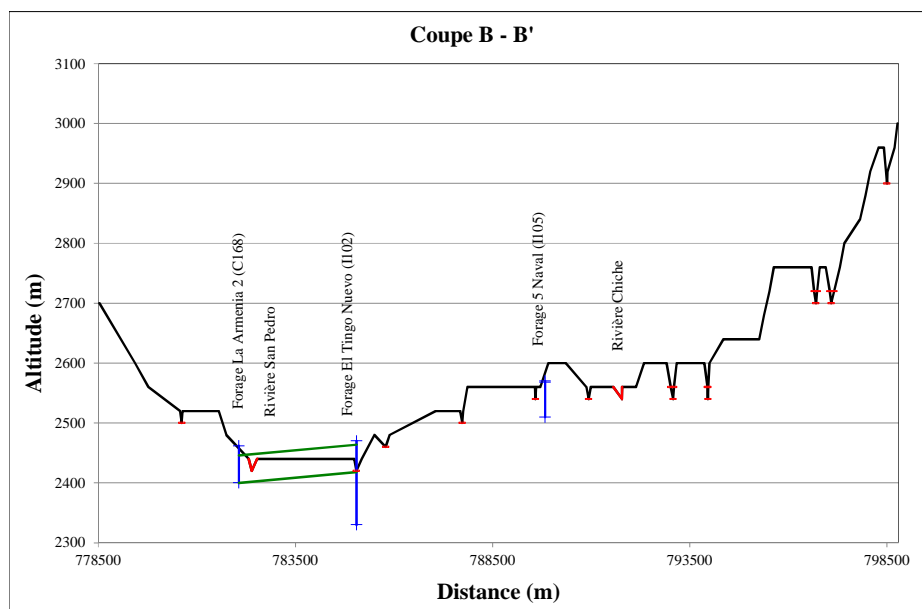
Figure 2.25. Localisation des axes des coupes topographiques.

Dans le nord de la zone, les rivières Chiche et San Pedro sont encore plus profondes jusqu'à traverser totalement la Formation Chiche (Figure 2.28) et atteindre la Formation Guayllabamba.



—	Topographie du terrain
∨	Ravins de rivières plus importantes
	Forages dans l'axe de la coupe
—	Petits cours d'eau
—	Formation Chiche selon lithologie de forages

Figure 2.26. Coupe topographique dans l'axe A-A'.



—	Topographie du terrain
∨	Ravins de rivières plus importantes
	Forages dans l'axe de la coupe
—	Petits cours d'eau
—	Formation Chiche selon lithologie de forages

Figure 2.27. Coupe topographique dans l'axe B-B'.

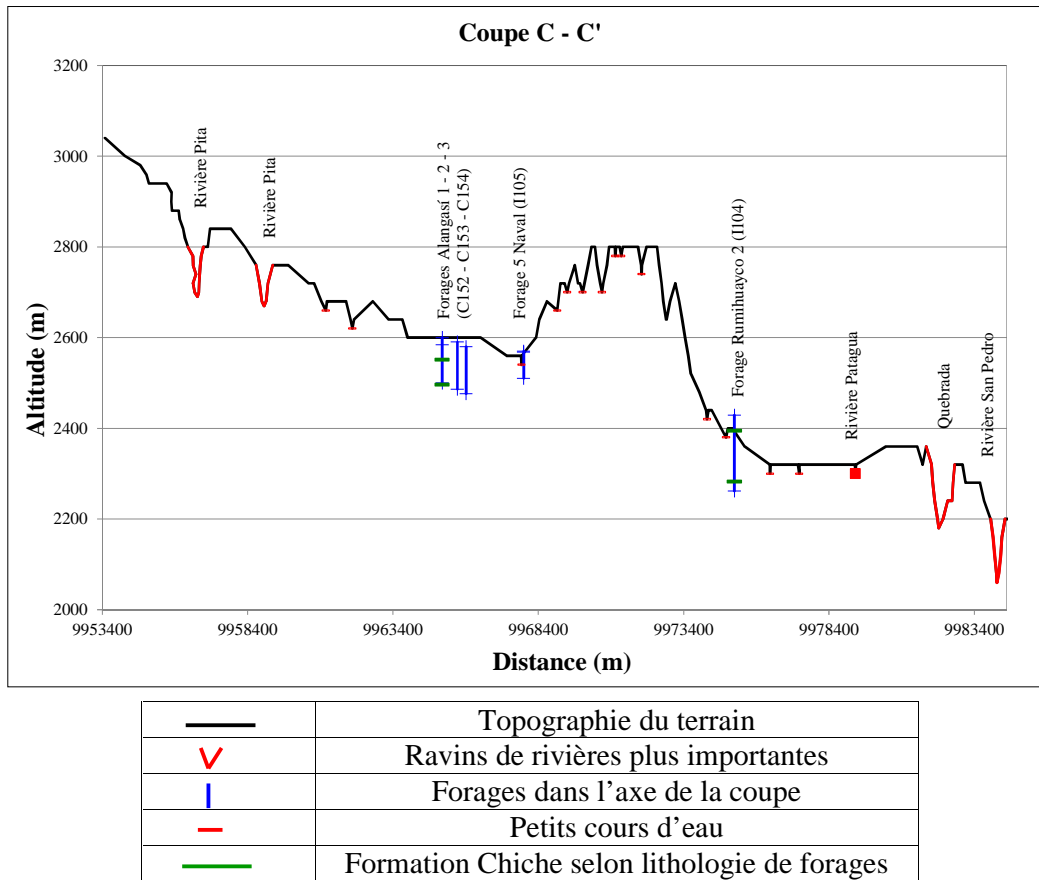


Figure 2.28. Coupe topographique dans l'axe C-C'.

- La Formation Cangahua :** la perméabilité de cette formation est un sujet de discussion. Pourrut et Aranyossy (1988) et Martínez (2004) la signalent comme globalement imperméable. A partir d'essais de laboratoire sur 36 échantillons de sol, Castillo (1982) a observé que la perméabilité de la Cangahua est liée à son degré de consolidation et a proposé une vitesse d'infiltration moyenne dans une Cangahua consolidée ou très fortement altérée de l'ordre de 10^{-10} cm/s. De façon générale, cet auteur dit qu'elle est peu perméable.

Quantin et Zebrowsky (1996) ont étudié la Formation Cangahua au nord de l'Equateur dans la Vallée Interandine, depuis la Province de Carchi (frontière avec la Colombie) jusqu'à la Province du Chimborazo au centre-nord de l'Equateur. Ils ont trouvé que la Cangahua non altérée ou partiellement altérée est faiblement perméable. Cependant, Torres (1975) suggère, à partir de son étude de la Cangahua de la vallée de Los Chillos, Tumbaco et Quito, qu'elle peut avoir un comportement semi-perméable ; les vitesses d'infiltration calculées à partir de la granulométrie en utilisant des formules empiriques varient entre 6×10^{-3} et 8×10^{-3} cm/s. Mais les formules utilisées par cet auteur, pour calculer la vitesse d'infiltration à partir de la granulométrie ont été conçues pour des matériaux à grain uniforme (Davis 1988), ce qui n'est pas du tout le cas de la Cangahua.

Une étude menée sur les sols composés de cendres volcaniques sur les páramos cultivés en Equateur, où les sols ont été soumis à d'intenses changements d'usage, a démontré que quand ces sols se dessèchent, ils acquièrent des propriétés

hydrofuges (Poulenard et al. 2004). Une autre étude faite sur la Cangahua au pied du volcan Ilaló dans le cadre de l'utilisation agricole des sols (Podwojewski et al. 2008) montre une perméabilité faible à cause de la formation en surface de croûtes très dures. La Cangahua en surface peut se dégrader structuralement très rapidement avec la pluie. Les croûtes très indurées en surface se forment précisément en raison de la texture limono-sableuse, augmentent le ruissellement en surface et limitent l'infiltration. Cette étude suggère que pour améliorer les conditions d'infiltration et baisser l'érosion de la Cangahua, une couche de pâturage devrait être cultivée et maintenue. Cette idée a été aussi reprise par un autre auteur qui indique que la végétation pourrait améliorer leur perméabilité dans les premiers mètres (Pan et al. 2012). Néanmoins, Podwojewski et al. (2008) ont observé que l'infiltration rapide dans la Cangahua pourrait conduire à l'accumulation de l'eau peu loin de la surface bloquée par des couches imperméables plus consolidées.

Le sol Cangahua en surface est donc probablement presque imperméable. Cette faiblesse de flux vertical est aggravée quand les pentes sont très prononcées parce que le ruissellement augmente et ne permet pas d'infiltration lente. Même si la conductivité hydraulique de la Formation Cangahua peut s'améliorer avec la présence de végétation en surface, cela ne concerne que les premiers mètres, et très localement. On peut donc difficilement envisager la Cangahua comme une zone de transfert de l'eau de surface vers les formations aquifères Chiche ou Ilaló. Cependant, cette formation, par sa texture parfois plus sableuse, peut former des lentilles perméables localement. En effet, nous avons observé surtout dans la partie sud de la zone d'étude, des forages superficiels qui captent cette couche mais ces forages deviennent secs après quelques mois d'exploitation. Les conditions de perméabilité de la Cangahua seront confirmées avec nos analyses et interprétations par différentes approches dans le chapitre 4.

Les caractéristiques hydrodynamiques, chimiques et isotopiques de l'aquifère contenu dans la Formation Chiche, dans les limites qui ont été définies et dans la Formation Ilaló, et ses interactions avec la couche en surface seront étudiées dans les chapitres suivants.

3. CHAPITRE 3 : DONNÉES DISPONIBLES, DESCRIPTION ET CRITIQUE

Ce chapitre décrit les données utilisées, données anciennes et mesures acquises au cours de cette thèse. Les données anciennes proviennent de rapports techniques et de travaux académiques, dans la zone d'étude ou à proximité et concernent des forages, puits et sources, « publics » ou privés. Les données récentes proviennent des sites que nous avons instrumentés au début de ce travail. Ces données concernent l'hydrodynamique de l'aquifère, la physico-chimie de l'eau, les isotopes stables et radioactifs, ainsi que des données plus générales (géologie, climat). Chaque partie indique la provenance et la quantité de l'information disponible. Un inventaire général de tous les points qui existent sur la zone d'étude a été montré dans la section 2.2.2.2, sur Figure 2.8 et l'annexe 2A.

3.1 DONNÉES HYDRODYNAMIQUES

Un travail topographique a été réalisé sur la zone de Tumbaco, en utilisant un DGPS, afin de connaître le plus précisément possible les altitudes, au cm près, afin de minimiser les erreurs sur les altitudes piézométriques.

Sur les 40 points ayant fait l'objet d'un suivi régulier au cours de cette thèse, 30 sont des forages et 10 sont des sources (Figure 3.1). Les niveaux piézométriques de 15 forages ont été mesurés mensuellement depuis septembre 2009. Trois autres forages, situés plus au sud dans la Vallée de Los Chillos, ont été suivis mensuellement depuis février 2011. On a aussi récupéré des données ponctuelles des niveaux piézométrique mesurés en 2006, sur 40 forages privés dans la Vallée de Los Chillos (Villarreal 2006). Sur 8 forages, des mesures ponctuelles anciennes de la piézométrie faites par l'EPMAPS ont été aussi récupérées, les détails du nombre de mesures et la période sont présentés dans le Tableau 3.2. Sur la totalité des points, 11 forages sont artésiens jaillissants (en rouge tableau Annexe 3A et localisation sur la **Figure 2.8**), malheureusement on ne dispose pas de mesure de pression, excepté le seul point VCH 1 (M301), mesuré à l'aide d'un manomètre.

En complément, 6 enregistreurs automatiques de pression absolue (Diver) ont été installés dans des forages par l'IRD (3 en avril et juillet 2010) et l'EPMAPS (3 en décembre 2011, avril et juin 2012), avec un pas de temps entre une heure et six heures (pour le détail voir section 3.2.2). Deux sondes Baro-Diver permettent de corriger les fluctuations de la pression barométrique.

Les rapports anciens de l'EPMAPS ont fourni 15 essais de pompages réalisés sur des forages juste après leur perforation. Les pompages ont été de faible durée, parfois seulement de quelques heures (entre 3 et 6 heures), ce qui limite fortement la représentativité des caractéristiques hydrodynamiques ainsi calculées. En complément, 4 essais de pompages longs (entre 24 et 408 heures), donc plus représentatifs des paramètres hydrodynamiques que l'on cherche à estimer, ont été effectués au cours de cette thèse. Les détails de la durée précise des pompages sur chaque point sont transcrits sur le Tableau 3.1.

Sur deux forages de l'EPMAPS réalisés en 2008, un au nord-ouest et l'autre au nord-est de la Vallée de Tumbaco (points en vert sur la Figure 2.8), on dispose de données de perméabilité à plusieurs profondeurs à partir d'essais de type Lefranc.

En complément, un suivi mensuel du débit des 7 sources les plus accessibles a été mis en place depuis février 2011.

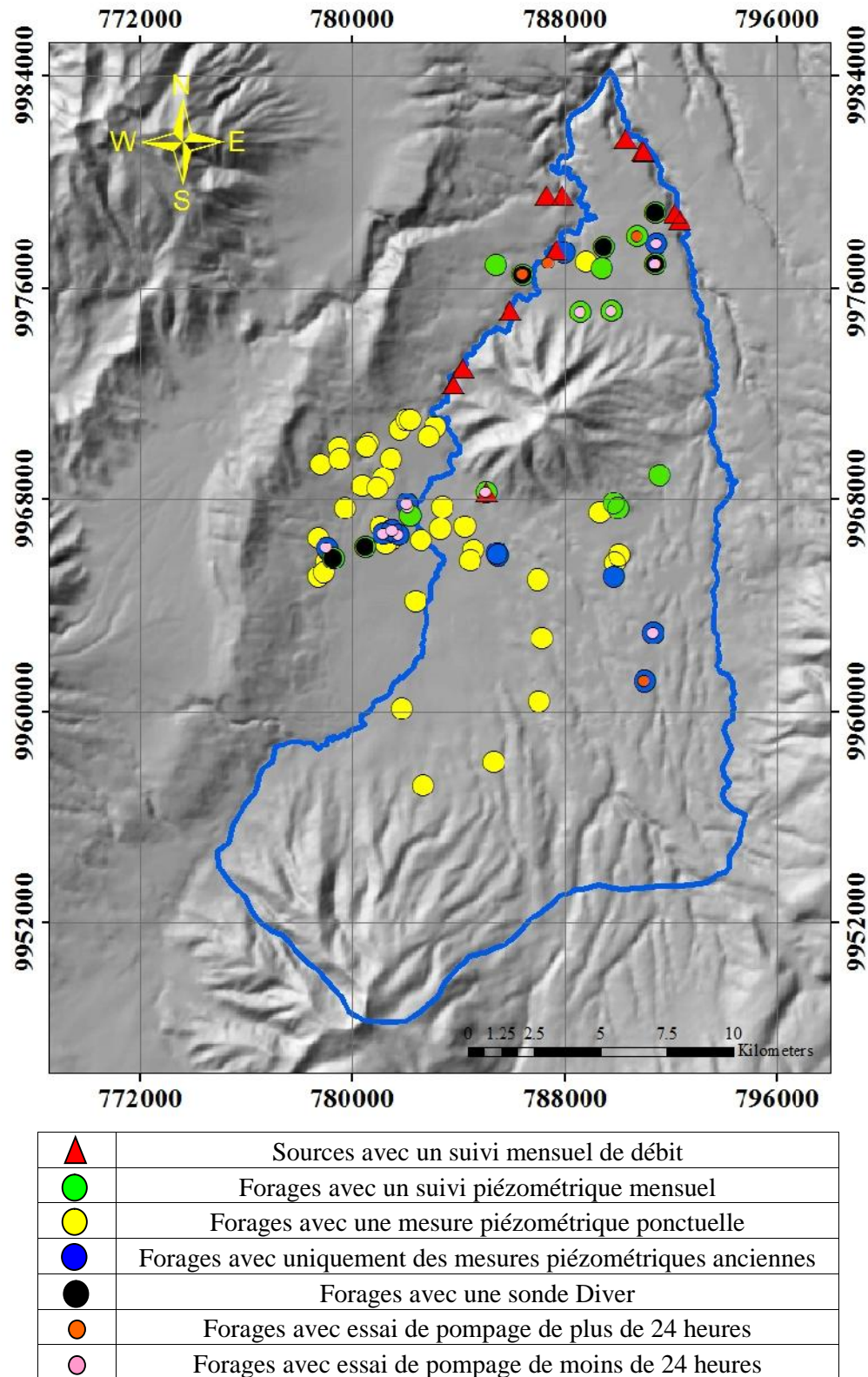


Figure 3.1. Données hydrodynamiques disponibles.

Tableau 3.1. Durée des essais de pompage.

Code	Aquifère	Forage	Temps de pompage (heures)
C101	Chiche nord	Las Acacias	4,5
C103	Chiche nord	El Carrizal	5
C107	Chiche nord	Santa Rosa	72
C155	Chiche sud	Armenia 1	3
C159	Chiche sud	La Moya 1	4,5
C161	Chiche sud	La Moya 3	4
C162	Chiche sud	Pintag 1	7,5
C163	Chiche sud	Pintag 2	66
C166	Chiche sud	San Juan de Conocoto	3,5
C168	Chiche sud	Armenia 2	10
C170	Chiche sud	Ushimana 2	20
I103	Ilaló	Planta de Tratamiento	5
I104	Ilaló	Rumihuayco 2	6
M302	Mélange	El Nacional	72
M303	Mélange	La Primavera 1A	408

3.2 CRITIQUE DES DONNÉES HYDRODYNAMIQUES

3.2.1 CRITIQUE DES DONNEES DES MESURES PIEZOMETRIQUES MANUELLES

Les mesures piézométriques des forages de la Vallée de Tumbaco, de la Vallée de Los Chillos et du volcan Ilaló sont détaillées dans l'Annexe 3B. Les mesures ont été réalisées avec une sonde piézométrique au centimètre près.

Dans les campagnes mensuelles figurent des lacunes (entre 6% et 30% de données manquantes) dues à des problèmes d'accès (clés perdues, gardien absent, nettoyage de forages) ou des défaillances des sondes piézométriques (Figure 3.2). Les détails de ces lacunes, marquées en jaune, sont exposés dans les tableaux de l'Annexe 3B.

Les données acquises ont permis de tracer des cartes piézométriques qui seront exploitées dans le chapitre 4.1, section 4.1.2.2, en complétant l'information avec les données anciennes dans le cas du forage Las Acacias (C101), qui sont la seule information piézométrique de ce forage.

Ces données anciennes représentent entre 3% et 15% des mesures totales, elles ont été mesurées entre 1991 et 2008 et nous les avons comparées avec nos mesures. Elles proviennent de 8 forages de la Vallée de Tumbaco. Les niveaux anciens qui ont montré des erreurs évidentes ont été supprimés. Par exemple dans le forage El Carrizal (C103) un seul point (26 mars 1991) montre un niveau plus profond que les niveaux actuels avec un écart de 2,20 m. Il est probablement le résultat de mesures d'un niveau piézométrique très influencé par le pompage. Ce forage a été fortement exploité avant 2006 par l'EPMAPS pour la distribution de l'eau potable, et il est possible que cette donnée ait été prise au moment du

pompage (en bleu, Tableau 3.2). Ces points sont marqués en jaune dans les tableaux de l'Annexe 3B.

On a pu observer deux comportements par rapport aux données actuelles :

- i) En général les niveaux piézométriques anciens sont moins profonds que les niveaux actuels, jusqu'à +3,2 m (voir Annexe 3B et Tableau 3.2 en rouge).
- ii) A La Esperanza MICEI (C104), La Primavera pz (M303_1) et Santa Rosa pz (C107_1) les niveaux anciens ont été mesurés sur un ou deux jours consécutifs sans montrer de variation et ils restent dans la gamme de variation des niveaux actuels (Tableau 3.2).

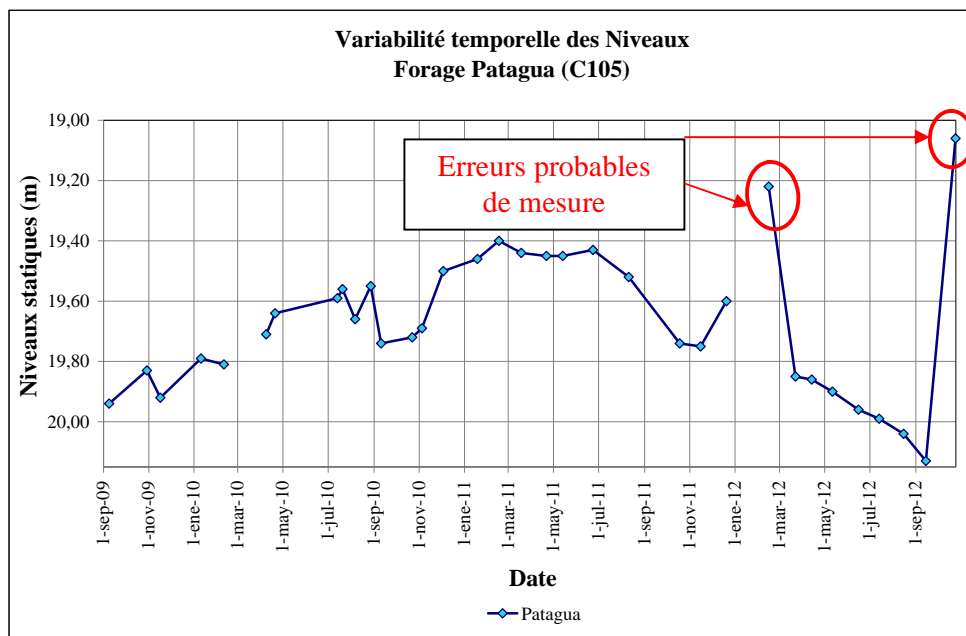


Figure 3.2. Exemple d'erreur probable de lecture sur la mesure piézométrique dans les forages.

Nous ne pouvons confirmer a priori la validité des mesures anciennes, cependant on peut proposer quelques hypothèses sur leur qualité. Nous avons indiqué précédemment que les aquifères Chiche nord et Ilaló ont été exploités pour l'alimentation humaine, pendant trois décennies jusqu'en 2006. Les niveaux anciens moins profonds que les niveaux actuels sont en apparence surprenants puisque la période avant 2006 correspond aux années de plus forte exploitation. Soit les données anciennes sont entachées d'erreur, soit l'exploitation après 2006 est finalement plus intense qu'attendu (usages industriel, agricole et urbain). On ne dispose pas des chiffres de l'exploitation de l'aquifère avant 2010. Cependant, les données officielles de la SENAGUA indiquent qu'actuellement, sur 9 forages déclarés dans la Vallée de Tumbaco, seulement 4 sont utilisés dont 2 pour l'usage industriel (déclaration de 7 l/s) et les 2 autres pour une utilisation plus domestique (débit non quantifié). Nos observations sur le terrain et les enregistrements des sondes Diver montrent que les niveaux piézométriques pendant nos 3 années de mesures sont largement perturbés par des pompages à proximité, beaucoup plus nombreux que les seuls déclarés. Il n'y a donc pas de raison a priori de douter de la qualité et de la représentativité des mesures anciennes et donc que l'exploitation en tous les cas localement serait plus importante qu'avant 2006.

Tableau 3.2. Analyse statistique de données piézométriques actuelles entre septembre 2009 et octobre 2012 et anciennes en différentes dates indiquées sur le tableau. Les données encadrées ont des différences très importantes avec les données anciennes.

Station	Pl. de Trat.	Prim. 1	Rumih. 1	Carrizal	Prim. 1_Pz	Sta. Rosa-Pz	Esperanza MICEI	Acacias
Code	I103	M303	M305	C103	M303_1	C107_1	C104	C101
DONNÉES ACTUELLES								
Moyenne	15,99	29,53	35,56	64,23	30,40	47,97	103,12	
Max	16,43	29,86	35,89	64,84	30,65	48,93	103,52	
Min	15,67	29,30	35,40	63,71	30,21	47,23	102,35	
ET	0,24	0,15	0,12	0,31	0,12	0,49	0,31	
n	34	23	29	29	28	31	34	
DONNÉES ANCIENNES								
Max	14,85	27,10	33,44	67,00	30,50	48,00	103,20	90,50
Min	14,83	26,10	33,44	63,25	30,50	48,00	103,20	90,22
n	2	3	1	5	1	1	2	3
Période données anciennes	2 jours en nov.-98	3 jours en avar-99	1 jour en sept-99	4 jours en janv.-91, 1 jour en mars-91	1 jour en juill.-08	1 jour en juill.-08	2 jours en août-07	3 jours en août- 91

Les forages La Esperanza – MICEI (C104), La Primavera pz (M303_1) et Santa Rosa pz (C107_1) ont des niveaux piézométriques qui ont été mesurés après l'arrêt théorique des pompes en 2006. Ces données ponctuelles se situent dans la gamme des variations observées entre 2009 et 2011. Cela indique le peu de variabilité de niveau que l'aquifère peut avoir et qui a été observé pendant nos mesures, résultat d'un aquifère en équilibre.

3.2.2 CRITIQUE DES DONNEES DES MESURES AUTOMATIQUES DE NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

Les sondes Diver de Schlumberger mesurent la température et la pression totale (colonne d'eau et atmosphère), d'où l'on tire le niveau piézométrique après soustraction de la pression barométrique, enregistrée par une sonde Baro-Diver. La précision est de 0,2 cm pour la piézométrie et de $\pm 0,2$ °C pour la température. Les pressions ont été enregistrées à un pas de temps d'une heure (sondes Diver IRD) et de six heures (sondes Diver EPMAPS). Les sondes ont été accrochées aux têtes des forages avec un câble en acier, pour éviter des déformations engendrant des perturbations dans les données ; par précaution, un câble en nylon additionnel a été raccordé au cas où le câble en acier par corrosion se romprait.

Deux Baro-diver ont été installés : l'un par l'IRD avec un pas de temps de 30 minutes près du forage La Primavera (M303) à 2360 m d'altitude (avril 2010 - octobre 2012) et l'autre par l'EPMAPS avec un pas de temps de 6 heures près du forage El Carrizal (C103) à 2418 m (décembre 2011 - octobre 2012). Les deux Baro-divers sont à 5 Km de distance. Pour effectuer les corrections dans les autres sites, si les valeurs de la pression atmosphérique ne sont pas mesurées en même temps que le niveau d'eau, on utilise une interpolation linéaire entre valeurs mesurées. Dans les conditions optimales, il est conseillé d'installer le Baro-diver dans un rayon de 15 Km autour des forages, ce qui a bien été respecté. Cependant les

différences d'altitude entre les forages et les Baro-Diver (Tableau 3.3) peuvent nécessiter une correction additionnelle.

Tableau 3.3. Altitudes des différents forages équipés avec une sonde Diver.

Code	Forage	Altitude (m)
C103	El Carrizal forage	2419
C103	El Carrizal Baro – Diver	2419
M303	La Primavera forage	2360
	La Primavera Baro – Diver	2380
C104	La Esperanza – MICEI	2418
C105	Patagua	2360
C158	Lasallinos	2595
C164	San Germán	2522

La variation journalière de la pression barométrique est entre 0,02 et 0,12 m. Cette variation représenterait l'influence de la pression atmosphérique sur les niveaux piézométriques.

Durant la période commune des deux Baro-diver, leur différence de pression varie entre 0 et 0,10 m d'eau (entre 0 et 7,6 mm Hg). Entre février 2012 et septembre 2012, la pression barométrique est plus élevée à La Primavera, et en décembre 2011-janvier 2012 et octobre 2012 la relation est inverse (Figure 3.3). La différence maximale, observée en octobre 2012, est égale à 0,10 m (Figure 3.5).

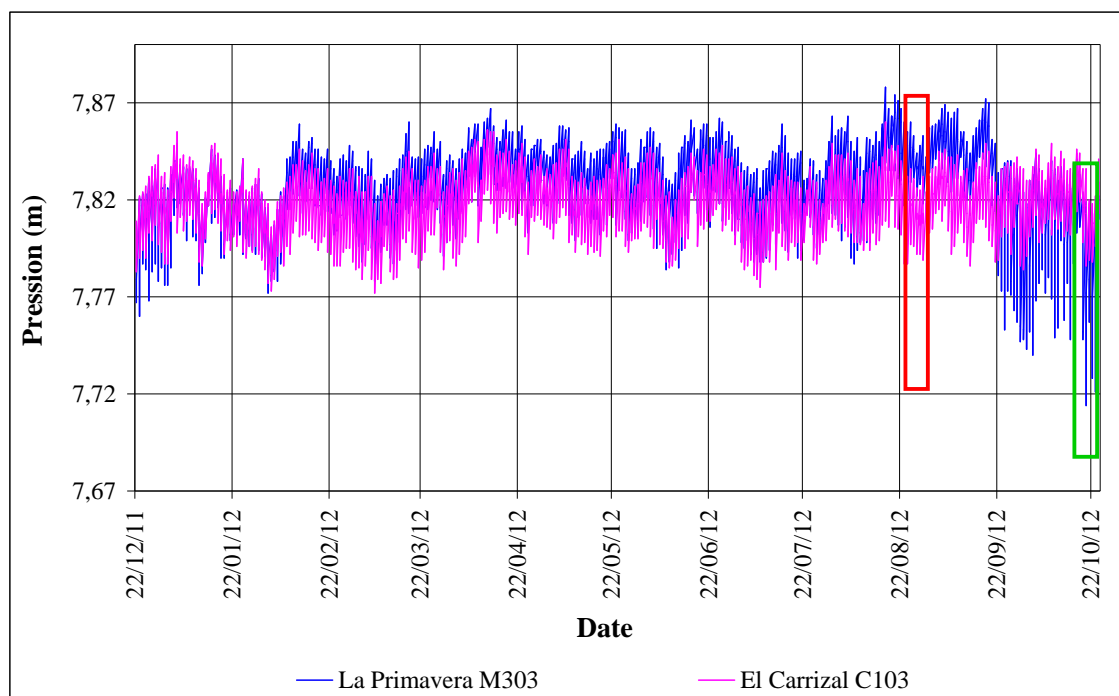


Figure 3.3. Période commune entre les Baro-divers du 22 décembre 2011 au 24 octobre 2012.

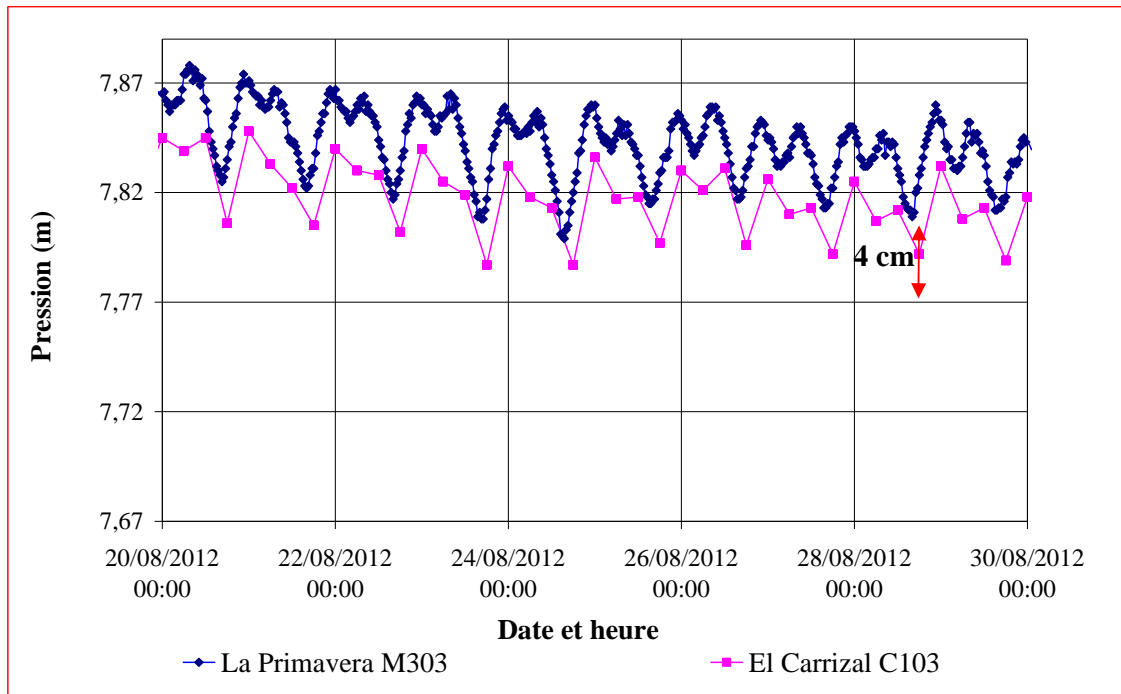


Figure 3.4. Différence de pression atmosphérique entre La Primavera et El Carrizal du 22 au 30 août 2012.

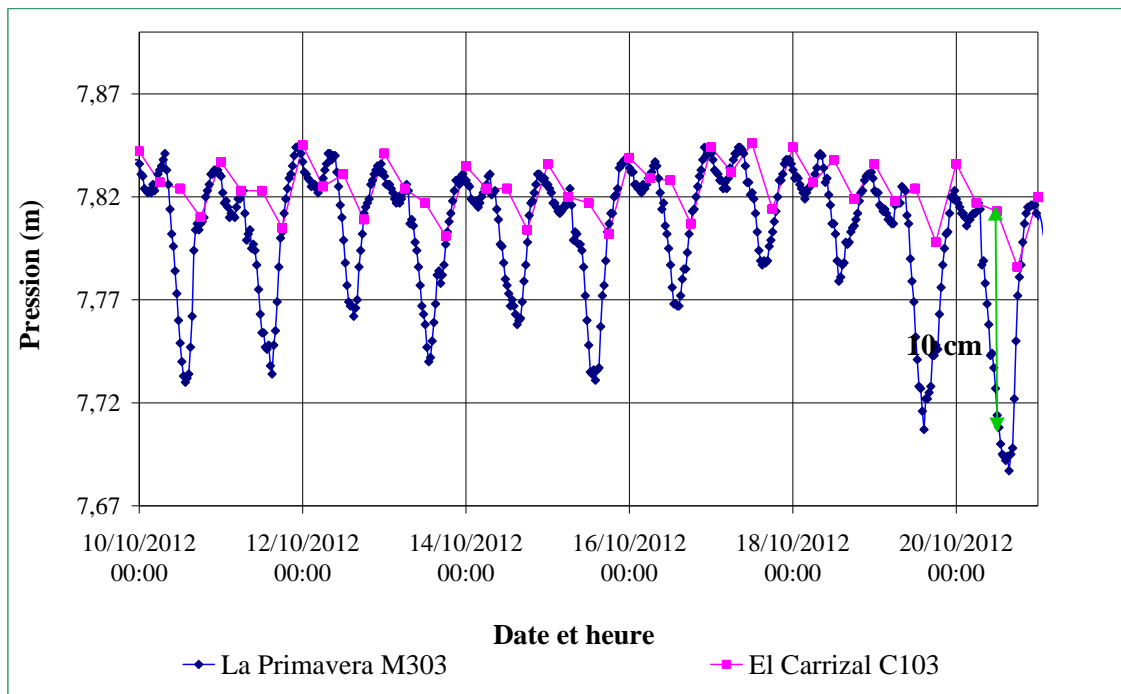


Figure 3.5. Différence de pression atmosphérique entre El Carrizal et La Primavera du 3 au 20 octobre 2012.

Cette analyse soulève plusieurs problèmes sur les mesures et techniques utilisées qui se sont révélés au cours de la période d'étude:

- i) L'inversion de la relation entre les stations qui sont relativement proches est due probablement à un mauvais fonctionnement de la sonde Baro-Diver installée à

La Primavera. Le problème a été détecté à partir de nos comparaisons entre les valeurs moyennes de pression barométrique à Tumbaco (2380 m) qui est de 783 cm d'eau, avec celles de Quito (2850 m) autour de 743 cm d'eau (donnée correspondant à la moyenne annuelle sur la période 1961-1995 à l'Aéroport de Quito). La différence d'altitude de 500 m se traduit par une différence de pression de 40 cm. La différence d'altitude de 58 m entre les Baro-diver devrait induire une différence de pression d'environ 5 cm, ce qui correspond à la différence observée avant septembre 2012.

- ii) En relation avec l'utilisation du Baro-diver pour la compensation barométrique des sondes piézométriques installées au sud de la zone d'étude, où aucun Baro-Diver n'a été installé, on a pris la sonde d'El Carrizal, qui est à 2418 m. L'erreur maximale générée aux niveaux piézométriques, si l'on fait une interpolation linéaire, serait d'à peu près 6 cm d'eau.

La pression compensée mesurée par les sondes automatiques est évidemment comparée avec les mesures manuelles de niveau piézométrique pour les valider. Nous avons rencontré des différences entre les deux niveaux, en relation avec un problème sur la longueur du câble, mal mesurée à l'initial, qui a ensuite été corrigée pour chaque forage (Tableau 3.4) permettant ainsi que les mesures automatiques coïncident avec les mesures manuelles.

Tableau 3.4. Corrections faites sur les mesures automatiques de niveaux en relation avec l'erreur sur la longueur du câble.

Code	Forage	Période de fonctionnement / mesure	Longueur initiale du câble (m)	Correction (m)	Installation faite par
M303_2	La Primavera 1A	Du 08-04-2010 au 23-06-2011	32,40	0,60	IRD
C105	Patagua	Du 21-07-2010 au 25-08-2012	20,70	0,15	IRD
C104	La Esperanza - MICEI	Du 28-07-2010 au 23-06-2011	104,10	Entre 0,10 et 1,00	IRD
C103	El Carrizal	Du 22-12-2011 au 24-10-2012	84,00	0,18	EPMAPS
C164	San Germán	Du 17-04-2012 au 26-10-2012	30,00	0,01	EPMAPS
C158	Lasallinos	Du 04-06-2012 au 26-10-2012	31,30	0,03	EPMAPS

Les périodes de fonctionnement de chaque Diver sont indiquées sur le Tableau 3.4. Les Diver de La Primavera 1A (M303_2), Patagua (C105) et El Carrizal (C107) (localisés sur la Figure 5 en Annexe 3A), après la compensation barométrique et les corrections liées à la longueur du câble, donnent des résultats cohérents. Néanmoins, chaque forage a présenté quelques particularités pendant la période de fonctionnement. Par exemple, les enregistrements à La Primavera 1A (Figure 3.6) et à Patagua (Annexe 3C) ont confirmé la présence de pompages à proximité, avec une fréquence plus élevée à Patagua. Le lieu et la nature de ces pompages, non déclarés n'ont par contre pas pu être identifiés. Sur le forage Patagua, 3 mesures manuelles sont en dehors de la gamme des mesures Diver (Annexe 3C). Même si pour les mesures manuelles nous avons pris toutes les précautions pour éviter une erreur de lecture, cependant une telle erreur ou une erreur de report reste possible. L'autre problème que nous avons rencontré dans ce forage, entre octobre 2011 et février 2012, a été la

rupture du câble porteur du Diver liée à l'agressivité du milieu mais le câble en nylon a évité la perte de la sonde. Une correction manuelle de modification de la longueur du câble de 0,60 m a été nécessaire. Les données au forage El Carrizal présentent un écart assez important d'à peu près trois mètres entre le 23 décembre 2011 et le 14 février 2012 peut-être lié au changement du câble d'accrochage du Diver qui a été remplacé (Annexe 3C).

Les forages au sud de la zone d'étude San Germán (C164) et Lasallinos (C158) (localisés sur la Figure 5 en Annexe 3A) comme il a été dit précédemment en raison de l'absence de Baro-Diver, les compensations barométriques ont été faites à partir du Baro-Diver le plus proche « El Carrizal » avec une différence de +100 m en altitude et une distance de +15 Km. Malgré la compensation barométrique très peu précise et après la correction sur la longueur du câble, la comparaison avec les mesures manuelles a montré des variations identiques des niveaux (Annexe 3C). Les anomalies de niveau présentes sur ces deux forages seront discutées dans le chapitre hydrodynamique (Chapitre 4.1, section 4.1.2.1.2).

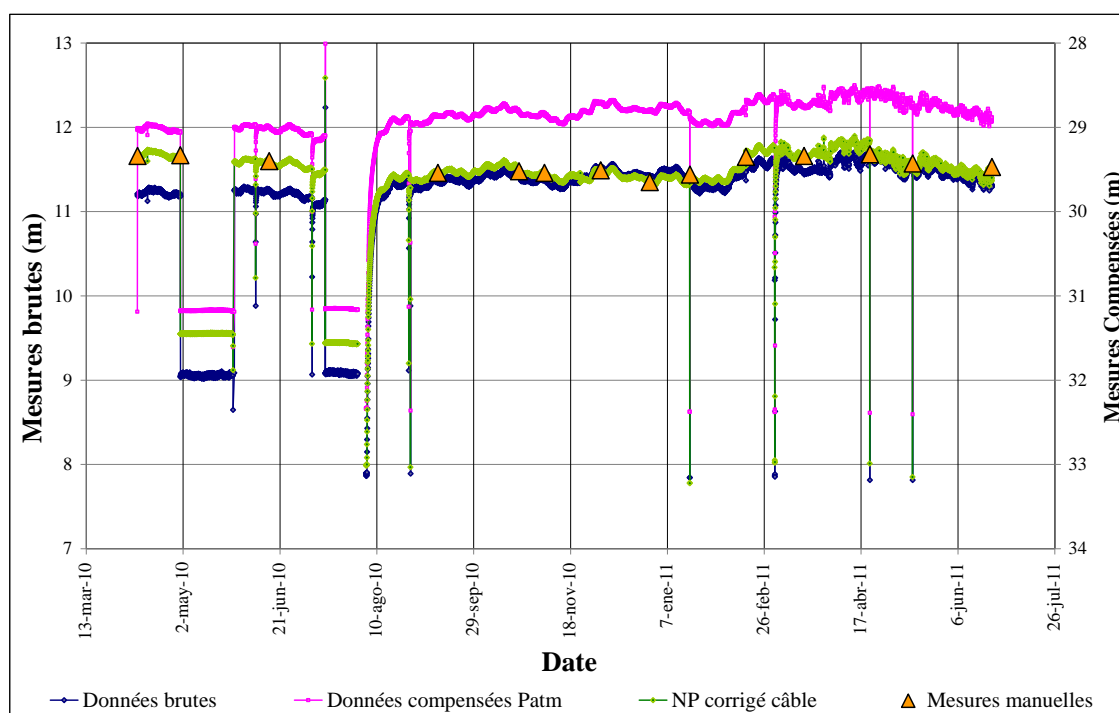


Figure 3.6. Mesures piézométriques par sonde Diver du forage « La Primavera » du 8 avril au 23 juin 2010. En bleu, données brutes ; en rose, données compensées, la courbe verte correspond aux données corrigées de l'erreur initiale faite sur la longueur du câble et les points oranges correspondent aux mesures manuelles.

Le forage La Esperanza – MICEI (C104, localisation en Annexe 3A) a montré des variations de niveau piézométrique très brusques à la baisse suivie par une récupération très lente. Après la compensation barométrique et la correction supplémentaire pour la longueur du câble, les mesures de la sonde automatique et les mesures manuelles ne présentent pas de cohérence. On a essayé d'observer si ces différences étaient dues à des problèmes liés au câble. Manipuler un câble en acier et un câble en nylon de plus de 100 m n'est pas très maniable et nous avons eu beaucoup de problème d'emmêlement et de nœuds. Ces comparaisons ont permis d'ajuster des corrections à partir de la longueur du câble qui varient entre 0,10 m et 1 m. Deux hypothèses peuvent être proposées pour expliquer ces différences : i) Si l'on considère que les mesures du Diver sont exactes, on aurait au moins 1 mesure manuelle incorrecte, et ces chutes de niveau peuvent être en relation avec un pompage à

proximité (Figure 3.7) ii) En cas de défectuosité de la sonde automatique, il est possible qu'elle capte des signaux piézométriques parasites liés à un mauvais fonctionnement. Pour l'hypothèse i), si l'on supprime la mesure incorrecte, les mesures manuelles gardent une cohérence par rapport aux données compensées, elles sont toujours plus élevées jusqu'au nettoyage du forage à partir d'avril 2011 (Figure 3.7). Pour pouvoir discuter l'autre hypothèse il aurait été nécessaire de continuer les mesures sur ce forage, mais en juin 2011 la sonde Diver a été volée, malgré les dispositifs de sécurité mis en place sur le forage (couvercle soudé et cadenassé). Les variations observées dans ce forage seront discutées dans le chapitre hydrodynamique (Chapitre 4.1, section 4.1.2.1.2).

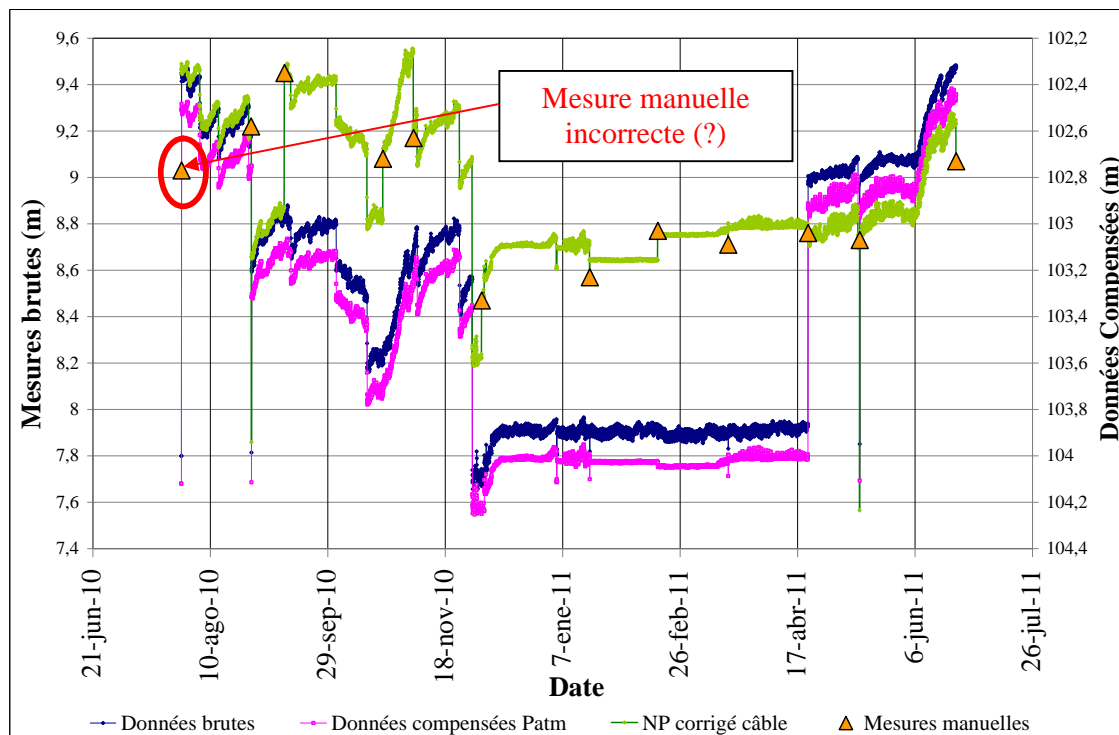


Figure 3.7. Mesures automatiques de la sonde Diver dans le forage « La Esperanza - MICEI » du 28 juillet 2010 au 23 juin 2011 (bleu : données brutes ; rose : données compensées transformées en m ; vert : données corrigées à partir de l'erreur sur la longueur du câble ; orange : mesures manuelles).

3.2.3 CRITIQUES DES DONNEES DES ESSAIS DE POMPAGES

On dispose de données d'essais de pompages sur 15 forages appartenant à l'EPMAPS. Seulement quatre d'entre eux (La Primavera 1, El Nacional, Santa Rosa au nord et Pintag 2 dans la partie sud) ont duré plus de 24 heures (durée de pompage sur le Tableau 3.1). Ces forages sont localisés sur les Figure 5 et 6 de l'Annexe 3A avec les codes M303, M302, C107 et C163 respectivement. Ce sont eux qui fourniront les données les plus fiables puisque représentant un plus grand volume d'aquifère.

Pour traiter ces données, la méthode de Cooper et Jacob (1946) a été utilisée, ce qui implique de respecter les conditions suivantes :

- l'aquifère doit être captif et d'extension infinie,

- l'aquifère est homogène, isotrope et a une épaisseur uniforme sur la zone influencée par le pompage,
- avant le pompage, la surface piézométrique est horizontale sur la zone influencée,
- l'aquifère est pompé par un débit constant,
- le forage perce l'épaisseur complète de l'aquifère et donc reçoit un flux horizontal,
- la distance entre le puits d'observation et le forage pompé doit être petite et le temps de pompage doit être suffisamment grand.

La première condition est respectée seulement par trois forages avec un essai de pompage de plus de 24 heures. Le forage Pintag 2 est dans un endroit où l'aquifère n'est pas en pression libre (voir section 4.1.1). Cependant, pour l'interprétation de cet essai de pompage nous avons utilisé la même méthode de Cooper et Jacob (1946) appliquée uniquement sur la dernière partie de la courbe, où l'on suppose que le régime permanent a été atteint.

Le forage Pintag 2 est profond (280 m) et, selon la description lithologique, il ne capterait que la formation Chiche qui serait d'une épaisseur de 235 m, sous les 45 m de la Formation Cangahua. Dans cette partie sud-est de l'aquifère, l'épaisseur totale de la Formation Chiche n'est pas connue avec précision. La seule étude sur l'épaisseur de cette formation au sud-ouest de la zone, se base sur l'interprétation de sondages électriques verticaux, pour estimer son épaisseur à au moins 230 m (Villarreal 2006). A partir de ce travail on peut penser que le forage Pintag 2 traverse la plus grande partie de la formation et que la formation Chiche du côté sud-ouest a une épaisseur au moins égale à 235 m.

Le forage Santa Rosa (120 m de profondeur, dont 52 m correspondant à la Formation Cangahua) de toute évidence ne traverse pas la totalité de l'épaisseur de l'aquifère. Les crépines du forage Santa Rosa ont une longueur de 67 m captant environ la moitié de l'aquifère, la formation Chiche pouvant atteindre entre 120 et 170 m au nord de la zone (Villagómez 2003). Pour Halford et Kuniansky (2002), le modèle de Cooper et Jacob (1946) peut néanmoins être utilisé avec un niveau d'approximation acceptable.

Les forages La Primavera et El Nacional captent en même temps les deux formations Chiche et Ilaló. Les résultats des calculs de ces deux forages ne peuvent donc pas être utilisés pour tirer des conclusions sur les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère Chiche ou Ilaló.

Le calcul de la transmissivité T sur ces deux forages Santa Rosa et Pintag 2 a été fait en utilisant les feuilles de calcul de l'USGS développées par Halford et Kuniansky (2002) qui utilisent la méthode de Cooper et Jacob (1946) :

$$s = \left(\frac{2,303 \cdot Q}{4f \cdot T} \right) \cdot \left[\log t - \log \left(\frac{r^2 S}{2,25 \cdot T} \right) \right] \quad (1)$$

Où :

s est le rabattement (L)

t temps du pompage (T)

r distance entre le piézomètre et le forage pompé (L)

Q est le débit constant (L^3/T)

S est le coefficient d'emmagasinement

T est la transmissivité (L^2/T)

L'interprétation des données se fait par la méthode graphique, où les variables sont s, r et t, qui sera exprimée en échelle logarithmique. La pente de la droite ajustée aux données est représentée dans l'équation (1) par le premier terme entre parenthèse, d'où l'on peut déterminer T. L'ordonnée à l'origine est le terme entre crochets qui permet de déterminer S. Les feuilles de résultats sont en Annexe 3D.

Les autres essais de pompages fournis par l'EPMAPS ont une faible durée de 3 à 6 heures. Néanmoins, ces données ont été exploitées en utilisant également la méthode de Cooper et Jacob (1946), afin d'avoir une estimation locale de la transmissibilité, en sachant que ces résultats devront être utilisés avec précaution.

3.2.4 CRITIQUE DES DONNEES DE PERMEABILITE A PARTIR DES ESSAIS LEFRANC

Nous disposons de données de perméabilité déterminées à partir des essais Lefranc sur deux forages dans la Vallée de Tumbaco, un à l'ouest (La Primavera pz, M303_1) et l'autre à l'est (Santa Rosa pz, C107_1). Les deux forages captent uniquement la Formation Chiche.

Selon Cassan (2005), l'essai Lefranc permet d'évaluer ponctuellement le coefficient de perméabilité d'un terrain aquifère supposé homogène et isotrope. Réalisé au-dessous du niveau piézométrique, il consiste :

- à la base d'un forage, on met une cavité dont les dimensions (diamètre, hauteur, forme) sont connues. On va créer une charge supplémentaire (dH) à la charge correspondant au niveau initial de la nappe. La filtration de l'eau produite par cette charge différentielle doit se faire uniquement par les parois de cette cavité (Figure 3.8);
- à mesurer l'évolution, en fonction du temps, de cette charge différentielle qui se produit, par un apport d'eau (injection d'eau), à débit constant (Figure 3.8).

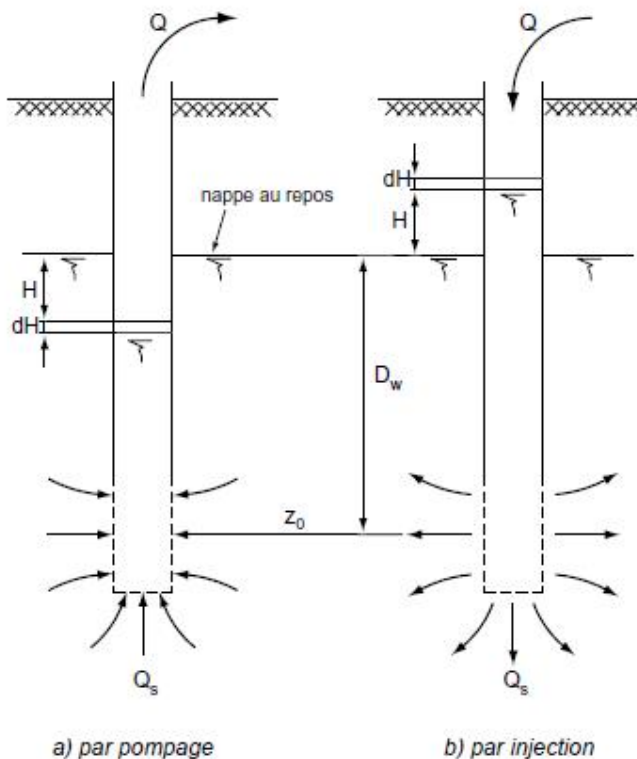


Figure 3.8. Principe de l'essai Lefranc selon Cassan (2005).

L'essai Lefranc ne permet que de déterminer un coefficient de perméabilité local dont la valeur peut être nettement différente de celle du coefficient de perméabilité en grand et n'est applicable qu'aux terrains dont la perméabilité est supérieure à environ 10^{-6} m/s. C'est pourquoi ce type d'essai ne peut pas remplacer les essais de pompages conventionnels, parce que l'essai Lefranc ne va déterminer que les caractéristiques du petit volume d'aquifère le plus proche du forage, d'autant plus que ce volume a pu être perturbé pendant la perforation. Cependant, Moench et Hsieh (1985) et Ramey et al. (1975) ont constaté que des valeurs approximatives acceptables de la perméabilité peuvent être atteintes. Comme il s'agit d'un essai rapide et relativement peu coûteux, on peut en multiplier le nombre, ce qui donne des renseignements précieux sur la structure et sur l'hétérogénéité des terrains.

Pour interpréter cet essai, on fait l'hypothèse que la loi de Darcy est applicable, que l'on atteint un régime permanent et que le milieu est homogène et isotrope. Le débit Q est proportionnel à la perméabilité k et à la charge h :

$$Q = k \cdot C \cdot h \quad (2)$$

C est un coefficient caractéristique de la forme de la cavité et du milieu. En supposant une cavité cylindrique de hauteur L et de diamètre D , dans un milieu infini, on a utilisé la formule approchée suivante :

$$C = 2fD \frac{\sqrt{\left(\frac{L}{D}\right)^2 - 1}}{\ln \left[\frac{L}{D} + \sqrt{\left(\frac{L}{D}\right)^2 - 1} \right]} \quad (3)$$

Dans nos deux forages l'essai Lefranc a été fait par injection d'eau à débit constant et les variations de niveau ont été mesurées. Avec ces données, on a construit la courbe $Q = f(h)$, d'où on obtient k . Selon Rat et al. (1970), il est rare d'obtenir une droite quand on fait cet essai à niveau variable et il est donc difficile d'évaluer une pente k . On peut essayer d'interpréter l'essai si l'on trace une tangente à la courbe au début de l'essai. De façon générale, les points s'alignent sur une droite quand l'essai est idéalement fait ; les mesures non alignées sur une droite peuvent traduire des problèmes de mise en place de la cavité ou bien un colmatage durant l'essai. Pour ces raisons, la tangente à la courbe pourrait nous donner une valeur de perméabilité sur un forage spécifique mais un tel résultat est à considérer avec précaution.

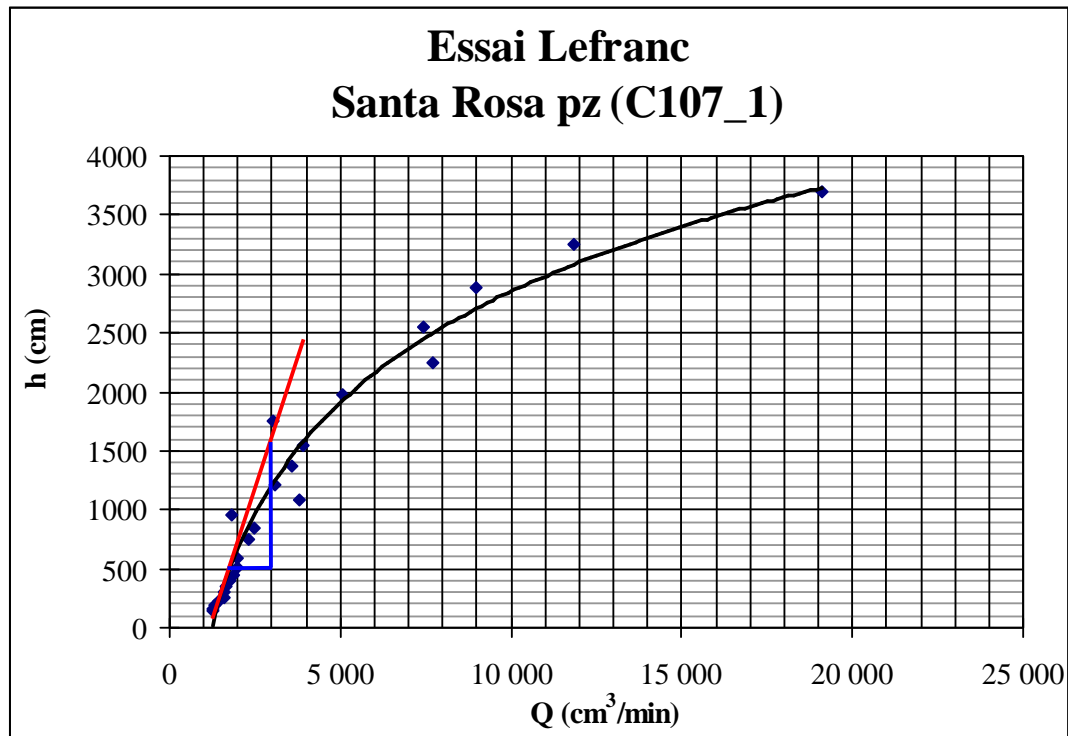


Figure 3.9. Courbe $Q=f(h)$ de l'essai Lefranc à Santa Rosa. La courbe en noir est la courbe théorique qui a permis de tracer la pente de la tangente au début de l'essai.

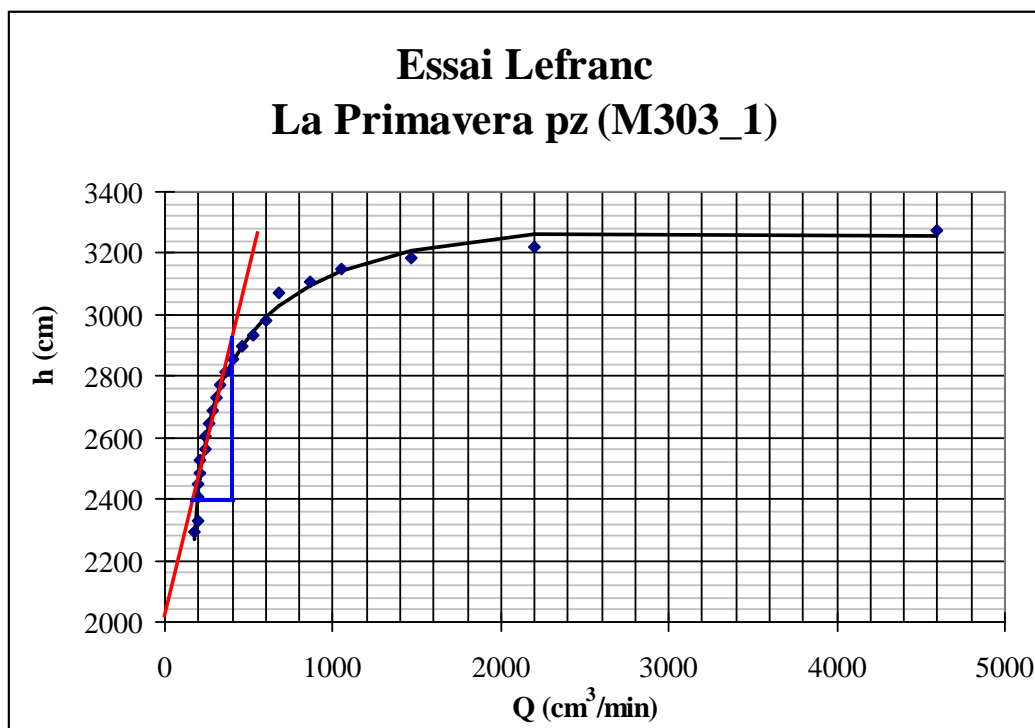


Figure 3.10. Courbe $Q=f(h)$ du piézomètre La Primavera à partir de l'essai Lefranc. La courbe noire est la courbe théorique sur laquelle les points devraient s'aligner.

Dans les forages La Primavera pz (M303_1) et Santa Rosa pz (C107_1), les courbes $Q = f(h)$ ne sont pas des droites. Nous avons alors calculé la pente de la tangente au début de l'essai pour avoir une valeur de la perméabilité sur les forages (Figure 3.9 et Figure 3.10).

Les résultats de ces essais seront discutés dans le chapitre 4.1 et comparés avec la perméabilité calculée à partir des essais de pompages.

3.2.5 CRITIQUE DES DONNEES DES JAUGEAGES SUR LES SOURCES

Un total de 18 sources a été recensé sur la zone d'étude. Sur 11 de ces sources on ne dispose pas des données de débits : 4 sont captées au point de sortie et distribuées à travers le réseau d'eau ; 3 sources émergent dans de profonds ravins, dont l'accessibilité a été compliquée et dangereuse, ne permettant pas de faire les mesures de débits de façon satisfaisante, les 4 dernières sont privées et l'accès est totalement restreint pour les mesures. Les détails des noms et codes sont donnés sur le Tableau 3.5, pour la localisation voir la carte de l'Annexe 3A. Les sept sources restantes ont fait l'objet d'un suivi mensuel de leurs débits (en rouge sur le Tableau 3.5).

Tableau 3.5. Observations d'accessibilité des sources. En rouge sources qui ont un suivi mensuel.

ID	Sources	Observations
C201	Las Chirimoyas 1	Mesure mensuelle
C202	Las Chirimoyas 2	Mesure mensuelle
C203	Las Chirimoyas 3	Captation souterraine
C204	EEQ	Privée
C205	John Daane	Privée

ID	Sources	Observations
C206	Vertiente San Pedro	Mesure mensuelle
C207	Cañón del Chiche	Privée
C208	Chiche Ferrocarril	Accessibilité difficile
C209	Chunchi 1	Accessibilité difficile
C210	Chunchi 2	Accessibilité difficile
I201	Balneario Ilaló	Captation souterraine
I202	Cununyacu 1	Mesure mensuelle
I203	Cununyacu 2	Mesure mensuelle
I204	El Tingo Carrizal	Mesure mensuelle
I205	El Tingo Piscina	Captation souterraine
I206	Rumiloma 1	Mesure mensuelle
I207	Rumiloma 2	Privée
I208	Rumiloma 3	Captation souterraine

Nous avons appliqué la méthode capacitive en utilisant un seau de 16 L gradué par L, et un chronomètre dont la précision était de 0,1 seconde. Le seau a été changé pour un autre de 9 litres en octobre 2011. Un chronomètre peu précis (précision de 1 seconde) a été utilisé entre octobre 2011 et janvier 2012. Toutes les mesures de débit ont été faites au moins 3 ou 4 fois pour contrôle.

Tableau 3.6. Débits de sources mesurées sur le terrain en l/s de février 2011 au septembre 2012. Les sources marquées en rouge correspondent aux endroits où on ne dispose que de mesures rares. Las Chirimoyas 1A et 1B et Cununyacu Int. 1 et Cununyacu Int. 2 sont des sources que son débit a été divisé par deux tubes dans une galerie de captage qui arrive dans le même réservoir, nous avons mesuré les débits sur les deux tubes.

ID	Sources	Q Max (l/s)	Q Min (l/s)	Q Moy (l/s)	ET	% Données manquantes	Nombre des mesures disponibles
C201A	Las Chirimoyas 1A	6,59	3,00	5,06	1,27	9%	10
C201B	Las Chirimoyas 1B	8,91	3,00	6,58	1,97	9%	10
C202	Las Chirimoyas 2	4,64	3,00	3,79	0,50	9%	10
I202	Cununyacu Int. 1	8,45	3,00	5,86	1,76	0%	11
I202_1	Cununyacu Int. 2	1,81	0,63	1,38	0,65	73%	3
I203	Cununyacu Ext.	19,44	0,35	9,90	13,50	82%	2
I206	Rumiloma 1	9,00	3,00	5,61	1,84	9%	10
C206	Vertiente San Pedro	0,30	0,04	0,16	0,09	18%	9
I204	El Tingo Carrizal	2,20	0,98	1,50	0,41	0%	11

Les problèmes rencontrés avec ces mesures sont de deux ordres : pourcentages très élevés entre 9% et 82% de données manquantes pour toutes les stations parce que le calendrier initial n'a pas pu être toujours respecté et que les mesures sont très peu précises, par exemple : 3 mesures sur exactement le même volume du seau, avec exactement les mêmes temps de remplissage, ces données ont été marquées en jaune sur le tableau de l'Annexe 3E.

Les débits mesurés avec le chronomètre précis (0,1 s) montrent des incertitudes sur les mesures entre 5% et 50%, et entre 30% et 100% avec le chronomètre à 1 s. Ces données seront regardées avec précaution au moment des interprétations hydrodynamiques (Tableau 3.6).

On dispose seulement de 11 mesures sur les 20 mois d'observation, dans le meilleur des cas. Néanmoins, nous allons faire une analyse de la variation temporelle de ces débits. De ces premiers calculs, l'écart type montre que la dispersion des données reste faible pour les sources où les pourcentages de données manquantes est inférieur à 20% donc, on peut penser que les variations temporelles sont possiblement peu marquées (Tableau 3.6).

3.3 *DONNÉES PHYSICO - CHIMIQUES*

Depuis 2006, le laboratoire de Contrôle et Qualité de l'Eau de l'EPMAPS a mis en place des campagnes d'analyses chimiques de l'eau des aquifères deux fois par an de façon régulière. On dispose de données jusqu'à septembre 2011. On a récupéré aussi 30 analyses anciennes faites au moment de la construction des forages entre 1974 et 1999, complétées par des analyses non périodiques réalisées par l'EPMAPS à partir de 1990, soit un total de 255 mesures sur 47 points d'eau, forages et sources (Figure 3.11).. Certains paramètres ont été mesurés sur le terrain : la conductivité électrique (CE), le pH, la température de l'eau et la température ambiante. Les mesures analysées au laboratoire sont : couleur, turbidité, solides totaux dissous (TDS), coliforme totaux, E. Coli, alcalinité, dureté totale, éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^-), Si et PO_4^{3-} , carbone organique total, oxygène dissous et éléments traces dont F, Al, As, Cd, Co, Cu, Cr total, Fe total, Li, Mn, Ni, Zn, et pour certains forages une mesure unique du Ba, Ag, Pb, Hg, Sb, Se, V. Pour les 18 sources et sur 15 forages on a aussi 38 analyses, au total, de 28 pesticides différents.

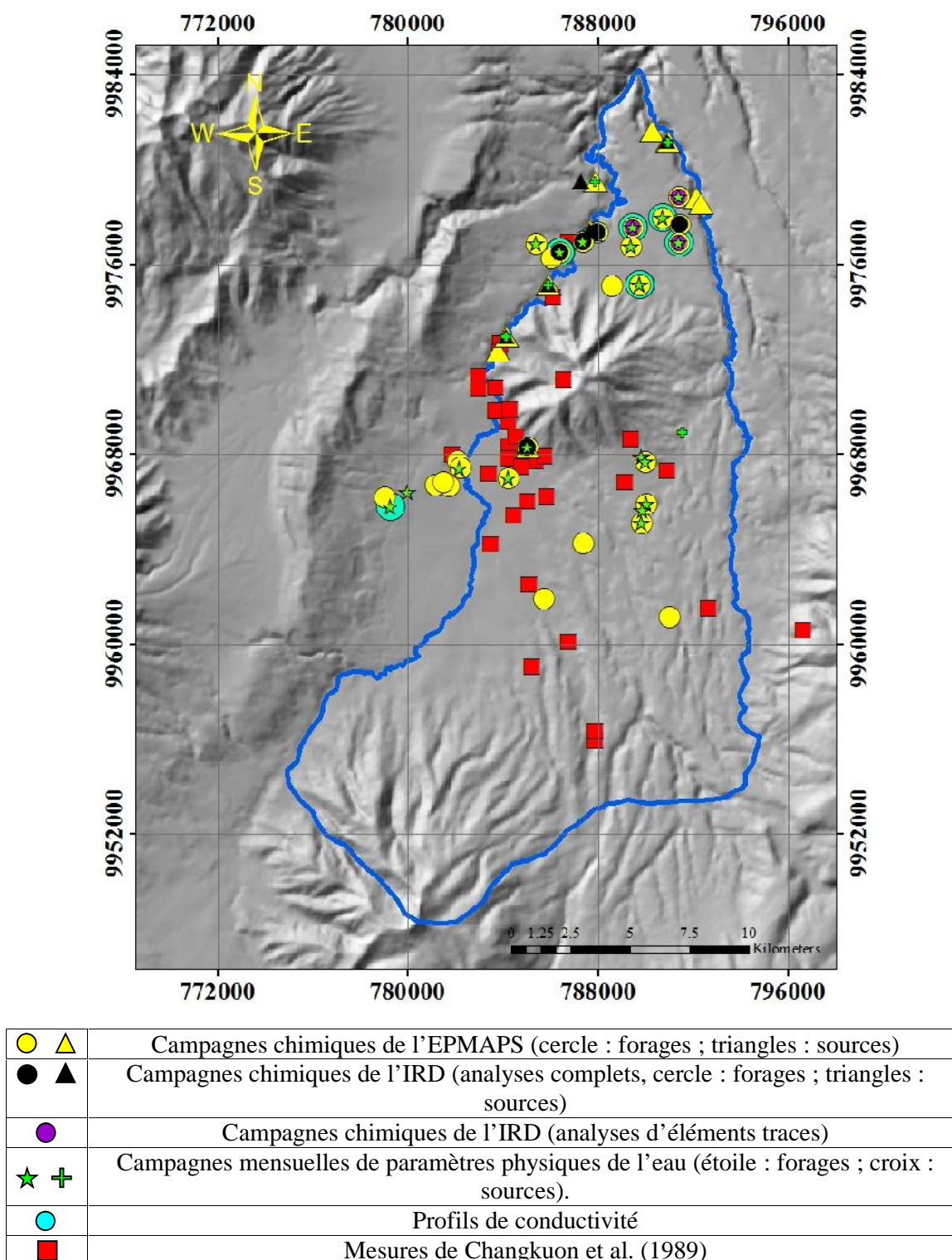


Figure 3.11. Localisations de points de mesures chimiques.

En 2010 et 2011, une série de 11 échantillons complémentaires à ceux de l'EPMAPS a été analysée au laboratoire d'Hydrosciences à Montpellier (HSM), plus 3 autres échantillons dont seulement les éléments traces ont été mesurés (Figure 3.11). Sur le terrain, les mêmes paramètres que l'EPMAPS ont été mesurés ainsi que le potentiel redox (Eh), l'oxygène dissous et l'alcalinité. Au laboratoire les paramètres mesurés sont : les éléments

majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^-), PO_4^{3-} , F^- , Br^- , le carbone organique total, Fe II et Fe total, la spéciation de l'arsenic, et les éléments traces comme : Li, B, Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, Pb, U, La, Ce, Gd, Dy, Be, Ti, Ag, Au, Tl, Th, Si.

En supplément de ces campagnes chimiques, des mesures de conductivité électrique, pH, Eh et température de l'eau ont été effectuées tous les mois, à partir de février 2011 sur 29 points (21 forages et 8 sources, Figure 3.11) des aquifères Chiche et Ilaló. Ces données sont fournies en Annexe 3F.

En 2012, pour caractériser les forages captant plus d'une formation aquifère, des profils verticaux de CE ont été effectués dans 8 forages (Figure 3.11), dont 7 au nord et 1 au sud, ayant un diamètre assez grand pour introduire la sonde multi-paramètres et n'étant pas équipés de pompe.

Le travail de Changkuon et al. (1989) sur la Vallée de Los Chillos en 1984 apporte en complément 41 analyses chimiques sur 41 points dans et autour de la zone d'étude (Figure 3.11). Les paramètres qui ont été mesurés sont : CE, pH, température de l'eau, alcalinité, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NH_3^- , B, CO_2 .

Un récapitulatif des méthodes utilisées sur le terrain et au laboratoire pour prendre et analyser les échantillons est présenté en Annexe 3G, en soulignant les différences entre les méthodes appliquées au Laboratoire de Contrôle et Qualités des Eaux en Equateur et au laboratoire d'Hydrosciences à Montpellier.

3.4 CRITIQUE DES DONNÉES CHIMIQUES

3.4.1 CRITIQUES DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU

Les données de CE, pH et température de l'EPMAPS ont été confrontées avec nos mesures mensuelles de terrain entre février 2011 et octobre 2012, à l'aide d'analyses statistiques simples (Tableau 3.7), extrêmes, moyenne et écart-type. Toutes les analyses chimiques incluant les paramètres physiques de l'eau, faites sur le terrain au moment des prélèvements, sont présentées à l'Annexe 3H, avec leur traitement de données

Des erreurs de conductivité électrique ont été trouvées sur les données EPMAPS (30 mesures erronées sur 144 au total), liées à la non-compensation de la conductivité par la température de référence de 25 °C ; les conductivités avaient une différence entre 10% et 20% avec les valeurs extrêmes que nous avons mesurées ; 19 mesures ont pu être corrigées, les autres écarts sont incohérents et sont peut-être dus à une mauvaise calibration de l'appareil ou à des erreurs dans les mesures de température de l'eau.

Tableau 3.7. Variabilité des paramètres physiques de l'eau calculée à partir des mesures mensuelles faites sur les forages et sources.

		Vallée		Ilaló
		Tumbaco (nord)	Los Chillos (sud)	
Conductivité (~S/cm)	Max	778	417	3136
	Min	435	322	927
	ET	61	52	259

		Vallée		Ilaló
		Tumbaco (nord)	Los Chillos (sud)	
pH	Max	8,78	7,91	8,10
	Min	7,45	7,40	6,76
	ET	0,51	0,32	0,42
Eh (mV)	Max	173,7	171,3	208,2
	Min	92,9	129,3	140,0
	ET	18,2	15,1	24,6
Température (°C)	Max	21,9	19,9	41,6
	Min	19,1	18,8	21,1
	ET	1,7	1,4	2,3

La même analyse a été faite pour le pH. Seulement 3 valeurs sont vraiment différentes, supérieures à 10%.

La température montre des écarts notables pour 25 valeurs, parfois jusqu'à 7°C.

3.4.2 CRITIQUES DES ANALYSES DE IONS MAJEURS

On a contrôlé la qualité de la totalité des analyses chimiques, en calculant le bilan ionique des majeurs par la formule suivante :

$$bilan\ ionique = \frac{\sum cation - \sum anion}{\sum cation} * 100$$

La limite acceptable fixée pour considérer l'analyse correcte est de 10%. On a aussi comparé la CE théorique calculée à partir des analyses des ions majeurs avec la CE mesurée sur le terrain, la différence entre ces deux paramètres ne devant pas dépasser 15%. La CE théorique a été calculée avec la formule de Logan (Logan 1961) :

$$B = 0.5 * \sum cations + anions$$

Si $B < 1$ méq/l	CE = $100 * B$	
Si $1 < B < 3$ méq/l	CE = $12,27 + 86,389 * B + 0,835 * B^2$	
Si $3 < B < 10$ méq/l	CE = $B * (95,5 - 5,54 * \log B)$	
Si $B > 10$ méq/l	Si HCO_3^- dominant	CE = $90 * B$
	Si Cl^- dominant	CE = $123 * B^{0,939}$
	Si SO_4^{2-} dominant	CE = $101 * B^{0,939}$

Avec B = coefficient calculé en méq/l à partir des ions majeurs
CE = conductivité électrique en $\mu S/cm$ à 25°C

La formule de Logan a l'avantage d'être non linéaire. De plus cette approche nous a permis facilement et de façon efficace de discriminer les erreurs même si le bilan ionique est inférieur à 10%, on a ainsi trouvé que parfois un ion majeur peut avoir des concentrations plus élevées ou plus basses que la moyenne mesurée dans ce forage pour cet ion majeur spécifiquement et qui se traduit par un biais de la CE très éloignée de la moyenne de la CE

observée. Par exemple : sur le forage La Merced (I106) du 01 mars 2011 le bilan ionique est de 3,1% mais la différence entre la conductivité mesurée et la conductivité de Logan est de 26,6% (Tableau 3.8), quand on regarde les ions majeurs, on voit que la moyenne pour les valeurs de l'ion Ca^{2+} est de 2,1 méq/l, mais pour cet analyse suspecte elle était de 0,6 méq/l, le bilan s'est équilibré parce que la valeur de Mg^{2+} a été plus élevée que la moyenne. Les analyses qui ont présenté ces incohérences ont été écartées de nos interprétations.

Sur les 222 analyses de l'EPMAPS, 111 ont finalement été gardées, dont 12 échantillons au-dessus du seuil de 15% (entre 16% et 87%) d'écart entre les CE calculée et mesurée. Ces échantillons n'ont pas été éliminés parce que l'erreur semble venir de la non rectification de la conductivité de terrain avec la température ou des erreurs de mesures sur la CE (Annexe 3F).

Sur les 11 analyses chimiques qui ont été passées au laboratoire d'Hydrosciences, en France, 3 ont été rejetées parce que les alcalinités n'ont été mesurées ni sur le terrain ni à leur arrivée au laboratoire.

Tableau 3.8. Exemple des corrections avec la conductivité de Logan (Co Lg) pour le forage La Merced (I106). Les ions majeurs sont exprimés en méq/l.

Date	CE Mesurée $\mu\text{S}/\text{cm}$	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Mg^{2+}	Ca^{2+}	K^+	Na^+	Sum Anion	Sum Cation	Bilan	B	Cond Logan	%cond - CoLg
30/10/2007	139	1,9	10,1	0,4	6,1	2,0	0,4	3,9	12,4	12,3	0,7	12,3	1111,1	87,5
29/10/2008	1072	1,9	10,2	0,4	5,2	1,9	0,3	3,8	12,4	11,2	10,9	11,8	1064,1	0,7
04/05/2009	1061	2,0	10,2	0,3	6,5	1,9	0,4	1,8	12,5	10,6	17,9	11,5	1035,6	2,5
26/10/2009	1246	2,1	10,2	0,4	3,3	3,5	0,4	5,7	12,8	12,9	0,9	12,8	1153,3	8,0
04/05/2010	1044	1,2	9,9	0,3	4,3	2,2	0,5	6,0	11,4	12,9	11,6	12,2	1096,5	4,8
14/09/2010	1103	1,2	10,0	0,3	5,3	2,0	0,2	4,4	11,5	12,0	4,1	11,7	1053,6	4,7
01/03/2011	1291	1,2	9,7	0,2	6,1	0,6	0,2	4,6	11,2	11,5	3,1	11,3	1019,6	26,6
24/08/2011	1085	1,8	9,8	0,5	4,7	2,3	0,3	4,9	12,2	12,2	0,1	12,2	1096,7	1,1
Moyenne	1129	1,7	10,0	0,3	5,2	2,1	0,3	4,4	12,0	11,9				

3.4.3 CRITIQUES DES ANALYSES DES ELEMENTS TRACES

De l'ensemble des éléments traces analysés, seuls Al, As, B, Fe, F, Li et le Mn ont des teneurs supérieures aux limites de détection. As est le seul qui peut dépasser la norme de l'OMS de 10 $\mu\text{g}/\text{l}$, avec de possibles conséquences graves sur la santé de la population.

Pour les éléments traces il n'y a pas une méthode telle que le bilan ionique des ions majeurs pour contrôler la qualité des résultats. On dispose seulement de la répétitivité, dans l'hypothèse où l'eau reste en équilibre chimique. La méthode que nous avons utilisée pour traiter les résultats issus des éléments traces est évidemment toujours la même. Elle est illustrée ci-dessous par l'As.

Sur l'ensemble des 195 mesures EPMAPS d'As, 127 sont en dessous de l'erreur instrumentale de la méthode spectrophotométrie d'absorption atomique par génération d'hydrures (30 $\mu\text{g}/\text{l}$) (voir Annexe 3H, et pour les différents aquifères Tableau 3.9). Les données d'As sont donc en majorité très incertaines, surtout du côté sud de l'aquifère Chiche.

Tableau 3.9. Points échantillonnés sur le système aquifère qui ont des teneurs en As inférieures à l'erreur de mesure de la machine au laboratoire.

	NB de point < 30 ~g/l	Total de points
Chiche nord	63	78
Chiche sud	24	24
Ilaló	21	66
Mélange	12	27
Total	127	195

Tableau 3.10. Nombre de mesures et points en commun entre le laboratoire EPMAPS à Quito et Hydrosociencias à Montpellier.

ID	Aquifère	Type	Station	EPMAPS	MSE	Total
C101	Chiche nord	Forage	Acacias	3	1	4
C103	Chiche nord	Forage	El Carrizal	1	1	2
C104	Chiche nord	Forage	La Esperanza - MICEI		1	1
C105	Chiche nord	Forage	Patagua	3	1	4
C109	Chiche nord	Forage	Diego Andrade		1	1
C201	Chiche nord	Source	Chirimoyas 1	8	1	9
C204	Chiche nord	Source	EEQ		1	1
I102	Ilaló sud	Forage	El Tingo Nuevo	1	1	2
I202	Ilaló nord	Source	Cununyacu 2		1	1
I207	Ilaló nord	Source	Rumiloma 2	3	1	4
M302	Mélange	Forage	El Nacional	3	1	4
Total				22	11	33

On a aussi effectué sur 7 points une analyse double à la même date : une faite par l'EPMAPS et l'autre par Hydrosociencias (Tableau 3.10) où le seuil est de 2 µg/l (voir Annexe 3H). Des différences très grandes ont été observées (Figure 3.12), accentuées notamment pour les points où les teneurs en As sont les plus élevées. Ces différences varient du double à 5 fois, les résultats de Quito donnant les teneurs les plus élevées. Seulement deux points présentent des résultats similaires : Las Chirimoyas 1 (C201), source de l'aquifère Chiche, et Rumiloma 1 (I207), source de l'aquifère Ilaló. Ces désaccords sont peut-être dus à la méthode utilisée dans chaque laboratoire (voir Annexe 3G), celle du laboratoire de Montpellier étant beaucoup plus précise. Mais ces différences peuvent aussi résulter d'une mauvaise conservation de nos échantillons (mauvais choix du réactif sur le terrain, ou absence de réactif, problème de la bonne conservation des échantillons lors du transport entre Quito et Montpellier...). Ces différences rendent ces résultats difficilement comparables. A la suite de nos discussions nous allons utiliser les données des deux laboratoires séparément. Nous allons aborder dans le chapitre chimie (section 4.2.4.2.1) les évidentes variations observées sur l'As entre les deux laboratoires pour trouver une explication à ce phénomène.

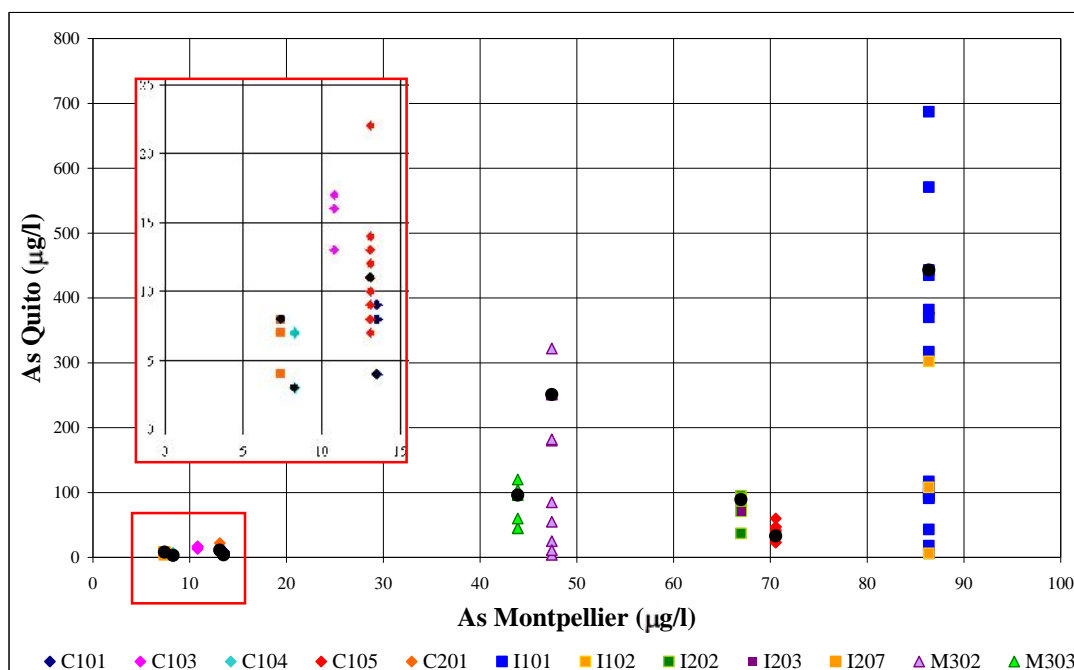


Figure 3.12. Comparaison des résultats des analyses d'As entre le laboratoire de l'EPMAPS et Hydrosciences. Les points noirs sont les analyses faites aux deux laboratoires à la même date.

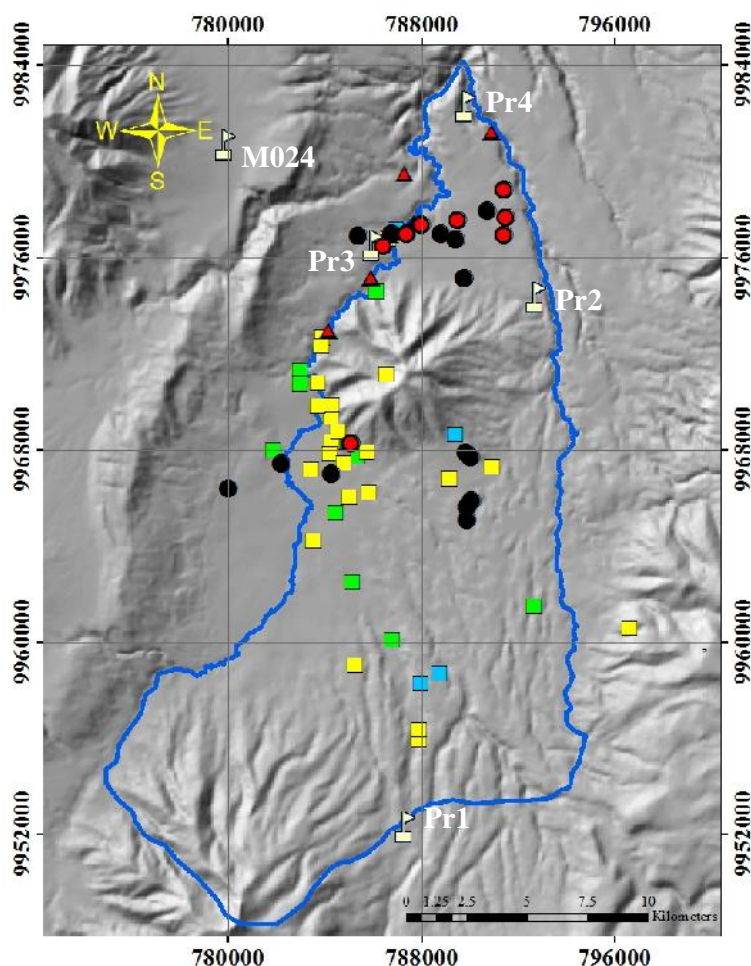
3.5 DONNÉES ISOTOPIQUES

Au début de cette thèse, quatre stations pluviométriques ont été installées afin d'obtenir une chronique mensuelle des isotopes de l'eau de pluie, oxygène 18 (^{18}O) et deutérium (D). Les stations ont été placées en essayant de respecter le gradient altitudinal sur la zone. Trois stations ont été installées en janvier 2010 et la dernière en mars 2010. On dispose d'un total de 112 mesures d'isotopes stables de la pluie sur une période allant jusqu'en septembre 2012. Ces stations sont localisées sur la Figure 3.13. Pour avoir une chronique de référence plus longue, la station de Quito, installée en 2001, va être aussi prise en compte. Les noms, codes d'identification, coordonnées, altitude des stations sont dans le Tableau 3.11.

On dispose aussi de 73 autres données d'isotopes stables de l'eau, 28 sur les forages et sources de l'aquifère Ilaló et 45 sur les points de l'aquifère Chiche. Les campagnes d'échantillonnage ont eu lieu deux fois par an dans la partie nord du Chiche et Ilaló en 2010 et 2011 et une unique fois pour la partie sud du Chiche en avril 2011. Ces mesures ont été faites pendant la saison « sèche » (juillet – août) et en saison humide (avril – mai), afin d'apprécier une possible variabilité saisonnière. Suite aux premiers résultats, indiquant des variations isotopiques très faibles, les campagnes ont été arrêtées en 2012.

Tableau 3.11. Information de localisation sur les stations pluviométriques sur la zone d'étude.

ID	Station	Altitude	UTM WGS 84	
		m	Latitude	Longitude
Pr4	Las Peñas	2340	789830,01	9982310,98
Pr3	Cumbayá	2362	785978,47	9976519,31
Pr2	La Tola	2480	792754,30	9974397,42
Pr1	Rumipamba	2976	787333,75	9952331,27
M024	Quito	2850	779883,66	9980699,94



	Limite de la zone d'étude
	Stations pluviométriques
	Forages (cercles) et sources (triangles) où il y a des analyses d'isotopes stables de l'eau
	Forages (cercles) et sources (triangles) où il y a des analyses d'isotopes radioactifs
	Données de ^{18}O et D récupérées de l'étude de Changkuon et al. (1989)
	Point où il y a des données d'isotopes stables et de ^{14}C issus de l'étude de Changkuon et al. (1989)
	Point où il y a du ^{14}C issus de l'étude de Changkuon et al. (1989)

Figure 3.13. Stations et points d'échantillonnages d'isotopes stables et radioactifs.

De la même façon, 12 échantillons pour mesure des isotopes radioactifs, tritium (^3H) et/ou carbone 14 (^{14}C), ont été prélevés à des dates différentes : 8 points en avril – mai 2010 (^3H et ^{14}C) ; 3 points en septembre 2011 (^{14}C), profitant du nettoyage de 3 forages localisés au nord-est de la zone effectué par l'EPMAPS ; 1 point en octobre 2012 (^{14}C).

Les analyses d'isotopes radioactifs ont été faites au laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon avec une erreur de 0,5 UT pour le ^3H et de 0,5 pmc pour le ^{14}C .

On dispose aussi de 37 données d'isotopes stables et radioactifs (37 ^3H et 16 ^{14}C) de l'étude de Changkuon et al. (1989), dans la partie sud, dans la Vallée de Los Chillos (localisation en Figure 3.13).

3.6 CRITIQUE DES DONNÉES D'ISOTOPES STABLES

Les isotopes stables de cette étude ont été analysés au Laboratoire Hydrosociences de Montpellier (LAMA) par spectrométrie de masse en utilisant la méthode Dual Inlet, avec équilibre de CO₂ pour le ¹⁸O et flux continu d'hélium par réduction de l'eau sur chrome dans un four à 1050 °C pour le deutérium. L'erreur de mesures est de 0,06‰ pour ¹⁸O et de 0,8‰ pour ²H. La méthode utilisée pour ces mesures est expliquée en Annexe 3G. Les analyses de Changkuon et al. (1989) ont été faites au Laboratoire de l'AIEA à Vienne.

Les résultats des isotopes stables sur les forages et sources de l'aquifère Chiche et Ilaló, ont été confrontés avec les résultats de Changkuon et al. (1989). Les différences sont inférieures à 0,05‰ en ¹⁸O pour les mêmes points.

3.7 DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES : DESCRIPTION ET CRITIQUE

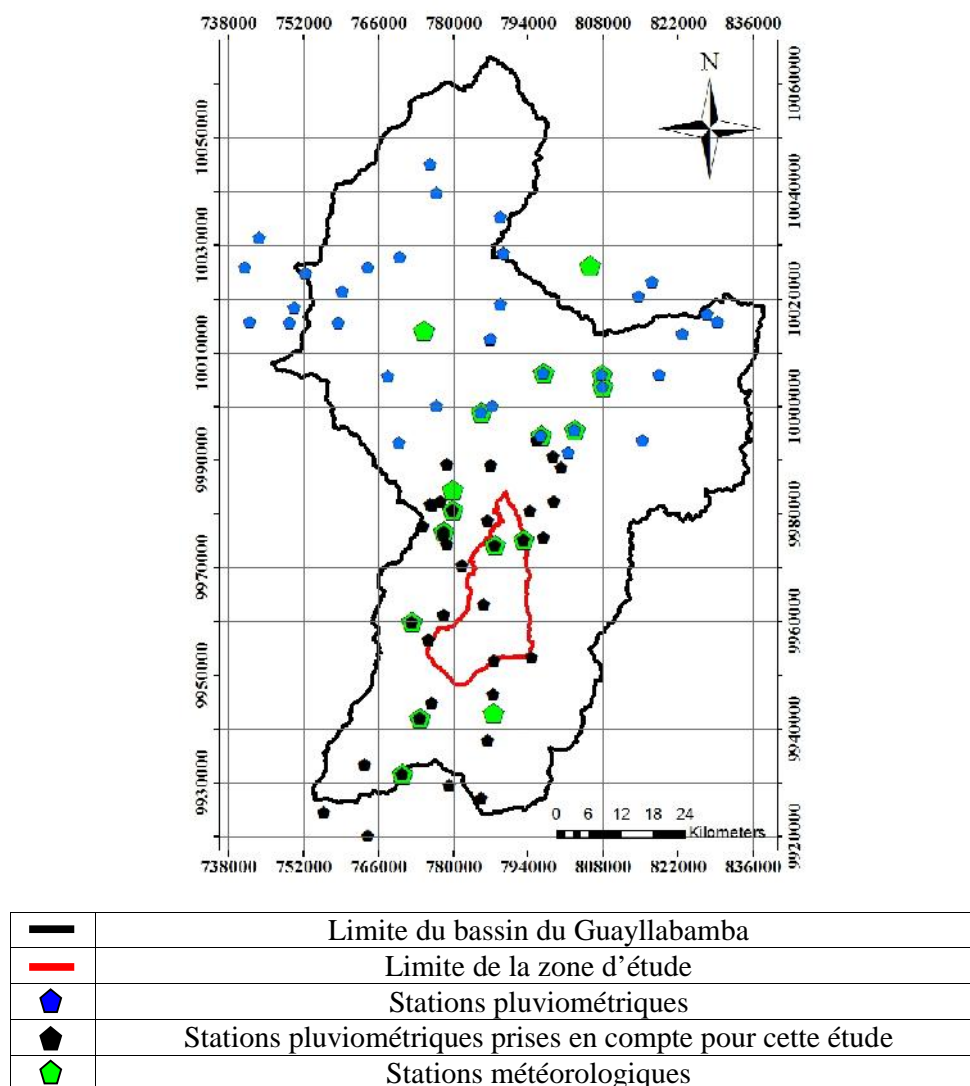


Figure 3.14. L'aquifère Cumbayá - Tumbaco - Los Chillos dans le grand bassin du Guayllabamba. Localisation des stations pluviométriques et météorologiques du projet AguAndes. Les stations avec un point noir au milieu sont utilisées dans la présente étude.

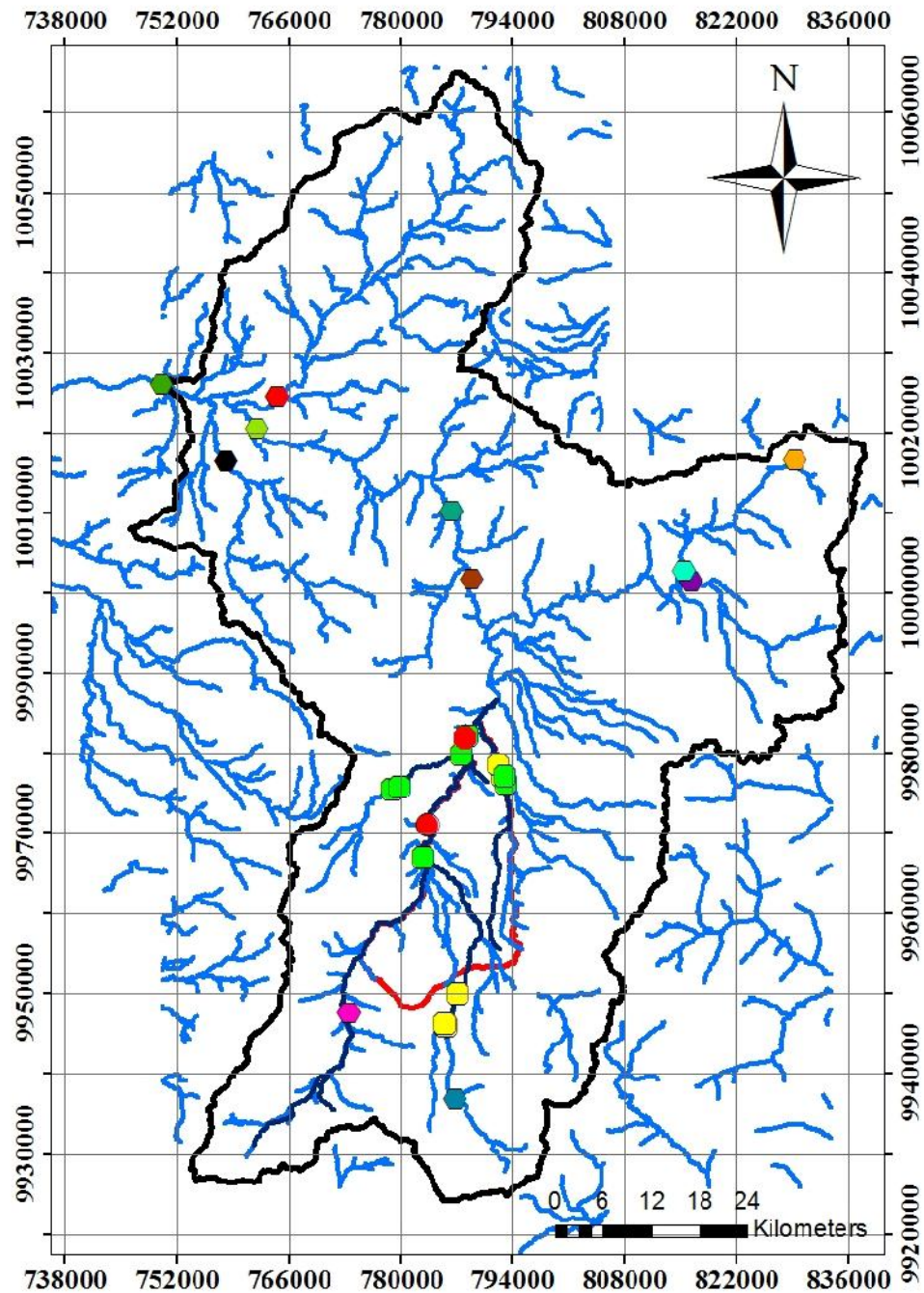
Les données météorologiques utilisées dans le cadre de ce travail proviennent du projet AguAndes (Proaño 2010, Pila 2011, Serrano 2011), ayant pour objectif d'évaluer les ressources en eau dans les Andes. En Equateur, ces recherches se sont centrées sur le bassin du Guayllabamba, dont fait partie l'aquifère Cumbayá – Tumbaco – Los Chillos (Figure 3.14).

Le projet AguAndes a récupéré les données moyennes mensuelles de 87 stations pluviométriques de l'INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) dont 54 stations ont en plus des données de température, humidité relative, nébulosité, vitesse du vent (Figure 3.14). Les chroniques sont parfois très anciennes, mais la majorité commence à partir de 1962. Toutes ces données jusqu'à l'année 2006 ont été traitées, homogénéisées, corrigées dans certains cas par la méthode du vecteur régional (Serrano 2011). Les 47 stations proches de notre zone d'étude, marquées par un point noir sur la carte (Figure 3.14), ont été complétées jusqu'à l'année 2011. Toutes les données météorologiques vont être utilisées dans cette étude pour calculer un bilan hydrique dans le bassin versant de l'aquifère. Tous ces résultats seront détaillés dans le Chapitre 4.4, section 4.4.2.3.

3.8 DONNÉES HYDROLOGIQUES : DESCRIPTION ET CRITIQUE

Dans la zone d'étude il n'y a aucune station hydrométrique. Il est donc pratiquement impossible de déterminer le débit naturel des rivières qui sont aussi perturbés par les aménagements des villes qui jettent leurs eaux d'égout directement et sans aucun traitement dans les « quebradas » et dans les cours d'eau principaux, qui par conséquence sont très contaminés.

Le projet AguaAndes a exploité les données hydrométriques de 10 stations limnigraphiques et 1 station limnimétrique de l'INAMHI dans le grand bassin du Guayllabamba (localisation en Figure 3.15). Leurs noms, codes, coordonnées, altitudes, pourcentages de données manquantes sont détaillés en Annexe 3I. Les lacunes sont très nombreuses, jusqu'à 85%. Cette thèse s'est intéressée aux stations en aval du bassin de l'aquifère, H158 – Pita AJ Salto et H159 – San Pedro Machachi. Elles ont respectivement 37,5% et 6,9% de données manquantes. La station H159 est remarquable pour la qualité de ses données et surtout pour sa chronique relativement complète. La station la plus proche en amont, H148 – Guayllabamba DJ Pisque ne peut pas être prise en compte parce qu'elle a 84% de données manquantes de qualité très douteuse.











	Stations hydrométriques sur le bassin versant du Guayllabamba - INAMHI
	Jaugeages ponctuels faits pour cette étude en 2011
	Jaugeages ponctuels faits par l'EPMAPS sur la zone d'étude
	Stations hydroélectriques
	Limite du bassin versant du Guayllabamba
	Limite de la zone d'étude de l'aquifère Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos
	Rivières
	Rivières principales traversant la zone d'étude

Figure 3.15. Stations hydrométriques du bassin versant de Guayllabamba et sites de jaugeages ponctuels.

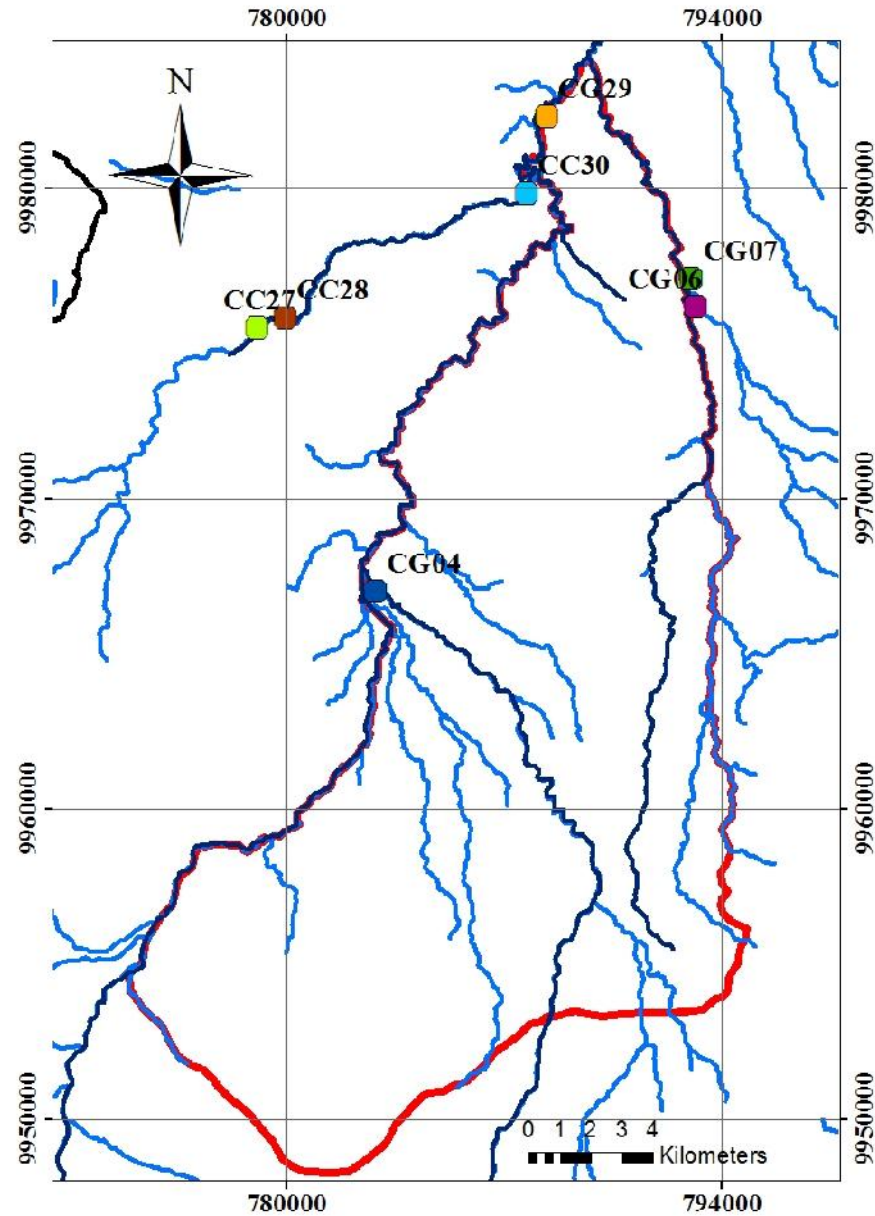
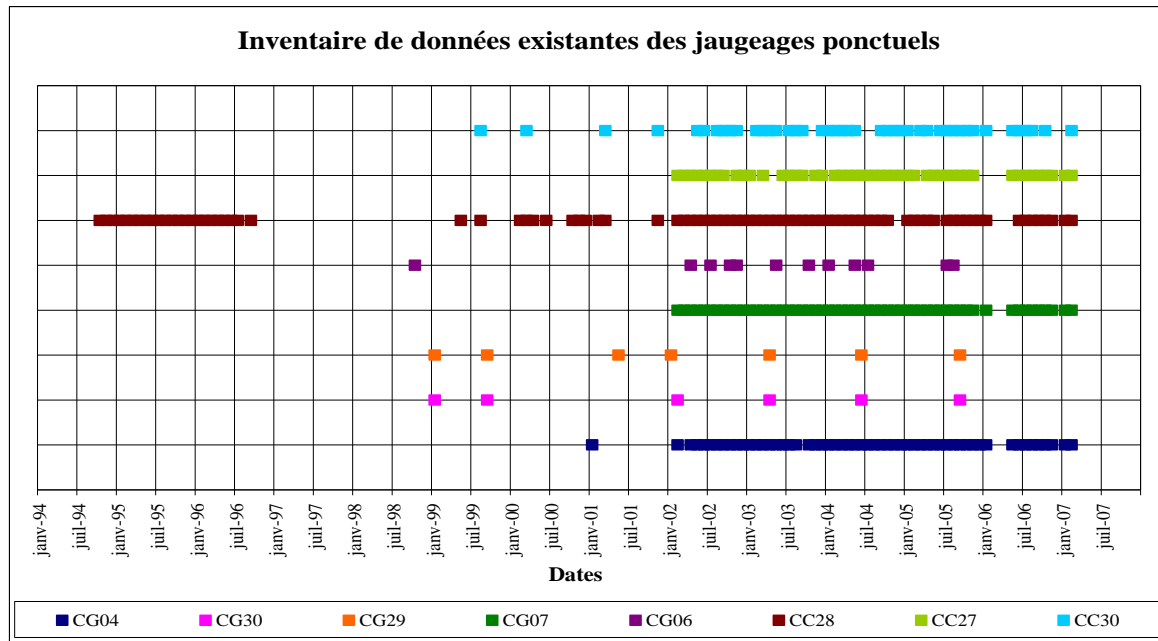


Figure 3.17. Jaugeages ponctuels faits par l'EPMAPS. Les noms de chaque point sont indiqués sur la légende de la Figure 3.18.

On dispose aussi pour cette étude de 10 autres jaugeages ponctuels effectués en juillet – août 2011 sur la rivière Chiche (Figure 3.15 points en noirs), faits par l'EPMAPS afin de mesurer la variation de débit sur des tronçons courts de rivière durant la saison « sèche » pour essayer de quantifier un éventuel apport souterrain. Les autres rivières San Pedro et Machángara n'ont pas pu être jaugeées à cause de l'énorme contamination qui existe dans ces cours d'eau.

Sur la rivière San Pedro, deux centrales hydroélectriques sont gérées par l'Entreprise Electrica Quito (localisation voir Figure 3.15). Nous disposons des mesures de débits à la « Central de Nayón » (point CC30 sur la Figure 3.17) de janvier 1997 à octobre 2009. Ces données sont dites mensuelles sans que l'on sache si ce sont des mesures ponctuelles mensuelles ou des moyennes de mesures à plus haute résolution.

Pour les calculs du bilan hydrique sur la zone d'étude, que nous allons présenter dans le chapitre suivant, nous avons conçu notre modèle de telle façon que les données hydrologiques de surface n'interviennent pas dans les calculs, mais servent à confirmer et valider nos résultats en sachant que toutes les mesures de jaugeages sont effectuées à l'aide d'un moulinet et que l'incertitude sur les résultats est comprise entre 10% et 30%.



■	CG04	San Pedro AJ Pita
■	CG30	San Pedro AJ Machángara
■	CG29	San Pedro DJ Machángara
■	CG07	Chiche
■	CG06	Alcantarilla
■	CC28	Machángara Monjas
■	CC27	Machángara El Trébol
■	CC30	Machángara Trasvase Hidroeléctrique Nayón

Figure 3.18. Jaugeages ponctuels de l'EPMAPS entre 1994 et 2007 (mesures plus fréquentes à partir de 2002).

4. CHAPITRE 4 : INTERPRETATION DES RÉSULTATS

Ce chapitre est divisé en quatre parties : les résultats hydrodynamiques, les résultats chimiques, les résultats isotopiques, et enfin la synthèse de ces éléments aboutissant à un modèle conceptuel du système aquifère.

4.1. ANALYSES DES RÉSULTATS HYDRODYNAMIQUES

Cette partie aborde les caractéristiques hydrodynamiques en utilisant dans un premier temps les essais de pompage et quelques essais Lefranc. Nous analyserons ensuite les variations piézométriques dans le temps et l'espace pour proposer un schéma d'écoulement et étudier la relation entre eaux souterraines et rivières.

Les données lithologiques, les coupes techniques de forages, les sondages électriques verticaux nous ont aidés à discriminer les forages qui captent soit une seule des deux formations Chiche ou Ilaló, soit les deux formations. Dans ce chapitre, nous allons essayer de mettre en évidence les différences de fonctionnement hydrodynamique de ces deux aquifères. Ces informations vont nous permettre de calculer un bilan hydrique approximatif du système, qui sera traité dans la quatrième partie du chapitre 4.

4.1.1 CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES

Les forages captant la Formation Chiche sont différenciés entre ceux de la Vallée de Tumbaco (Chiche nord) et ceux de la Vallée de Los Chillos (Chiche sud) (Tableau 4.1). Les forages au nord ne sont pas en pression à l'exception du forage Santa Rosa C107 (Figure 4.1). Au sud, les forages sont tous en pression au sud-ouest, et parfois en pression au sud-est (2 sur un total de 4 forages) (Figure 4.1). Les forages captant la Formation Ilaló, seule ou en mélange, sont tous en pression (Figure 4.1).

Pour définir les caractéristiques hydrodynamiques, on a interprété les essais de pompage décrits et critiqués dans le chapitre 3, en privilégiant ceux de plus de 24 h (en rouge dans le Tableau 4.1). Les résultats des essais de pompages plus courts ont été utilisés dans un but comparatif. Les transmissivités et coefficients d'emménagement ont été calculés avec les équations 1 et 4 (Tableau 4.1). La perméabilité déduite des transmissivités et de l'épaisseur de la nappe est ensuite comparée avec celle issue des essais Lefranc.

Tableau 4.1. Epaisseur des formations géologiques à partir des données lithologiques, transmissivité, perméabilité et emmagasinement. Pour chaque forage, les niveaux crépinés ont été surlignés.

Code	Aquifère	Forage	Epaisseur Formation (m)			T (m ² /s)	k pompage k Lefranc (m/s)	S	Temps pompage (heures)
			Cangahua	Chiche	Ilaló				
C101	Chiche nord	Las Acacias	43	137		2,7E-03	1,9E-05		4,5
C103	Chiche nord	El Carrizal	46	107		1,3E-03	1,2E-05		5

Chapitre 4 : Interprétations des résultats

Code	Aquifère	Forage	Epaisseur Formation (m)			T (m ² /s)	k pompage k Lefranc (m/s)	S	Temps pompage (heures)
			Cangahua	Chiche	Ilaló				
C104	Chiche nord	MICEI	24	190					
C105	Chiche nord	Patagua	15	143					
C107	Chiche nord	Santa Rosa	52	68		2,6E-03	3,5E-05 1,8E-07	3,9E-7	72
C152	Chiche sud	Alangasí 1	49	55					
C155	Chiche sud	Armenia 1	16	50		4,7E-03	9,4E-05		3
C159	Chiche sud	La Moya 1	18	104		1,2E-03	1,1E-05		4,5
C160	Chiche sud	La Moya 2	18	104					
C161	Chiche sud	La Moya 3	15	91		1,1E-03	1,2E-05		4
C162	Chiche sud	Pintag 1	40	165		6,3E-04	3,8E-06		7,5
C163	Chiche sud	Pintag 2	46	234		5,7E-04	2,4E-06		66
C166	Chiche sud	San Juan de Conocoto	21	119		1,4E-03	1,1E-05		3,5
C167	Chiche sud	Armenia 4	21	79					
C168	Chiche sud	Armenia 2	16	46		1,2E-03	2,5E-05		10
C169	Chiche sud	Ushimana 1	21	59					
C170	Chiche sud	Ushimana 2	27	69		1,2E-03	1,8E-05		20
I101	Ilaló	El Tingo Viejo				7,0E-04			
I102	Ilaló	El Tingo Nuevo	6	46	> 88				
I103	Ilaló	Planta de Tratamiento	37	110	> 51	1,1E-02	2,3E-04		5
I104	Mélange	Rumihuayco 2	34	113	> 21				6
M302	Mélange	El Nacional	3	122	> 61	1,3E-03	1,0E-05		72
M303	Mélange	La Primavera 1	37	73	> 70	6,5E-04	8,9E-06	5,8E-4	408
M303_1	Chiche nord	La Primavera piézomètre	37	65			2E-07		
M305	Mélange	Rumihuayco 1	37	101	> 24				

Même si les essais de pompage ont été parfois très courts, les valeurs de transmissivité de la Formation Chiche sont à peu près uniformes sur toute la zone d'étude : entre $1,3 \times 10^{-3}$ et $3,4 \times 10^{-3}$ m²/s au nord, entre 1×10^{-3} et 7×10^{-4} m²/s au sud (Tableau 4.1). Les pompages plus longs sont supposés plus représentatifs.

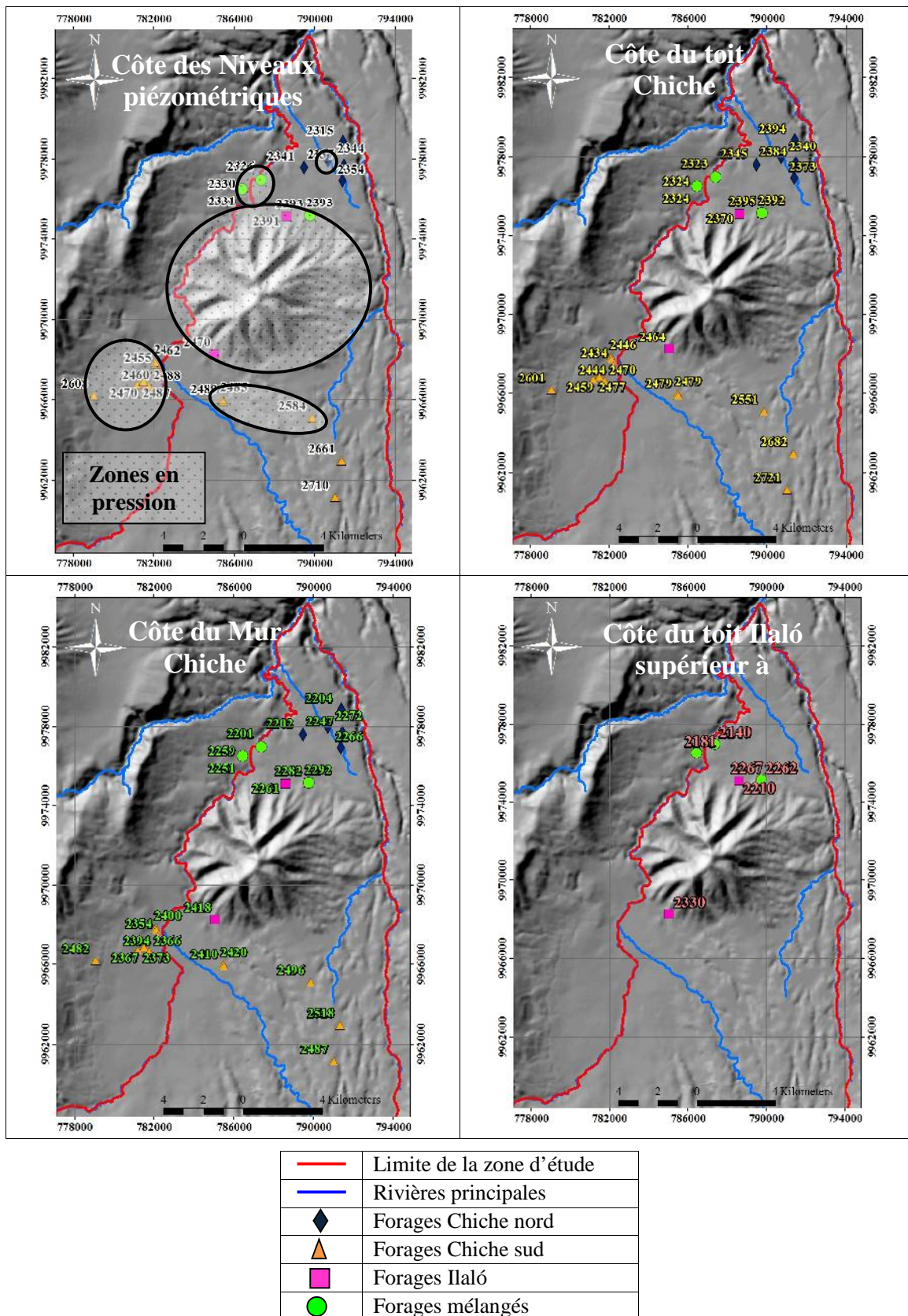


Figure 4.1. Distribution des épaisseurs de formations dans la zone d'étude.

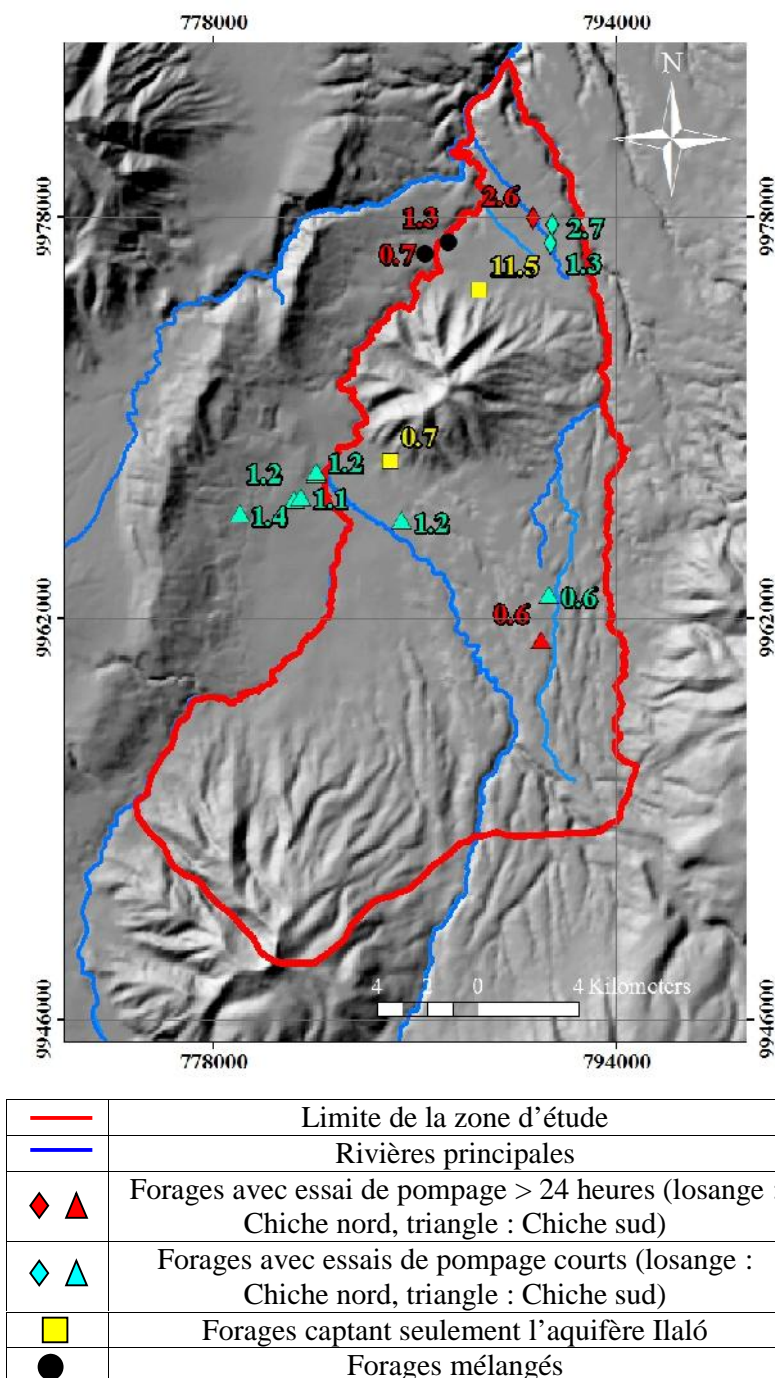


Figure 4.2. Transmissivités (en $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$).

La transmissivité des deux forages captant la formation Ilaló au pied du volcan est de $11 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et $7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, au nord et au sud du volcan respectivement (Figure 4.2).

Les deux forages captant uniquement la Formation Chiche avec des essais de pompage longs (plus de 24 heures) sont Santa Rosa et Pintag 2, on déduit de T une perméabilité à Santa Rosa de $3,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ et à Pintag, de $2,4 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (incertitude théorique de 20%), ce qui correspond, selon la classification de Domenico et Schwartz (1997), à des sables fins pour Santa Rosa et des limons modérément perméables pour Pintag 2. Les autres forages (Tableau 4.1) de la Formation Chiche ont des perméabilités du même ordre de 10^{-5} à 10^{-6} m/s ,

caractéristiques de sables fins et limons qui correspond bien, suivant la description lithologique de la Formation Chiche, à un aquifère modérément perméable (voir Annexe 2C).

La perméabilité tirée des essais de pompage de Santa Rosa (C107) et La Primavera 1 (M303) est très différente de celle issue des deux essais Lefranc réalisés dans les piézomètres près de ces forages. Les débits, les pentes de la tangente à la courbe et les coefficients C calculés avec l'équation 3 pour une cavité cylindrique sont indiqués en Figure 4.3 pour le piézomètre Santa Rosa (à moins de 5 m du forage) et sur la Figure 4.4 pour le piézomètre La Primavera 1 (à 10 m du forage). Pour Santa Rosa la perméabilité est de $1,8 \times 10^{-7}$ m/s ($7,3 \times 10^{-5}$ m/s avec l'essai de pompage) et 2×10^{-7} m/s ($8,9 \times 10^{-6}$ m/s avec l'essai de pompage) pour La Primavera. Ces faibles valeurs sont en dehors de la gamme de validité des formules d'interprétation des essais Lefranc (10^{-6} m/s). Les essais de pompage, bien plus longs (72 h pour Santa Rosa et 408 h pour La Primavera) et donc bien plus représentatifs, mettant en jeu un volume plus important d'aquifère, sont plus fiables que les essais Lefranc pour estimer une perméabilité (Figure 4.5, Figure 4.6).

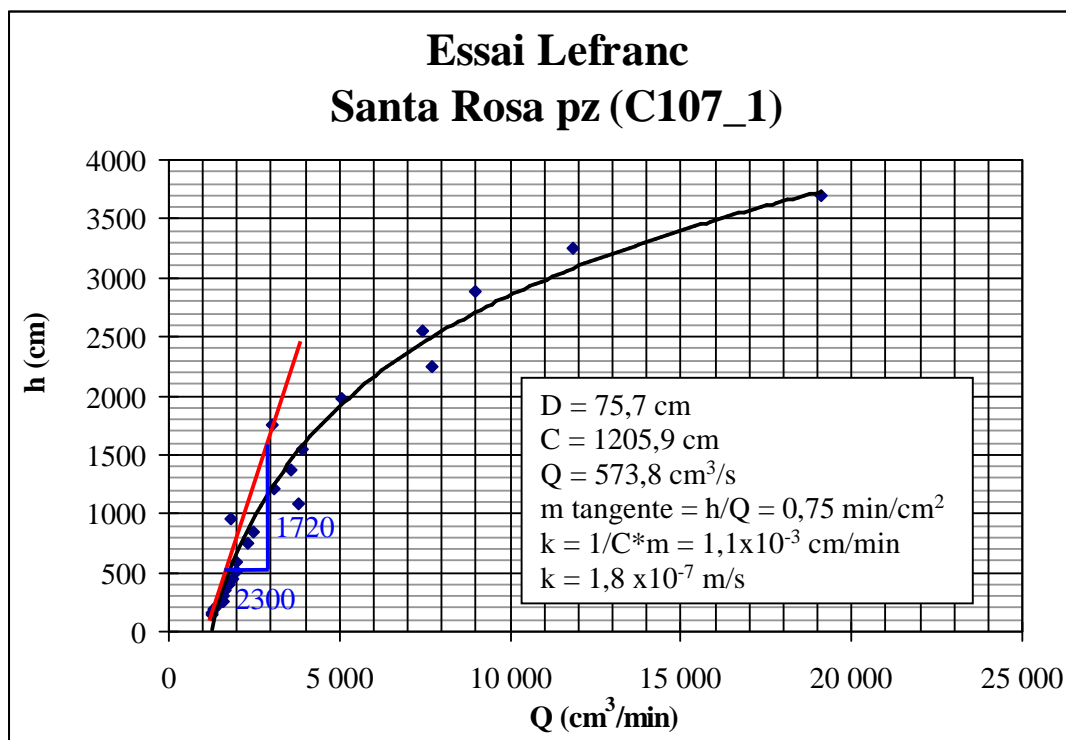


Figure 4.3. Essai Lefranc du forage Santa Rosa.

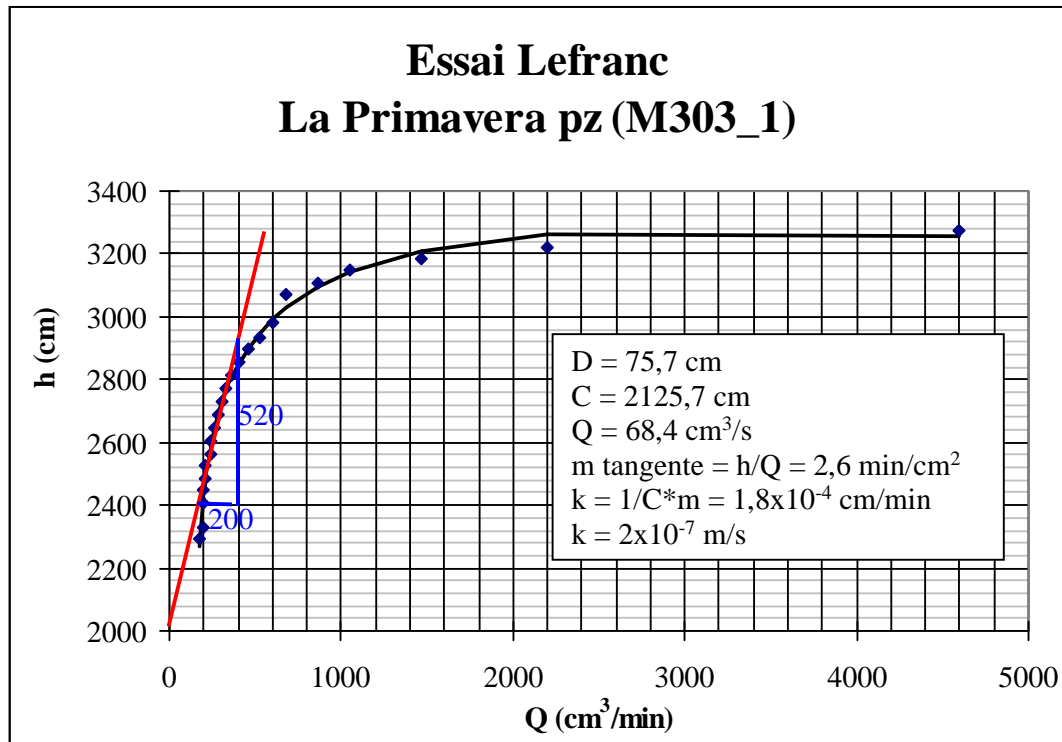


Figure 4.4. Essai Lefranc du forage La Primavera 1.

Il n'existe qu'un forage captant la seule Formation Ilaló (Planta de Tratamiento I103) où l'on connait l'épaisseur captée. La perméabilité (10^{-4} m/s) n'est donc qu'une mesure approximative.

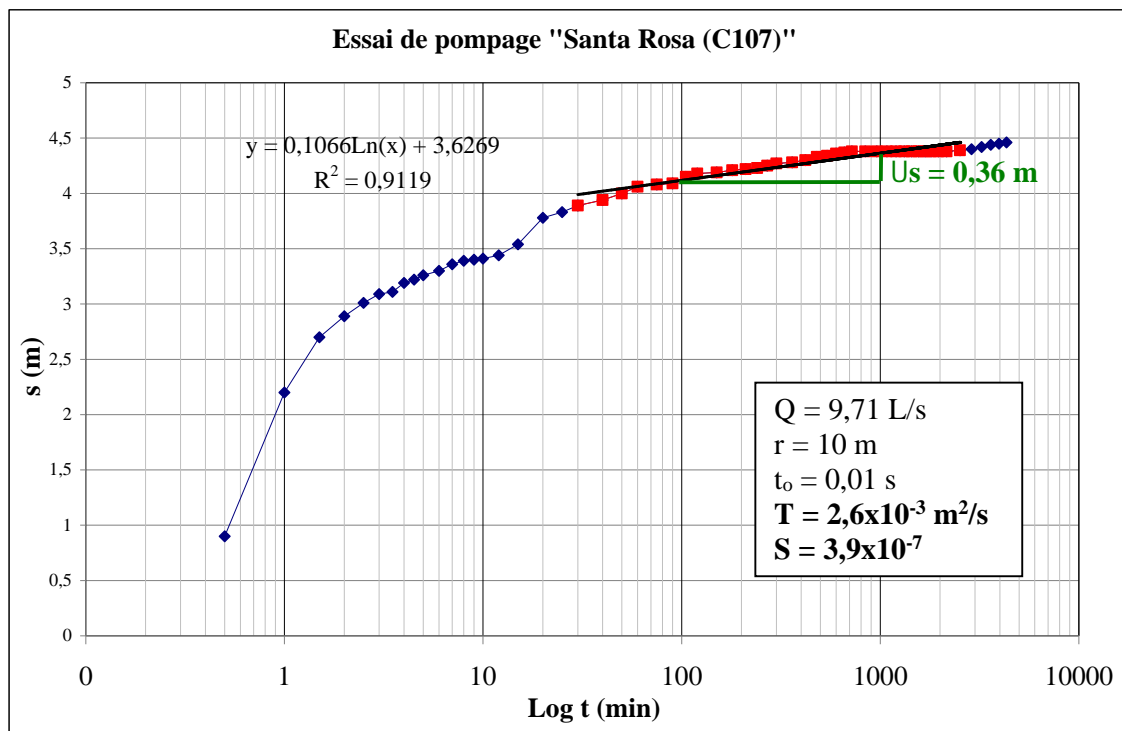


Figure 4.5. Essai de pompage à Santa Rosa.

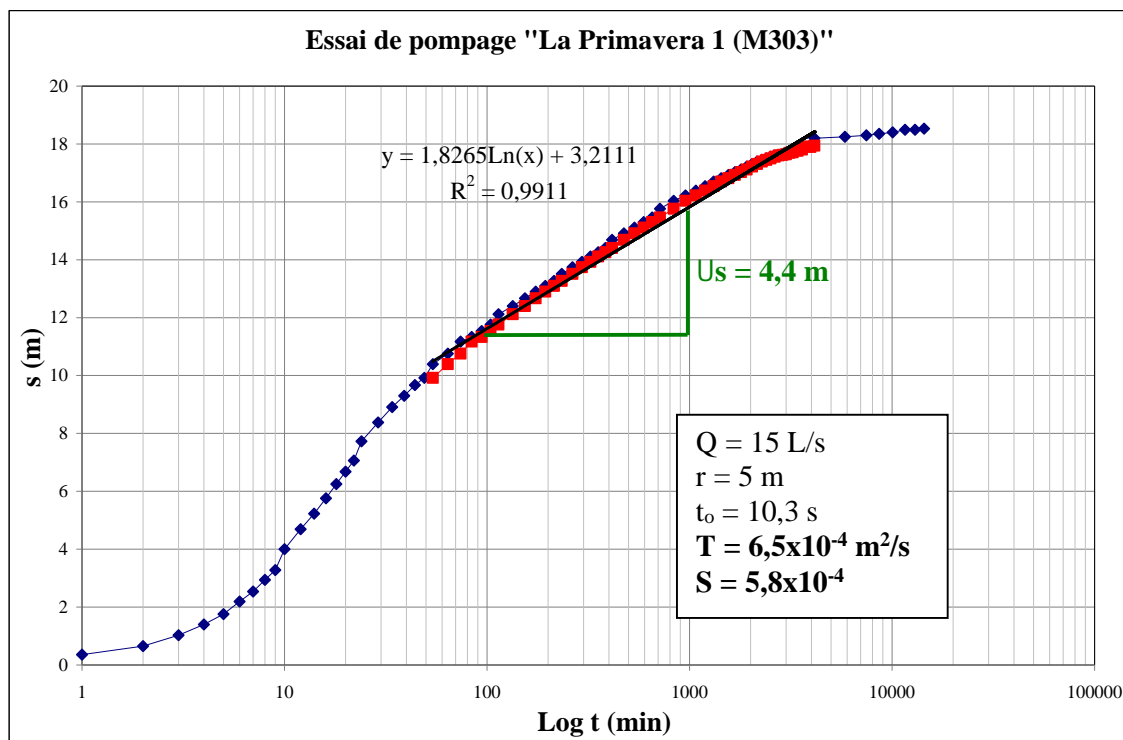


Figure 4.6. Essai de pompage à La Primavera.

Nous avons calculé le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère dans les deux seuls forages équipés de piézomètres (Tableau 4.1) : $5,8 \times 10^{-4}$ à La Primavera (M303, au nord-ouest, un forage mélangé) et $3,9 \times 10^{-7}$ à Santa Rosa (C107, au nord-est, un forage captant uniquement la Formation Chiche). Pour ce dernier, la forme presque horizontale de la courbe (Figure 4.5) pourrait laisser penser à une réalimentation différée, mais la petite rivière coulant à proximité est séparée du toit de la Fm. Chiche par au moins 20 m de Fm. Cangahua supposée imperméable. Le piézomètre et le forage ont des variations à long terme similaires, mais un décalage piézométrique de 2 m (Figure 4.7), ce qui peut faire penser à des profondeurs de crépines différentes (hypothèse non contrôlable par absence d'archive de foration). Cependant, le biais évident rend incertain l'ensemble du calcul. La valeur de S retenue pour l'aquifère Chiche, dans les endroits où la nappe est captive, sera celle du forage La Primavera.

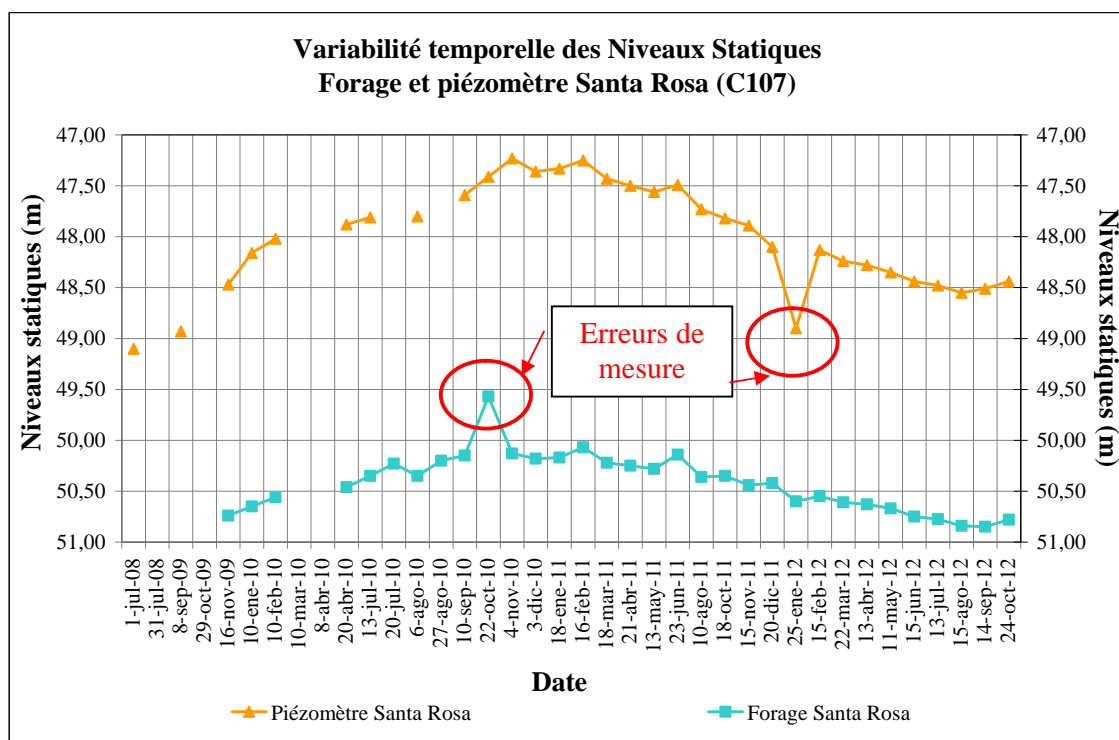


Figure 4.7. Niveaux piézométriques du forage et du piézomètre Santa Rosa.

4.1.2 VARIABILITÉ PIÉZOMÉTRIQUE

4.1.2.1 VARIABILITÉ TEMPORELLE DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES

Ce chapitre interprète les données manuelles mensuelles puis les mesures automatiques des sondes Diver.

4.1.2.1.1 Niveaux piézométriques manuels

Les aquifères Chiche et Ilaló ne sont plus exploités pour la consommation humaine collective depuis 2006 à cause de teneurs élevées en arsenic. La plupart des 10 forages de l'EPMAPS devraient donc fournir un niveau piézométrique statique. Cependant, la sonde Diver du forage Patagua (C105), au centre-ville de Tumbaco, a montré des perturbations chaque semaine en relation avec des pompages proches entre septembre 2009 et octobre 2012. Il y a donc encore exploitation pour d'autres usages que l'AEP. La Primavera, forage situé en dehors de la ville, est également perturbé par des pompages, probablement dus à des activités domestiques intermittentes (arrosage de jardin, remplissages de piscines...), voire industrielles.

Pour déterminer la variabilité piézométrique générale de l'aquifère Chiche, traitées et critiquées dans le chapitre 3, nous avons comparé la différence de niveaux piézométrique d'un mois à l'autre avec un total de 252 mesures sur 8 forages du côté nord entre septembre 2009 et octobre 2012, et 2 forages du côté sud avec 36 mesures faites entre février 2011 et octobre 2012. Le nombre de mesures par forage est indiqué sur le Tableau 4.2. Ces variations relatives

mensuelles sont très faibles, de façon générale, dans tous les forages avec un maximum de 80 cm (Tableau 4.2).

Au sud, un seul forage, Lasallinos (C158), a subi une chute surprenante de 4,20 m en octobre 2011. Une variation aussi brusque et unique pourrait résulter d'un pompage à proximité. Néanmoins, la récupération a été très lente et les niveaux de ce forage ont continué à être plus bas que ceux des 6 mois précédents (Figure 4.8). Cette observation a été confirmée avec la sonde automatique et on discutera ses variations dans la suite du texte (voir section 4.1.2.1.2).

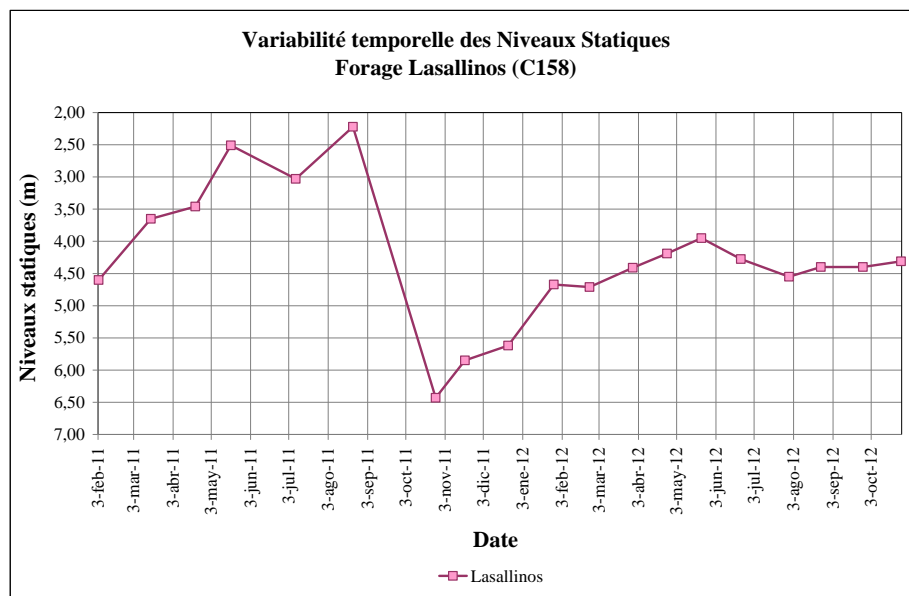


Figure 4.8. Variation piézométrique du forage Lasallinos entre février 2011 et octobre 2012 (18 mesures).

Tableau 4.2. Variations piézométriques en m pour Chiche nord (septembre 2009 – octobre 2012) et Chiche sud (février 2011 – octobre 2012). Les valeurs positives représentent des remontées de niveau et les valeurs négatives des baisses de niveau. En rouge les forages équipés avec une sonde Diver.

Code	Aquifère	Nom	Max	Min	Moy	n
C102	Chiche nord	Cementerio	0,19	-0,21	0,01	28
C103	Chiche nord	Carrizal	0,78	-0,16	0,03	28
C104	Chiche nord	La Esperanza MICEI	0,34	-0,70	-0,02	31
C105	Chiche nord	Patagua	0,19	-0,22	0,00	29
C106	Chiche nord	San Patricio	0,63	-0,33	0,03	28
C107	Chiche nord	Santa Rosa	0,58	-0,56	0,00	30
C107_1	Chiche nord	Santa Rosa-Pz	0,77	-0,80	-0,01	26
C158	Chiche sud	Lasallinos	0,95	-4,21	0,02	18
C164	Chiche sud	San Germán	0,65	-0,89	-0,05	18
I103	Ilaló	Planta de Tratamiento	0,11	-0,07	0,02	32
I104	Ilaló	Rumihuayco 2	0,19	-0,30	-0,01	28
M303_1	Chiche nord	Primavera 1-Pz	0,31	-0,17	0,00	22
M303_2	Chiche nord	Primavera 1A	0,25	-0,31	0,00	24
M305	Mélange	Rumihuayco 1	0,35	-0,35	0,01	28

Les variations piézométriques des 10 forages de l'aquifère Chiche, observées entre septembre 2009 et octobre 2012, dans les endroits où il est libre (Figure 4.1), ont été comparées avec les hauteurs de pluie afin de rechercher une éventuelle influence des précipitations sur la variabilité piézométrique à l'échelle de la saison. Les données de pluie utilisées proviennent des stations Pr1, Pr2, Pr3 (voir Figure 3.13, chapitre 3) localisées sur la zone d'étude ; des lacunes sur les quatre stations concernent les mois de mars 2010, août à novembre 2010, décembre 2010 (entre 20% et 30% de lacunes).

L'aquifère Chiche nord, où il n'est pas en pression, ne montre pas de corrélation entre variations piézométriques et pluie (exemple sur la Figure 4.9). Certaines remontées brusques sont uniques mais semblent déconnectées des précipitations ; il pourrait s'agir d'erreurs de mesure. D'autres forages présentent plusieurs remontées comme San Patricio C106, qui a deux pics, l'un en décembre 2011 et l'autre en avril 2012 (voir Annexe 4A). D'autres forages présentent une seule remontée avec une élévation du niveau piézométrique de 0,80 m au cours de la période des mesures (El Carrizal C103, Figure 4.9 en octobre 2011). La chronique des données de San Patricio C106 est encore insuffisante pour permettre d'expliquer ce phénomène, d'autant plus qu'il n'y a pas d'autres mesures à proximité. Par contre, l'élévation du niveau piézométrique du forage El Carrizal C103 ne s'explique pas par des erreurs de mesures et elle est très localisée. Les variations que l'on observe dans les forages sont dues à des perturbations par des pompages proches, hypothèse que nous avons confirmé par les résultats issus de la sonde Diver, ceci sera développé plus avant dans la suite du texte (voir section 4.1.2.1.2). Les courbes de variation piézométrique en fonction du temps sont montrées sur l'Annexe 4A.

Au sud de l'aquifère Chiche où l'on dispose de données mensuelles des variations piézométriques, l'aquifère est en pression. Les deux forages du sud-ouest (Lasallinos de la Figure 4.10 et San Germán en Annexe 4A) ne réagissent pas au signal pluviométrique évidemment. Cependant on observe des variations importantes de 4 m à Lasallinos que nous allons discuter par la suite à l'aide des mesures de la sonde automatique, nous allons montrer que ces variations sont le résultat d'un pompage à proximité.

L'absence de lien entre variation piézométrique et pluie ne démontre ni invalide l'hypothèse de l'imperméabilité de la Cangahua. Si cette formation en surface n'est pas si imperméable que la texture en grand semble montrer, il est probable que le passage de l'eau à travers la Cangahua de toute façon soit très lente, avec comme conséquence un signal piézométrique temporel très tamponné comme nous l'avons observé.

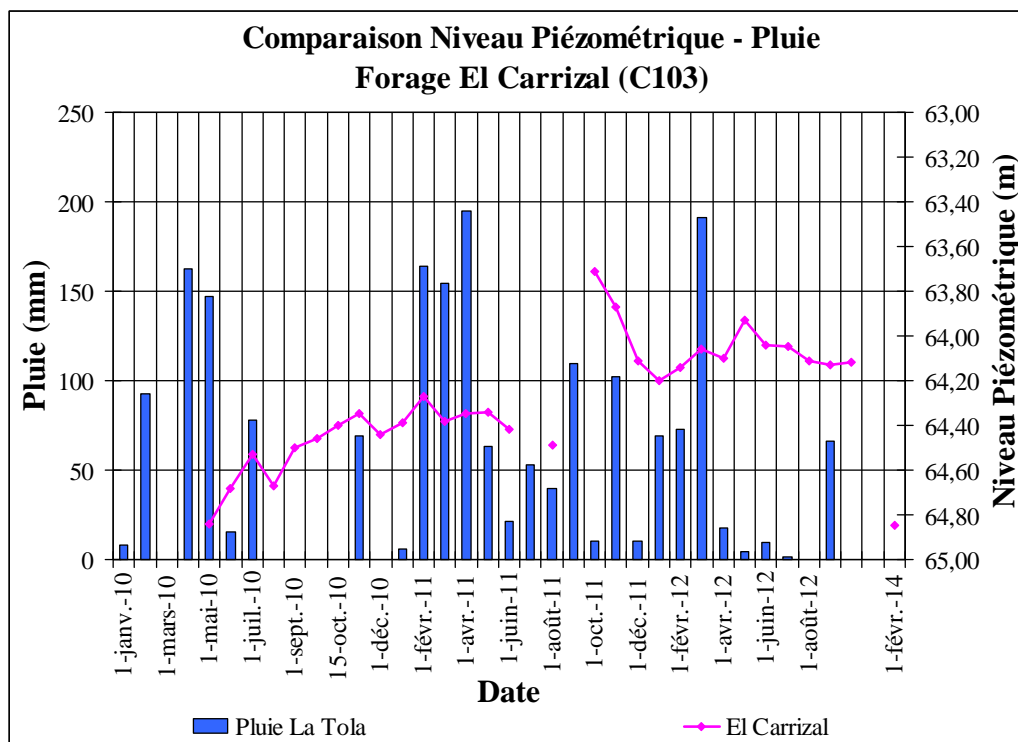


Figure 4.9. Niveaux piézométriques à El Carrizal (NE de la zone d'étude) et pluie à la station La Tola (janvier 2010 - février 2014).

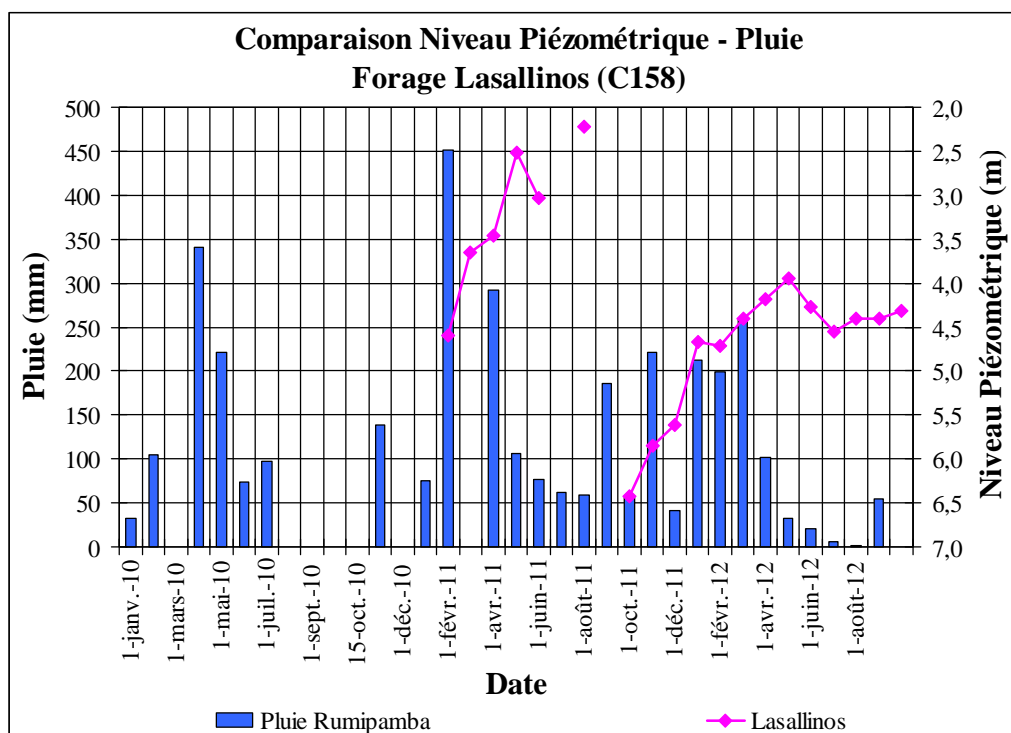


Figure 4.10. Niveaux piézométriques du forage Lasallinos (SO de la zone d'étude) et pluie à la station de Rumipamba (2010 - 2012).

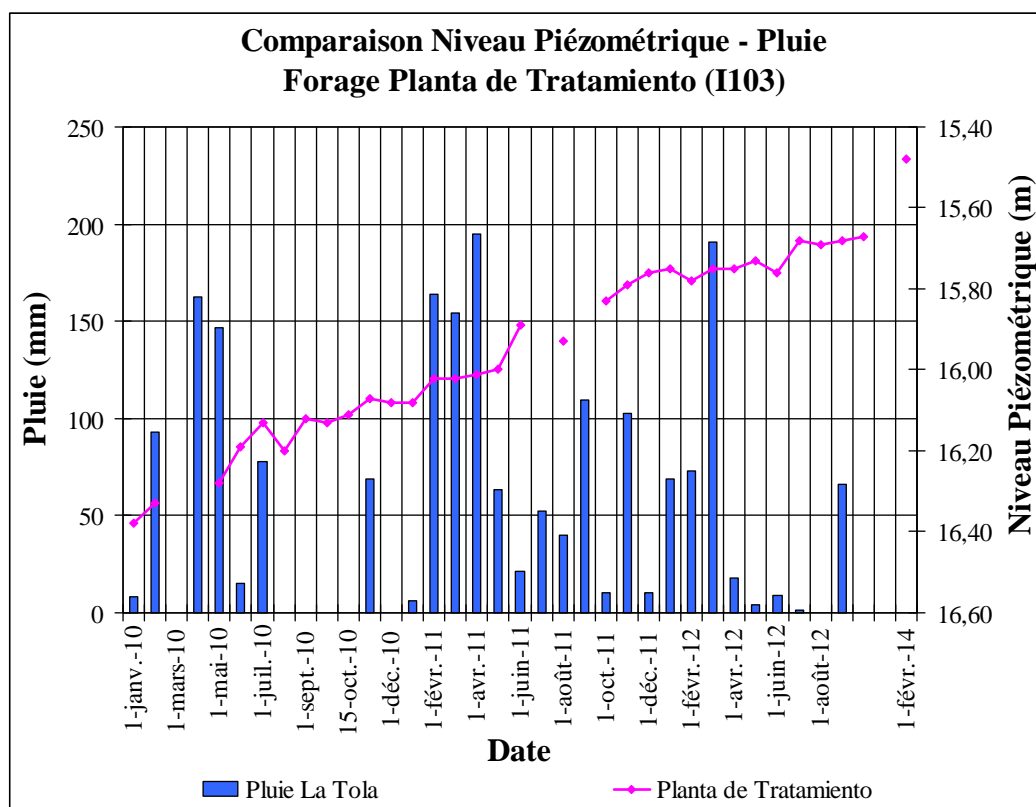


Figure 4.11. Niveaux piézométrique du forage Planta de Tratamiento (pied du volcan Ilaló) et pluie de la station de La Tola (janvier 2010 – février 2014).

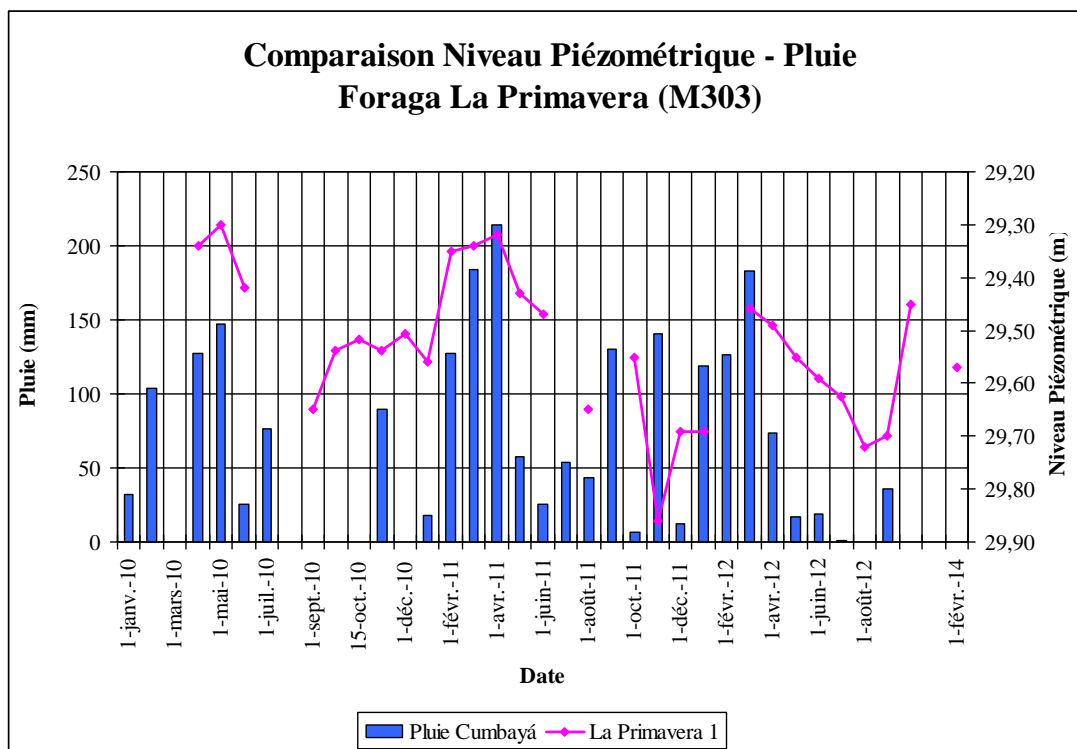


Figure 4.12. Niveaux piézométrique du forage mélangé La Primavera (NO de la zone d'étude) et pluie de la station de Cumbayá – Río Pita (janvier 2010 – février 2014).

Les niveaux piézométriques des forages situés au pied du volcan Ilaló ne montrent aucun lien avec la pluie (voir Annexe 4A). Cependant, on a observé un phénomène particulier, le forage Planta de Tratamiento (Figure 4.11), qui capte uniquement l'aquifère Ilaló (captif), est le seul forage qui a un niveau piézométrique en hausse continue, et qui ne montre pas une accentuation en période pluvieuse.

La hausse graduelle de niveau du forage Planta de Tratamiento pourrait être mise en relation avec l'arrêt des pompages AEP sur la zone à partir de 2006. Pour tester cette idée, nous retenons un débit d'exploitation de 52 L/s (information d'un rapport EPMAPS), permanent de septembre 1998 (quand le forage a été construit) à septembre 2006 (arrêt des pompages AEP dans la zone). Ensuite, nous faisons l'hypothèse que ce forage n'a pas été perturbé par d'autres pompages puisque la Fm. Chiche, située au-dessus et épaisse de 110 m, sera exploitée préférentiellement par les forages les plus proches. A partir de la formule de Jacob (équation 1 voir chapitre 3, section 3.2.3), avec r le rayon du forage (0,15 m), une transmissivité issue des essais de pompage de 0,011 m²/s et un coefficient d'emménagement pris arbitrairement à 1×10^{-4} , nous obtenons un rabattement de 10,5 m en 8 ans (Tableau 4.3).

$$s = \frac{2,30 \cdot Q}{4\pi \cdot T} \log \left(\frac{2,25 \cdot T \cdot t}{r^2 \cdot S} \right) \quad (4)$$

Tableau 4.3. Rabattement en fonction du temps

	1 jour	1 mois	1 an	2 ans	8 ans
t (s)	86400	2628000	31536000	63072000	252288000
s (m)	7,60	8,85	9,76	10,02	10,52

Deux ans après l'arrêt du pompage, ne resterait plus qu'un résidu d'environ 0,5 m. Or ce forage a monté de 0,30 m par an de 2009 jusqu'à 2014 (Figure 4.11). Les pompages AEP et leur arrêt n'expliquent donc pas cette hausse continue. Une recharge locale ne semble pas non plus une cause possible (cf. les données des isotopes radioactifs du chapitre 4.3 et le temps de résidence de l'eau ainsi calculé). En l'état actuel de nos recherches, ce phénomène ne peut pas être expliqué.

Pour les forages qui captent les deux formations Chiche et Ilaló, les variations piézométriques ne présentent pas de relation avec la précipitation parce qu'ils sont en conditions de pression (Figure 4.12). Les variations ne sont pas régulières, ni synchrones entre ces forages, et elles sont difficiles à interpréter (voir aussi Annexe 4A forages Rumihuayco 1 et 2). Cependant, au forage La Primavera (M303) une sonde Diver montre que ce point est soumis à des perturbations par des pompages à proximité ce qui pourrait expliquer ces variations irrégulières.

4.1.2.1.2 Niveaux piézométriques des enregistreurs automatiques

Ces mesures ont été faites dans 6 forages à l'aide d'une sonde Diver, 4 dans la partie nord et 2 dans la partie sud, avec une mesure horaire. Ces données sont confrontées aux mesures manuelles. Finalement, toutes les sondes Divers ont confirmé nos hypothèses que les forages sont soumis à des perturbations par des pompages à proximité.

Le forage La Primavera (M303) présente le moins de perturbations, et il a une récupération totale du niveau. Les 5 autres forages, Patagua, La Esperanza-MICEI, El Carrizal

au Chiche nord et San Germán et Lasallinos au Chiche sud, ont montré que l'aquifère est exploité de manière continue et comme conséquence ne sont pas en mesure de retrouver leur point d'équilibre piézométrique (voir Annexe 4B).

Quand les sondes ont enregistré plus des 10 baisses de niveau produites par les pompages, les données ont été analysées et interprétées à partir de l'équation 1 (formule de Jacob) avec l'hypothèse d'un pompage à débit constant, e.g. $Q = 10 \text{ l/s}$, et un coefficient d'emménagement de $S = 1 \times 10^{-4}$ pour le forage comme La Primavera (exemple Figure 4.14) et de $S = 1 \times 10^{-2}$ pour le reste des forages en conditions d'aquifère libre. Les forages El Carrizal, MICEI et Patagua sont des forages en aquifère libre ; la formule de Jacob est utilisée pour des temps suffisamment importants. Les calculs ici présentés sont purement hypothétiques et ont pour objectif de nous aider à reconnaître le comportement de l'aquifère dans les forages en cas d'un pompage ou de rejeter l'hypothèse de pompage. Dans le cas où on dispose de données de transmissivité (cas de La Primavera et El Carrizal), on a calculé le débit pompé (Q) et la distance entre le forage pompé et la pompe (r). Si l'on ne dispose pas de T (cas des forages MICEI, Patagua, San Germán et Lasallinos), la transmissivité a été calculée avec une valeur de débit imposée.

Quand les points de pompages enregistrés pour la sonde Diver sont rares (moins de 10 points) mais que la remontée de niveau, plus lente et donc avec plus de points, peut être traité plus finement (Figure 4.15 et Figure 4.16) on a utilisé la formule de Theis (équation 2) :

$$s' = \frac{2,30 \cdot Q}{4f \cdot T} \left(\log \frac{4 \cdot T \cdot (t + t')}{r^2 \cdot S} - \log \frac{4 \cdot T \cdot t'}{r^2 \cdot S} \right) \Rightarrow s' = \frac{2,30 \cdot Q}{4f \cdot T} \left(\log \frac{(t + t')}{t} \right) \forall r = cte. \quad (5)$$

avec :

s' rabattement résiduel (m)

r distance du forage pompé au piézomètre (m)

T transmissivité (m^2/s)

S coefficient d'emménagement pendant le pompage

t' temps écoulé après l'arrêt de pompage (s)

t temps écoulé depuis le début du pompage (s)

Q débit pompé = débit de recharge (m^3/s)

Cette équation nous a permis, d'une part, de vérifier si les données s'alignent sur une droite et valider ainsi l'hypothèse d'un pompage perturbateur, et d'autre part, de calculer la transmissivité ou le débit de la pompe. Les résultats obtenus pour chaque forage sont dans le Tableau 4.4 et les détails de chaque forage sont en Annexe 4B.

Tableau 4.4. Paramètres calculés à partir de données de sondes automatiques traités comme des pompages à proximité de forages

ID	Chiche	Forage	Perturbations analysées	T (m^2/s)	S	Q (L/s)	r (m)
M303	Nord	La Primavera	2	$6,5 \times 10^{-4}$	6×10^{-4}	6,5	40
C105	Nord	Patagua	2	$1,5 \times 10^{-3}$	1×10^{-4}	2	330
C104	Nord	La Esperanza - MICEI	2	$2,5 \times 10^{-3}$	1×10^{-4}	3	270-410
C103	Nord	El Carrizal	1	$1,3 \times 10^{-3}$	1×10^{-4}	21,5	-
C164	Sud	San Germán	2	$2,5 \times 10^{-3}$	1×10^{-4}	4	550
C158	Sud	Lasallinos	4	$2,5 \times 10^{-3}$	1×10^{-4}	1-5	500-900

4.1.2.1.2.1 Observations particulières sur chaque forage

- Le forage La Primavera est localisé dans une zone urbanisée avec de grandes maisons qui utilisent probablement l'aquifère pour un usage domestique (jardinage, remplissage de piscines...). Dans ce forage, la variation piézométrique enregistrée par le Diver est cohérente avec celle observée sur les mesures manuelles, présentant une faible variabilité d'une mesure à l'autre, au pas d'une heure, sur toute la chronique, jusqu'à 0,18 m (hors période avec pompage, Figure 4.13 et Figure 4.14). On peut tester différentes valeurs de débits de pompage à différentes distances théoriques du forage (Tableau 4.5) avec la transmissivité issue des essais de pompage. Ainsi un débit de 40 L/s pompé pendant 4 heures, à 32 m de distance est cohérent avec les variations piézométriques observées.

Tableau 4.5. Rayon d'influence du pompage à La Primavera à différents débits de pompe.

Q (L/s)	r (m)
5	11
10	16
20	22
40	32
50	35
70	40
100	50

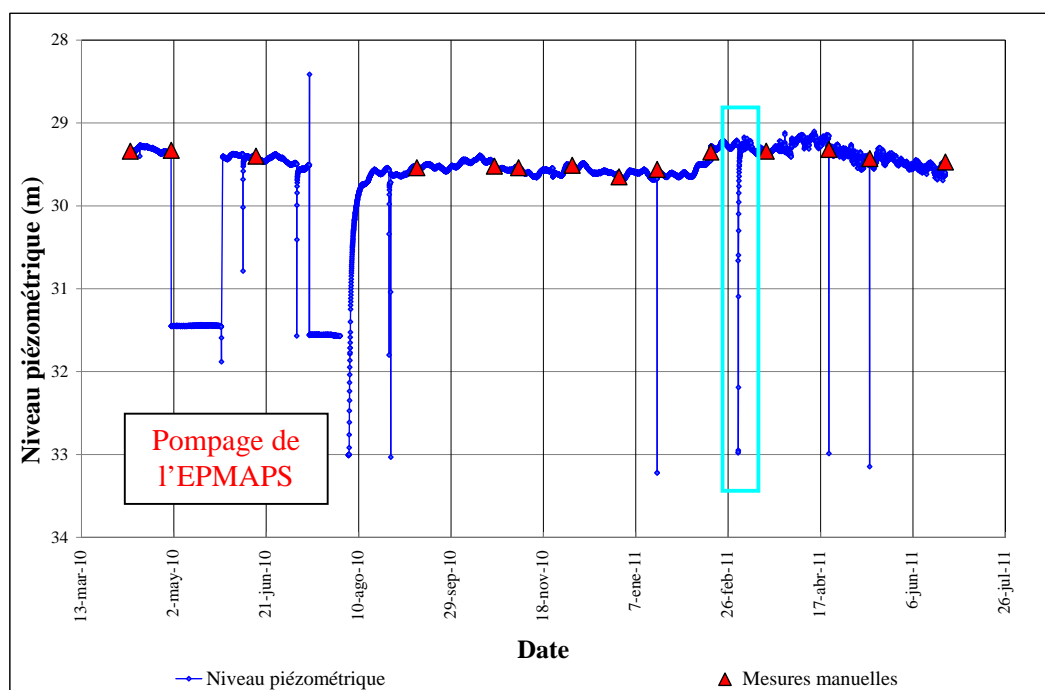


Figure 4.13. Mesure des niveaux par sonde Diver dans le forage "La Primavera 1 M303" (1 heure) entre le 8 avril 2010 et le 23 juin 2011. La courbe en bleu représente les données corrigées comparées aux données des mesures manuelles (triangles rouges).

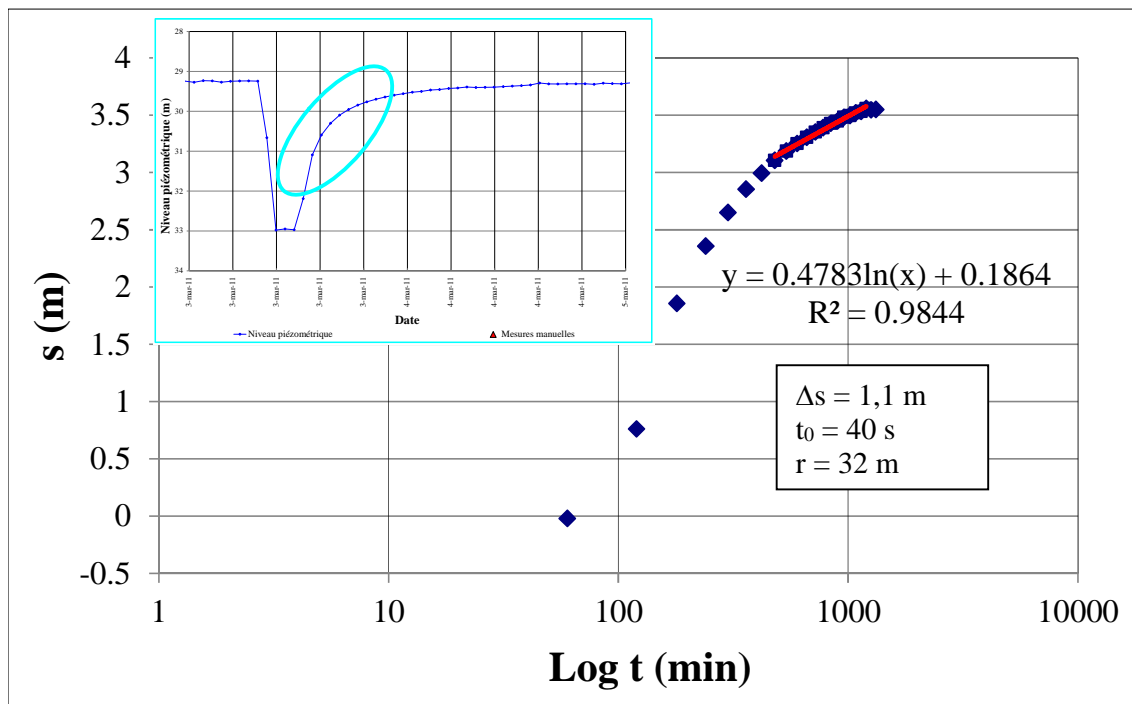


Figure 4.14. Zoom du pompage du 3 mars 2011 (bleu) au forage La Primavera.

- Le même type de calcul appliqué au forage Patagua peut être conforté sur le terrain : une serre à environ 300 m exploitant probablement l'aquifère suffirait à perturber le niveau du forage. La sonde Diver a permis de constater que le niveau piézométrique de ce forage est très perturbé. La différence entre le niveau le plus haut enregistré sur la période de mesure, et le niveau le plus bas est de 0,50 m. Tandis que les fluctuations de niveau entre pompage ne dépassent pas les 5 cm.
- Dans le forage La Esperanza – MICEI, les variations piézométriques enregistrées par la sonde peuvent atteindre jusqu'à 0,80 m et ne sont pas cohérentes avec les mesures manuelles. Nous avons évoqué deux hypothèses probables dans le chapitre 3 (section 3.2.2) pour expliquer le comportement de cette sonde Diver et rejeté la possibilité que toutes les mesures manuelles soient incorrectes.

La sonde présente des baisses de niveaux rapides et des remontées très lentes (Annexe 4B). L'hypothèse d'un mauvais fonctionnement de la sonde est rejetée puisque, après le nettoyage du forage par l'EPMAPS en décembre 2010, les mesures manuelles coïncident avec le signal de la sonde automatique. L'hypothèse d'un pompage à proximité est probable puisque MICEI est localisé dans une zone urbaine et industrielle.

- El Carrizal a montré des fluctuations de niveaux relativement faibles de 0,09 m, sur un temps de 6 heures, d'une mesure à l'autre et sur toute la chronique. Sa hausse lente entre avril et mai 2012 est de 0,20 m. En supposant que cette remontée est le signe d'une récupération de niveau après un pompage, les niveaux piézométriques anciens moins profonds que les actuels (voir chapitre 3, section 3.2.2) ont été utilisés pour faire ces calculs de remontée de niveau. Ils ont donné des résultats cohérents, facilement obtenus avec la formule de Theis (Figure 4.16 et Annexe 4B). Ces analyses démontrent que le forage El Carrizal est soumis actuellement à un pompage intensif qui ne permet pas de remontée au même niveau qu'il avait avant nos mesures (avant 2009).

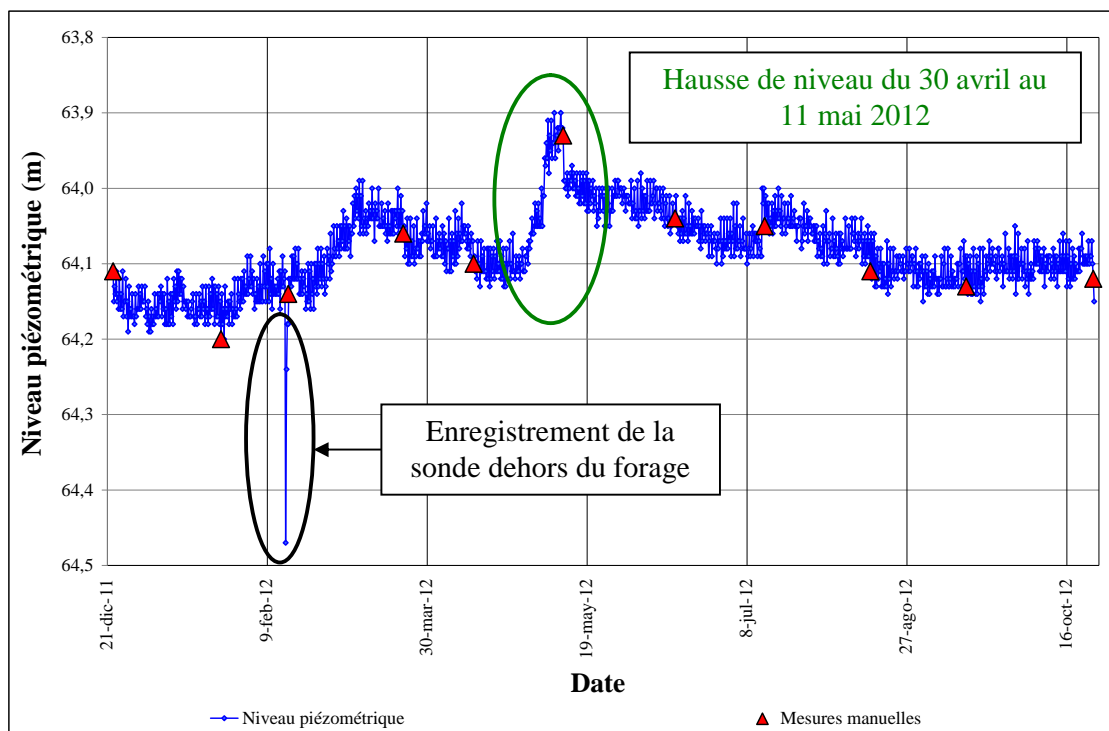


Figure 4.15. Mesure des niveaux par sonde Diver dans le forage "El Carrizal" du 22 décembre 2011 au 24 octobre 2012 (installation EPMAPS). Les courbes bleues sont les données corrigées par comparaison avec les mesures manuelles (triangles rouges).

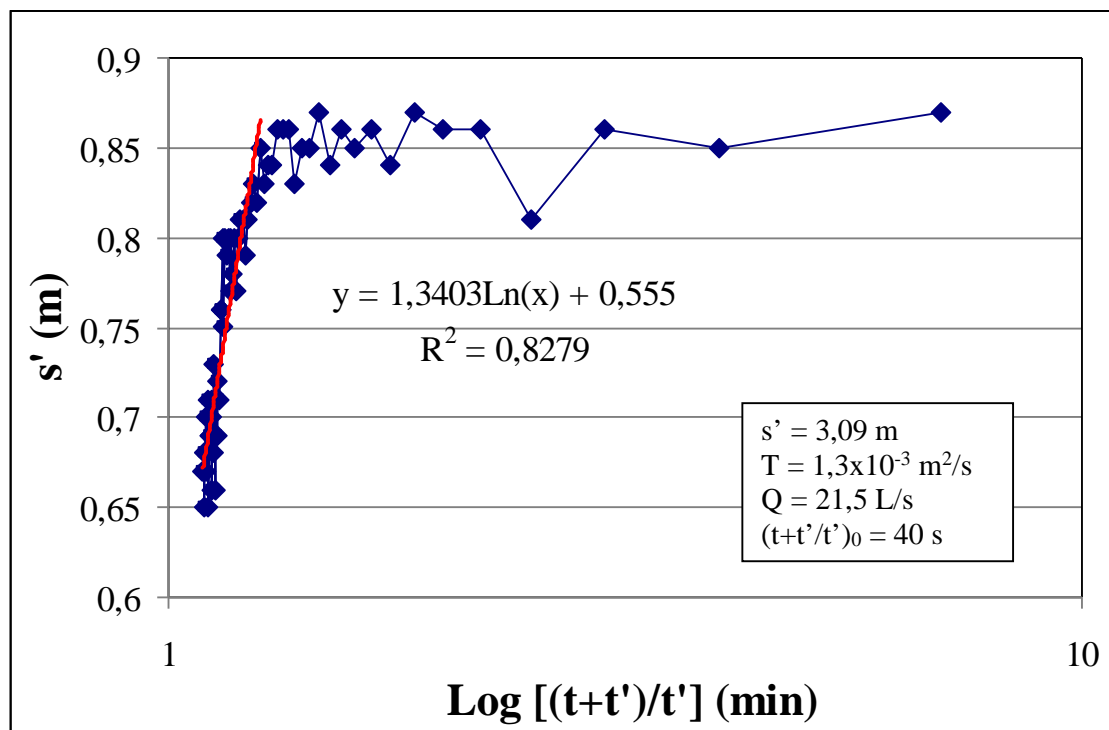


Figure 4.16. Remontée de niveau au forage El Carrizal entre avril 2012 et mai 2012.

- Le forage San Germán a montré une baisse de niveau de 2 m. Il est situé dans la ville de Conocoto (au sud de la zone d'étude), dans une zone très urbanisée avec des industries à proximité. La tendance à la baisse du niveau de ce forage serait la conséquence d'un pompage intensif dans la région, selon les calculs, situé à une distance de 550 m du forage.
- Les données du forage Lasallinos ont montré des variations importantes de niveaux de près de 1 m, qui n'ont pas été observées avec la même intensité et à la même période dans le forage San Germán, situé à 1,3 Km de distance (voir Annexe 4B). Les hausses de niveaux ne correspondent pas non plus à des périodes de précipitation. Ce forage est en pression (niveau piézométrique 3,80 m, au-dessus du toit de la Fm. Chiche situé à 50 m de profondeur). Comme le précédent, San Germán, il se trouve dans un centre urbanisé avec de fortes possibilités de subir un pompage intensif perturbateur.

4.1.2.1.3 Variation temporelle du débit des sources

Les débits de sept sources ont été mesurés de février 2011 à septembre 2012 au pas de temps mensuel (cf. chapitre 3).

Las Chirimoyas 1 (C201), en août 2011, mois le plus sec, montre une baisse de débit qui s'est maintenue jusqu'à mars 2012, début de la saison pluvieuse. A Las Chirimoyas 2 (C202), qui se trouve à 100 m de distance et à la même altitude, les débits sont quasiment constants pendant l'année de mesure. Las Chirimoyas 1 est une source captée dont la sortie est tubée en deux parties, les débits de ces deux branches étant appelés Chirimoyas 1A et 1B. Les données de Las Chirimoyas 1A, 1B et 2 (Figure 4.17) sont très peu précises (incertitudes entre 50% et 100% du fait du protocole de mesure, voir Tableau 4.6 et chapitre 3). Ces sources ne réagissent pas aux précipitations les plus fortes en avril ou septembre 2011 (Figure 4.17). La baisse de débit à Las Chirimoyas 1 en août 2011 et janvier 2012 coïncident avec les incertitudes les plus importantes (100%). Du fait des importantes incertitudes et de la chronique courte dont on dispose, l'importance de la variabilité saisonnière de ces sources doit être confirmée dans des études futures, avant d'interpréter ces résultats.

Tableau 4.6. Mesure des débits de sources du 31 octobre 2011.

Source		t (s)	Volume (l)	Débit (l/s)
Las Chirimoyas 2	3 mesures identiques	3	9	3
Las Chirimoyas 1A	3 mesures identiques	3	9	3
Las Chirimoyas 1B	3 mesures identiques	2	9	4,5

Les débits de la source San Pedro (C206) montrent une baisse continue, en relation avec son blocage progressif par les déblais d'une construction voisine, jusqu'à la disparition complète de la source en mars 2012. Aucune interprétation ne peut donc en être tirée.

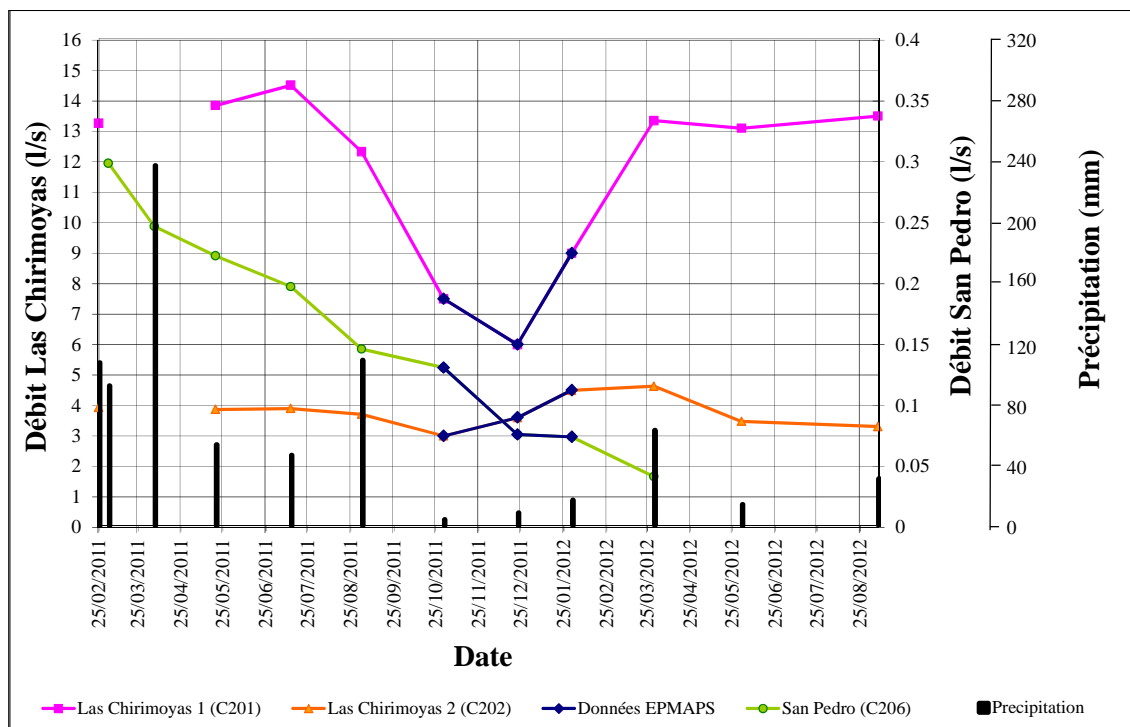


Figure 4.17. Variation de débit des sources de la Formation Chiche et comparaison avec la précipitation.

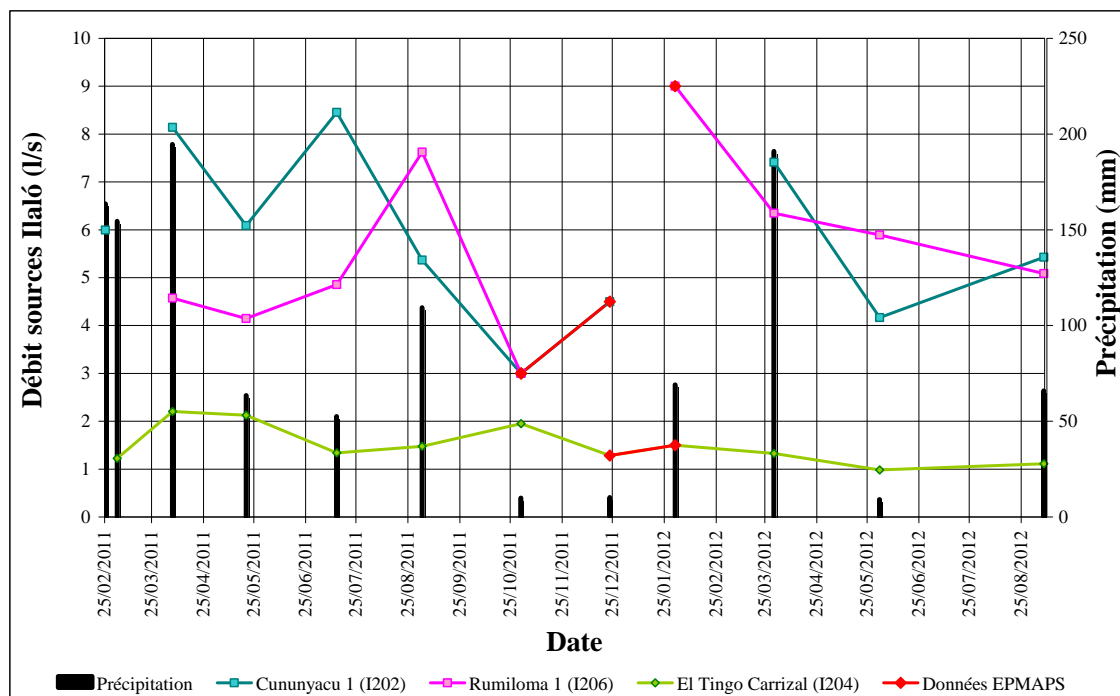


Figure 4.18. Variation de débit des sources de la Formation Ilaló.

Les sources liées à la Formation Ilaló ont des comportements différents (Figure 4.18). Ces sources sont captées tous les jours par des stations balnéaires municipales à heures fixes à partir de 5h30 et jusqu'à 14-15h00, moment de la fermeture, à l'exception des lundis. Les mesures ont été faites chaque fois dans des conditions similaires (heures de mesure, structures de conduction et captation, généralement un tuyau...). Les débits de sources Cununyacu 1

(I202) et El Tingo Carrizal (I204) ont été mesurés à la sortie de plusieurs tuyaux le plus souvent, elles sont utilisées pour le balnéaire au même moment que nos mesures de débit ou une partie du débit a été dérivé vers les rivières. Cela amène à des incertitudes très importantes dans les mesures de débit. Sans prendre en compte les structures de conduction où les mesures ont été faites, les incertitudes pour ces sources fluctuent entre 5 et 15%, mais pour la période d'octobre 2011 à février 2012 les incertitudes sont de l'ordre de 70% à 100% du fait du changement de chronomètre (voir chapitre 3, section 3.2.5). Dans ces conditions d'exploitation intensive et d'incertitude sur les mesures, les variations de débits des sources de la Formation Ilaló ne peuvent pas être interprétées (Figure 4.18).

4.1.2.1.4 Conclusions sur les variations temporelles de niveaux piézométriques

Les niveaux piézométriques mesurés mensuellement dans l'aquifère Chiche varient peu. Cependant à cette échelle il a été difficile d'observer des variations régulières comme une variabilité multi-annuelle.

Les sondes Divers ont mis en évidence que cinq forages de l'aquifère Chiche (Patagua, La Esperanza-MICEI et El Carrizal au nord, San Germán et Lasallinos au sud) sont très perturbés par des pompages à proximité. Une tendance interannuelle à la baisse des niveaux piézométriques est visible localement aux forages Patagua et San Germán mais ailleurs les niveaux piézométriques et les débits de sources montrent une relative stabilité dans le temps.

Sur le cône du volcan, du côté nord, les forages ne sont plus utilisés. Le forage Planta de Tratamiento montre une remontée de niveau qui se poursuit actuellement. Ce phénomène ne peut pas être actuellement expliqué mais il n'est pas en relation avec l'arrêt des pompages en 2006. Par contre, du côté sud du volcan les forages sont utilisés en continu pour les activités récréatives, et les mesures sont trop perturbées pour être interprétées.

De multiples incertitudes pèsent donc sur les niveaux piézométriques. Cependant, elles peuvent néanmoins être utilisées avec précaution pour tracer les cartes piézométriques et donc nous apporter des informations précieuses sur le fonctionnement de l'aquifère et ses relations avec les rivières principales.

4.1.2.2 VARIABILITÉ SPATIALE DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES

4.1.2.2.2 Comparaisons entre les niveaux piézométriques et les niveaux de rivières

Pour approcher les possibles échanges entre aquifères et réseau hydrographique, nous allons comparer piézométrie et niveaux des rivières. Les niveaux piézométriques absolus ont été calculés grâce à un relevé topographique par D-GPS (erreur 0,015 m) pour la partie nord et par altimètre de précision (erreur de ± 3 m) dans la partie sud (réalisé pour cette zone par l'EPMAPS). L'altitude des lits des rivières a été obtenue à partir des cartes topographiques (erreur de ± 10 m à l'échelle 1:25.000). Au droit des stations limnimétriques, le projet AguAndes nous a fourni les lames d'eau des rivières Pita et San Pedro : entre 0,3 m et 3 m (Pila 2011).

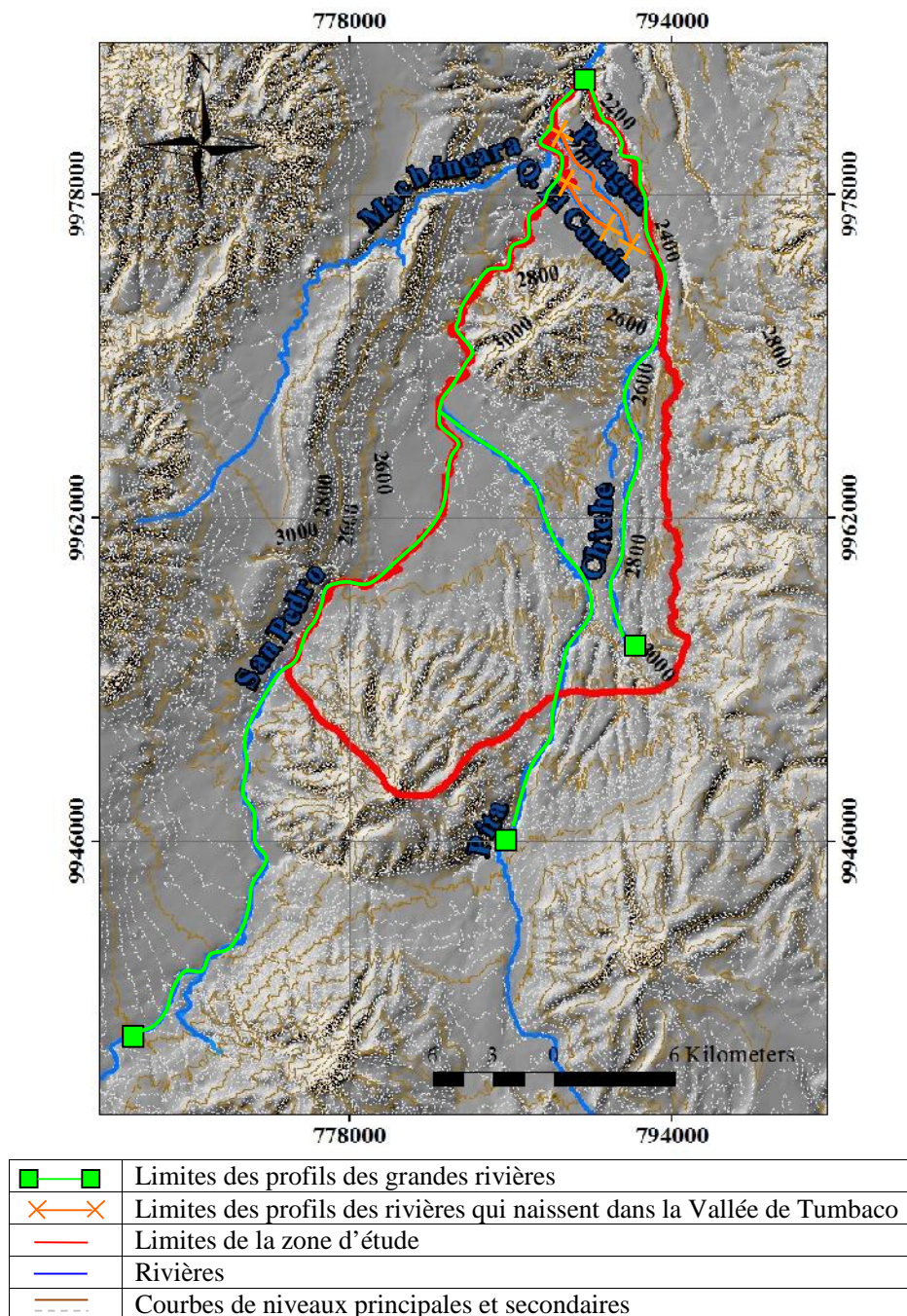


Figure 4.19. Carte des rivières et des profils.

Quand la distance entre les forages et les rivières est de moins de 30 m, les coupes topographiques (voir chapitre 2) ne permettent plus de différencier la relation niveaux piézométriques - niveaux des rivières. Pour mieux observer la relation entre ces niveaux, des profils dans les axes des rivières San Pedro, Chiche, Pita, Quebrada « El Común » et Patagua ont été tracés (localisation des rivières et limites de profils sur Figure 4.19). Les grandes rivières Chiche et San Pedro qui s'écoulent dans des ravins très profonds ont des niveaux toujours plus bas que les niveaux piézométriques des forages les plus proches : il y a donc apparemment décharge de l'aquifère vers ces rivières.

La rivière Chiche (Figure 4.20) est toujours plus basse (environ 30 m) que le niveau piézométrique des trois forages les plus proches.

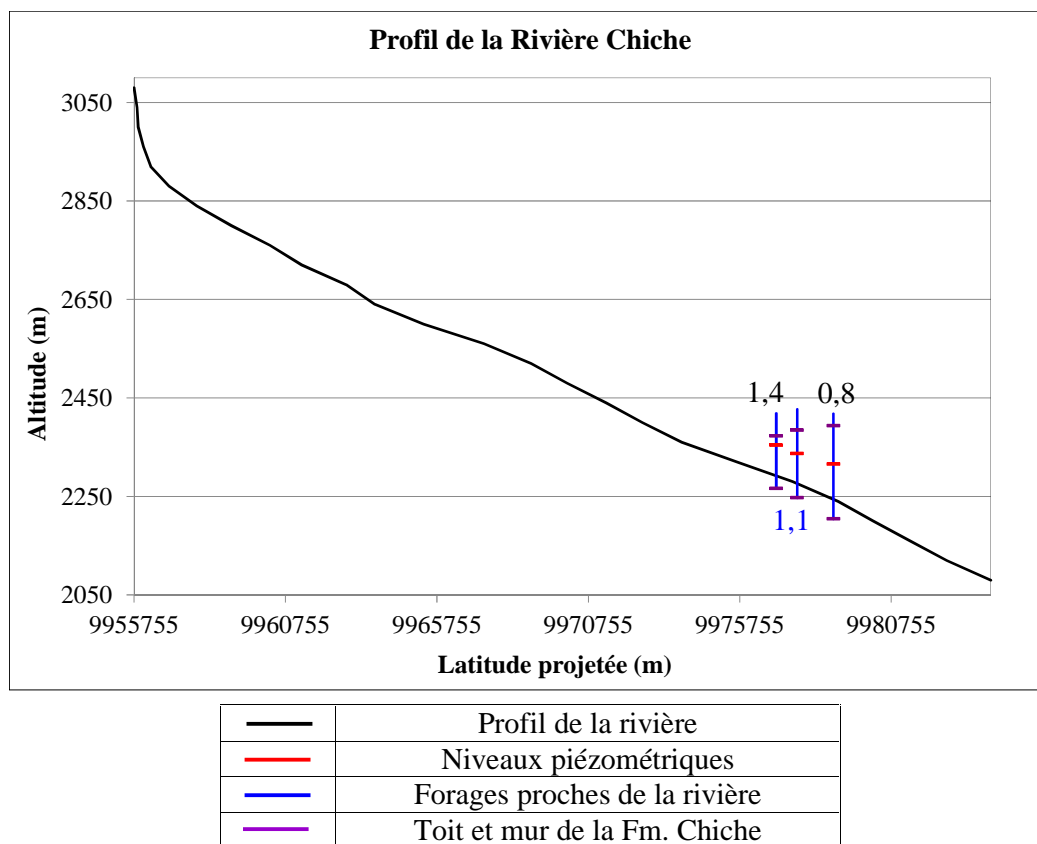


Figure 4.20. Profil de la Rivière Chiche. Les numéros représentent la distance forage – rivière en Km.

La rivière San Pedro montre des différences de niveau au sud du volcan Ilaló de 15 m, et jusqu'à 70 m au nord (Figure 4.21). Un seul forage, « Textiles Padilla » (V38), a un niveau piézométrique plus bas que la rivière San Pedro (Figure 4.21), mais cette information récupérée d'un rapport (Villarreal 2006) n'a pas pu être vérifiée parce que le forage est privé et l'accès totalement restreint.

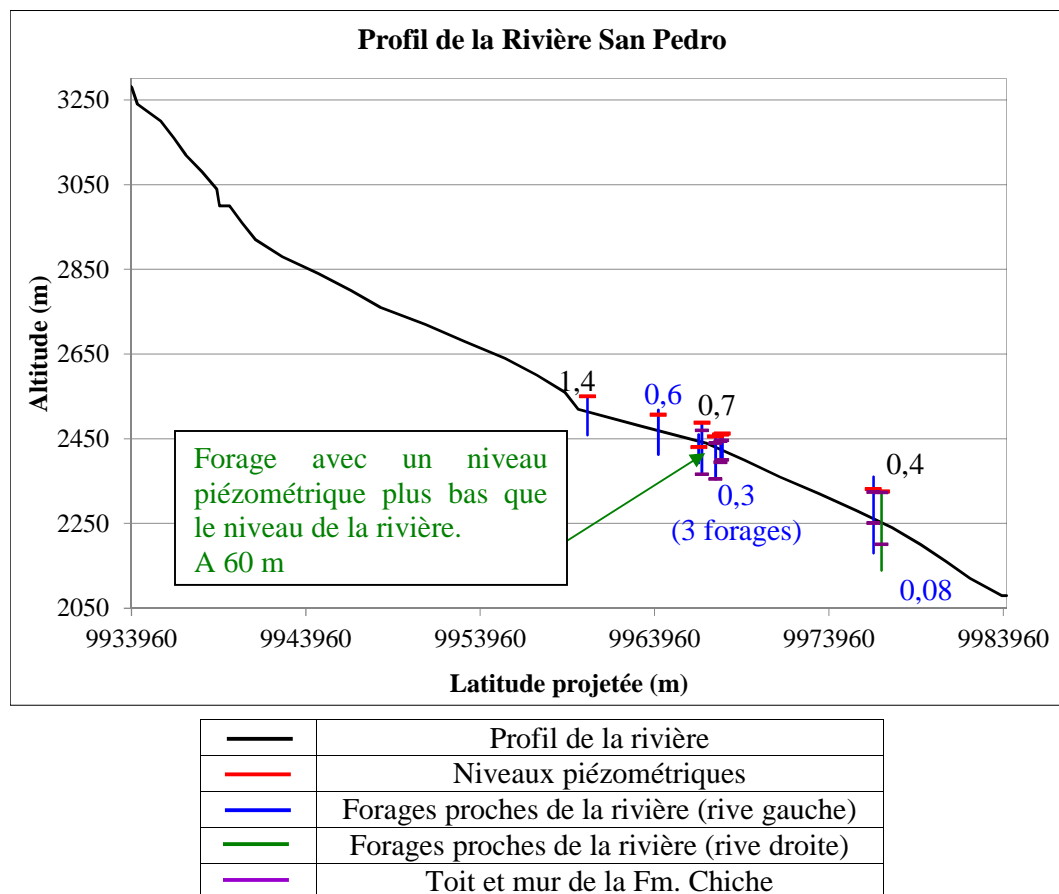


Figure 4.21. Profil de la Rivière San Pedro. Les numéros représentent la distance forage – rivière en Km.

La rivière Pita s'écoule aussi dans un ravin très profond. A proximité de la rivière il y a 4 forages en rive gauche et 6 forages en rive droite. En rive gauche, les niveaux piézométriques de 3 forages sont inférieurs à celui de la rivière (entre 1 et 30 m), le quatrième forage est plus haut que la rivière de 40 m (Figure 4.22). En rive droite 5 forages ont des niveaux piézométriques plus élevés que la rivière (entre 10 et 130 m), et le sixième forage, le plus au nord, a un niveau plus bas que la rivière de 10 m (Figure 4.22). Il est possible que les niveaux piézométriques plus bas que la rivière Pita soient seulement des niveaux perturbés par des pompes. En effet, sur ces 10 forages proches de la rivière Pita, 8 sont des forages privés et au moins 5 se trouvent dans des usines qui exploitent l'aquifère.

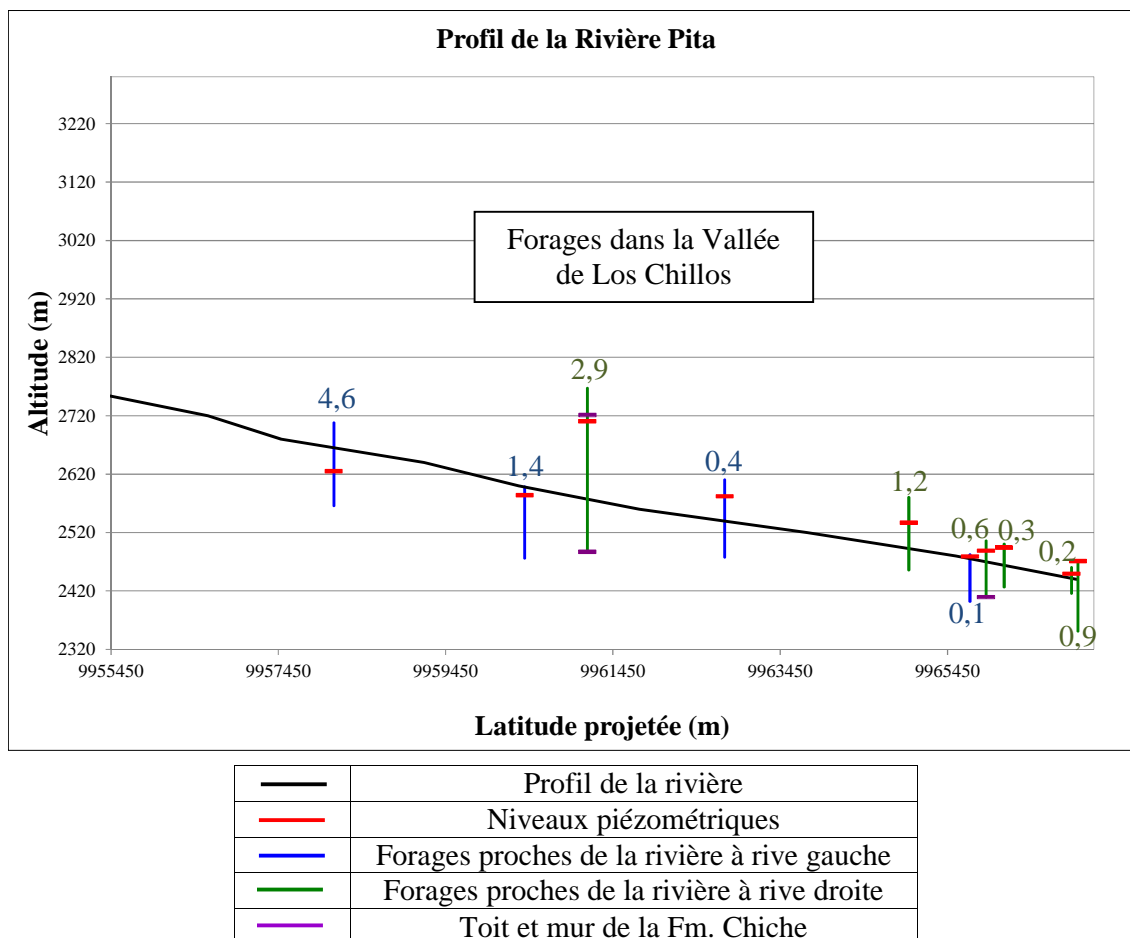


Figure 4.22. Profil de la Rivière Pita. Les numéros représentent la distance forage – rivière en Km.

Pour la « Quebrada El Común », une petite rivière au nord de la zone d'étude, les niveaux piézométriques des 4 forages les plus proches (Figure 4.23) sont plus élevés que la rivière d'au moins 30 m. Selon la description lithologique du forage Patagua, le plus proche de la rivière, à une distance de 20 m (ligne bleu sur la Figure 4.23 de la « Quebrada El Común »), la Formation Cangahua ferait seulement 15 m d'épaisseur (profondeur de la quebrada 50 m) à cet endroit et cette rivière creuse la Formation Chiche sur 35 m. Il y a encore au moins 100 m de Formation Chiche sous le lit de la rivière. Une connexion hydraulique localement est donc possible, avec des échanges de la nappe vers cette rivière. Cette rivière est la seule où l'information disponible suggère ce phénomène.

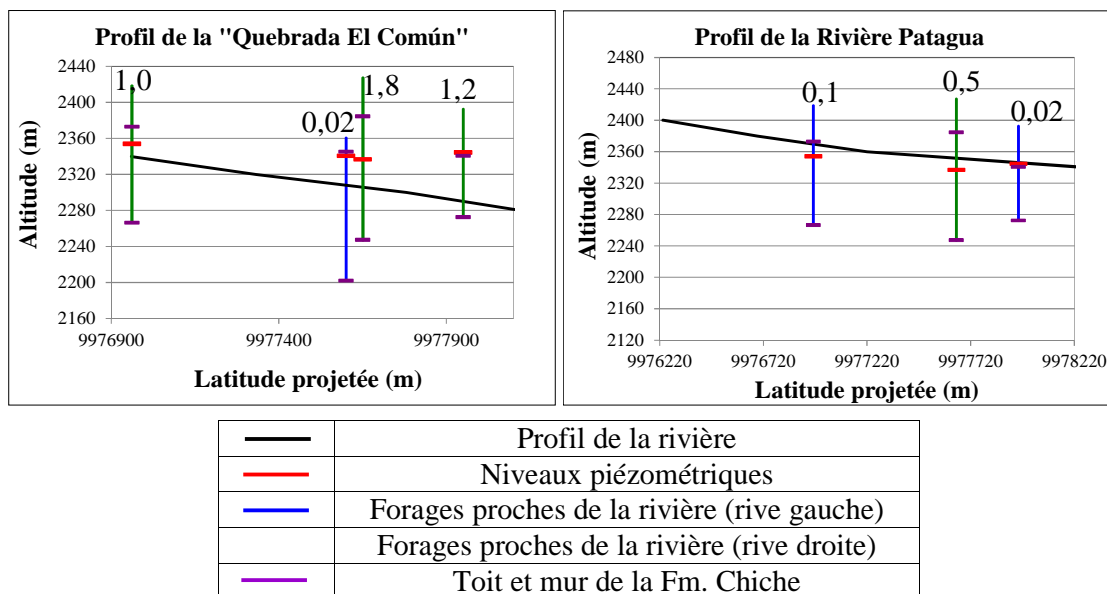


Figure 4.23 Profil de la Quebrada El Común et Patagua. Les numéros représentent la distance forage – rivière en Km.

La rivière Patagua prend naissance dans la Vallée de Tumbaco. Le ravin qu'elle a formé n'est pas très profond (autour de 40 m tout au long de la rivière) et, selon la description lithologique du forage Santa Rosa qui est à 20 m de la rivière, elle coulerait sur la Fm. Cangahua qui est épaisse d'un peu plus de 50 m à cet endroit. Le lit de la rivière serait plus haut que le toit de l'aquifère (Figure 4.23), et l'imperméabilité attribuée à la Fm. Cangahua empêcherait l'alimentation de la nappe par la rivière.

Les rivières principales Chiche et San Pedro se comportent comme des axes de drainage de l'aquifère dans la partie nord. Dans la partie la plus haute de la zone d'étude, au sud, la rivière Pita pourraient constituer une zone de recharge. Les rivières qui naissent dans la vallée de Tumbaco pourraient avoir une connexion hydraulique avec l'aquifère (Figure 4.24). La variation saisonnière des niveaux de rivières ne dépassant pas 3 m, le sens des échanges rivières – aquifère Chiche ne doit pas changer au cours de l'année.

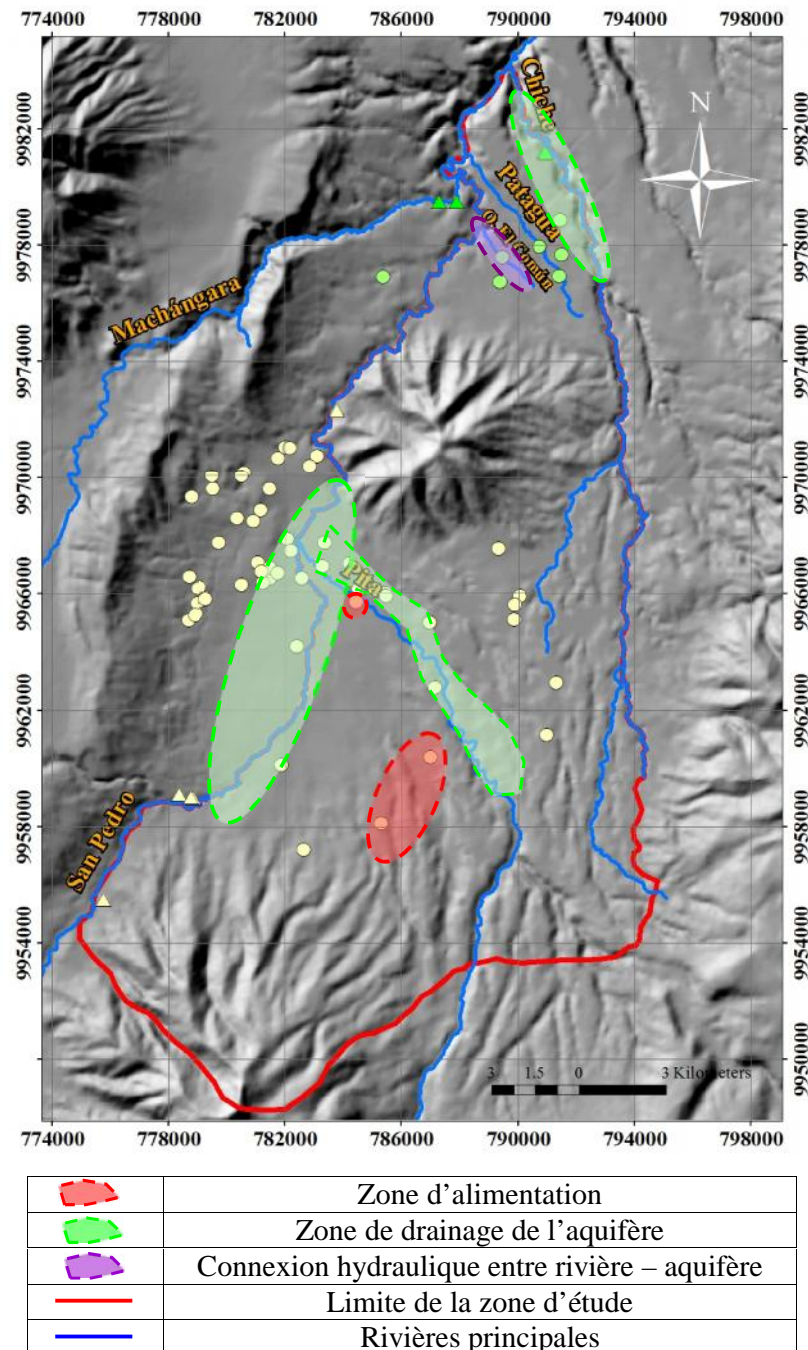


Figure 4.24. Relation rivière - aquifère.

4.1.2.2.2 Construction des cartes piézométriques

Même avec les fortes incertitudes notées précédemment, les cartes piézométriques vont nous aider à déterminer les directions de flux, les zones probables de recharge et de drainage, et à préciser les relations entre l'aquifère Chiche et rivières d'une part, l'aquifère Ilaló d'autre part.

Pour la construction de ces cartes, nous avons utilisé la valeur moyenne des niveaux piézométriques, étant donné leur faible variabilité temporelle même s'ils sont localement perturbés par des pompes proches. Nous avons complété nos observations par les mesures piézométriques de la SENAGUA en 2010 et du rapport de Villarreal (2006). Pour l'utilisation de ces points anciens à proximité du volcan, l'absence d'information lithologique ne permet pas d'identifier avec exactitude les formations captées.

Deux cartes piézométriques ont été créées, pour les parties nord (Figure 4.25) et sud (Figure 4.26) de l'aquifère Chiche. Les forages artésiens jaillissants sont symbolisés par « > » lorsque la piézométrie exacte est inconnue. Les isopièzes de l'aquifère Ilaló n'ont pas été tracées parce qu'il y a trop peu de points autour du volcan, mais on abordera sa piézométrie à la fin de ce sous-chapitre. Les courbes ont été obtenues par triangulation.

Au nord, le nombre très réduit de forages, leur distribution hétérogène et les incertitudes sur les mesures piézométriques dans la partie centrale rendent fragile le tracé de la carte piézométrique. Malgré ces difficultés, on peut tirer quelques conclusions. Les rivières Chiche et San Pedro drainent l'aquifère Chiche et constituent donc une limite hydraulique isolant notre zone de l'aquifère Pifo – El Quinche au nord-ouest. Les sorties observées au niveau de la rivière Chiche sont de deux types : drainance et sources au niveau de la rivière ; autres sources issues de fractures situées environ 60 m au-dessus de la rivière (Figure 4.25). Les altitudes différentes des sources suggèrent que l'aquifère Chiche présente localement des couches de perméabilités très différentes formant éventuellement des niveaux perchés. Ceci serait cohérent avec les conditions de dépôt de l'aquifère, même si les descriptions lithologiques ne repèrent pas de niveaux indurés. De plus, il est possible que des failles dans la Formation Chiche facilitent les sorties de l'eau vers les rivières, comme ce qui est observé ailleurs dans les milieux volcaniques (Lachassagne et al. 2001, Cabrera et Custodio 2004, Bertrand et al. 2010) et déjà évoqué pour la zone de Tumbaco (Rios-Sanchez et al. 2012).

La carte piézométrique actuelle ne permet pas de distinguer les rôles des petites rivières en particulier celles qui naissent dans la Vallée de Tumbaco, comme la rivière Patagua, qui ont creusé la formation Cangahua et qui coule directement sur la Formation Chiche.

Dans la partie sud, les données anciennes de la SENAGUA complétées par les mesures de cette recherche ont permis d'avoir une densité de points plus importante. À côté du volcan Pasochoa, les lignes isopièzes suggèrent un flux du SE vers le NO ; de l'autre côté de la rivière San Pedro, les eaux circulent plutôt vers l'Est. La carte ne montre pas de relation particulière entre l'aquifère Chiche et la rivière Pita. Au contraire, le drainage de l'aquifère par la rivière San Pedro est très marqué (Figure 4.26). Enfin, le volcan Ilaló constitue un obstacle majeur au flux vers le nord de l'aquifère Chiche sud et des sources rattachées à Chiche sud ont été récemment recensées au pied du volcan.

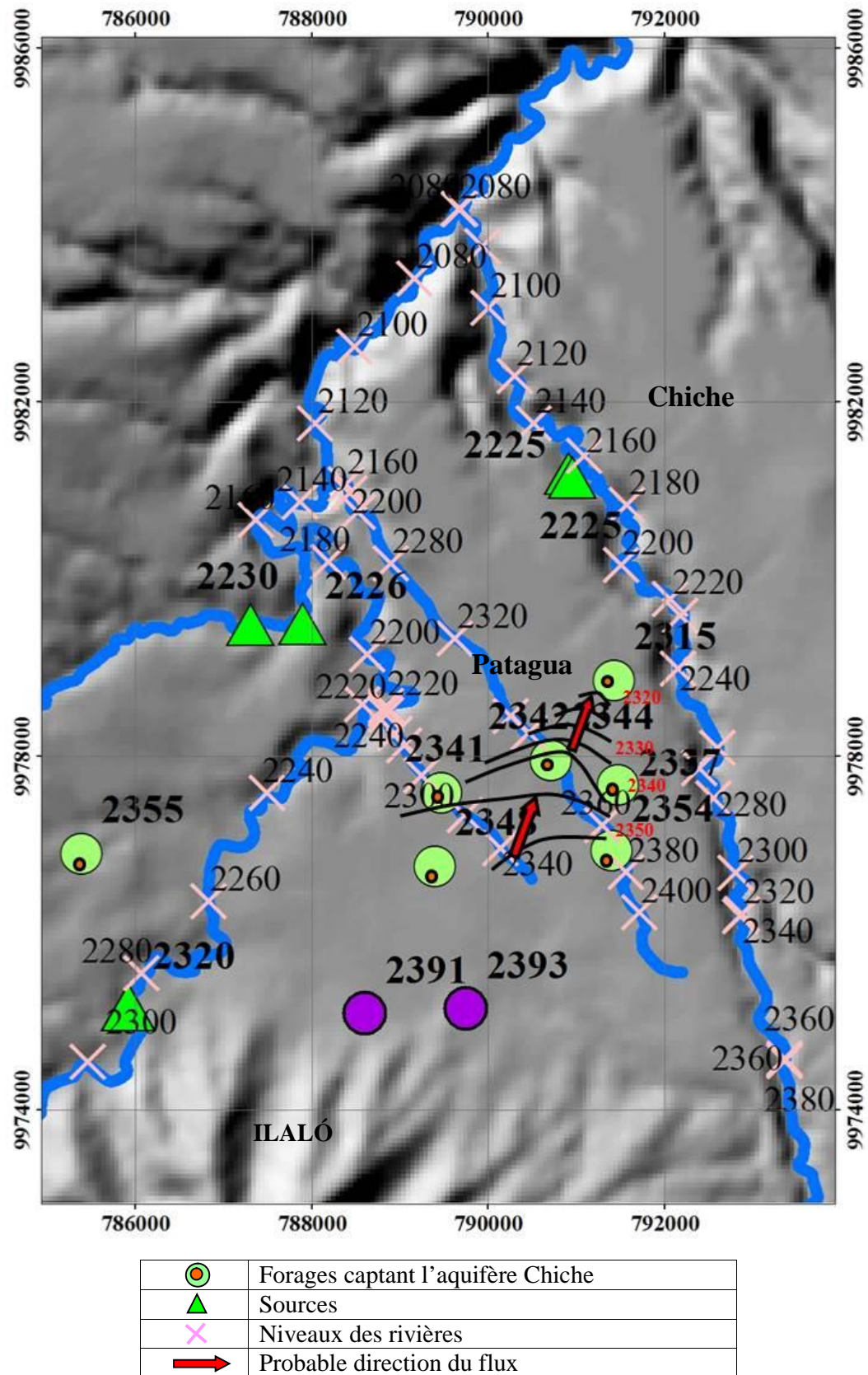


Figure 4.25. Isopièzes de l'aquifère Chiche nord. Valeurs des isopièzes en rouge.

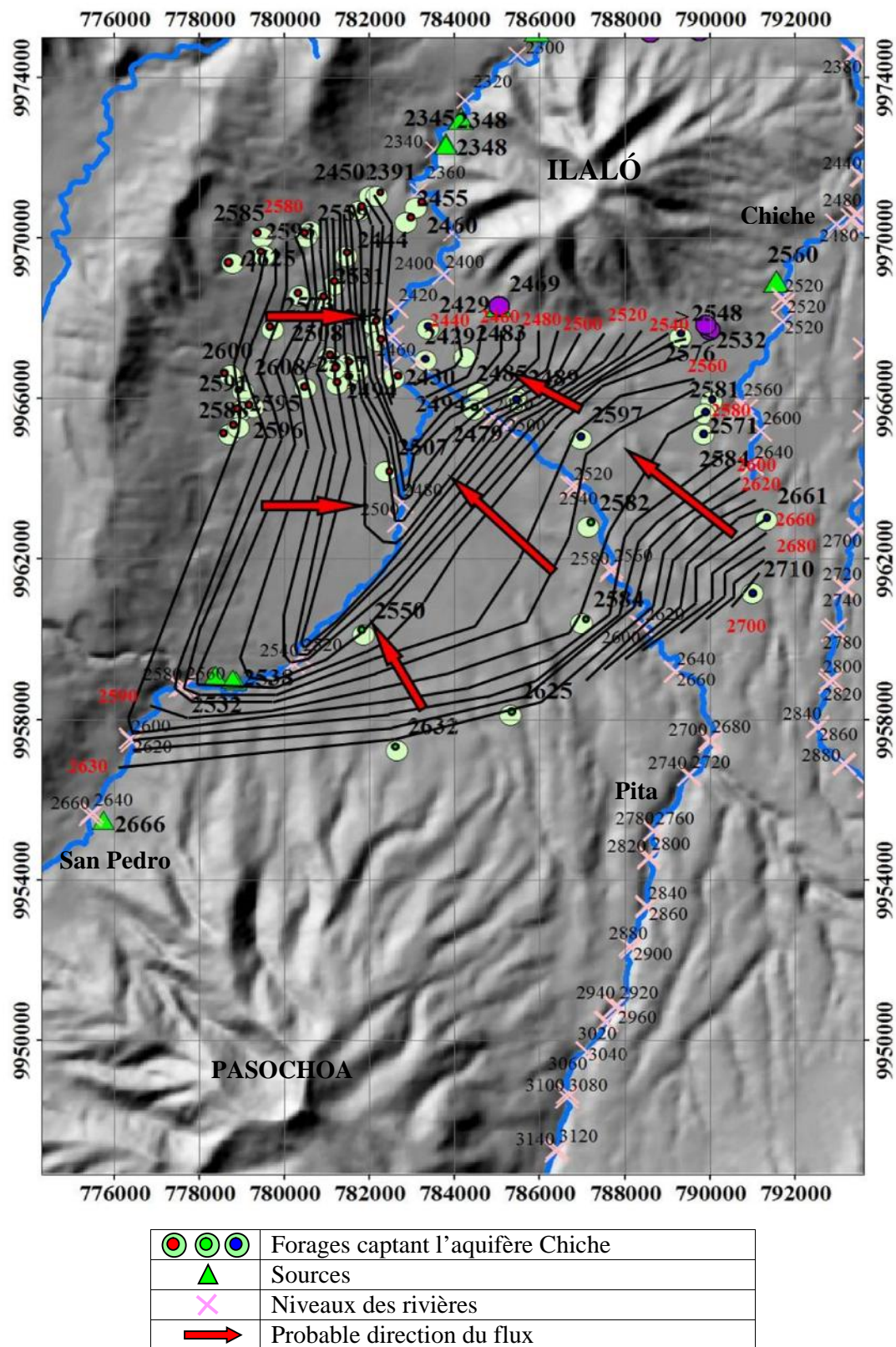


Figure 4.26. Isopièzes de l'aquifère Chiche sur la partie sud. Valeurs des isopièzes en rouge.

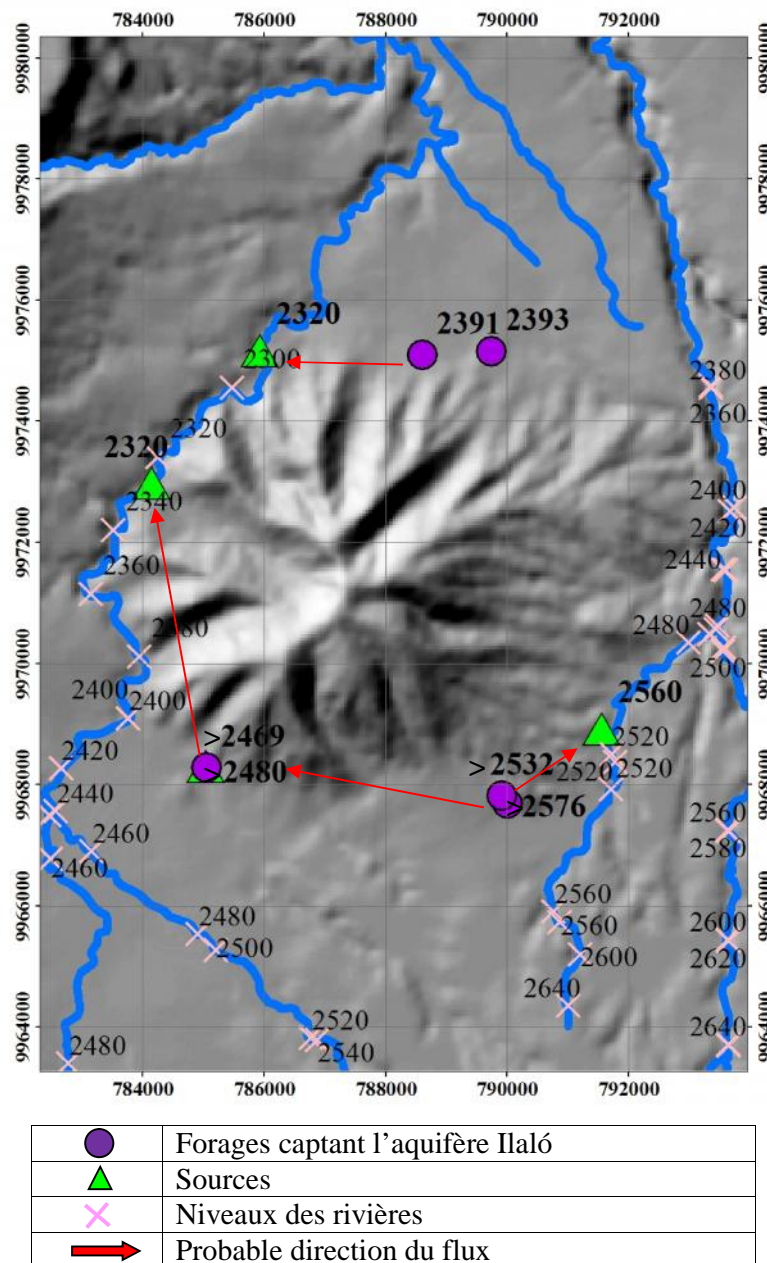


Figure 4.27. Niveaux piézométriques de l'aquifère Ilaló.

Les forages captant la Formation Ilaló, au sud du volcan sont artésiens jaillissants (Annexe 2B) et les charges hydrauliques réelles sont inconnues. Au nord on dispose uniquement de 3 points dont deux sont des eaux mélangées avec celles de la Fm. Chiche (Rumihuayco 1 M305 et Rumihuayco 2 I104). Les 8 sources recensées au pied du volcan sortent en pression par des failles ou fissures dans la roche. Merla (1980) a indiqué un sens du flux : SE – NO au nord de l'Ilaló et SO – NE au sud, basé seulement sur 4 points autour du volcan (présentés sur la Figure 4.27, deux forages au sud de l'Ilaló et les deux forages au nord), sens de flux que nous avons confirmé avec la totalité de nos points de mesure. Cependant, du côté sud, la cote piézométrique ne permet pas de bien différencier le sens du flux.

La relation hydrodynamique éventuelle entre les aquifères Chiche et Ilaló est difficile à préciser. Dans la partie nord, les forages Ilaló sur le volcan sont trop éloignés des forages Chiche de la vallée (entre 2 et 3 Km) pour prouver une connexion. On devra utiliser donc d'autres informations comme la géochimie pour essayer de répondre à cette question.

A partir des cartes piézométriques il est possible de calculer des gradients hydrauliques. Dans la partie nord, le gradient est souvent compris entre 2% et 4%, le gradient étant plus prononcé dans les zones de drainage que constituent les quebradas (Figure 4.28). Les gradients dans la partie sud varient entre 1,3% et 4,7% (Figure 4.29), les plus forts se trouvant dans les zones de fort gradient topographique (Figure 4.30). Pour nos calculs, nous allons utiliser une valeur moyenne de 2% pour l'aquifère Chiche nord et sud.

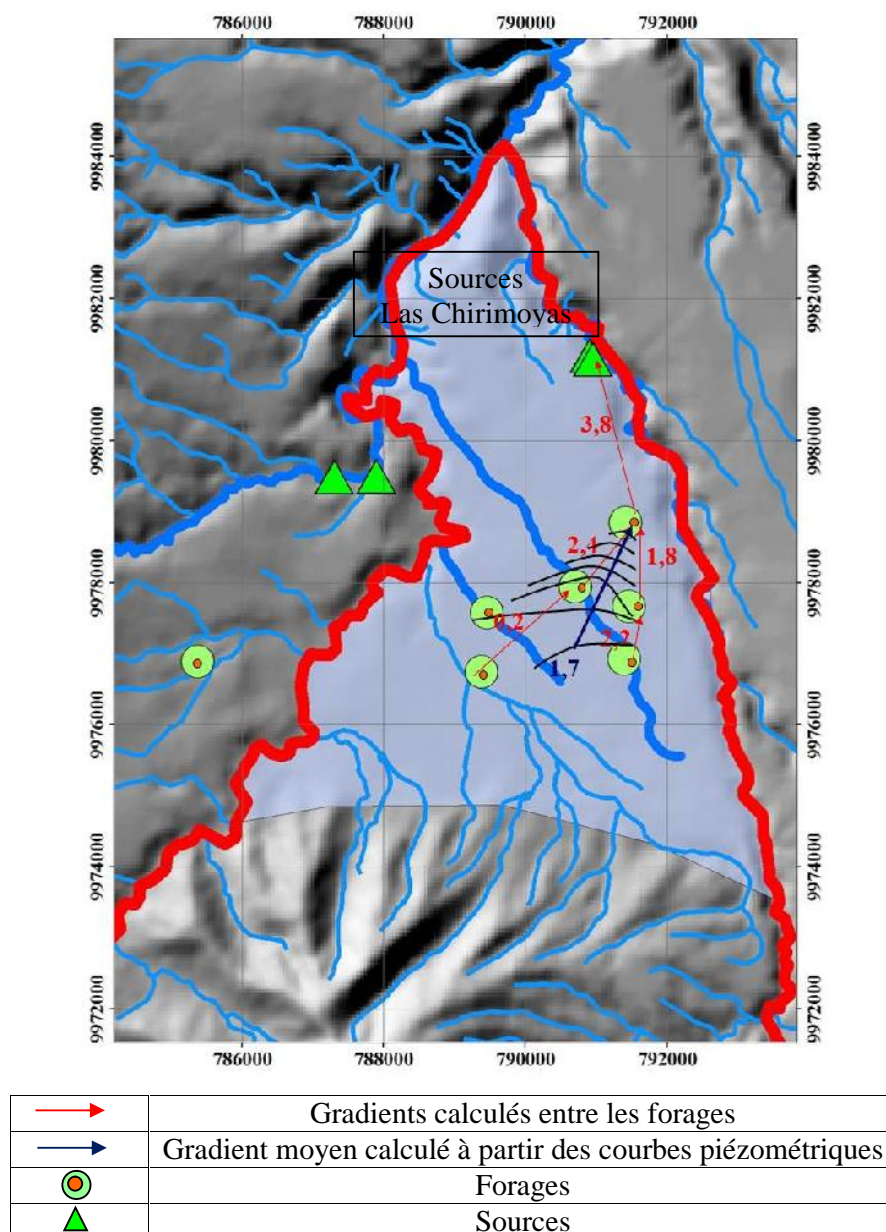


Figure 4.28. Gradients hydrauliques du Chiche nord en %.

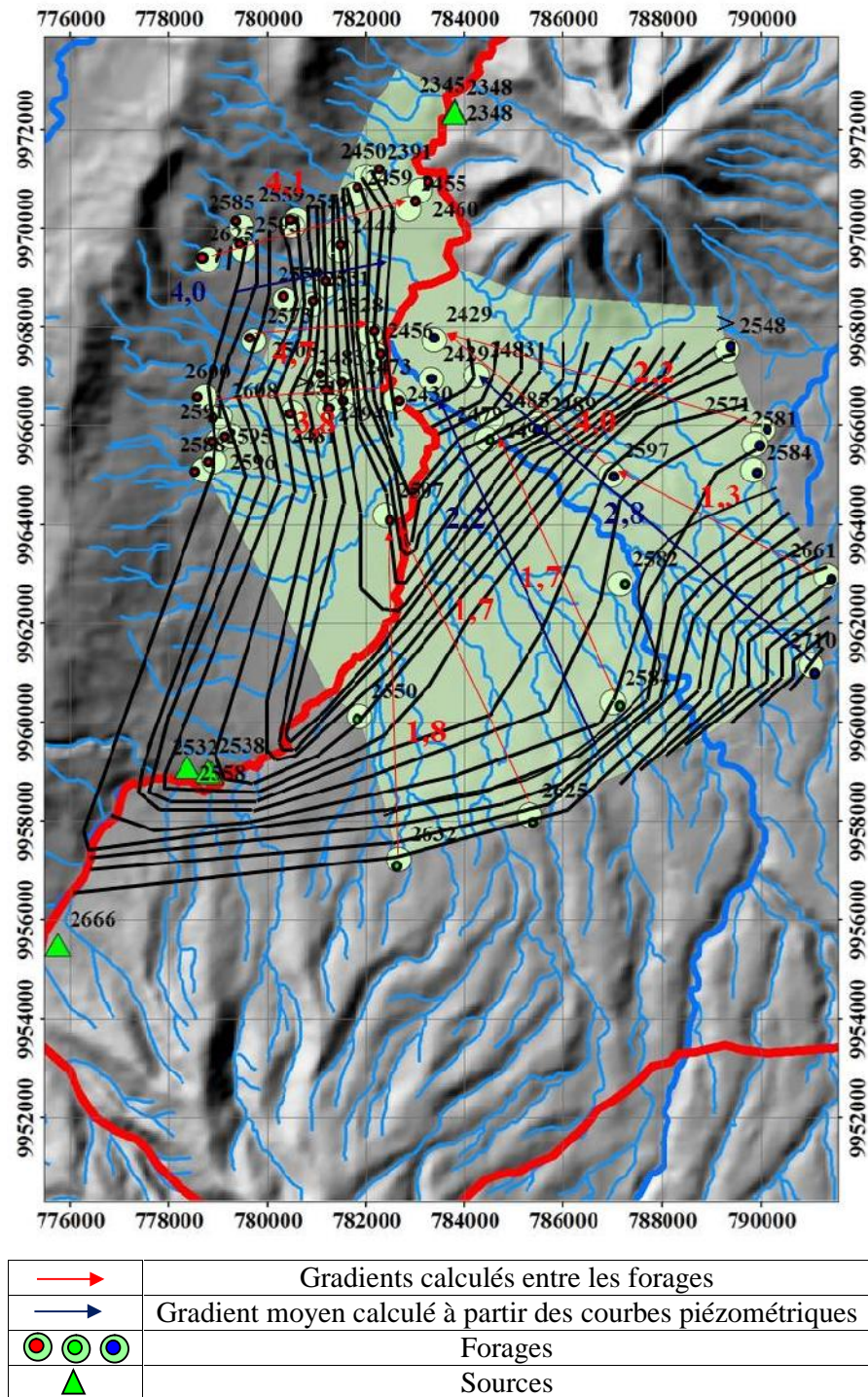


Figure 4.29. Gradients hydrauliques du Chiche sud en %.

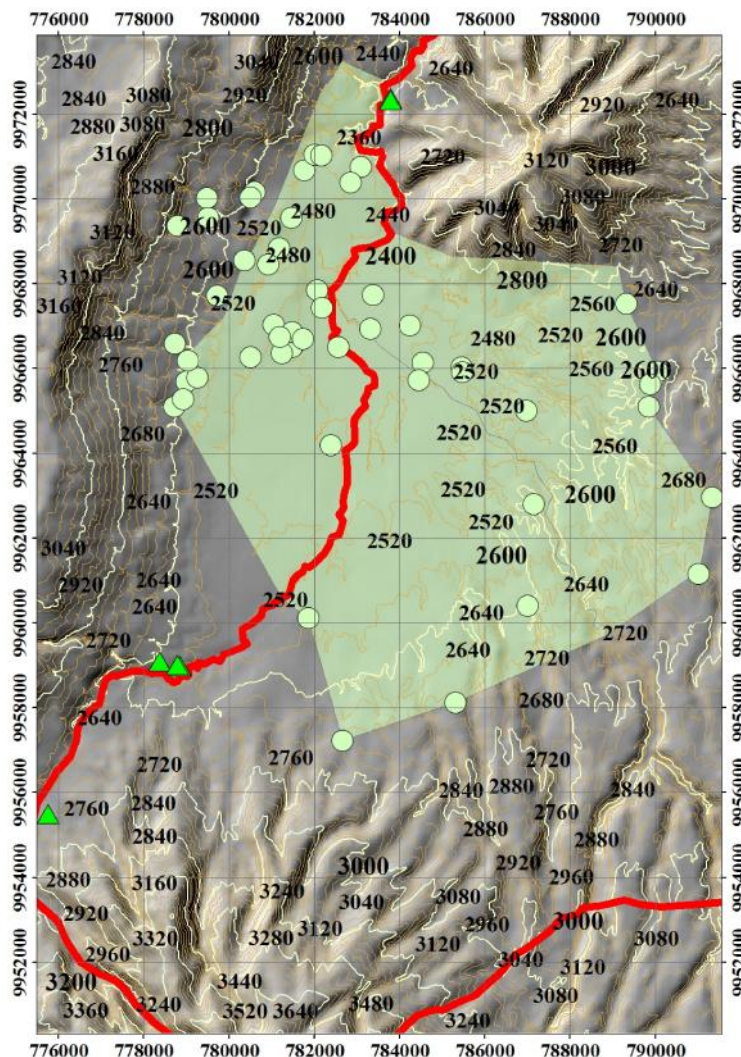


Figure 4.30. Topographie de la Vallée de Los Chillos

A partir des données piézométriques, un premier bilan hydrique, forcément approximatif du fait des multiples incertitudes, sera proposé et comparé avec les résultats obtenus à partir des approches géochimiques. Ce bilan sera présenté dans la section 4.4.2.

4.1.3 CONCLUSION SUR LES RESULTATS HYDRODYNAMIQUES

La variation piézométrique interannuelle semble très faible sur les forages. Ceci nous permet de considérer des valeurs moyennes comme représentatives. Des cartes piézométriques ont ainsi été tracées et les possibles interactions avec le réseau hydrographique étudiées. Les rivières les plus importantes comme Chiche et San Pedro drainent l'aquifère.

Les niveaux piézométriques sont généralement plus hauts que les niveaux des rivières les plus importantes comme les rivières Chiche et San Pedro. Au fur et à mesure que les rivières avancent vers le nord, elles creusent l'aquifère et le fragmentent par une série d'axes de drainage. Il en résulte une discontinuité de flux entre la Vallée de Los Chillos et la Vallée de Tumbaco, bloqué par la barrière du volcan Ilaló.

L'aquifère Ilaló semble être une entité à part sur le plan hydrodynamique, car l'information hydrodynamique n'a pas permis de mettre en évidence des interactions entre cet aquifère et l'aquifère Chiche. Cela est dû, d'une part, à la rare information existante sur les forages captant la Formation Ilaló et d'autre part, on ne dispose pas des niveaux piézométriques réels des points localisés au sud du volcan puisque de ce côté les forages sont artésiens, on dispose uniquement des niveaux topographiques.

4.2. INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS CHIMIQUES

Dans un premier temps, nous allons analyser la variabilité temporelle et spatiale des paramètres physiques de l'eau, puis nous utiliserons les ions majeurs pour caractériser les faciès chimiques des eaux des aquifères de notre zone d'étude. Ensuite seront abordés les éléments traces, dont un sous-chapitre spécifique sur l'arsenic. Enfin, nous mettrons ces résultats en perspective avec l'étude hydrodynamique.

4.2.1 VARIATION TEMPORELLE DES PARAMÈTRES PHYSIQUES DE L'EAU

Les paramètres physiques de l'eau comme la conductivité électriques (CE), le pH, la température ont été systématiquement mesurés au cours des campagnes de suivi chimique. Ces mesures ont été complétées par des relevés mensuels, entre février 2011 et septembre 2012, en y ajoutant le potentiel redox (Eh). Le but de ces campagnes mensuelles était de rechercher une éventuelle variabilité saisonnière dans l'aquifère, en relation avec les processus hydrodynamiques. Ainsi qu'indiqué dans le chapitre 3 et dans l'Annexe 3E, les variations chimiques de l'aquifère Chiche et Ilaló ne sont pas très marquées temporellement et spatialement.

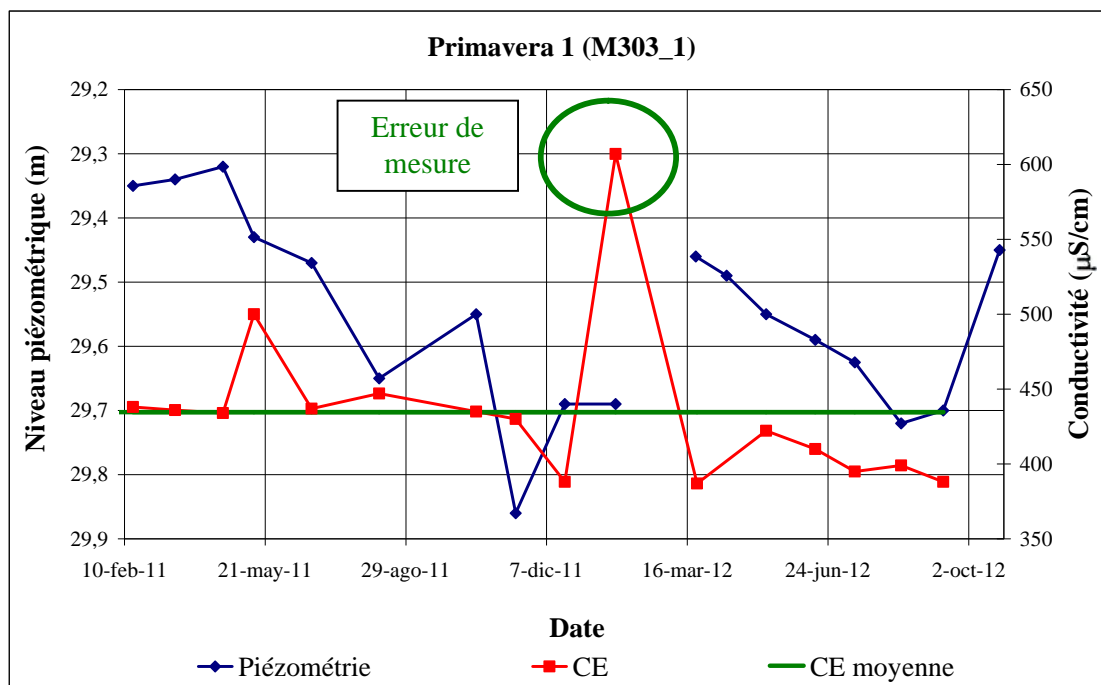


Figure 4.31. Variation temporelle de la CE dans le piézomètre La Primavera 1 dans l'aquifère Chiche nord (février 2011 - septembre 2012) comparée à celle des niveaux piézométriques.

Au nord, les CE peuvent montrer de fortes variations brusques en hausse (Figure 4.31). Ces pics ne sont pas synchrones avec la variation des niveaux piézométriques (Figure 4.31) ou la pluie (Figure 4.32), il s'agit d'une erreur de mesure. Cependant, on a observé sur 5 forages de l'aquifère Chiche nord-est une baisse progressive de la CE entre décembre 2011 et mars 2012 qui montrent une relation inverse avec les niveaux piézométriques (Figure 4.33 et Figure 4.34). Cette relation indique que les variations piézométriques que l'on a observées,

perturbées par des pompages, montrent leur effet naturel sur la salinité de l'eau quand il y a une récupération ou une baisse de niveau.

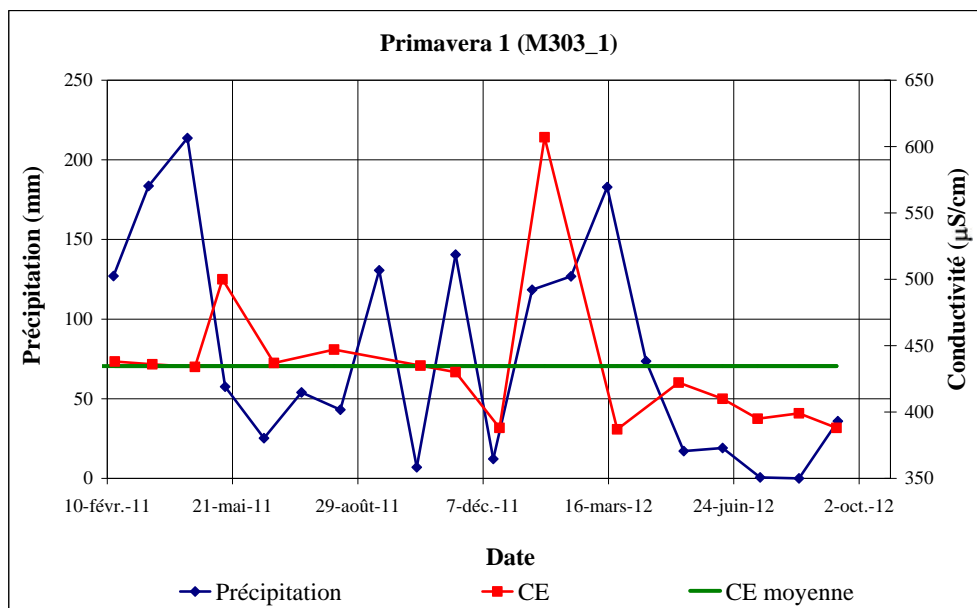


Figure 4.32. Variation temporelle de la CE dans le piézomètre La Primavera 1 dans l'aquifère Chiche nord (février 2011 - septembre 2012) comparée à celle de la précipitation.

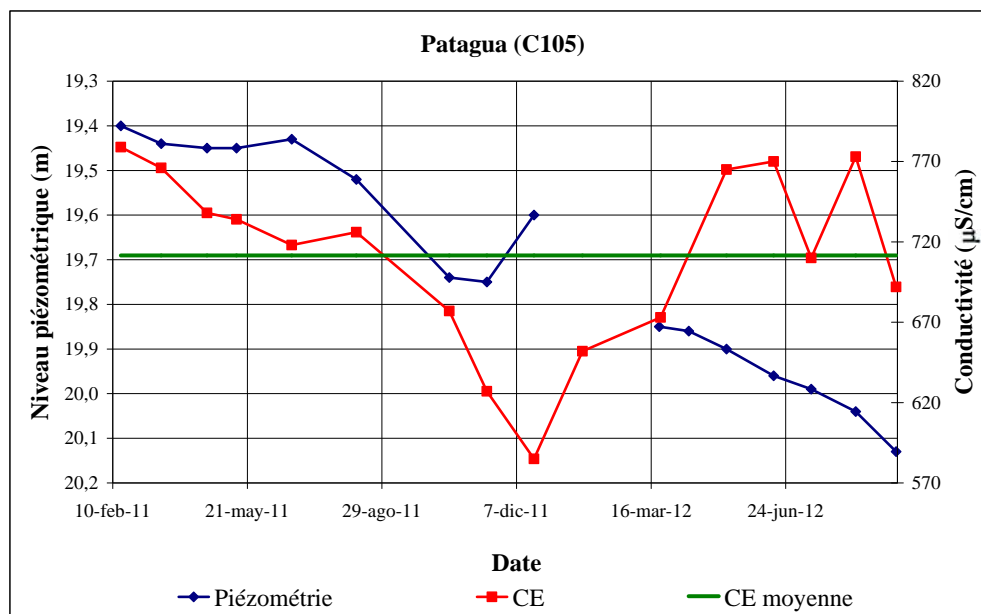


Figure 4.33. Variation temporelle de la CE dans le forage Patagua dans l'aquifère Chiche nord (février 2011 - septembre 2012) comparée à celle des niveaux piézométriques.

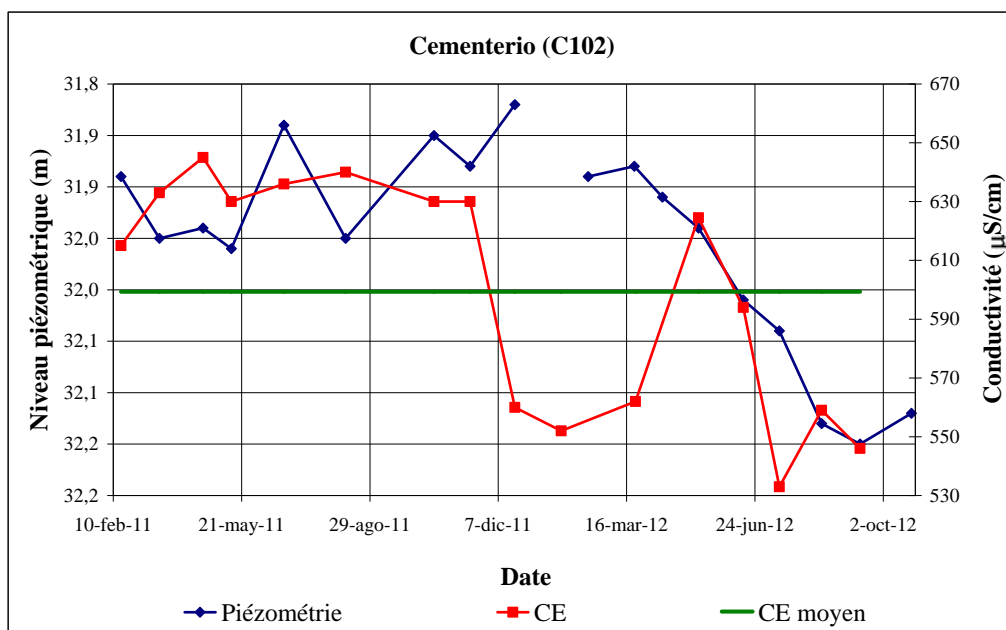


Figure 4.34. Variation temporelle de la CE dans le forage Cementerio dans l'aquifère Chiche nord (février 2011 - septembre 2012) comparée à celle des niveaux piézométriques.

Dans les forages au sud de la zone captant la Formation Chiche on a trouvé des hausses et des baisses brusques de CE (Figure 4.35). Ce phénomène est synchrone partout dans l'aquifère Chiche sud (exemple entre le forage Acosta Soberón C151 et Alangasí No.1 C152, Figure 4.36) qui sont séparés de 10 Km par les rivières San Pedro et Pita. Le fait d'avoir une synchronisation des événements des deux côtés de l'aquifère suggère que les rivières ne se comportent pas comme une barrière hydraulique de flux (sur le chapitre 2 nous avons expliqué que la Fm. Chiche a une épaisseur d'au moins 100 m en dessous du lit de ces rivières) et on a une seule unité aquifère qui réagit à un même processus qui provoque ces variation de CE. Cependant il y a des hausses de conductivité du côté sud-est qui n'ont pas été observées du côté sud-ouest.

Afin de relier les variations de la CE avec d'autres variations saisonnières, nous l'avons comparé avec la précipitation. Les Figure 4.35 montrent qu'il n'existe pas de relation entre précipitation et variation de CE. La hausse brusque de juin 2012 n'est pas liée à la précipitation puisque même si elle se produit dans une période de très faible pluviosité (Figure 4.35 et Figure 4.36) seul un unique point remonte, le reste des mesures montre une variation faible et près de la moyenne de CE à la même saison entre mai 2012 et août 2012 (Annexe 5A). Malheureusement, on ne peut pas comparer ces données avec les niveaux piézométriques parce que du côté sud-ouest les forages sont artésiens jaillissants et on ne dispose d'aucune donnée de pression, et du côté sud-est les forages sont équipés de pompes, empêchant la mesure des niveaux piézométriques.

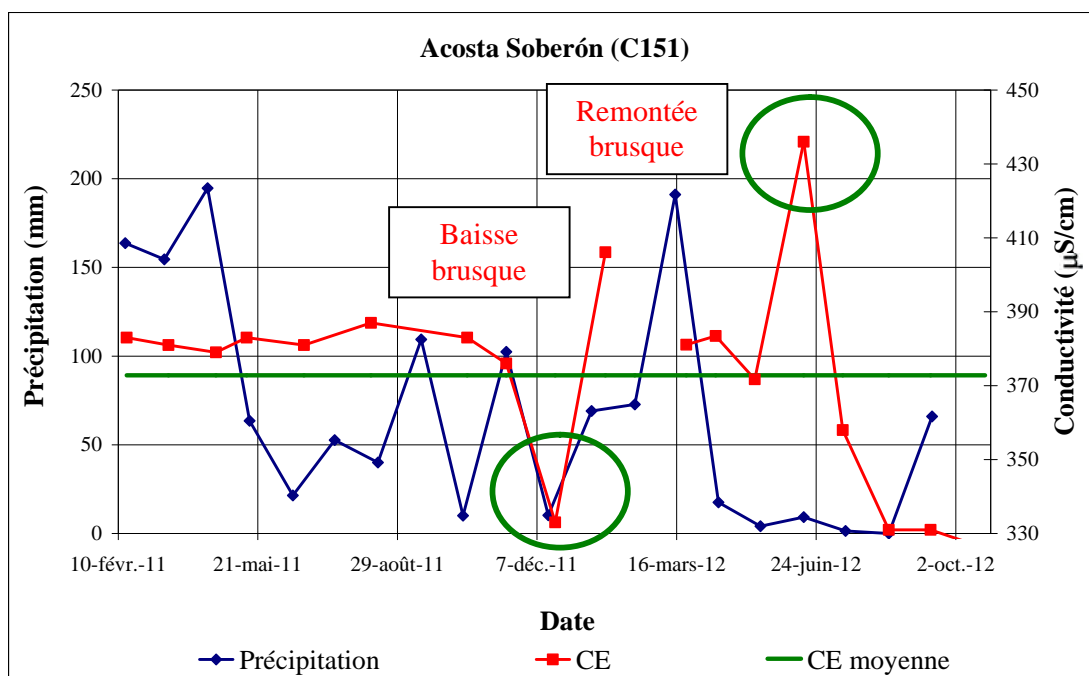


Figure 4.35. Variation temporelle de la CE (rouge) dans le forage Acosta Soberón au dans l'aquifère Chicche sud-ouest (février 2011 – octobre 2012) comparée à celle de la précipitation (bleu).

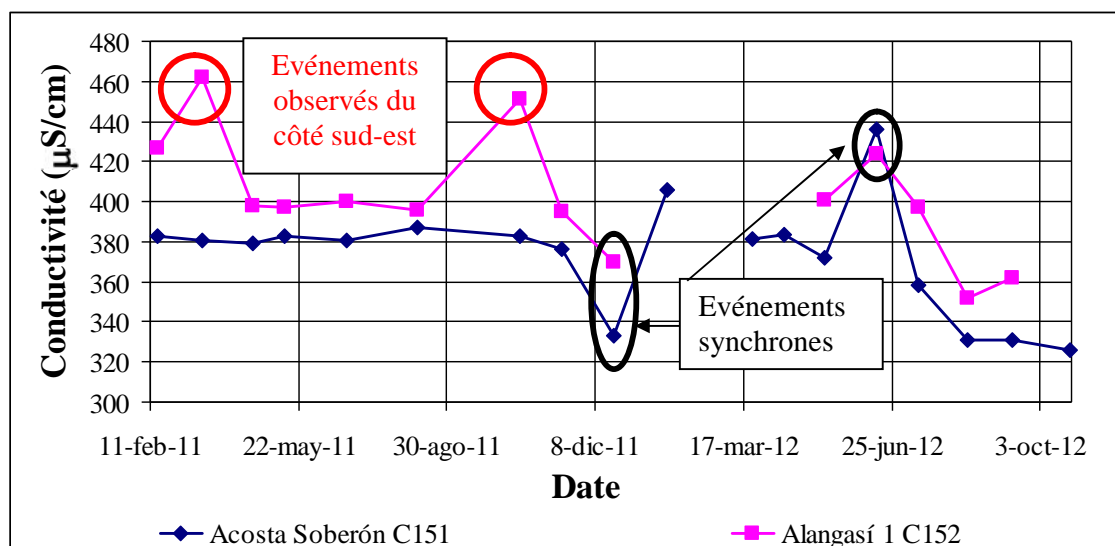


Figure 4.36. Synchronisation des variations de CE dans l'aquifère Chicche entre le forage Alangasí au sud-est et le forage Acosta Soberón au sud-ouest.

Les forages qui captent la formation Ilaló montrent des variations très faibles de CE (Figure 4.37). Sur la Figure 4.37, le pic observé au forage El Tingo Nuevo (I102) en décembre 2011 est probablement une erreur de mesure, avec une valeur très éloignée de ce qui a été toujours observé sur ce forage, une erreur qui est probablement due à une mauvaise calibration de l'appareil de mesure de la CE sur le terrain et qui n'a pas été observée dans les autres forages Ilaló.

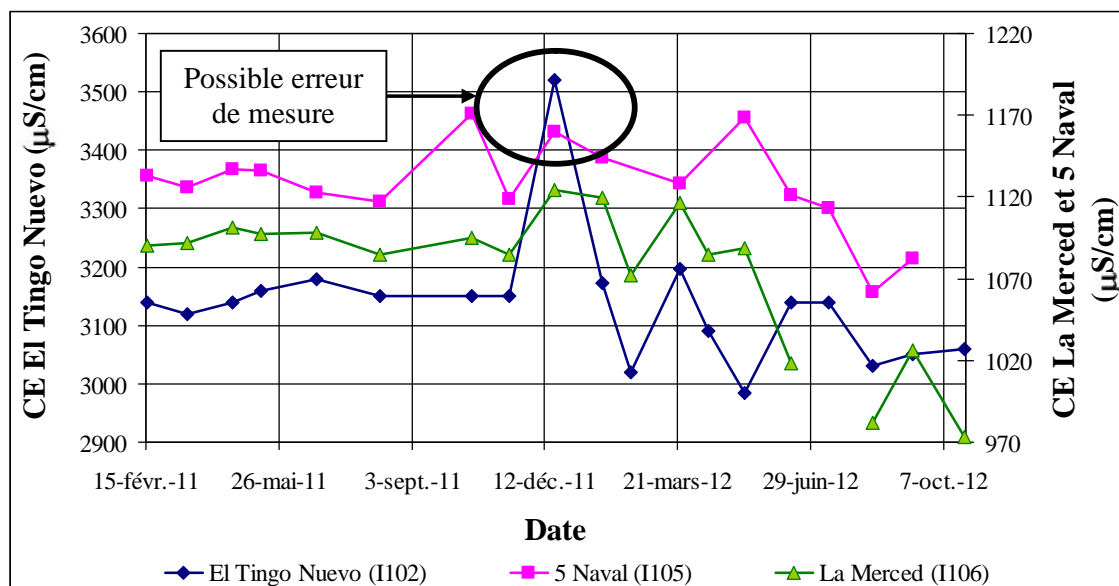


Figure 4.37. Variation temporelle de la conductivité dans les forages qui capte la Formation Ilaló (février 2011 - octobre 2012).

Pour le pH on a observé des variations très faibles dans les 8 forages du Chiche nord et les 6 forages de l'aquifère Chiche sud étudiés. Les mesures se maintiennent près de la neutralité à légèrement alcalines. L'aquifère Chiche ne montre pas une saisonnalité marquée sur les valeurs de pH. Cependant, ces variations montrent quand même des extrêmes en pH (Figure 4.38 et Annexe 5A) qui ne sont pas liées à la variation de la conductivité (Figure 4.38 et Annexe 5A) ou à la variation piézométrique (Annexe 5A). Les variations de pH dans les forages de l'aquifère Chiche nord sont synchrones (Annexe 5A) et de son côté les forages du Chiche sud montrent aussi une synchronisation (Annexe 5A), mais il n'existe pas une relation entre les deux côtés. Cette synchronisation des hausses ou baisses de pH suggère qu'il ne s'agit pas d'erreurs de mesures, mais d'une variation naturelle de l'aquifère.

De la même façon, les variations de pH de l'aquifère Ilaló sont très faibles, et de manière identique à l'aquifère Chiche, elles ne sont pas liées à la variation de la CE (Annexe 5A).

Nous avons comparé les variations de pH dans l'aquifère Chiche avec celles de l'aquifère Ilaló afin de voir si les variations sont en phase. La Figure 4.39 montre que les mouvements de pH entre l'Ilaló et le Chiche nord sont synchrones, mais, cela n'a pas été observé avec le Chiche sud (Figure 4.40). Ces résultats indiquent qu'il peut exister une connexion entre l'aquifère Chiche nord et l'aquifère Ilaló, et la variabilité de pH observée pourrait affecter ces deux aquifères.

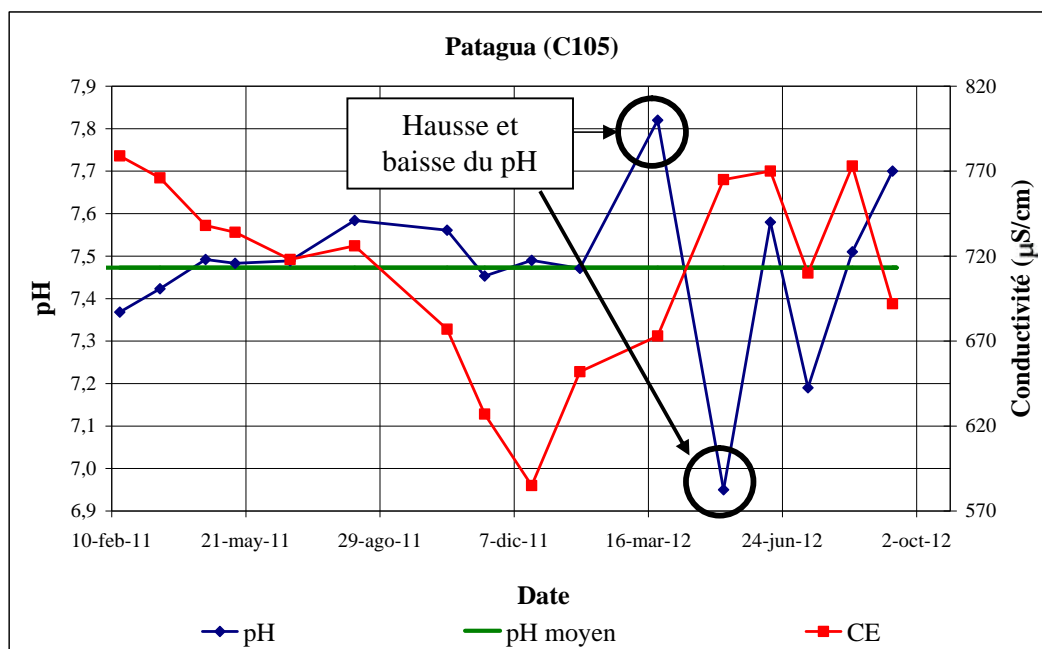


Figure 4.38. Variation temporelle du pH sur le forage Patagua dans l'aquifère Chiche nord entre février 2011 et octobre 2012 comparée à celle de la CE du même forage.

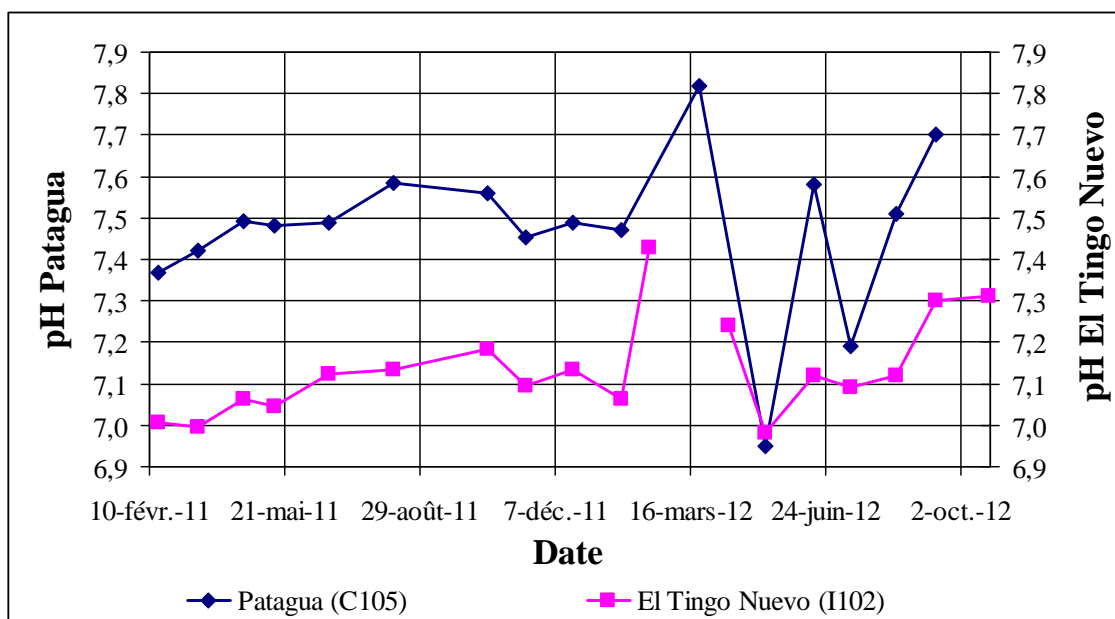


Figure 4.39. Variation de pH entre l'aquifère Chiche nord (Patagua) et Ilaló (El Tingo Nuevo).

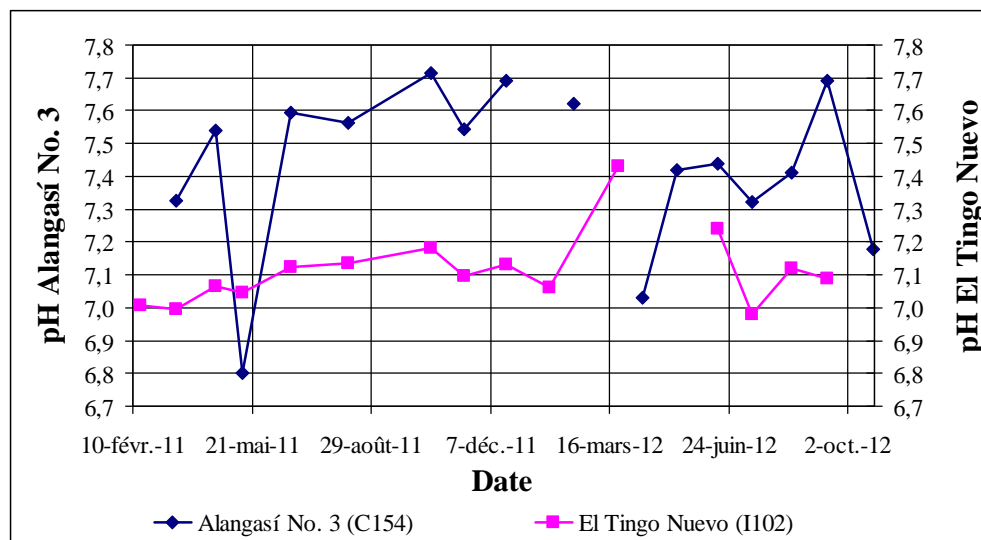


Figure 4.40. Variation de pH entre l'aquifère Chiche sud (Alangasí No. 3) et Ilaló (El Tingo Nuevo).

Pour la température de l'eau des forages, comme indiqué dans le chapitre 3, on dispose d'une part, des températures mesurées manuellement dans 23 forages au pas de temps mensuel (7 sur l'aquifère Chiche nord, 6 sur l'aquifère Chiche sud, 5 sur l'aquifère Ilaló et 5 forages mélangés) et d'autre part des températures des sondes Divers sur 6 forages. Les mesures ont ainsi pu être comparées.

Les variations de température mesurées manuellement ont montré des écarts maximum d'un mois sur l'autre de 3 °C dans l'aquifère Chiche nord et 2 °C dans l'aquifère Chiche sud, sur la période février 2011 à octobre 2012. Ces variations ne suivent pas celles de la piézométrie (Figure 4.41) ou du pH (Figure 4.42 et Annexe 5A). Nos données montrent que dans l'aquifère Chiche, la conductivité est indépendante de la température (Figure 4.43 et Annexe 5A).

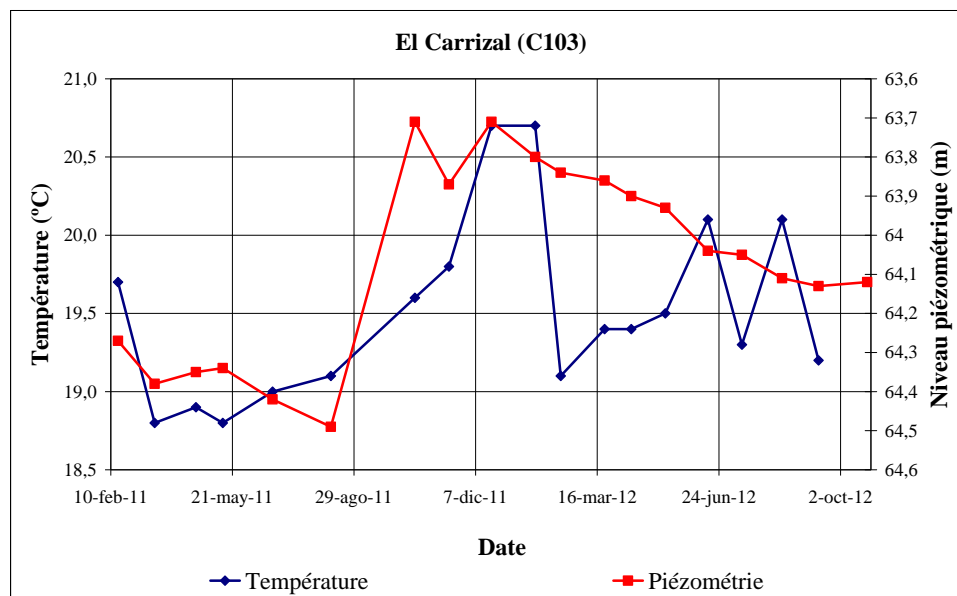


Figure 4.41. Variation de la température dans le forage El Carrizal de l'aquifère Chiche nord du février 2011 à octobre 2012, comparée à celle des niveaux piézométriques.

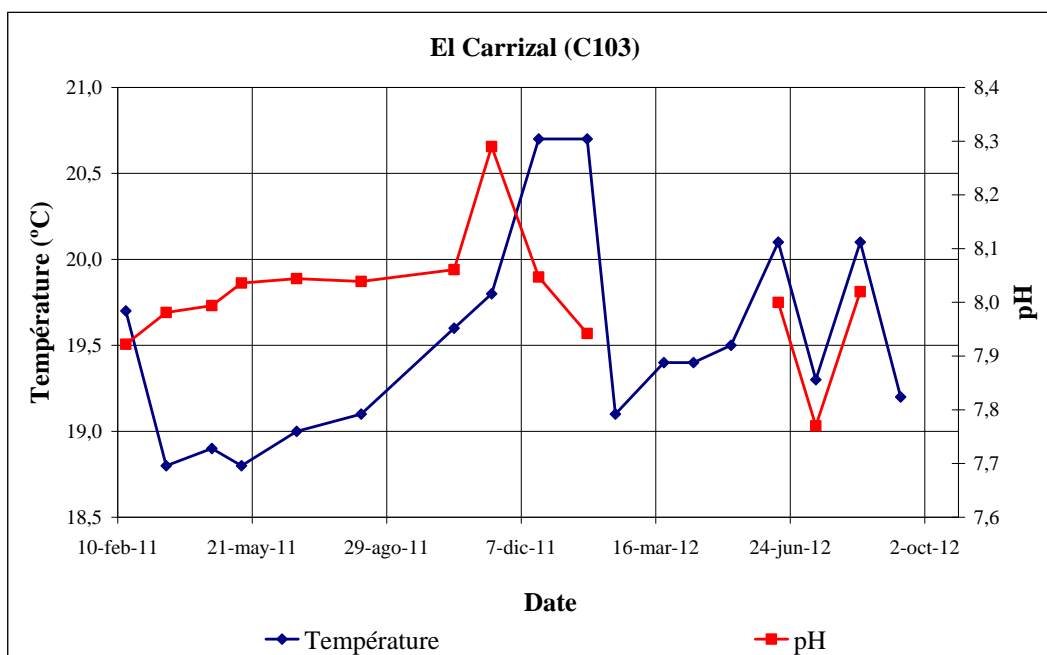


Figure 4.42. Variation de la température dans le forage El Carrizal de l'aquifère Chiche nord comparée à celle du pH.

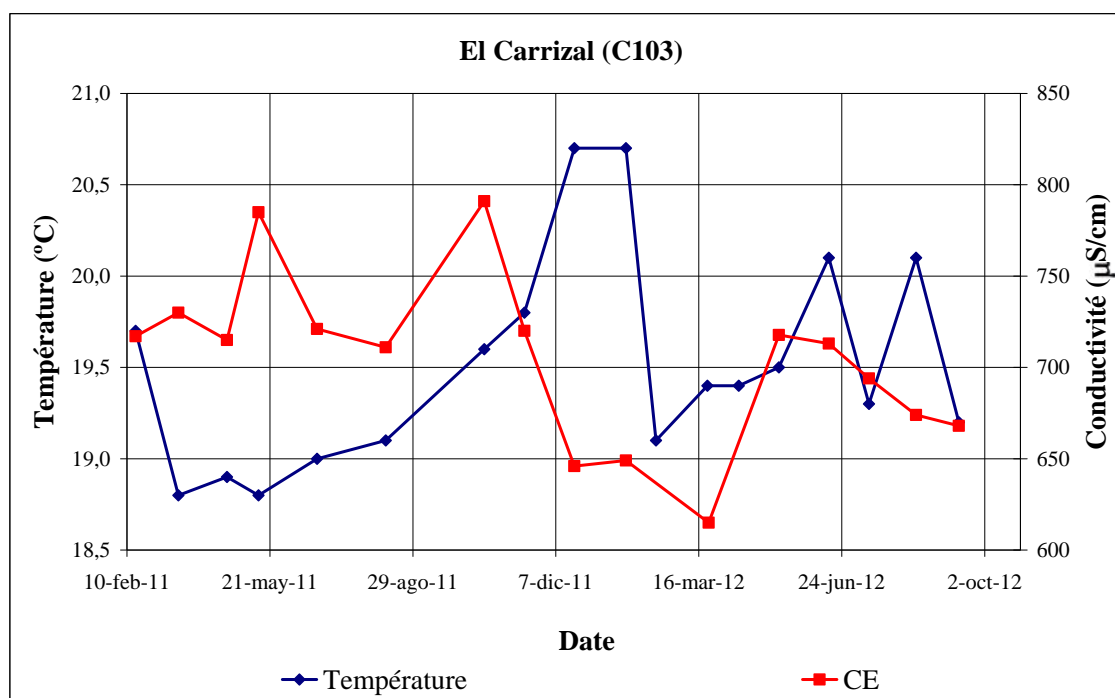


Figure 4.43. Variation de la température dans le forage El Carrizal de l'aquifère Chiche nord comparée à celle de la CE.

Les données des divers montrent de très faibles variations de température sur la période de mesures, par exemple sur le forage El Carrizal, la température varie pour la période décembre 2011 à octobre 2012 de 0,15 °C (Annexe 5A) qui est inférieure à la précision de mesure de température de la sonde (0,2 °C) et donc, on peut considérer que la température de l'aquifère est constante du moins sur la période de mesure. On a observé les mêmes faibles variations dans les Divers positionnés dans les forages de l'aquifère Chiche sud (Annexe 5A).

Les comparaisons entre les températures de l'eau mesurées manuellement et celles des Divers montrent des différences très importantes (Figure 4.44, exemple du forage El Carrizal C103). C'est pourquoi on a repris les températures de l'eau que nous avons mesurées à l'aide du thermomètre incorporé au pH-mètre pour les comparer avec les températures ambiantes mesurées au même moment, pour trouver d'où vient l'anomalie. La Figure 4.45 montre la relation très proche entre la température de l'eau d'un forage mesurée manuellement et celle de l'atmosphère.

On a procédé de manière identique avec la température enregistrée par le Baro-Diver La Primavera qui nous permet de faire une comparaison plus fine. En sachant que les températures à El Carrizal ont été mesurées à peu près chaque fois entre 10h30 et 12h00. La Figure 4.46 montre que ces températures n'ont pas les mêmes magnitudes, mais gardent une tendance similaire.

Nous avons ainsi comparé les deux températures ambiantes ponctuelles (manuelles et Baro-Diver) avec la moyenne mensuelle obtenue à partir des données Baro-Diver (Figure 4.46 ligne noire). Le résultat montre une tendance différente par rapport à celle des températures ponctuelles. Ce qui nous permet de dire que ce n'est pas la température ambiante qui influence la température de l'aquifère et que probablement nos températures de l'eau mesurées manuellement sont complètement biaisées. Afin de connaître le temps qui a été nécessaire pour que la température ambiante influence la température de l'eau prélevée dans le forage, on a fait un calcul de transfert de chaleur dont les équations et la démonstration sont développées dans l'Annexe 5A. On montre ainsi qu'il suffit de 11 minutes de contact entre eau et atmosphère au sol pour biaiser nos mesures de température de l'eau de l'aquifère. Pour nos analyses suivantes, seules les températures des Divers seront utilisées.

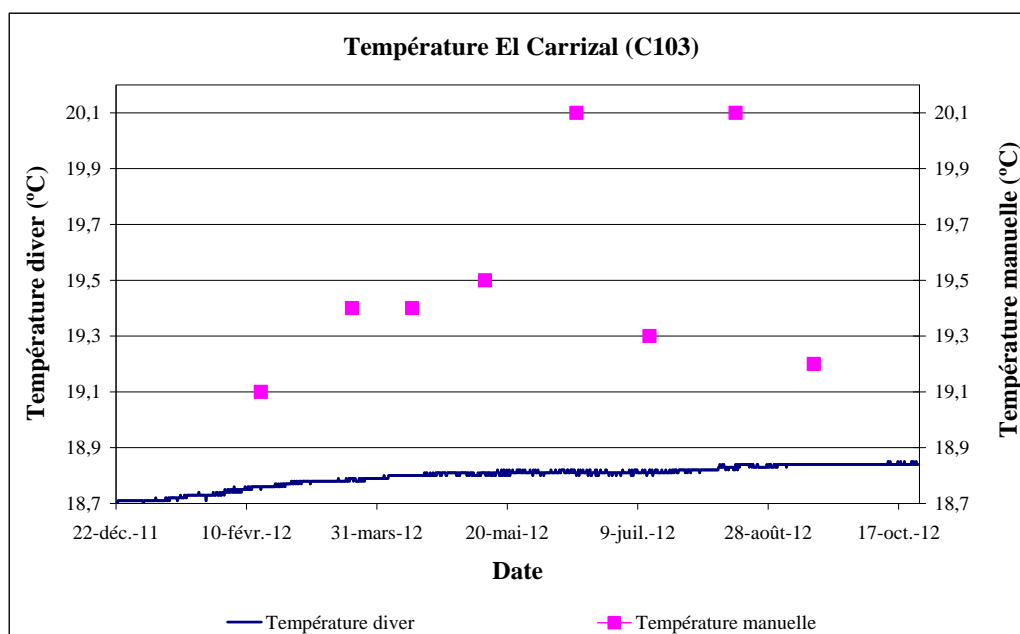


Figure 4.44. Variation de la température dans le forage El Carrizal du décembre 2011 à octobre 2012. Comparaison entre diver (en bleu) et mesures manuelles (en rose).

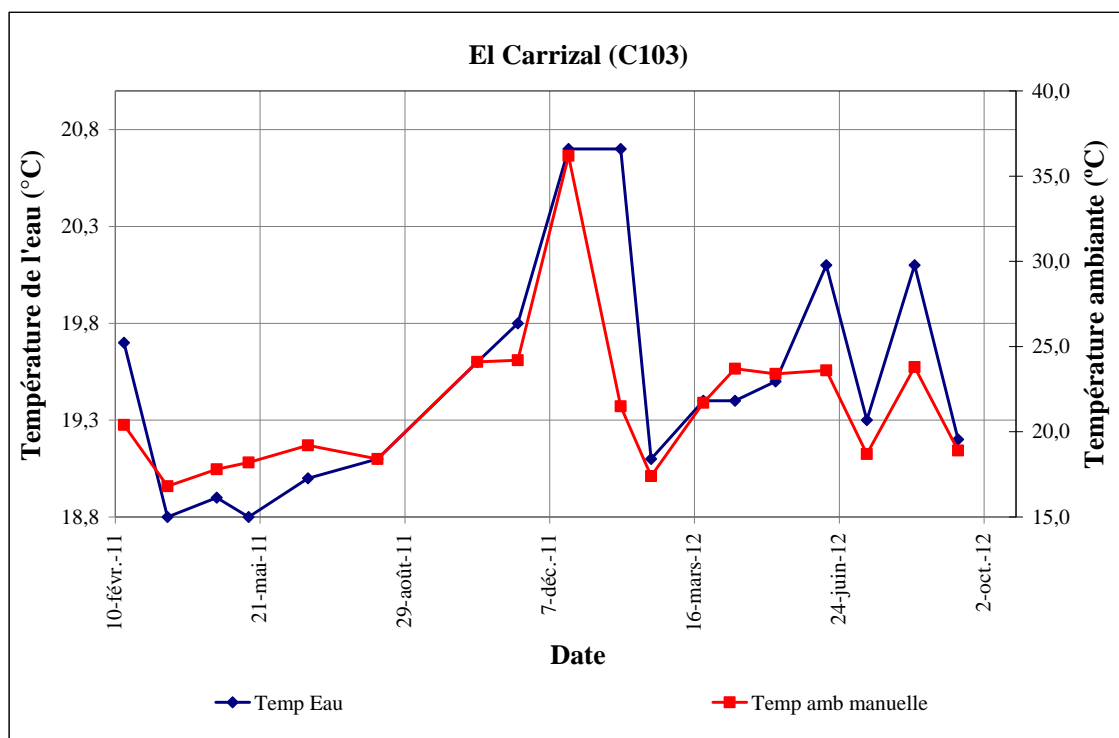


Figure 4.45. Température de l'eau dans le forage El Carrizal comparée avec la température ambiante mesurée au même temps.

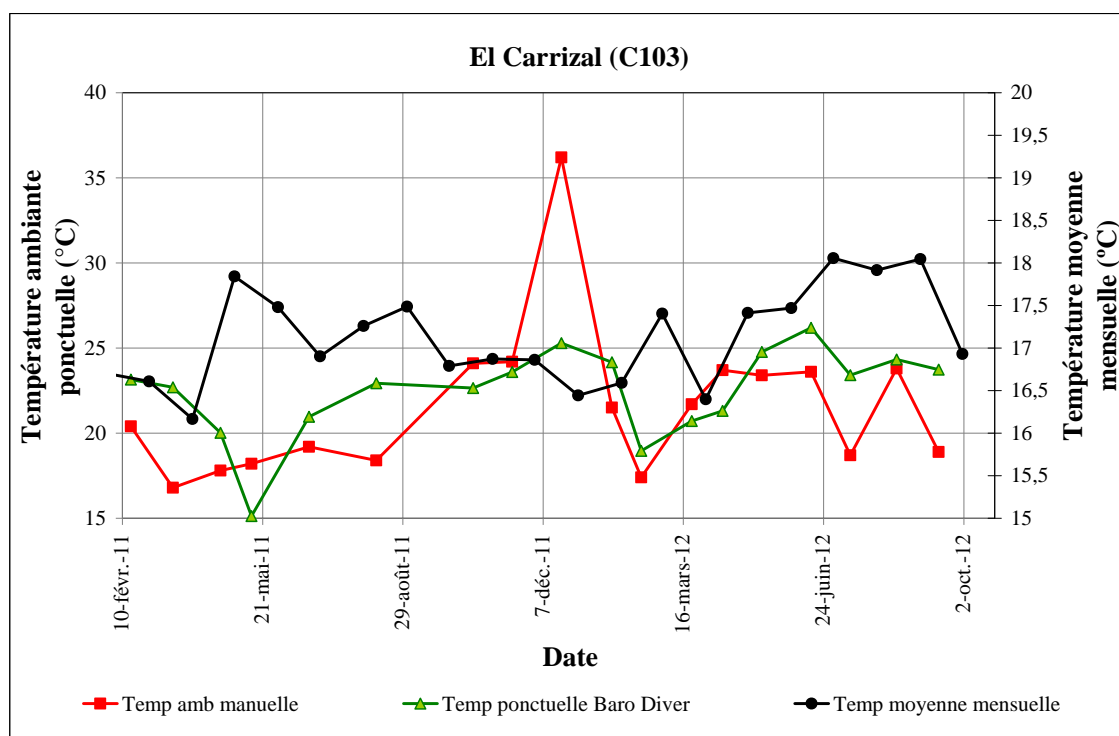


Figure 4.46. Comparaison entre les températures ambiante : mesurées manuellement (rouge), par le Baro-Diver (vert) et la moyenne mensuelle de cette température (noir).

Dans le cas de l'aquifère Ilaló, les mesures de température sur les eaux ont été faites dans leur quasi-totalité directement dans les forages, donc sans biais. Les variations de

température sur ces forages sont très faibles à l'exception de quelques points (pour le cas de El Tingo Nuevo, 4 points sont en déviation par rapport à la moyenne, Figure 4.47), d'où 2 sont synchrones avec les autres forages de l'aquifère Ilaló où l'on dispose de l'information (Figure 4.48). Dans cet aquifère la température ne montre pas, non plus, une relation flagrante avec la CE (Figure 4.47). Sur la Figure 4.49 la température de l'eau du forage El Tingo Nuevo et la température ambiante sont présentées.

Les données de novembre 2011, février 2011 et mars 2012 coïncident avec une température ambiante plus basse, il peut s'agir de mesures biaisées (Figure 4.47). Les points de février 2011 et mars 2012 sont synchrones avec les autres forages de l'Ilaló, et montrent une relation avec la CE (Figure 4.47). La CE qui a été prise dans des conditions de température ambiante plus basse ont pu être influencées aussi. Pendant le temps des mesures l'échantillon s'est possiblement refroidit, processus amplifié par les mouvements de mélange avec les sondes dans le récipient pour « uniformiser », entraînant une baisse de la CE dans le même temps.

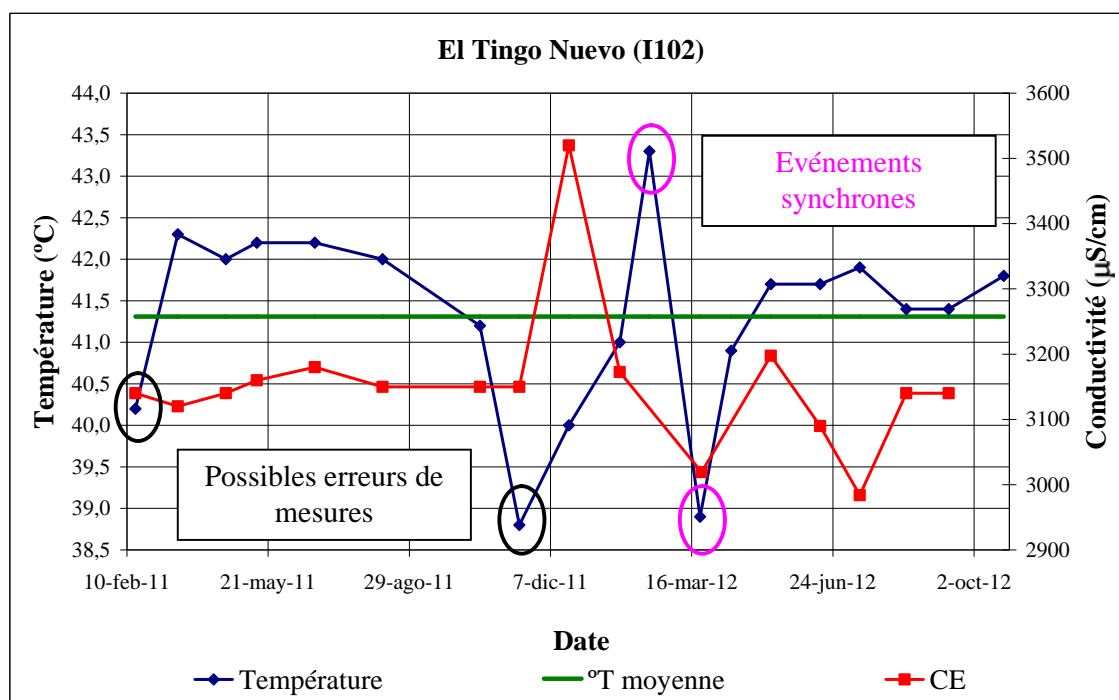


Figure 4.47. Variation de température dans le forage El Tingo Nuevo de l'aquifère Ilaló du février 2011 à octobre 2012, comparée avec la CE.

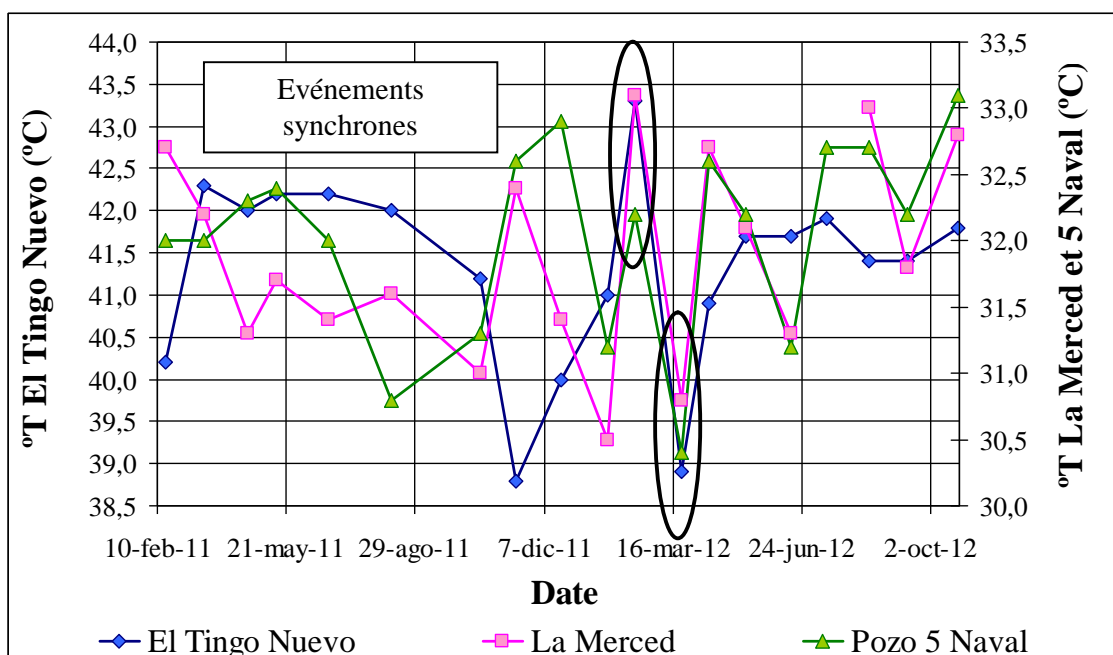


Figure 4.48. Événements synchrones des hausses et baisses de température sur l'aquifère Ilaló.

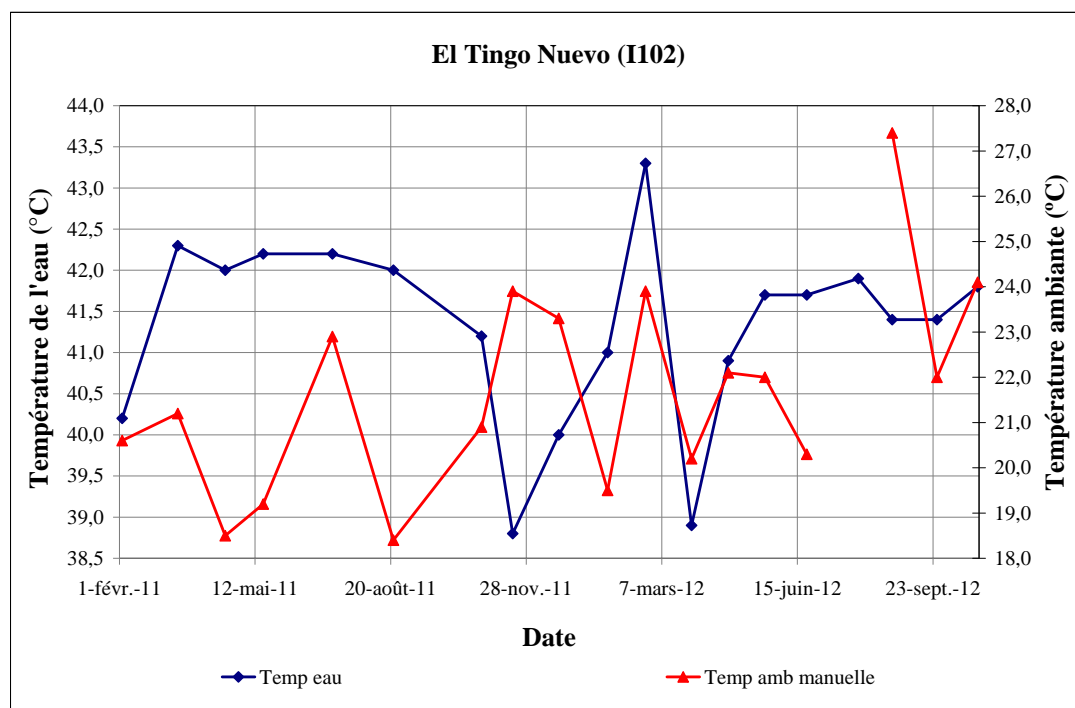


Figure 4.49. Comparaison entre la température de l'eau mesurée à El Tingo Nuevo et la température ambiante manuelle mesurée au même temps.

Les valeurs d'Eh, dans l'aquifère Chiche nord, Chiche sud et l'aquifère Ilaló ont une relation négative avec le pH (Figure 4.50 et voir Annexe 5A). Cela est lié à l'équilibration stœchiométrique des couples redox qui fait très souvent intervenir des ions H^+ et de nombreux couples redox sont aussi des couples acide-base.

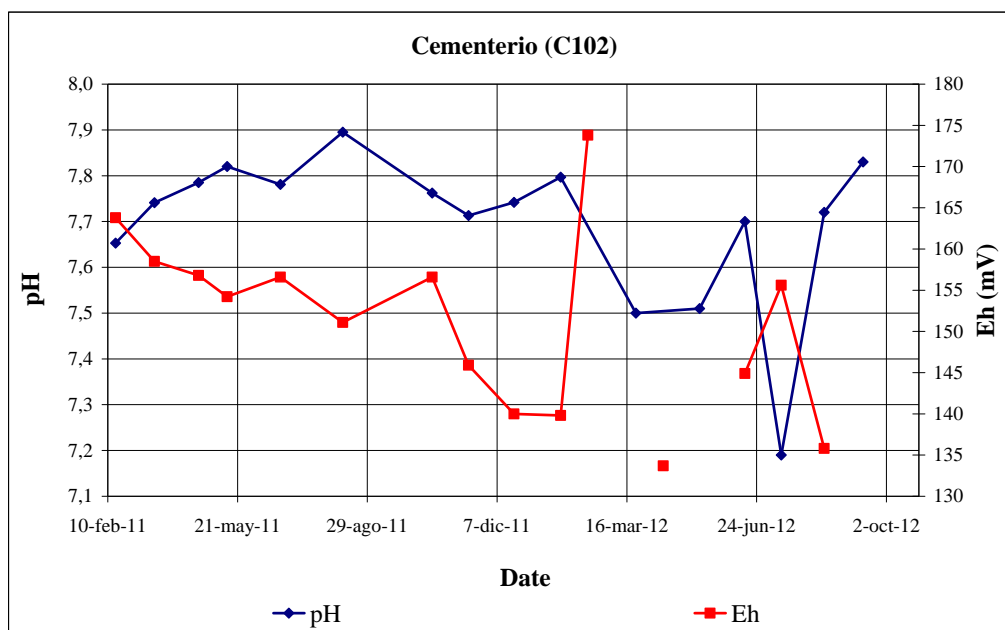


Figure 4.50. Variation de l'Eh dans le forage Cementerio de l'aquifère Chiche nord du février 2011 à octobre 2012, comparée à celle du pH.

4.2.2 VARIATION SPATIALE DES PARAMÈTRES PHYSIQUES DE L'EAU

Les conductivités dans l'aquifère Chiche se situent entre 140 et 780 $\mu\text{S}/\text{cm}$, les valeurs de températures varient entre 18,8 et 21,4 $^{\circ}\text{C}$ et celles du pH varient entre 7,4 et 8,3, les Eh varient entre 121 et 171 mV. Par contre les forages ou sources qui captent la Formation Ilaló ont des conductivités plus fortes entre 880 et 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec des températures variant entre 31,9 et 41,3 $^{\circ}\text{C}$, liées au géothermalisme, des valeurs de pH un peu plus neutres entre 6,8 et 7,4, et des valeurs de potentiel redox entre 169 et 208 mV qui bien que plus élevées montrent des conditions d'oxydoréduction transitoires comme pour l'aquifère Chiche (voir section 4.2.4.2.5 pour plus de détails). Les forages qui captent les deux formations, montrent des valeurs intermédiaires pour ces paramètres, avec une plage de variations assez large qui dépend à priori des pourcentages de mélanges entre les eaux des deux aquifères. Par exemple : les CE ont été mesurées entre 425 et 1275 $\mu\text{S}/\text{cm}$, les valeurs de pH se trouvent entre 7,4 et 8,8, les températures entre 20,2 et 26,9 $^{\circ}\text{C}$ et les Eh entre 83 et 174 mV.

On présente ici des cartes spatialisées de la CE et de la température moyenne mettant en évidence leur distribution spatiale dans le bassin. En plus de nos données, on a pris en compte également les données récupérées en 2010 par la SENAGUA. D'une façon globale, les CE les plus hautes se trouvent autour du volcan (Figure 4.51, carrés) dont les valeurs les plus élevées se situent côté sud (1075 à 3136 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Dans la Vallée de Los Chillos, les conductivités sont basses (entre 141 et 409 $\mu\text{S}/\text{cm}$) à l'exception d'un point qui, selon la SENAGUA, présente une valeur assez élevée (974 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la source parque écologique (S576), sur la Figure 4.51). Cette source pourrait capter des eaux de la formation volcanique Pasochoa, malheureusement, on ne dispose pas d'information sur sa lithologie pour expliquer cette valeur ni l'accès à d'autre point proches pour la confirmer. Au nord, la distribution de la conductivité est un peu plus hétérogène, les forages qui sont les plus proches du volcan montrent des conductivités entre 700 et 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mais il y a des points, au centre, qui ont des valeurs plus faibles (Cementerio (C102) 599 $\mu\text{S}/\text{cm}$, et La Primavera piézomètre (M303_1) 590 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Plus au

nord, les valeurs de CE diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du volcan pour arriver aux points de décharge que constituent les sources Las Chirimoyas 1, 2 et 3 (C201, C202 et C203) avec des valeurs autour de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette distribution suggère qu'il peut exister des échanges entre l'aquifère Chiche nord et l'aquifère Ilaló, connectés possiblement par des failles locales présentes dans la Formation Chiche (voir section 2.2.1.2.3). Les sources au nord, Las Chirimoyas, qui présentent des valeurs plus basses captent probablement l'aquifère Chiche seulement, de la même façon que les autres forages qui ont des CE similaires (Cementerio et La Primavera piézomètre). Ces hypothèses sont confirmées par les isotopes radioactifs (voir chapitre 4.3). Les forages qui captent les deux formations et qui sont près du volcan (VCH 1 M301 et El Nacional M302), signalés sur la Figure 4.51, ont des valeurs de CE de plus de 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ suggérant un fort apport de l'aquifère Ilaló.

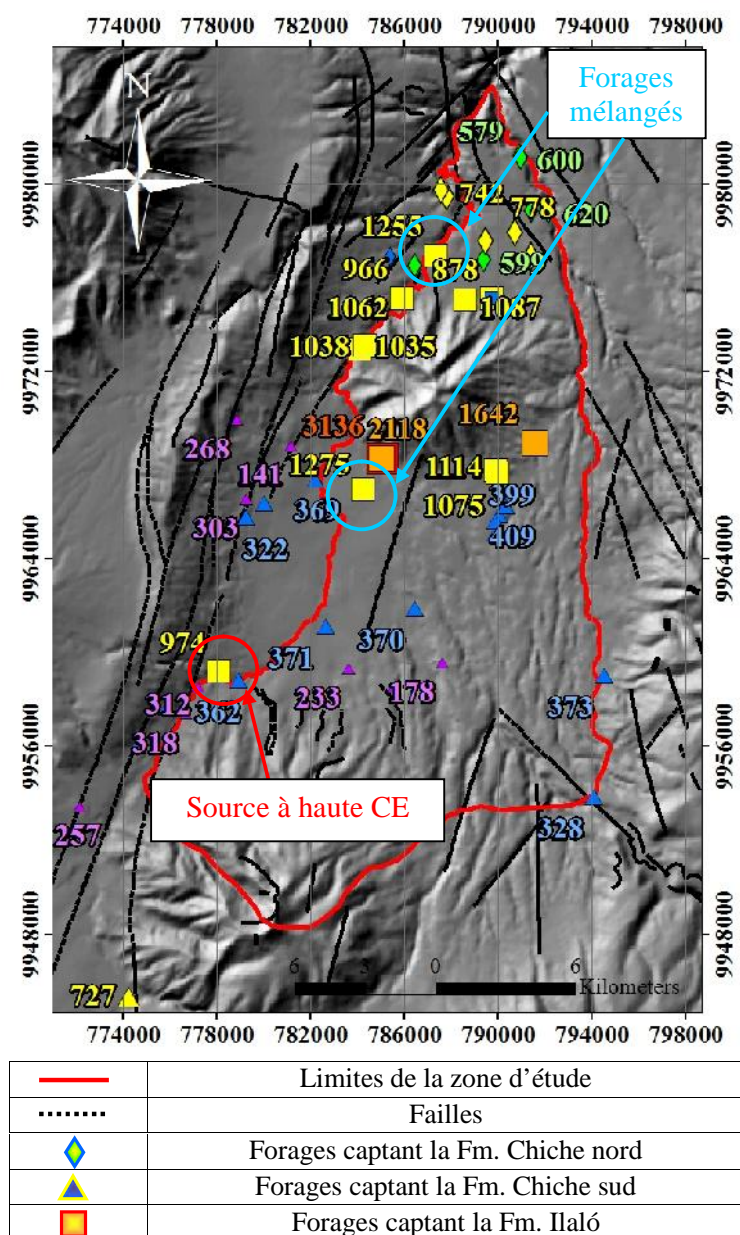


Figure 4.51. Variation spatiale de la conductivité.

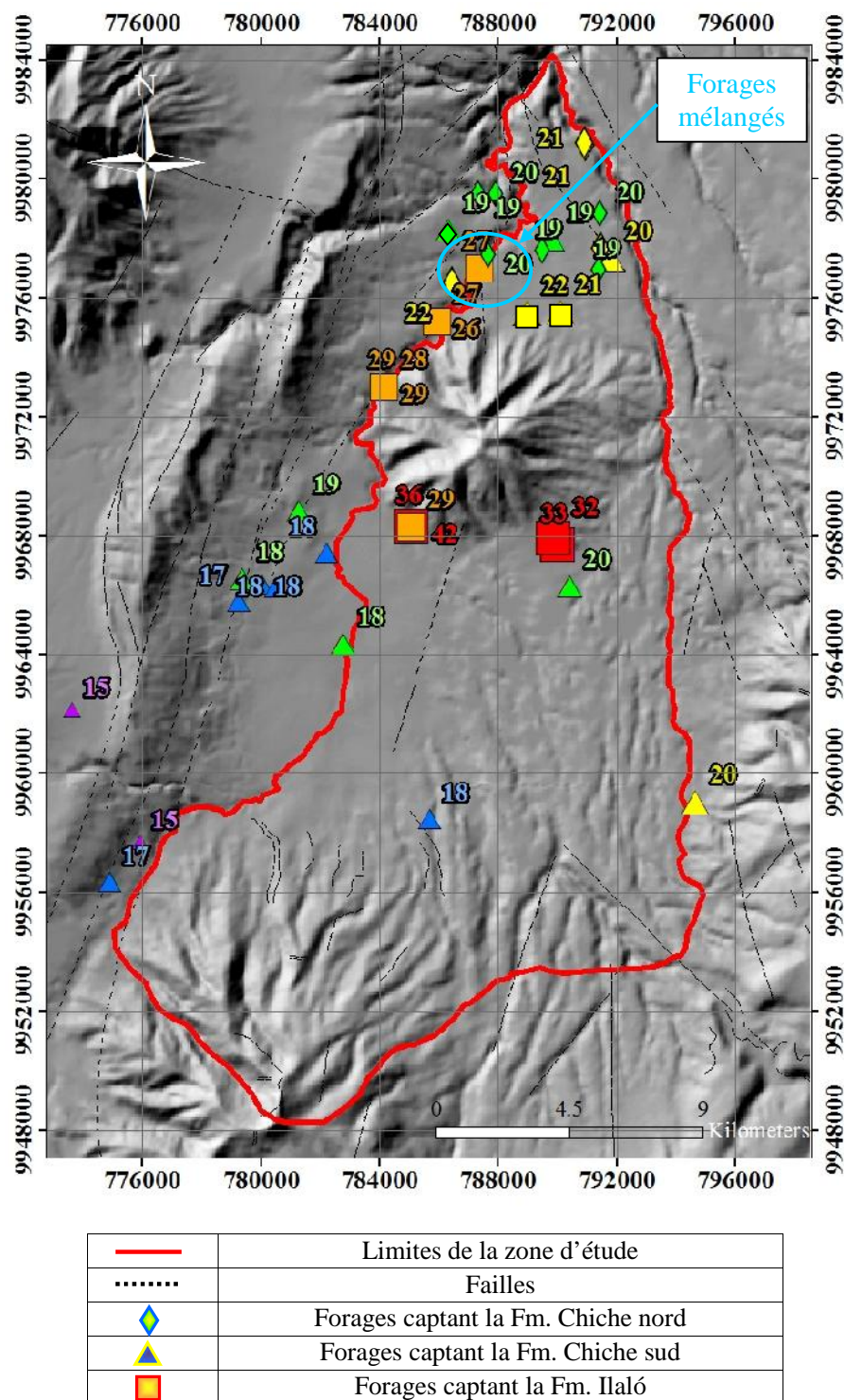


Figure 4.52. Variation spatiale de la température.

La température suit un schéma spatial identique à la CE, les valeurs les plus hautes sont autour du volcan (entre 32 et 42 °C), et notamment dans la partie sud (Figure 4.52), probablement en liaison avec l'emplacement de la chambre magmatique. Pour l'aquifère Chiche, la distribution de la température, est liée à la position du forage par rapport au volcan, on note aussi que dans la zone sud les températures sont un peu plus basses (entre 15 et 18 °C près du volcan Pasochoa) et près du volcan Ilaló les températures montent jusqu'à 18 à 20 °C.

Au nord, les températures sont un peu plus élevées mais relativement uniforme, entre 19 et 21 °C. De la même façon les forages qui captent les deux formations Chiche et Ilaló montrent des valeurs de température intermédiaires entre les deux aquifères (entre 22 et 27 °C, forages signalés sur la Figure 4.52).

Pour documenter les différences entre les aquifères Chiche et Ilaló, des profils de conductivité ont été réalisés dans 8 forages, dont :

- un forage qui capte uniquement Ilaló: Rumihuayco 2 (I104),
- cinq qui captent uniquement la Fm. Chiche, un au sud dans la Vallée de Los Chillos : Lasallinos (C158) et quatre au nord, dans la Vallée de Tumbaco : El Carrizal (C103), Patagua (C105), Santa Rosa (C107), et le piézomètre La Primavera (M303_1) et
- deux forages mélangés : Rumihuayco 1 (M305) au pied du volcan et La Primavera 1A (M303_) à la Vallée de Tumbaco.

Les profondeurs des profils seront exprimées par rapport au niveau de la nappe. Le profil du forage Rumihuayco 2 de l'Ilaló représente une vision partielle de la variabilité de la CE par rapport à la profondeur, les mesures ont été faites seulement sur les premiers 30 m d'eau, avant que la sonde soit bloquée, les conductivités enregistrées se situent entre 920 et 970 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les 4 forages de la Formation Chiche sur la partie nord ont des valeurs de conductivité stables ou diminuant avec la profondeur, entre 520 et 640 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le forage de la Formation Chiche au sud (Lasallinos C158) montre une conductivité plus basse, 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ne variant que peu avec la profondeur essentiellement sur les 10 premiers m d'eau. Le forage dont les eaux sont mixtes, Rumihuayco 1, montre des valeurs en haut de la nappe de 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$, puis celle-ci augmente avec la profondeur, elle passe lentement à 650 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 70 m d'eau puis, la conductivité arrive à 970 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à partir de 90 m, valeur quasi-constante de conductivité et identique aux valeurs trouvées dans le forage Rumihuayco 2, vu précédemment, localisé à moins de 5 m de distance (Figure 4.53). Le forage La Primavera (M303) n'a pu être mesuré qu'en haut du profil parce qu'il est équipé d'une pompe, mais, à côté de ce forage (à moins de 10 m de distance) il y a deux piézomètres (La Primavera piézomètre M303_1 et La Primavera 1A M303_2) qui ont montré systématiquement une légère augmentation de la conductivité avec la profondeur de 550 à 680 et de 380 à 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement (Figure 4.53). Selon la lithologie du forage de La Primavera 1 (M303, prof. 180 m), ce dernier après avoir traversé la formation Chiche arrive jusqu'à la Formation Ilaló (voir Figure 2.10). L'augmentation de la conductivité est notée à partir de 100 m, et la Formation Ilaló serait captée à partir de 110 m, malheureusement ces piézomètres n'arrivent pas à cette profondeur, ils ne captent pas la Fm. Ilaló, et on n'a pas vu de changement de conductivité plus marquée qui se rapprocherait des forages de Rumihuayco, ils ont plutôt des valeurs de CE proches de ceux observés dans le reste de l'aquifère Chiche.

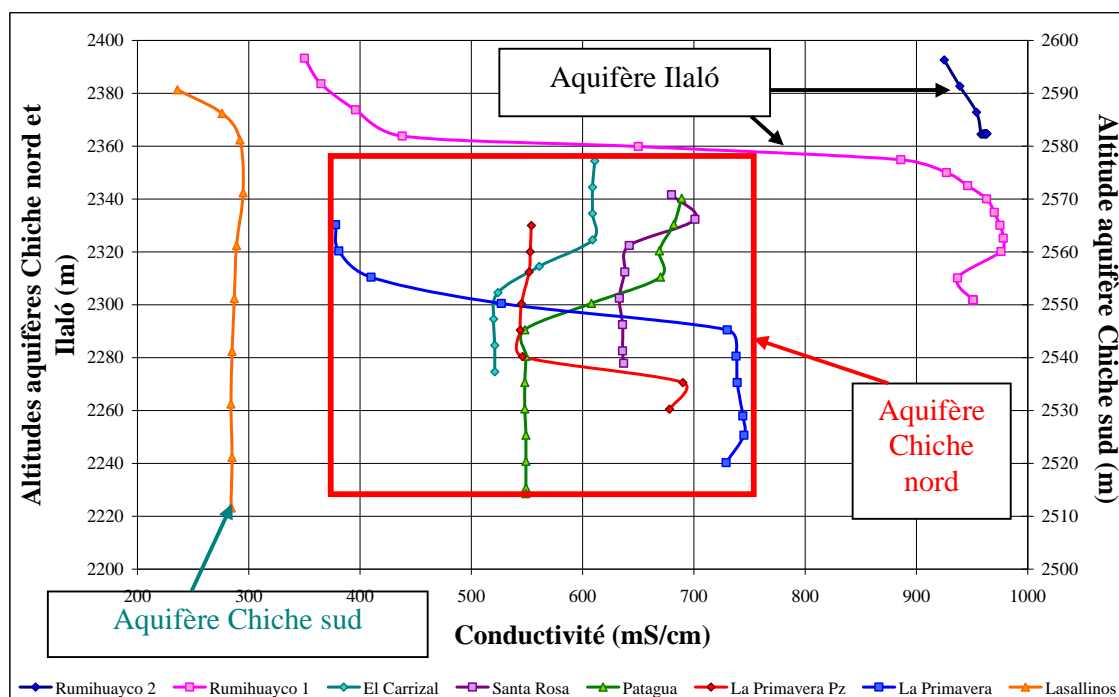


Figure 4.53. Profils de conductivité dans les forages de l'aquifère Chiche et l'aquifère Ilaló.

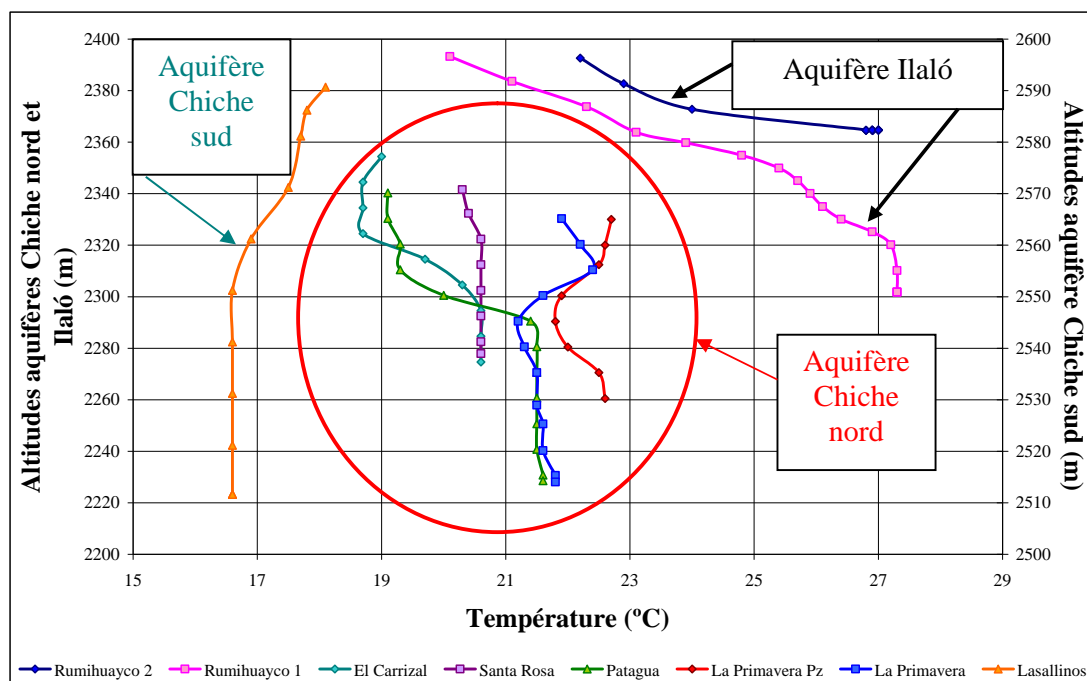


Figure 4.54. Profils verticaux de température dans les forages des aquifères Chiche et Ilaló.

La variabilité des profils de température a suggéré des différences entre les aquifères Ilaló et Chiche. Les forages qui captent la Formation Ilaló montrent des températures plus élevées que ceux captant la Formation Chiche (Figure 4.54). Comme pour la conductivité, le forage Lasallinos (C158) situé au Chiche sud, montre des valeurs de température plus basses que ceux situés au nord. Les deux piézomètres à côté de La Primavera (M303) ne montrent pas une augmentation de la température significative avec la profondeur, ils sont plutôt en

accord avec le reste des points qui captent la Formation Chiche. L'hypothèse de mélange dans ces forages a été validée en utilisant les analyses d'ions majeurs et les éléments traces.

4.2.3 INTERPRETATIONS DE LA CHIMIE DES IONS MAJEURS

Le suivi temporel des ions majeurs dans les forages et sources des aquifères Chiche (5 forages et 4 sources au Chiche nord et 9 forages au Chiche sud), et Ilaló (4 forages et 5 sources) et les 4 forages mélangés, a montré des variations très faibles (données en Annexe 3H, exemple sur le Tableau 4.7). C'est pourquoi on s'est permis de représenter la teneur de chaque ion d'un forage donné par la moyenne de ses valeurs au cours de l'étude.

Tableau 4.7. Exemple de la variation temporelle des ions majeurs à la source de l'aquifère Chiche nord Las Chirimoyas 1 (C201). Les données sont exprimées en méq/l. Les données en rouge sont les analyses pour cette source faites à Hydrosociences Montpellier. n.m. = non mesuré.

Date	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Bilan
01/10/2003	0,05	0,33	5,24	0,50	1,15	0,88	0,16	4,01	1,33
02/12/2003	0,29	0,35	6,00	0,36	1,19	0,77	0,15	4,88	0,35
21/07/2004	0,03	0,45	5,46	0,76	1,32	0,91	0,31	4,02	2,29
01/09/2006	0,17	0,46	5,47	0,79	1,68	0,89	0,19	4,42	4,12
20/04/2009	0,04	0,44	5,59	0,46	1,48	0,70	0,21	3,73	6,63
19/04/2010	0,16	0,34	5,66	0,43	1,25	0,85	0,19	4,30	0,13
05/05/2010	n.m.	0,21	5,45	0,30	1,31	0,82	0,23	3,99	6,21
23/03/2011	0,11	0,22	5,39	0,30	1,47	0,89	0,08	3,19	6,63
01/10/2003	0,23	0,35	5,73	0,56	1,30	0,88	0,17	4,68	2,12
Moyenne	0,12	0,35	5,55	0,50	1,35	0,84	0,19	4,14	

A partir de ces valeurs d'ions majeurs, des diagrammes de Piper ont été tracés. Les eaux des forages de l'aquifère Chiche de la Vallée de Tumbaco et Los Chillos ont le même faciès bicarbonaté qui va d'un pôle magnésien à un pôle sodique, les eaux de sources par contre sont un peu plus bicarbonatées sodiques (Figure 4.55). Ces différences entre forages et sources ne sont pas liées à la distribution spatiale du Na⁺, où la position par rapport au volcan (Figure 4.56). Une teneur en sodium plus élevée dans les sources indique que soit le temps de résidence est plus long, ce qui permet des échanges plus importants de bases entre le Ca²⁺ et le Na⁺, ou bien que les sources pourraient capter des eaux profondes, par le biais des fractures, qui auraient des teneurs en Na⁺ plus importantes que celles de l'aquifère Chiche.

Tableau 4.8. Cations prédominants sur l'aquifère Chiche et l'aquifère Ilaló exprimé en % de TZ+ (total des cations)

	$\frac{Na^+}{TZ+}$	$\frac{Mg^{2+}}{TZ+}$	$\frac{Ca^{2+}}{TZ+}$	$\frac{K^+}{TZ+}$	$\frac{Na^++K^+}{TZ+}$	$\frac{Ca^{2+}+Mg^{2+}}{TZ+}$	$\frac{Na^++Mg^{2+}}{TZ+}$	$\frac{Ca^{2+}+K^+}{TZ+}$
Chiche nord	0,53	0,29	0,15	0,03	0,57	0,43	0,82	0,18
Chiche sud	0,28	0,48	0,23	0,02	0,29	0,71	0,75	0,25
Ilaló	0,51	0,35	0,12	0,03	0,54	0,46	0,86	0,14
Mélange	0,49	0,37	0,12	0,02	0,51	0,49	0,86	0,14

L'aquifère Ilaló a un faciès également bicarbonaté qui va d'un pôle magnésien à un pôle sodique (Figure 4.57), de plus, les chlorures ne sont pas négligeables et ils correspondent au deuxième anion le plus important dans cet aquifère.

Tableau 4.9. Anions prédominants dans l'aquifère Chiche et l'aquifère Ilaló exprimés en % de TZ- (total des anions).

	$\frac{\text{HCO}_3^-}{\text{TZ-}}$	$\frac{\text{SO}_4^{2-}}{\text{TZ-}}$	$\frac{\text{Cl}^-}{\text{TZ-}}$	$\frac{\text{NO}_3^-}{\text{TZ-}}$	$\frac{\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}}{\text{TZ-}}$	$\frac{\text{HCO}_3^- + \text{Cl}^-}{\text{TZ-}}$
Chiche nord	0,85	0,06	0,07	0,02	0,92	0,92
Chiche sud	0,92	0,04	0,04	0,00	0,95	0,96
Ilaló	0,82	0,02	0,16	0,00	0,84	0,97
Mélange	0,85	0,03	0,13	0,00	0,87	0,97

Diagramme de Piper Aquifère Chiche

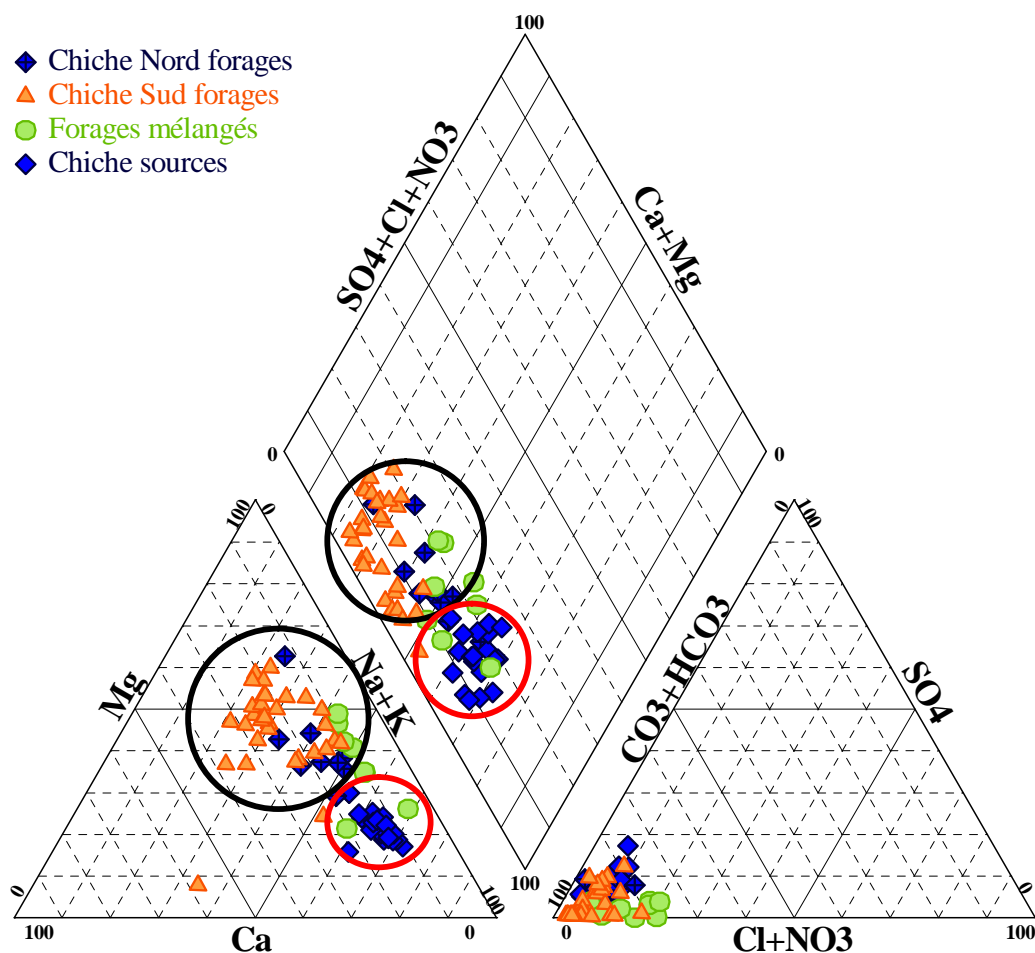


Figure 4.55. Diagramme de Piper pour l'aquifère Chiche, pour la position géographique ou la caractéristique particulière des points voir la légende.

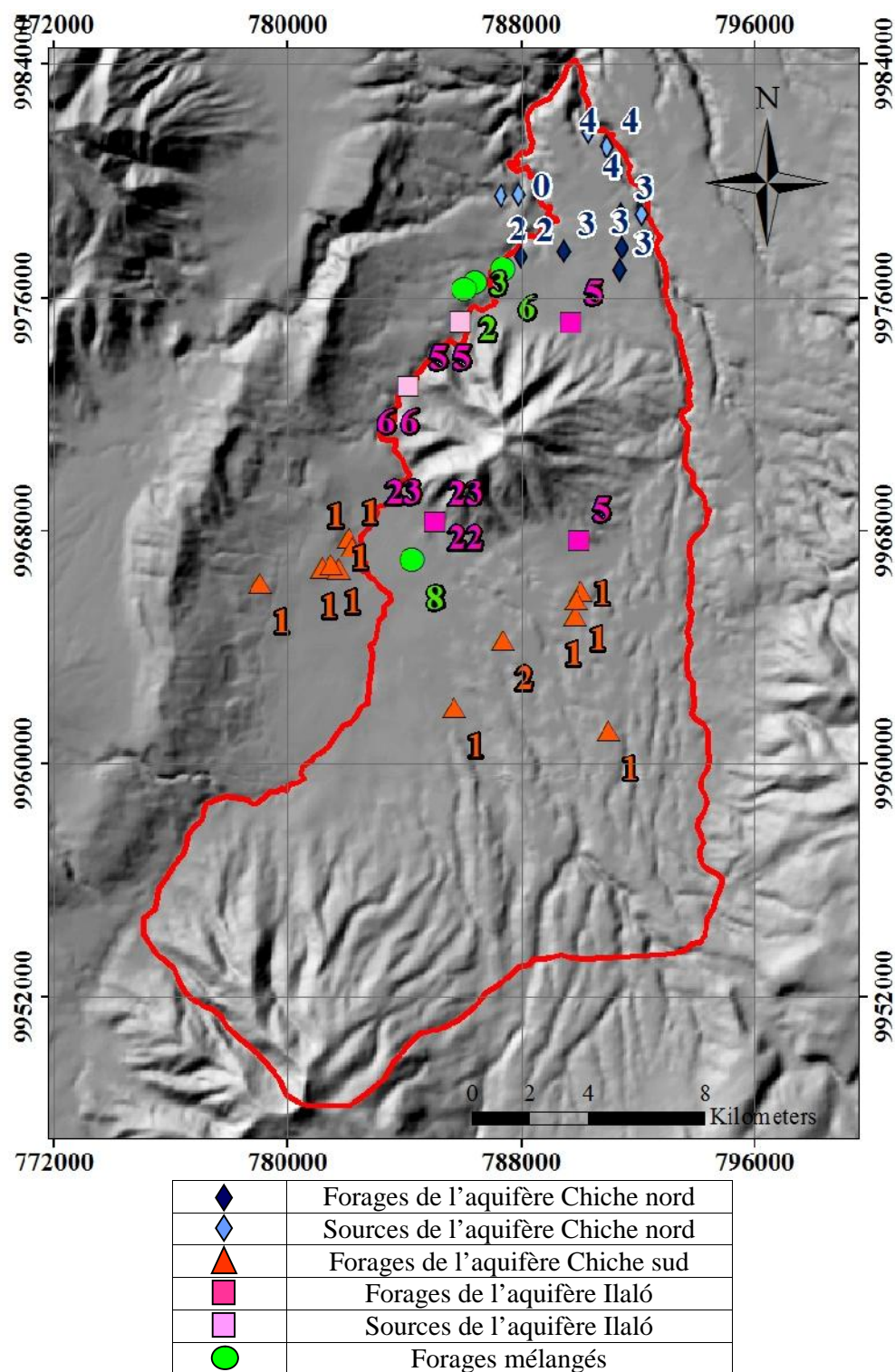


Figure 4.56. Distribution spatiale des teneurs en Na^+ .

Le sodium est le cation prédominant dans l'aquifère Chiche nord (53% du total des cations TZ^+), par contre au sud, le magnésium prédomine (48%). Pour l'aquifère Ilaló le sodium est aussi le cation prédominant (51%). Pour les forages qui captent les deux aquifères, le cation Na^+ est le plus important (Tableau 4.8). Le rapport $\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+}$ sur TZ^+ a montré que ces deux cations contribuent à 82% du bilan cationique dans l'aquifère Chiche nord. Pour

l'aquifère Chiche sud, ce pourcentage reste quand même très élevé environ 75%, mais il y a un apport un peu plus important en Ca^{2+} . Pour l'aquifère Ilaló, le rapport $\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+}$ arrive à 86%, pourcentage identique que celui pour les forages mélangés.

L'anion HCO_3^- est prédominant : il contribue à 85% du total des anions (TZ-) pour l'aquifère Chiche nord, 92% pour la zone Chiche sud, 82% pour l'aquifère Ilaló et 85% pour les forages mélangés (Tableau 4.9). Le Cl^- représente 7% des anions dans l'aquifère Chiche nord, 4% au Chiche sud et des apports beaucoup plus importants, 16%, pour l'aquifère Ilaló et 13% pour les forages mélangés. Le SO_4^{2-} contribue pour 6% des anions pour l'aquifère Chiche nord, au sud 4%, pour l'aquifère Ilaló à 2% et 3% pour les forages mélangés. Les NO_3^- ne sont présents que dans l'aquifère Chiche et seulement dans les sources Las Chirimoyas.

Diagramme de Piper Aquifère Ilaló

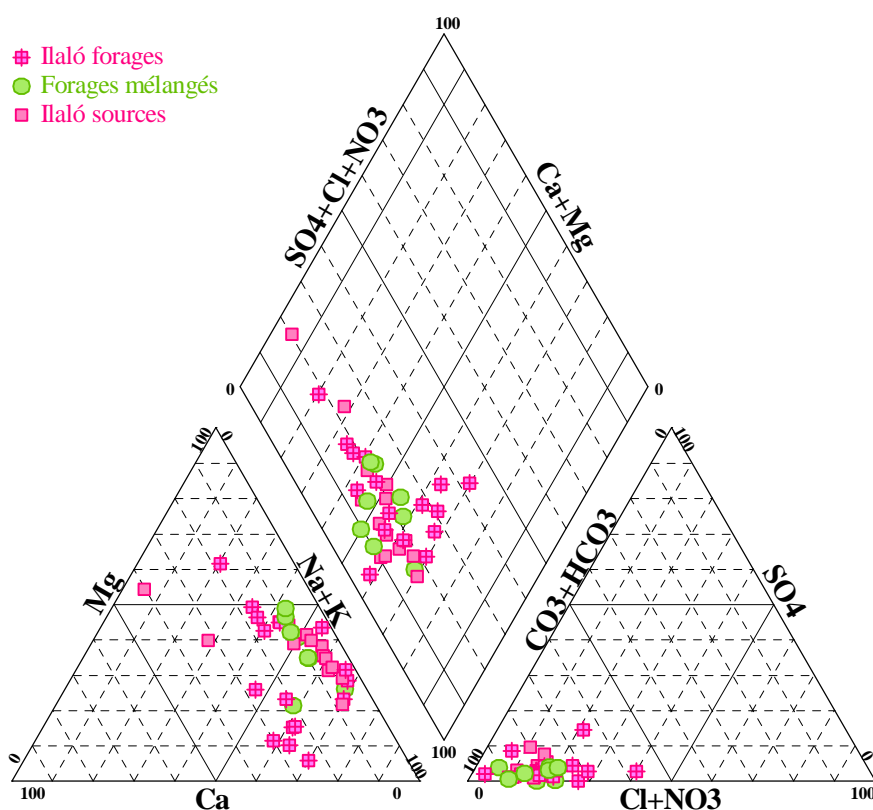


Figure 4.57. Diagramme de Piper pour l'aquifère Ilaló.

Les eaux de type bicarbonaté sodique ont été observées dans d'autres systèmes en milieu volcanique et volcano-sédimentaire ancien (Dall'Aglio et al. 1994, Smedley et al. 2005, Manganelli et al. 2007, Kebede et al. 2008, Foster 2012, Nicolli et al. 2012b) ou de volcanisme actif (Chapin et Dunbar 1995) et elles sont souvent observées dans des systèmes géothermaux contenant des gaz d'origine interne, fréquemment du CO_2 (Chiodini et al. 2001, López et al. 2012). D'après Minissale et al. (1997) le CO_2 pourrait modifier la composition chimique des eaux dans les aquifères confinés permettant des échanges entre les ions Ca^{2+} avec les ions Na^+ qui sont contenus dans les minéraux argileux, faisant évoluer les eaux vers le pôle $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$. Selon Bundschuh et al. (2012a), l'échange ionique peut être aussi lié au

temps de résidence de l'eau où le Na^+ de la phase solide est échangé avec Ca^{2+} et Mg^{2+} présents dans l'eau souterraine.

Dans l'aquifère Ilaló, les analyses minéralogiques de la formation géologique (Cornejo 1983) ont montré que les andésites-basaltiques sont constituées de 53% d'andésine, autant dans la matrice que dans les phénocristaux. Cette andésine contient 60% de plagioclase sodique (albite – $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) dans sa composition. Dans la composition minéralogique de ces roches ferromagnésiennes ont été aussi trouvés de l'olivine ($(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$), du pyroxène (augite – $(\text{Ca, Mg, Fe})_2(\text{Si, Al})\text{O}_6$, de l'hypersthène – $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$), de l'amphibole et des traces de serpentine ($(\text{Mg,Fe,Ni})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). En relation avec la présence de CO_2 dans cet aquifère (Figure 4.58), comme on l'a vu précédemment cela va favoriser les échanges de bases entre le Ca^{2+} et Na^+ (contenu dans le plagioclase sodique et les roches ferromagnésiennes) permettant le développement du faciès de l'eau observé, $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$.



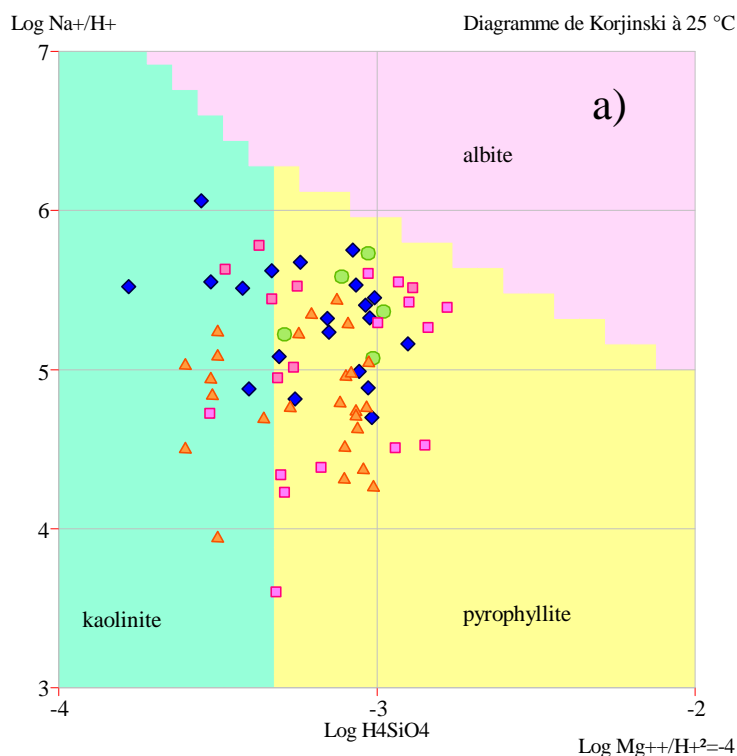
Figure 4.58. Dégazage du CO_2 dans le forage 5 Naval de l'aquifère Ilaló.

L'ion chlorure est un apport non négligeable sur le total des anions, pour les forages atteignant la Formation Ilaló. C'est un important constituant des « fluides hydrothermaux » (Chenevoy et Piboule 2007). On comprend par « fluide hydrothermal » tout fluide hydrique aux températures supérieures à 100°C , qui peut se présenter sous la forme, soit d'un liquide, soit d'une vapeur, qui d'ailleurs peut aussi avoir des molécules volatiles de très basse densité telles que CO_2 ou CH_4 (Chenevoy et Piboule 2007). Ce que l'on a mesuré dans les forages de l'aquifère Ilaló, n'est pas ce « fluide hydrothermal », comme tel, mais des eaux qui apparemment ont été en contact avec ce fluide, ce qui expliquerait la présence des chlorures dans les eaux de l'aquifère Ilaló.

Dans la Formation Chiche au nord, selon la description de Vera (1983), la matrice est composée de 60% de plagioclases, 10% de pyroxènes, 5% d'amphiboles pour les éléments les plus abondants, ce qui peut être considéré comme une sédimentation issue de la dégradation de roche de type andésite basaltique. Le même auteur signale que les grains ont des compositions aussi entre les andésites et les andésites basaltiques. Ces minéraux expliquent la prédominance des ions sodium et magnésium en relation avec la dissolution de la matrice.

Au sud, la présence du Mg^{2+} pourrait être expliquée aussi par la composition de la formation encaissante. On ne dispose pas d'analyses minéralogiques précises de la Formation Chiche au sud et il est difficile de déterminer la source exacte de cet élément dans les sédiments. La Formation Chiche sud est formée en grande partie par un énorme lahar produit par le Cotopaxi dont l'épaisseur varie du sud au nord en diminuant. Au sud son épaisseur serait de plus de 100 m et jusqu'à 200 m selon la lithologie du forage Pintag 1 et 2 (C162 et C163), mais au nord il atteindrait seulement 60 m selon la lithologie des forages Las Acacias et Santa Rosa pz (C101 et C107_1). La composition du lahar est principalement rhyolitique (Mothes et al. 1998), donc, riche en silice mais pauvre en fer et magnésium. Cependant, cette formation doit contenir, comme dans le nord, de la biotite, et surtout, de la cendre volcanique riche en obsidienne, probablement, contenant du magnésium qui expliquerait les concentrations élevées dans l'eau.

Ces interactions eau - roche à certaines températures peuvent être décrites par le diagramme d'activités d'aluminosilicates ou Diagramme de Korjinski qui montre l'équilibre entre l'eau et les minéraux silicatés. Pour le construire, on a choisi une température de référence qui va nous permettre de comparer les résultats de l'aquifère Chiche nord, sud et l'aquifère Ilaló, dans un diagramme unique. Les trois aquifères ont montré que leur produit final en équilibre avec l'eau est la kaolinite avec un passage vers la pyrophyllite (Figure 4.59a). Théoriquement, si un système aquifère atteint l'équilibre, ce qui est apparemment le cas de l'aquifère Chiche et Ilaló, la pyrophyllite n'est pas stable (Michard 2002) ainsi, le produit final de l'activité des aluminosilicate serait la kaolinite (Figure 4.59b).



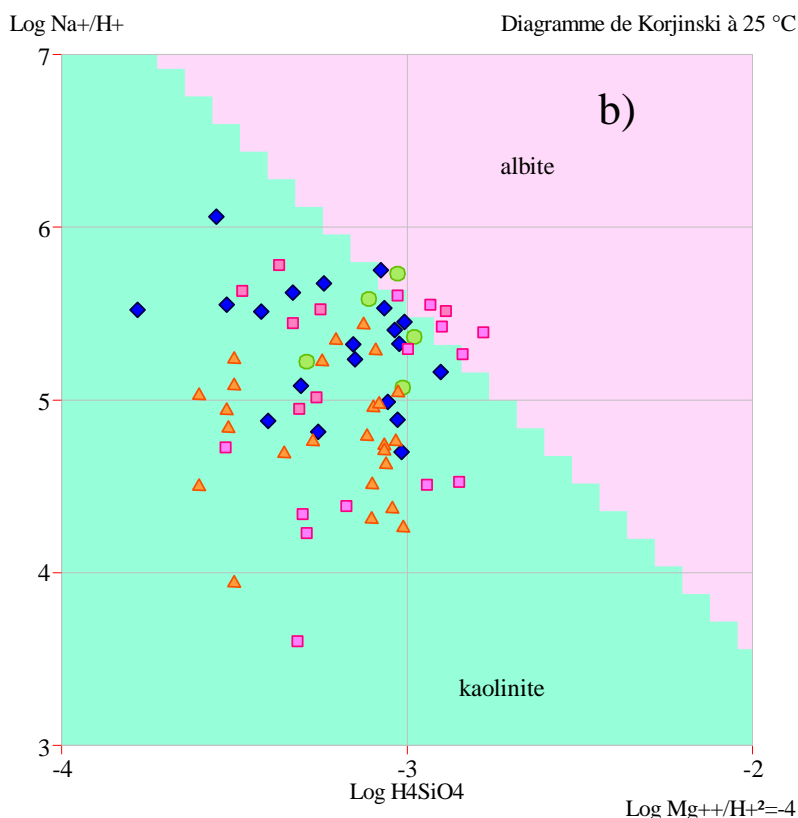


Figure 4.59. Diagramme de Korjinski ou d'activité des aluminosilicates à 25°C des aquifère Chiche nord et sud et l'aquifère Ilaló. Le diagramme a) est le produit final de l'activité des aluminosilicates avant d'atteindre l'équilibre, et b) est le diagramme quand le système est en équilibre. Pour les code-couleurs de points, voir la légende du diagramme de Piper.

L'indice de saturation (IS) a été aussi calculé à partir des analyses d'ions majeurs. L'IS est un indice de l'équilibre de l'eau qui donne le degré de saturation d'un minéral spécifique dans l'eau. Il correspond au logarithme du rapport entre le produit de son activité ionique et sa constante d'équilibre K :

$$\log(IS) = \log\left(\frac{\text{Ion activity product}}{K}\right) = \log(\text{Ion activity product}) - \log(K) \quad (6)$$

L'IS permet de savoir si l'espèce minérale est en train de se dissoudre dans l'eau, $IS < 0$, si il est en équilibre avec l'eau, $IS = 0$, ou si l'eau est à saturation et le minéral est en train de précipiter, $IS > 0$.

Les résultats montrent un comportement similaire dans l'aquifère Chiche nord et sud et dans l'aquifère Ilaló. Les minéraux qui ont des teneurs en sodium, magnésium, manganèse combinés avec les sulfates, chlorures ou fluorures, ont un état de sous-saturation. Les minéraux comme le carbonate de calcium, carbonate de fer et le carbonate de manganèse sont en équilibre. L'eau est sursaturé en minéraux calcique magnésique (dolomite), en silicates comme le quartz, talc et la calcédoine et vis à vis des oxydes ferreux notamment la goethite, qui pourrait expliquer les précipitations de fer qui ont été observées dans pratiquement tous les forages de l'aquifère (Figure 4.60).



Figure 4.60. Exemple de la précipitation du fer dans l'aquifère. Cas des forages Acosta Soberón (C151) et El Nacional (M302)

4.2.3.1 Conclusion sur les analyses des paramètres physiques de l'eau et ions majeurs

Les paramètres physiques de l'eau ont permis de différencier deux systèmes aquifères : l'aquifère Chiche et l'aquifère Ilaló. Des CE et des températures plus élevées se trouvent autour du volcan, et au fur et à mesure que l'on s'éloigne du cône, on observe des valeurs plus basses qui après s'uniformisent dans les vallées. L'aquifère Chiche présente des différences entre le nord et le sud avec des conductivités électriques plus basses dans la Vallée de Los Chillos que dans la Vallée de Tumbaco.

Les analyses d'ions majeurs ont montré que l'on a pour l'aquifère Chiche dans sa totalité et l'aquifère Ilaló, un faciès d'eau bicarbonaté magnésien qui évolue vers un pôle sodique. L'aquifère Chiche sud a d'importantes teneurs en magnésium, et l'aquifère Ilaló a des teneurs non-négligeables en chlorures. Les teneurs en sodium et magnésium pour les aquifères Chiche nord et Ilaló s'expliquent bien à partir de la minéralogie de ces formations, la teneur élevée en magnésium trouvée dans la partie sud du Chiche est encore une question à résoudre, quand à son origine, à confirmer avec des analyses minéralogiques mais, si la formation Chiche sud contient de la biotite et de l'obsidienne comme dans la partie nord, la forte teneur en Mg^{2+} pourrait être ainsi expliquée. Le teneur élevée en chlorures dans l'aquifère Ilaló est à relier à un processus de mélange avec des fluides géothermaux.

Toutes ces interactions eau-roche, les arrivées d'eau d'origine hydrothermale et les gaz géothermaux en ajoutant à ces éléments la température de l'eau, son pH et son Eh vont favoriser les migrations de certains éléments traces dans ces aquifères en milieu volcanique actif.

4.2.4 ELEMENTS TRACES

4.2.4.1 Etat de l'art

En milieu volcanique, les hautes températures ainsi que les conditions de pH et potentiel redox peuvent favoriser la dilution de certains éléments traces naturellement présents dans les roches. Ils ne représentent pas nécessairement une menace pour la santé publique, comme le fer, le manganèse et l'aluminium, ou encore le lithium ou le bore, souvent associés à l'activité volcanique. Mais d'autres éléments tels que le fluor, le vanadium, le sélénium, l'antimoine ou l'arsenic existent dans les environnements volcaniques à des taux largement supérieurs aux normes de potabilité.

L'arsenic par exemple peut causer des maladies de la peau comme l'hyperpigmentation et la kératose, qui peut évoluer progressivement en cancer de la peau, ou en lésion des organes internes provoquant d'autres types de cancer fortement létaux (OMS 2001). Ce métalloïde a capté l'attention de la communauté scientifique mondiale depuis les années 80 et 90, en raison des graves problèmes de santé qui ont été détectés en Inde et au Bangladesh (Nickson et al. 2000, Ravenscroft et al. 2005), à cause de teneurs en arsenic dépassant la limite de l'OMS (2008) de 10 µg/l. Le problème de l'arsenic dans l'eau concerne son utilisation comme eau de boisson par la population, et l'irrigation ou l'élevage, puisque l'arsenic n'est pas dégradé dans la chaîne alimentaire (Bundschuh et al. 2012b).

Actuellement, la dynamique de l'arsenic dans les eaux souterraines, sa distribution et son abondance naturelle sont un peu mieux connues, mais, il reste encore des questions sur les facteurs qui favorisent sa mobilisation et sa propagation dans les grands aquifères. En conditions naturelles, l'augmentation des teneurs en arsenic dans les eaux souterraines est la conséquence de la forte influence de l'interaction eau-roche dans des conditions physiques et géochimiques favorables à la mobilisation et l'accumulation de l'arsenic. Dans les eaux souterraines, les teneurs naturelles peuvent varier entre 0,5 et 5000 µg/l.

La chimie de l'arsenic suit de très près celle du soufre : les plus fortes teneurs en arsenic étant liées à la présence de minéraux sulfurés, dont la pyrite est la forme la plus abondante (Smedley et Kinniburgh 2002). L'arsenic est présent dans la structure cristalline de plusieurs minéraux sulfurés en se substituant à l'atome de soufre (Smedley et Kinniburgh 2002). Des teneurs élevées d'arsenic sont également retrouvées dans plusieurs minéraux oxydés et d'oxydes de métaux hydratés, soit dans la structure du minéral ou comme élément adsorbé (oxydes de Fe, Mn et Al) (Smedley et Kinniburgh 2002). L'arsenic peut aussi être adsorbé sur certaines faces des argiles et à la surface de la calcite (Goldberg et Glaubig 1988), mais en moindre quantité que dans le cas des oxydes de fer ou manganèse. Les réactions d'adsorption permettent de limiter les teneurs en arsenic dans les eaux naturelles (Smedley et Kinniburgh 2002). L'arsenic peut aussi se substituer à Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Ti^{4+} dans la structure de plusieurs minéraux mais à concentrations plus basses (Smedley et Kinniburgh 2002). Les minéraux silicatés et carbonatés en contiennent généralement en faible quantité (Smedley et Kinniburgh 2002). Dans les roches magmatiques les concentrations en arsenic sont souvent assez faibles (1,5 mg/Kg). Cependant les roches volcaniques, spécialement les cendres volcaniques, sont fréquemment impliquées dans la génération d'eaux riches en As, peut-être à cause de la nature réactive du matériel volcanique acide récent, notamment la cendre fine produisant des eaux souterraines riches en Na et à haut pH qui favorise la désorption de l'As inclus dans les oxydes et hydroxydes de Fe et Mn (Nicolli et al. 1989, Smedley et al. 2002).

De toutes les interactions avec les différentes roches et les constatations faites sur le comportement de l'arsenic, Smedley et Kinniburgh (2002) signalent qu'il est souvent bien corrélé avec le fer, c'est pourquoi les sels de fer, aluminium et manganèse sont utilisés pour le traitement des eaux riches en As.

Les réactions redox sont très importantes dans le contrôle de plusieurs espèces majeures et mineures dans les eaux naturelles, l'arsenic inclus. Cependant, en pratique, l'équilibre redox est souvent atteint lentement et le potentiel redox a tendance à être contrôlé par les éléments majeurs (O, C, N, H et Fe). Les éléments mineurs et traces comme l'arsenic répondent à ces changements plutôt qu'ils ne les contrôlent. Dans les eaux souterraines on peut trouver les deux états d'oxydation : l'As (III) et l'As (V). Le ratio entre les deux états d'oxydation peut varier grandement en fonction des variations de l'abondance en carbone organique, de l'activité des microorganismes et du contenu en oxygène dissous. L'équilibre thermodynamique prévoit que les teneurs en As (V) devraient être plus élevées que celles de l'As (III) sauf dans des conditions extrêmes de réduction (quand la réduction de SO_4 se produit par exemple, à un $Eh < -50$ mV). Ce comportement théorique n'est pas nécessairement observé quantitativement dans les eaux naturelles où différents couples redox peuvent exister à des conditions de Eh différent de celui attendu théoriquement (Seyier et Martin 1989, Eary et Schramke 1990). Par exemple, à Oslofjord, Norvège, As (III) a été trouvé en conditions oxydantes (Abdullah et al. 1995). L'oxydation de l'As (III) par O_2 dissous est une réaction particulièrement lente. Par exemple : Johnson et Pilson (1975) ont montré que le temps d'oxydation de l'As (III) dans des eaux marines vont de quelques mois à un an et Cherry et al. (1979) suggèrent que dans les eaux souterraines cette oxydation peut se produire en plusieurs années. Quand un aquifère est très stratifié, le flux provoqué par le pompage pendant l'échantillonnage peut aussi amener à un mélange des eaux avec des potentiels redox assez différents. Ce que l'on mesure avec l'électrode peut être le résultat de ce mélange qui n'est évidemment pas représentatif des conditions redox réelles de l'aquifère, déjà mis en évidence expérimentalement (Lindberg et Runnells 1984). Cherry et al. (1979) suggèrent que le ratio As(V)/As(III) pourrait être un indicateur des conditions redox dans les eaux souterraines. Cependant, Welch et al. (2000) ont trouvé que dans un même échantillon d'eau, l'Eh calculé à partir du couple redox de l'As n'est pas le même que celui calculé avec le couple redox Fe(III)/Fe(II) ni l'Eh de l'eau mesuré avec l'électrode. Ils attribuent ces différences au fait que dans les eaux souterraines les couples redox de l'As et du Fe ne sont pas en équilibre. Ce que l'on peut dire dans l'état actuel des connaissances, s'il y a de l'As (III) dans l'échantillon analysé, ceci implique qu'il y a des conditions réductrices quelque part dans le système aquifère (Smedley et Kinniburgh 2002). Les concentrations des formes organiques sont généralement négligeables dans les eaux souterraines.

Tous ces principes et remarques ont été observés notamment dans les eaux souterraines en milieu volcanique continental. En Amérique Latine, des teneurs élevées en As ont été détectées depuis le Mexique jusqu'au Chili.

Au Mexique l'arsenic dans les eaux souterraines a été relié aux roches volcaniques ou systèmes géothermaux (Chapin et Dunbar 1995, Armienta et Segovia 2008). Quelques recherches pour identifier la source de l'arsenic et sa dynamique ont été menées dans ce pays, mais elles restent pour l'instant incomplètes. Cependant Birkle et al. (2010) ont mis en évidence que les eaux géothermales mexicaines sont fortement enrichies en As à cause du lessivage à haute température de la roche volcanique encaissante riche en arsenic. Ce metalloïde précipite dans ces systèmes accompagné des sulfites sous conditions extrêmes de réduction et à hautes teneurs en fer (Birkle et al. 2010).

En Amérique Centrale, les hautes teneurs en arsenic ont été observées souvent autour des grands centres géothermaux, comme en Honduras (Goff et al. 1987), Guatemala (Goff et al. 1989, Adams et al. 1991), El Salvador (Raymond et al. 2005, Lopez et al. 2009), Nicaragua, Costa Rica (López et al. 2012). D'une façon générale, dans les champs géothermaux, les plus hautes teneurs en arsenic sont présentes dans des eaux de types $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$. Ces eaux ont typiquement de basses concentrations en sulfates, une haute salinité, de hautes teneurs en Na^+ et Cl^- et un pH généralement supérieur à 8. Les teneurs élevées en As sont souvent combinées avec une forte concentration en Li et B. Ces eaux de type $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ sont le résultat des interactions eau-roche à long terme entre l'eau souterraine enrichie en gaz volcanique et chauffée près de la chambre magmatique et la roche encaissante. Le mélange entre ces eaux géothermales et les eaux météoriques superficielles peuvent produire des eaux riches en bicarbonates qui abaissent fortement les teneurs en arsenic (López et al. 2012).

En Amérique du Sud, il y a aussi des pays qui sont concernés par le problème de l'arsenic dans l'eau : au Chili pendant les années 1960, les problèmes de santé de la population ont été reliés à la présence d'As : les eaux de rivières servant à la consommation humaine étaient issues d'aquifères volcaniques, en contact avec des dépôts de minerais de sulfites, des produits érodés des Andes ou l'activité géothermale (Fernandez-Turiel et al. 2005, Bundschuh et al. 2012a). Les études d'Oyarzun et al. (2004) associent les fortes teneurs en arsenic dans les sédiments contenant des oxydes de fer ou des oxyhydroxydes de fer.

En Argentine pendant les années 1913 – 1917 des publications ont mis en évidence une causalité entre lésions sur la peau de la population et eau contaminée par de l'As d'origine naturelle, à Córdoba, dans la Plaine de la Pampa du Chaco (Bundschuh et al. 2012a). A partir de cette époque plusieurs études et recherches ont été menées dans ce pays pour comprendre l'origine et la dynamique de l'arsenic dans les eaux souterraines. Apparemment la source de cet arsenic est la cendre volcanique qui se trouve piégée dans les sédiments de la plaine et qui contient 90% de verre volcanique de composition rhyolitique qui a souvent une teneur en As entre 5-8 mg/kg, de plus en raison de sa structure amorphe, il est fortement soluble dans l'eau (Nicolli et al. 1989, Bundschuh et al. 2004, Smedley et al. 2005, Nicolli et al. 2012a). Des fortes corrélations entre l'arsenic et le fer, l'aluminium et le manganèse ont été retrouvées (Bhattacharya et al. 2006), ainsi qu'avec d'autres éléments traces détectés comme le vanadium, molybdène, uranium et fluor (Bundschuh et al. 2004, Bhattacharya et al. 2006).

Dans les pays andins tropicaux, la détection d'As dans l'eau est récente notamment en Bolivie, Pérou et Equateur, avec encore peu d'études. En Bolivie par exemple, les données publiées portent sur des lacs localisés sur l'altiplano bolivien et dont le substratum est constitué de produits volcaniques. Les eaux sont de types $\text{Na}^+\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ et les processus impliqués dans la libération de l'arsenic sont liés à diverses sources ; les minéraux sulfatés avec libération par oxydation de la pyrite et/ou arsénopyrite, la désorption en surface des oxydes de fer hydratés et la cendre volcanique (Ramos et al. 2012). Au Pérou, il a été aussi observé de hautes teneurs en arsenic dans des rivières captées, alimentées par des eaux souterraines en contact avec des sédiments volcaniques riches en arsenic (Castro de Esparza 2009, Bundschuh et al. 2012a).

En Equateur il existe déjà des études sur les fortes concentrations en arsenic dans les eaux géothermales associées à la chaîne des Andes. Les analyses en Equateur se sont faites principalement au nord du pays et les publications jusqu'à présent sont très descriptives et ont une orientation plutôt tournée vers la compréhension chimique du processus avec encore peu d'études sur l'hydrogéologie de ces aquifères « contaminés ». Cumbal et al. (2010) ont observé que, de façon générale, l'arsenic dans les eaux est issu de processus de sorption et co-

précipitation qui se produisent sur les surfaces des minéraux riches en fer et des matières organiques présents dans les sédiments. Les teneurs en arsenic diminuent en aval des rivières, sous conditions oxydantes, ce qui peut être totalement différent dans les eaux souterraines où les conditions anoxiques peuvent être présentes.

Dans la zone d'étude, l'arsenic a été retrouvé dans l'eau souterraine (forages et sources) de la Vallée de Tumbaco, liée à la formation Chiche dans la partie nord et à celle du volcan Ilaló.

4.2.4.2 L'arsenic dans l'aquifère Chiche et l'aquifère Ilaló

Entre forages et sources où l'As a été analysé (195 mesures sur 38 points d'eau, pour les détails voir chapitre 3, section 3.4.3), on a observé que 66% des points mesurés présentent des teneurs en arsenic plus élevées que la norme OMS (2008) de 10 µg/l (Tableau 4.10) et les teneurs les plus importantes sont observées dans les forages.

Grâce aux analyses faites à Montpellier à Hydrosociences (HSM) on a pu échantillonner des forages privés qui n'ont pas été analysés par l'EPMAPS et de cette façon améliorer un peu la vision de la répartition de l'arsenic dans la zone.

Tableau 4.10. Nombre de forages et sources échantillonnés ayant des teneurs en arsenic élevées

Aquifère	Type	NB des stations éch.	Nombre d'analyses utilisées	Artésien	Nombre de stations avec As>10	% supérieur à As>10
Chiche nord	Forages	7	27		6	86%
	Sources	7	47		4	57%
Chiche sud	Forages	6	24	2	0	0%
	Sources	2	4		2	100%
Ilaló	Forages	5	35	3	5	100%
	Sources	7	31		5	71%
Mélange	Forages	4	27	2	3	75%
	Total	38	195	5	25	66%

Comme mentionné au chapitre 3 (section 3.4.3), pour valider la qualité des données d'arsenic, on dispose uniquement de la répétitivité des résultats, dans l'hypothèse où l'eau reste en équilibre chimique. Pour commencer, nous avons comparé l'ensemble des données d'As avec les bilans ioniques de l'échantillon ($\Sigma \text{cation} - \Sigma \text{anion} / \Sigma \text{cation} * 100$) pris à la même date, afin d'observer s'il existe une relation entre la qualité des analyses d'ions majeurs et les teneurs en éléments traces qui valideront ces résultats. Cette analyse de relation entre ions majeurs et éléments traces a été mis en place parce que le seuil de détection pour les analyses de l'EPMAPS est de 30 µg/l, sachant que la plus part des teneurs en As pour l'aquifère Chiche se trouvent entre 0 µg/l et ce seuil. Nous avons séparé les analyses en deux groupes en fonction du seuil de 30 µg/l.

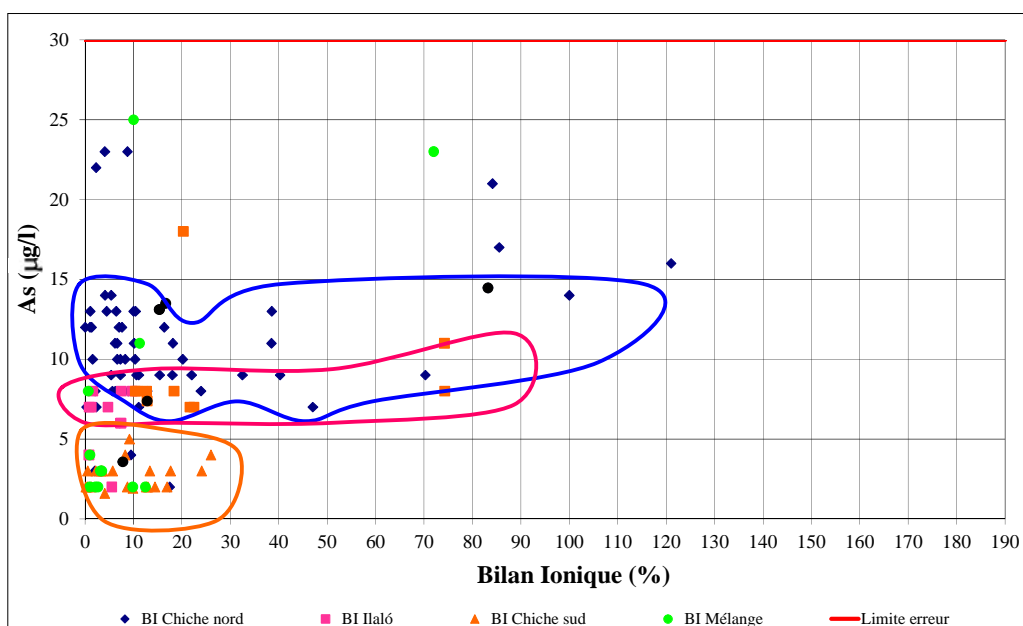


Figure 4.61. Relation As et bilan ionique en dessous de la limite d'erreur instrumentale de l'EPMAPS. Les points noirs correspondent aux mesures faites à HSM mis à titre indicatif (pour plus de détails voir chapitre 3). Encerclés : bleu : sources aquifère Chiche nord ; rose foncé : source aquifère Ilaló ; orange : points de l'aquifère Chiche sud.



Figure 4.62. Relation As et bilan ionique au-dessus de la limite d'erreur instrumentale de l'EPMAPS. Les points noirs correspondent aux mesures faites à HSM positionnés à titre indicatif (pour plus de détails voir chapitre 3). Encerclés : bleu : forage C105 aquifère Chiche nord ; rose foncé : forage I106 aquifère Ilaló.

Cette analyse, a permis de bien différencier chaque forage et chaque source appartenant aux aquifères Chiche nord, sud et Ilaló. Ces teneurs en As sont complètement indépendantes des bilans ioniques des échantillons. Les points captant l'aquifère Chiche nord et sud qui ont des teneurs en As en dessous du seuil de 30 µg/l montrent peu de variation dans ses concentrations (Figure 4.61 et Figure 4.62, pour plus de détails sur chaque point, voir annexe 5B). Cependant, ces comparaisons ont mis en évidence que les forages de l'aquifère Ilaló avec

des teneurs en As assez élevées montrent une variation que nous allons expliquer par la suite (Figure 4.62).

4.2.4.2.1 Variation temporelle de l'As

Pour interpréter la variation de l'arsenic que nous avons observé, les points qui ont plus de 6 analyses d'As ont été comparés avec la CE, l'oxygène dissous, le pH, et la température de l'eau. Indépendamment des teneurs en As ou de l'aquifère capté par les forages ou les sources, on n'a cependant pas observé de corrélation entre As et un paramètre physique de l'eau qui expliquerait ses variations dans le temps (de la Figure 4.63 à la Figure 4.66 et Annexe 5B). Le bilan ionique des échantillons a été aussi représenté sur les figures pour voir son éventuelle influence (sur les figures, selon le code couleur du Tableau 4.11), mais, il n'a visiblement aucun impact. Dans l'état actuel de nos connaissances, la variation temporelle de l'As dans l'aquifère Chiche ou Ilaló ne peut pas être expliquée.

Tableau 4.11. Code couleur du bilan ionique appliqué sur les figures de la variation locale temporelle de l'As.

◆	Bilan ionique < 10
◆	10 < Bilan ionique < 30
◆	31 < Bilan ionique < 60
◆	61 < Bilan ionique < 80
◆	Bilan ionique > 80
+	Ions majeurs incomplets

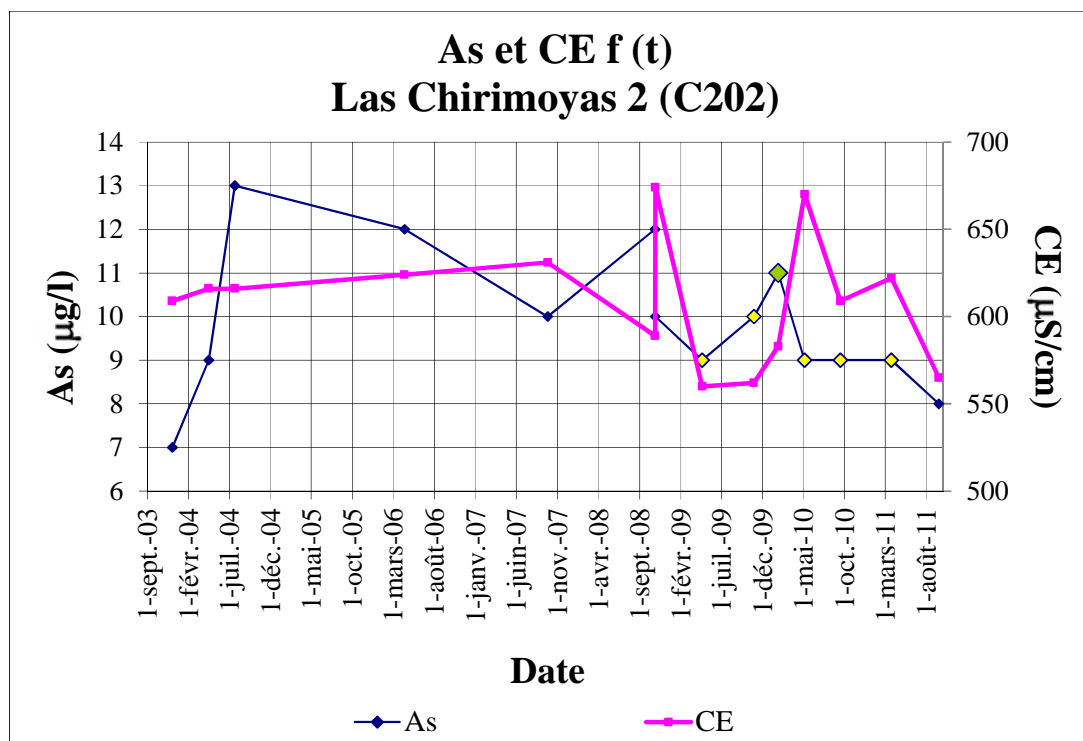


Figure 4.63. Variation temporelle de l'As et de la CE dans la source Las Chirimoyas 2 (C202) de l'aquifère Chiche.

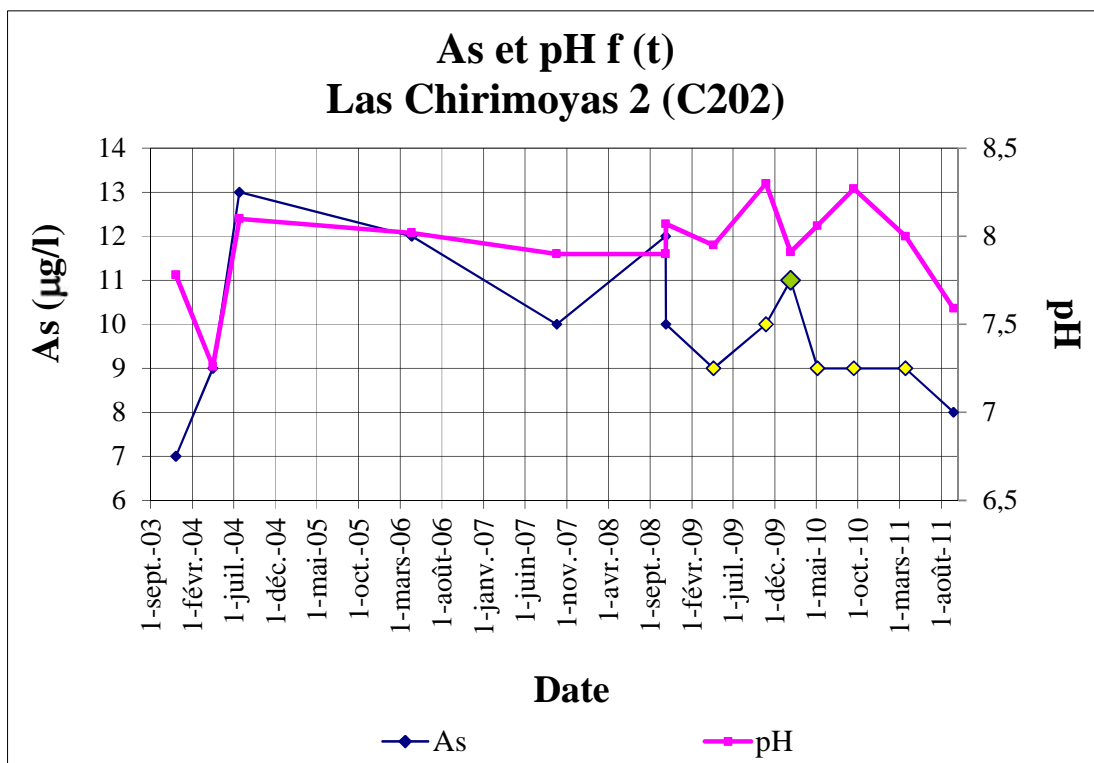


Figure 4.64. Variation temporelle de l'As et du pH dans la source Las Chirimoyas 2 (C202) de l'aquifère Chiche.

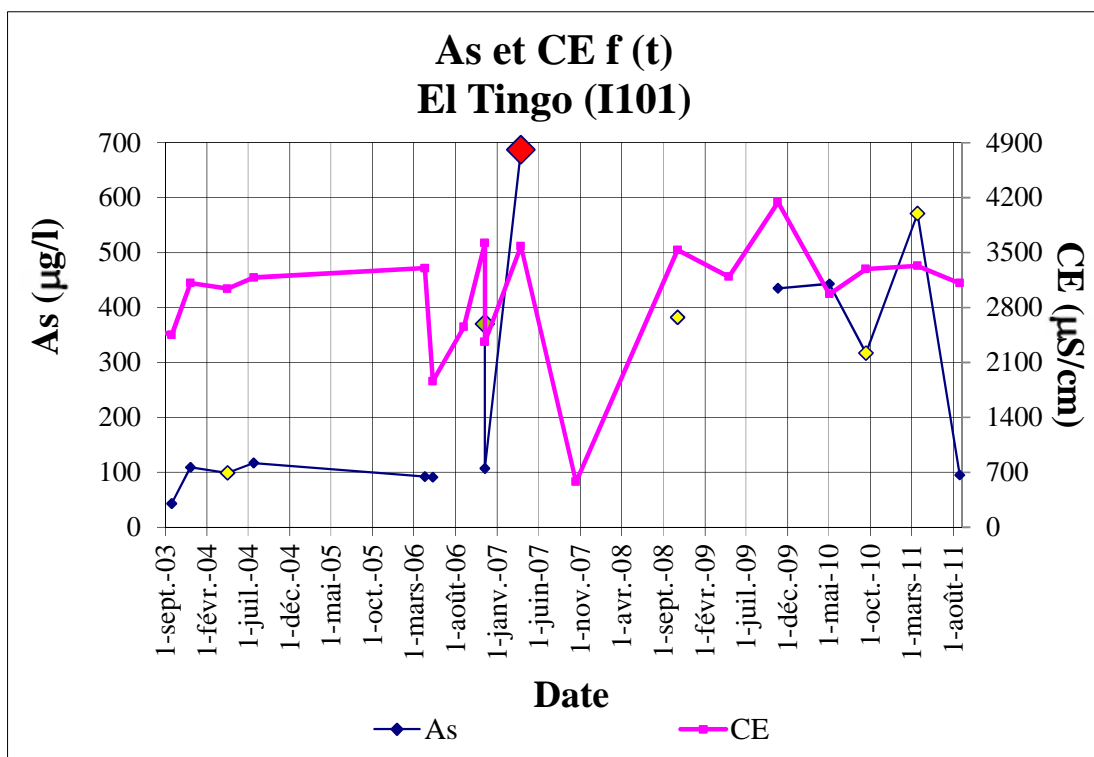


Figure 4.65. Variation temporelle de l'As et de la CE dans le forage El Tingo (I101) de l'aquifère Ilaló.

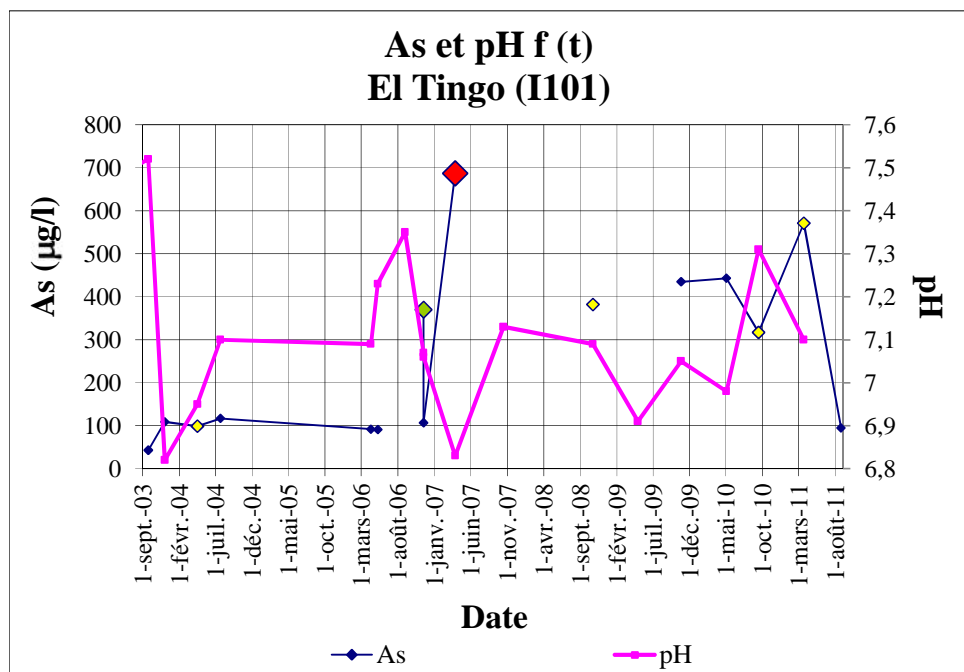


Figure 4.66. Variation temporelle de l'As et du pH dans le forage El Tingo (I101) de l'aquifère Ilaló.

4.2.4.2.2 Variation spatiale de l'As

L'aquifère Chiche du côté nord, a des concentrations en arsenic plus élevées que du côté sud. Dans la partie nord de l'aquifère Chiche, au fur et à mesure que l'on s'éloigne du volcan, les teneurs en arsenic diminuent impliquant une relation avec les eaux circulant dans le cône volcanique de l'Ilaló d'autant plus importante que l'on est proche du cône (Figure 4.67).

L'aquifère Ilaló, donne les concentrations les plus élevées, notamment dans la partie sud du volcan. Les forages qui captent les deux formations, montrent des teneurs en As intermédiaires mais assez élevées (Figure 4.67 et Tableau 4.12).

Tableau 4.12. Résultats des analyses sur les teneurs en arsenic (µg/l) par région du système aquifère.

Aquifère	Type	Teneurs moyenne (~g/l)	Teneurs max (~g/l)	Teneurs min (~g/l)
Chiche nord	Forages	23	71	3
	Sources	12	86	2
Chiche sud	Forages	3	6	2
	Sources	12	13	12
Ilaló	Forages	293	805	6
	Sources	41	311	2
Mélange	Forages	73	322	2

Pour l'Ilaló un point montre des caractéristiques différentes du reste du groupe. La source du côté ouest, Rumiloma 2 (I207), a une teneur en arsenic de 9 µg/l (mesurée au laboratoire de HSM), cette source sort du flanc du volcan. On a prélevé de l'eau à Rumiloma dans une galerie d'au moins 10 mètres de longueur, l'endroit où affleure la source est très

difficilement accessible. Elle a une conductivité et une température assez élevée (1030 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et environ 28 °C, voir Figure 4.51 et Figure 4.52), elle a un pH de 8,1, un peu plus élevé qu'un ensemble de sources situées à côté, Cununyacu 1 et 2 (I202, I23, teneurs en As 87 – 88 $\mu\text{g}/\text{l}$, 1062 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 966 $\mu\text{S}/\text{cm}$, à 26 °C, pH 7,4 et 7,5), les teneurs en ions majeurs sont par contre identiques. Ces sources sont thermales, mais, les teneurs en arsenic à Rumiloma sont faibles, sous la norme OMS, comparées au reste des points autour du volcan. En revanche les teneurs en Fe et Mn à Cununyacu sont plus basses que la limite de détection de la méthode ICP-MS (2 $\mu\text{g}/\text{l}$), Rumiloma a des teneurs plus hautes, 23 $\mu\text{g}/\text{l}$ en Fe et 37 $\mu\text{g}/\text{l}$ en Mn, qui restent cependant moins élevées que sur le reste des points de l'Ilaló. L'hypothèse pour expliquer les faibles teneurs en As dans la source Rumiloma serait une interaction avec les teneurs en Mn et Fer au moment de la sortie de la source dans la galerie de conduction qui faciliteraient l'adsorption et donc diminuerait d'autant l'As sous forme dissoute. Dans son parcours dans la galerie, l'eau coule en turbulence favorisant la dissolution de l' O_2 atmosphérique, permet la précipitation de l'As une fois oxydé, ce phénomène altérant aussi la chimie de l'eau. Si l'on avait un accès direct à la fracture où la source a été captée, on pourrait peut-être trouver de l'arsenic précipité dans cette eau. L'oxydation de l'As dans cette source a été démontrée par nos analyses sur la spéciation de l'arsenic.

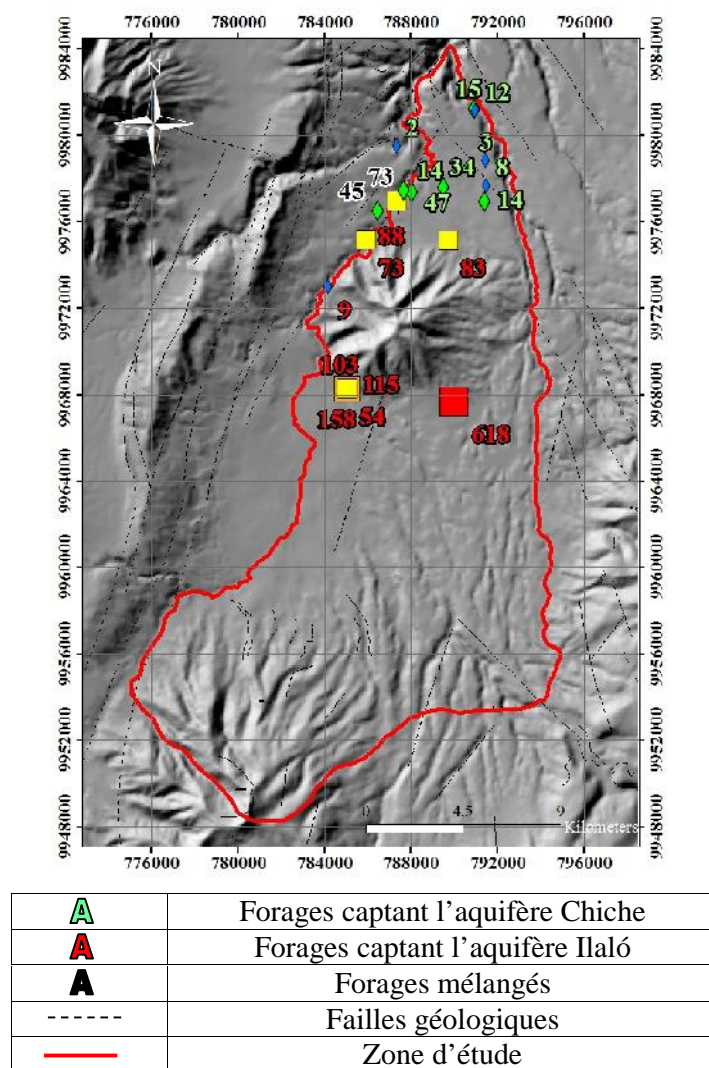


Figure 4.67. Distribution spatiale de l'arsenic ($\mu\text{g}/\text{l}$). La taille des points représente les teneurs en arsenic.

A partir de ces résultats, on peut déduire que l'arsenic présent dans le système aquifère est d'origine naturelle. D'autres éléments traces pourront confirmer la source de ce metalloïde, sa teneur étant liée aussi à ces éléments qui ainsi pourront nous apporter un peu plus d'informations sur sa dynamique.

4.2.4.2.3 Corrélations entre l'arsenic et d'autres éléments dans l'aquifère *Chiche nord et Ilaló*

La distribution spatiale de l'arsenic dans les aquifères n'est pas toujours très uniforme, mais il est possible de l'expliquer à travers des corrélations avec d'autres paramètres, comme les ions majeurs, les éléments traces, fer, manganèse ou les paramètres physiques de l'eau. Dans le système aquifère de Tumbaco, les corrélations linéaires avec les ions majeurs ou les paramètres physiques de l'eau sont faibles, mais on a trouvé des corrélations meilleures avec quelques éléments traces. Si l'on fait l'analyse par formation aquifère, on trouve un coefficient de détermination (R^2) de 57% entre l'arsenic et le fer pour l'aquifère Ilaló (Figure 4.68) et une corrélation linéaire entre l'As et le bore ($R^2 = 81\%$) pour l'aquifère Chiche nord (Figure 4.69). Pour le bore il semble que la corrélation soit aussi représentative, malheureusement, on ne dispose pas d'assez de données pour le bore, pour que statistiquement cela soit suffisamment solide.

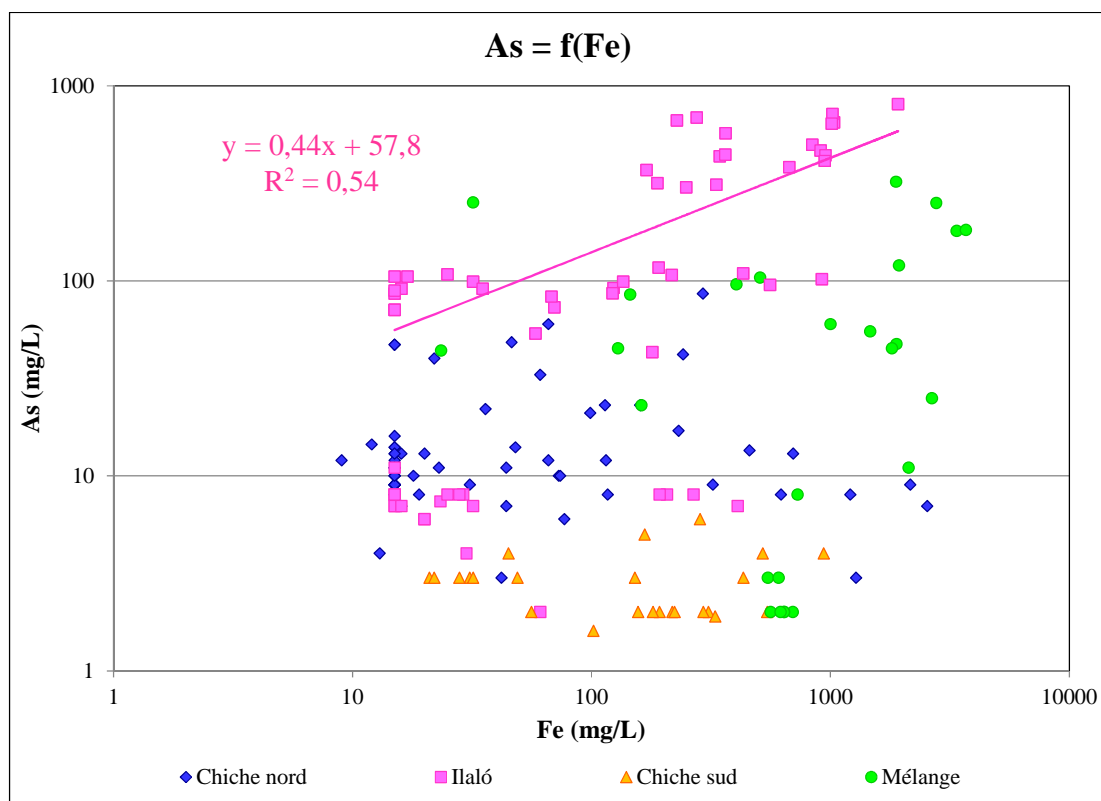


Figure 4.68. Corrélation entre l'arsenic et le fer pour le système aquifère de Tumbaco. L'aquifère Ilaló est le seul à avoir un coefficient de détermination assez élevé entre ces deux paramètres.

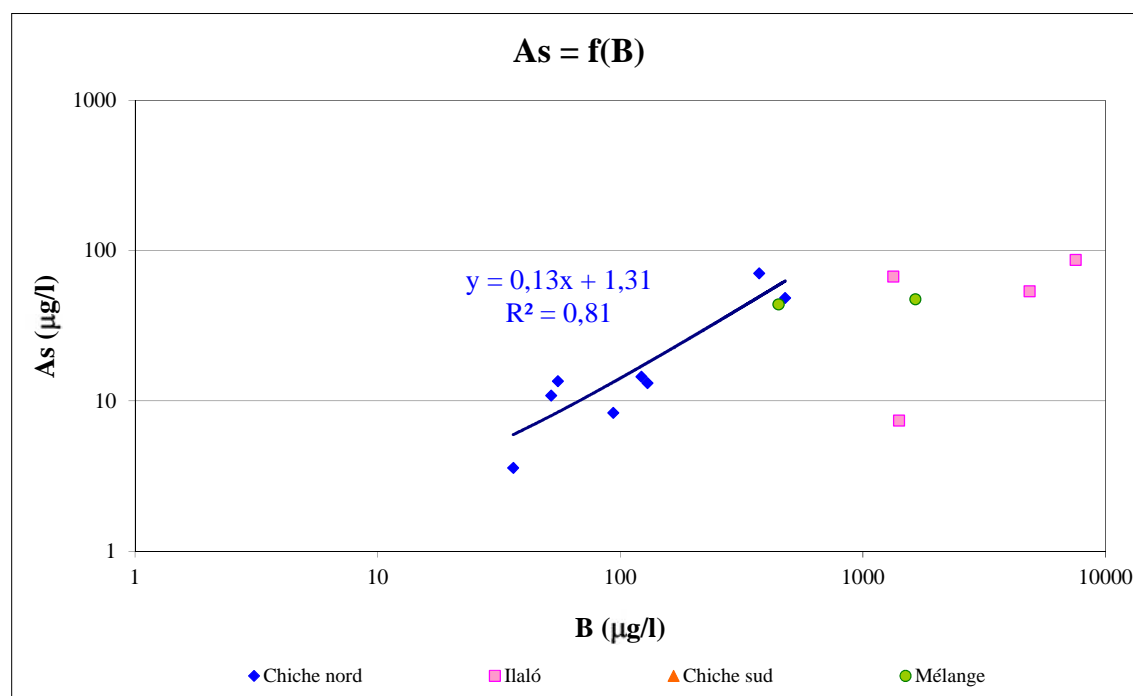


Figure 4.69. Corrélation entre l'arsenic et le bore pour le système aquifère de Tumbaco. Le peu de points dont on dispose montrent une bonne corrélation avec l'arsenic.

4.2.4.2.4 Discussion

Dans l'aquifère Chiche, où les teneurs en arsenic sont plus faibles que dans l'aquifère Ilaló, les processus de dissolution et la dynamique sont apparemment beaucoup plus compliqués. La corrélation entre le Fe qui a été validée pour les eaux thermales de l'Ilaló n'a pas été retrouvée pour l'aquifère Chiche et à l'inverse la corrélation entre As et B a été retrouvée uniquement pour Chiche.

Plusieurs auteurs (Nicolli et al. 1989, Smedley et al. 2005) ont mentionné que l'origine de l'arsenic dans des eaux non-thermales peut être reliée au verre des cendres volcaniques, les conditions amorphes rendant le verre volcanique plus facile à dissoudre dans l'eau. Pourtant, la formation Chiche contient dans sa matrice du verre volcanique, et les teneurs en arsenic sont beaucoup plus basses qu'à Ilaló.

La possibilité de migration de l'arsenic sous sa forme $\text{As}(\text{OH})_3$, sa phase gazeuse, par des failles, et sa connexion avec la formation volcanique, qui affecterait uniquement la partie nord de la Formation Chiche s'avère probable. Le transport de l'arsenic dans cette phase a été expérimentalement étudié et on le trouve dans les systèmes hydrothermaux et dans les gaz magmatiques, constitués de vapeurs produites à hautes températures et pressions, qui se volatilisent. Le même processus a été identifié pour le bore en raison de ses similarités chimiques (Pokrovski et al. 2002). Cette hypothèse pourrait ainsi expliquer la corrélation entre l'As et le B, très élevée (81 %) pour l'aquifère Chiche nord.

La corrélation entre l'arsenic et le fer dans l'aquifère hydrothermal Ilaló pourrait indiquer une origine commune de ces deux éléments. Les réservoirs qui ont des températures entre 150 et 250 °C favorisent l'intégration de l'arsenic notamment dans la pyrite, et en moindre mesure dans l'arsénopyrite, ou bien il peut être aussi associé aux oxydes de fer

(López et al. 2012). Selon Smedley et Kinniburgh (2002) l'oxydation de la pyrite peut être une source importante d'arsenic, mais, cela induirait des milieux extrêmement acides, riches en SO_4^{2-} , Fe et métaux en traces, ce qui n'est pas le cas pour l'aquifère Ilaló (absence de SO_4^{2-} et pH neutre). Il est peu probable qu'il s'agisse aussi d'un processus de dissolution de l'arsénopyrite (FeAsS), parce que ce minéral n'est pas souvent présent dans les systèmes géothermaux (Webster et Nordstrom 2003) car dépendant de la température du réservoir (Birkle et al. 2010). Une hypothèse plus vraisemblable qui expliquerait cette corrélation As/Fe serait la présence d'oxydes de fer qui par rapport à la minéralogie de la Fm. Ilaló existent dans la matrice et dans les phénocristaux de la formation sous forme de magnétite (Fe_3O_4) et comme minéral secondaire sous forme d'hématite (Fe_2O_3) (Cornejo 1983).

Il a été nécessaire pour mieux comprendre les processus d'adsorption et de désorption de l'arsenic et les conditions de compétition avec les autres ions de connaître l'état d'oxydation de l'arsenic et du fer. La spéciation de l'arsenic a été aussi analysée et comparée avec les mesures d'Eh faites sur le terrain.

4.2.4.2.5 Spéciation de l'arsenic

L'arsenic peut être trouvé sous plusieurs états d'oxydation : -3, 0, +3, +5, mais, dans les milieux naturels il est souvent sous sa forme inorganique d'arsénite trivalente, As (III), ou arséniate pentavalente, As (V). L'étude de la spéciation de l'arsenic dans le système aquifère permet de connaître les conditions de mobilité de As, l'As (III) est l'état d'oxydation qui est le plus mobile, dans certaines conditions souvent présentent dans les eaux souterraines. Cette forte mobilité est aussi la cause de problèmes sérieux en termes de santé publique. Selon Bundschuh et al. (2009), l'As (V) est l'état d'oxydation le plus souvent observé dans les eaux souterraines, mais l'As (III) peut être aussi trouvé en proportions significatives, dépendant des facteurs de la géologie locale, du pH et du potentiel redox de l'eau.

Les valeurs du potentiel redox mesurées sur le terrain pendant la période février 2011 – octobre 2012, pour les deux aquifères, Chiche et Ilaló, ne peuvent pas être considérées comme un environnement fixé d'oxydation ou de réduction, on peut parler seulement d'un environnement de transition (Figure 4.70), d'après Krauskopf et Bird (1995). Cependant, selon les expériences de Smedley et Kinniburgh (2002), les valeurs d'Eh entre 220 et 250 mV peuvent être considérées comme définissant des conditions relativement réductrices. Nous allons confronter ces deux points de vue pour essayer d'interpréter les résultats de nos analyses sur la spéciation de l'arsenic et du fer.

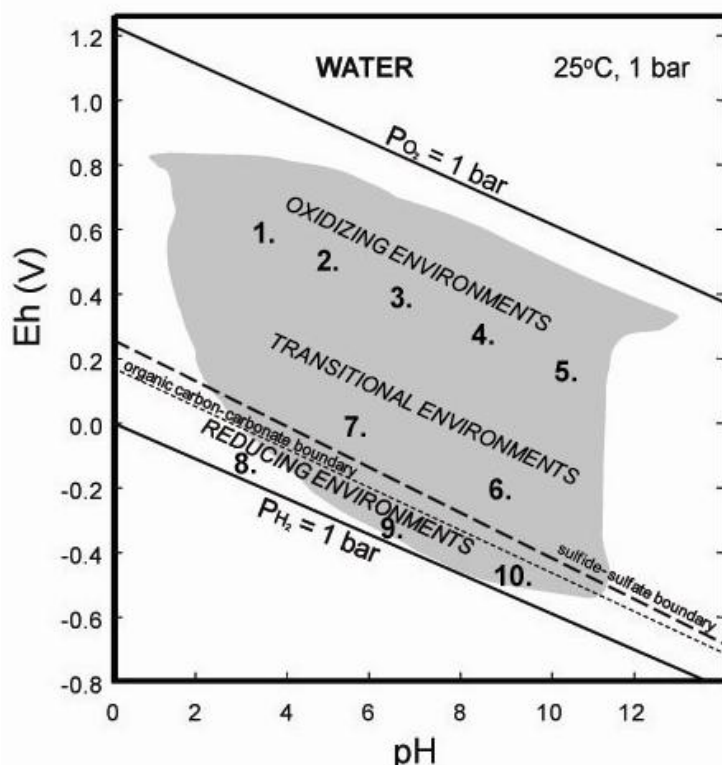


Figure 4.70. Diagramme Eh - pH. Les diagonales définissent les limites supérieure et inférieure de stabilité de l'eau à 25°C et sous 1 bar de pression. La zone grisée montre les limites générales mesurées d'Eh et pH en milieux naturels : (1) eaux de mines, (2) eaux météoriques, (3) ruisseaux, (4) eau normale de mer, (5) eau saline, (6) eaux souterraines, (7) eau de marais, (8) sols saturés en eau, (9) eaux euximique marines, (10) eaux salines riches en matière organique. Source : (Krauskopf et Bird 1995).

Dans l'aquifère Chiche, l'état d'oxydation prédominant de l'arsenic est le As (V) pour 100% des points prélevés. Dans l'aquifère Ilaló, les sources Cununyacu 2, Rumiloma 2 et El Tingo Piscina (I203, I207, I205) montrent la prédominance de l'As (V) tandis que le forage El Tingo Nuevo (I102) montre une tendance inverse (83% d'As (III)) (Tableau 4.13 et Tableau 4.14). On peut expliquer l'apparente contradiction de l'état d'oxydation de As dans l'aquifère Ilaló entre sources et forages par des conditions de sorties différentes. Les sources sortent toujours par des fractures, et pendant l'ascension de l'eau, elles peuvent retrouver des conditions qui favorisent la dissolution d'oxygène ce qui produirait une oxydation pratiquement totale de l'arsenic (Webster et Nordstrom 2003).

Les deux forages captant les aquifère Chiche et Ilaló, El Nacional (M302) et La Primavera (M303) montrent que l'As (III) est l'état d'oxydation prédominant, mais avec de fortes nuances peut-être dues à différentes parts de mélange. A La Primavera (M303) l'As (III) représente 60% de l'As total, par contre, au El Nacional (M302), l'As (III) constitue 95% de l'As total (Tableau 4.13 et Tableau 4.14).

La distinction des teneurs en As (III) des forages mixtes liée à leur part de mélange différent conduit à penser que la part du Chiche est plus importante à La Primavera (M303), la conductivité le montrant bien, conduisant à avoir un partage à peu près équivalent entre les deux états d'oxydation. Pour El Nacional c'est la situation inverse conduisant à un As (III) plus élevé.

Chapitre 4 : Interprétations des résultats

Pour le fer, on a trouvé un comportement cohérent avec l'arsenic pour l'aquifère Chiche, l'état d'oxydation prédominant est le Fe (III), à l'exception du forage « Las Acacias » (C101) ou 95% du fer mesuré est sous la forme Fe (II). Pour l'aquifère Ilaló le Fe (II) reste toujours prédominant (Tableau 4.13 et Tableau 4.14).

Pour les forages mixtes on note comme pour l'As, des différences entre les deux forages : La Primavera (M303) montre un état d'oxydation prédominant en Fe (III), 80% du fer total, et El Nacional (M302), c'est le Fe (II) qui prédomine quasi totalement, résultats qui vont dans le même sens que pour l'As (Tableau 4.13 et Tableau 4.14).

Les états d'oxydation entre l'arsenic et le fer ne sont pas toujours cohérents entre eux, car les deux éléments ne s'oxydent pas forcément à la même vitesse dans les mêmes conditions de potentiel redox et de pH. La dynamique d'oxydation de l'arsenic est connue comme très lente mais, ces conditions peuvent changer s'il y a des oxydes de Mn ou de l'activité microbienne dans l'eau, qui vont accélérer la cinétique (Smedley et Kinniburgh 2002). Dans ces conditions, l'oxydation de l'As va se faire avant l'oxydation du fer. Une autre hypothèse possible serait que ces différences pourraient être en relation avec les conditions de prélèvements des échantillons conduisant à une altération des résultats. Par exemple : dans l'aquifère Chiche les forages Las Acacias (C101) et Arq. Diego Andrade (C109) montrent des états d'oxydation As (V) prédominants, mais pour le fer c'est plus contrasté, le premier a 95% de Fe (II) et l'autre 87% de Fe (III). Pour le forage Las Acacias nous avons pompé pendant plus de 24 heures, l'autre forage, étant privé, nous avons réussi à le faire pomper pendant moins d'une heure. Il est possible que le pompage plus prolongé a influencé les résultats par un changement des conditions d'oxydation.

Tableau 4.13. Spéciation de l'arsenic et du fer dans les aquifères Chiche nord et Ilaló. Les valeurs en rouge sont au-dessous de la limite de quantification. <LD = dessous de la limite de détection.

CI	Aquifère	Nom	As III (~g/l)	As V (~g/l)	As total (~g/l)	Fe II (~g/l)	Fe III (~g/l)	Fe Total (~g/l)
C201	Chiche nord	Las Chirimoyas	0,02	15,83	15,85	0,00	0,00	0,00
C101	Chiche nord	Las Acacias	< LD	8,39	8,39	458,46	25,29	483,75
C109	Chiche nord	Arq Diego Andrade	< LD	47,41	47,41	6,04	40,32	46,36
C204	Chiche nord	EEQ	< LD	1,85	1,85			
C205	Chiche nord	John Daane	< LD	8,38	8,38	12,02	15,98	28,00
M303	Mélange	La Primavera 1	23,62	16,27	39,89	23,47	92,39	115,86
M302	Mélange	El Nacional	57,62	3,22	60,84	1893,21	1,52	1894,73
I203	Ilaló	Cununyacu 2	0,03	87,52	87,55	0,00	0,00	0,00
I207	Ilaló	Rumiloma 2	0,14	9,17	9,31	22,42	0,95	23,37
I205	Ilaló	El Tingo piscina	2,74	65,03	67,77	39,24	19,19	58,43
I102	Ilaló	El Tingo nuevo	95,53	19,95	115,48	122,71	51,07	173,78

Tableau 4.14. Pourcentage d'état d'oxydation de l'arsenic et du fer dans l'aquifère Chiche et Ilaló.

ID	Aquifère	Nom	As III (%)	As V (%)	Fe II (%)	Fe III (%)
C201	Chiche nord	Las Chirimoyas	0,1	100	0	0
C101	Chiche nord	Las Acacias	0	100	95	5
C109	Chiche nord	Arq Diego Andrade	0	100	13	87
C204	Chiche nord	EEQ	0	100	0	0
C205	Chiche nord	John Daane	0	100	43	57
M303	Mélange	La Primavera 1	59	41	20	80
M302	Mélange	El Nacional	95	5	100	0
I203	Ilaló	Cununyacu 2	0	100	0	0
I207	Ilaló	Rumiloma 2	2	98	96	4
I205	Ilaló	El Tingo piscina	4	96	67	33
I102	Ilaló	El Tingo nuevo	83	17	71	29

4.2.4.2.5.1 Conclusion sur l'arsenic et les éléments traces

Les éléments traces, dont l'As, trouvés dans le système aquifère, ont leur origine dans les formations géologiques composées de matériaux volcaniques.

La distribution de l'arsenic n'est pas uniforme, mais les teneurs les plus élevées se rencontrent autour du volcan, d'où l'hypothèse d'une origine liée à l'activité géothermale observée près de l'Ilaló. L'aquifère Chiche nord présente aussi des teneurs en arsenic, moins fortes et qui diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du volcan, mais il est encore difficile d'expliquer la dynamique temporelle ou spatiale de l'As dans cette partie de l'aquifère Chiche. De ces observations on peut quand même mettre en évidence les interactions entre l'aquifère Chiche et l'aquifère Ilaló. Dans la partie sud du Chiche, l'aquifère Ilaló n'échangerait pas avec l'aquifère Chiche au vu des faibles teneurs observées dans cette zone. Au nord par contre, les teneurs sont élevées. De ce fait l'interaction avec Ilaló semble plus probable, d'une part on est dans le sens du flux et d'autre part la fracturation localement enregistrée dans la Formation Chiche permettrait ces contacts.

La spéciation de l'arsenic nous a montré que pour l'aquifère Chiche, les conditions d'oxydoréduction ne sont pas totalement établies sur l'ensemble de la zone, même si l'on a montré que l'As (V) et le Fe (III) prédominent. Les résultats contradictoires observés entre les forages Las Acacias (C101) et Arq. Diego Andrade (C109) pourrait être en relation avec un temps de pompages trop court.

L'aquifère Ilaló, par la présence prédominante d'As (III) et du Fe (II) dans les forages, est le signe de conditions réductrices. Les résultats obtenus sur les sources de l'aquifère Ilaló, conditions oxydantes, s'avèrent contradictoires avec ce qui a été observé dans les forages, ceci peut être mis en relation avec la possibilité de dissoudre de l'oxygène, à partir des remontées de fluides par des fractures, ceci conduisant à une oxydation d'As.

Pour répondre à toutes les questions et conforter les hypothèses qui ont été évoquées pendant ces discussions, il serait intéressant dans des recherches futures, d'inclure les analyses des sédiments surtout dans les galeries de captation des sources et autour du volcan Ilaló, et également, des analyses des gaz dans les forages près du volcan et dans les forages mélangés.

4.2.5 CONCLUSIONS SUR LA CHIMIE

La chimie suggère des différences entre l'aquifère Ilaló et l'aquifère Chiche. En cohérence avec la piézométrie, la chimie discrimine la partie nord de celle du sud pour l'aquifère Chiche, cette dernière étant plus riche en magnésium alors que le faciès sodique prédomine au nord.

De même que pour la piézométrie, les paramètres physiques de l'eau ne montrent pas une saisonnalité marquée, et le peu de variabilité du faciès chimique de type Na-Mg-HCO₃, pourrait être le résultat d'un temps de résidence suffisamment long pour permettre des échanges entre les ions Ca²⁺ et Na⁺ entre la roche et l'eau.

Les teneurs en arsenic plus élevées dans l'aquifère Chiche nord, pourraient être interprétées comme des échanges entre cet aquifère et l'aquifère Ilaló dans le sens du flux.

Le taux de renouvellement de l'eau du système aquifère, la position de sa zone de recharge, la possibilité de distinguer le pourcentage de mélange des eaux des deux aquifères dans les forages, et le pourcentage de mélange des fluides géothermaux dans les eaux thermales, vont faire l'objet d'une analyse détaillée à travers l'outil isotopique présenté dans le sous chapitre suivant.

4.3 INTERPRETATIONS DES RESULTATS ISOTOPIQUES

Ce chapitre commence par un court rappel théorique sur les isotopes stables et radioactifs pour faciliter la compréhension des interprétations proposées.

4.3.1 BASE THÉORIQUE DES ISOTOPES STABLES

Les isotopes d'un élément chimique ont un comportement chimique presque identique mais une masse atomique et des propriétés physiques légèrement différentes.

On exprime la variabilité isotopique par le rapport isotopique, R , d'un élément, défini comme le rapport du nombre d'atomes de l'isotope le moins abondant (en général le plus lourd), A , divisé par l'isotope le plus abondant, B . Par exemple, le rapport isotopique du deutérium s'écrit :

$$R = \frac{{}^2H}{{}^1H} \quad (7)$$

Les teneurs isotopiques sont exprimées en pour mille (‰) avec la notation δ , en référence à un standard :

$$\delta = \frac{R_{éch} - R_{std}}{R_{std}} \times 1000 \quad (8)$$

Le standard (0‰) pour les isotopes stables de l'eau est le « Standard Mean Ocean Water de Vienne » élaboré par l'AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique) (V-SMOW). Par rapport à ce standard, la moyenne de l'eau océanique mondiale a une valeur de $\delta^2H = +0,2‰$ et en $\delta^{18}O = +0,04‰$. Pour le carbone, le standard est le PDB, un échantillon d'une bélemnite fossile de la Formation PeeDee en Caroline du Nord.

Les isotopes stables de l'eau, 2H et ${}^{18}O$, font partie de la molécule d'eau et donc sont des traceurs idéaux de son origine et de son comportement au long du cycle hydrologique. La coexistence de deux phases (e.g. liquide – vapeur) induit une différenciation isotopique appelée fractionnement isotopique. Plus généralement, au cours du cycle atmosphérique de l'eau, de nombreux changements de phase liquide-vapeur-neige interviennent provoquant un fractionnement isotopique entre les phases qui est une fonction de la température: la phase condensée est isotopiquement enrichie par rapport à la phase vapeur, et d'autant plus que la température est froide. A l'échelle mondiale, les eaux météoriques proviennent essentiellement de l'évaporation des eaux océaniques tropicales, générant une vapeur beaucoup plus appauvrie en isotope que les eaux océaniques. Cette vapeur remonte vers les latitudes plus élevées. Quand cette vapeur commence à précipiter, la pluie résultante sera plus enrichie que la vapeur mais moins que le réservoir océanique originel. Au cours des condensations successives la vapeur des nuages s'appauvrit de plus en plus, tout comme les précipitations résultantes. Ce modèle de vidange simple obéit à une loi de distillation de Rayleigh et fonctionne correctement dans les moyennes et hautes altitudes (Gat et al. 2001).

A l'échelle globale on note une corrélation très marquée, entre la température et les isotopes de la précipitation. En conséquence de quoi, où il y a un fort gradient de température, de forts gradients en $\delta^{18}O$ et δ^2H devraient être observés (Clark et Fritz 1997). Cette relation

sera donc mise en évidence dans les zones où l'on observe des variations notables de la température : c'est le cas de la variation latitudinale, altitudinale et localement dans les zones où la saisonnalité est marquée.

De façon corrélative, on observe un effet continental qui se traduit par un appauvrissement progressif des précipitations au fur et à mesure que la masse de vapeur s'enfonce au-dessus du continent (dans le cas simple d'une masse de vapeur d'origine océanique sans recharge continentale) ceci est lié au processus de vidange du nuage. La composition isotopique des précipitations dépend des conditions de température dans les nuages, et du degré de vidange qui se traduira par des précipitations plus ou moins appauvries au cours du parcours de la masse humide.

. Les explications théoriques et les résultats du fractionnement sont expliqués en Annexe 6A ainsi que les propriétés qui en découlent comme la relation entre l'oxygène 18 et le deutérium, qui sert à l'interprétation des processus que va subir l'eau au cours de son cycle.

4.3.2 BASE THÉORIQUE SUR LES ISOTOPES RADIOACTIFS

Pour l'âge ou le temps de résidence de l'eau, on utilise les isotopes radioactifs naturels qui sont caractérisés par un noyau instable. Ils se désintègrent en un autre élément chimique stable avec le temps. Le taux de désintégration ou l'activité est donné par :

$$-\frac{dN}{dt} = N \cdot \lambda \quad (9)$$

Soit N le nombre de radionucléides présents dans un échantillon à un instant t quelconque, dN le nombre total de désintégrations pendant un intervalle de temps dt et λ est la constante de désintégration du radio-isotope.

Si l'on reprend l'équation 11 et que l'on intègre l'intervalle de temps entre 0 et t pendant lequel le nombre de radionucléides se désintègre de N_0 à N , on obtient :

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda \cdot t \quad (10)$$

Ou, on peut écrire si l'on utilise l'activité A :

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (11)$$

Si la teneur initiale d'un isotope radioactif dans un système, A_0 , est connue et la teneur présente est mesurée, on peut alors calculer, l'âge du système avec l'équation 13.

On caractérise un isotope radioactif par sa demi-vie ($T_{1/2}$), qui est la durée au bout de laquelle le nombre de noyaux radioactifs restants N est égal à la moitié du nombre initial de noyaux N_0 ($N = N_0/2$). La demi-vie est liée à la constante de temps par la relation suivante et est unique pour un isotope radioactif donné:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (12)$$

A partir des propriétés des isotopes stables, nous avons utilisé l'outil isotopique pour localiser la zone de recharge des aquifères Ilaló et Chiche. Dans ce but, les isotopes stables de l'eau ont été mesurés, deutérium (D ou ^2H) et oxygène 18 (^{18}O) dans la pluie, sur quatre stations installées autour de la zone d'étude, à différentes altitudes, pour observer sa variabilité, et ensuite, dans les eaux de forages et les sources. De la même façon, nous avons fait des analyses des isotopes radioactifs, tritium (^3H) et carbone 14 (^{14}C), pour connaître le temps de résidence de l'eau dans le système.

4.3.3 INTERPRETATIONS DES ISOTOPES STABLES

4.3.3.1 Isotopes stables de la pluie

4.3.3.1.1 Variation de la précipitation

Les quatre stations pluviométriques de la région Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos ont été échantillonnées entre avril 2010 et août 2012. A l'échelle mensuelle, les variations de lames précipitées sont cohérentes avec la distribution observée dans la Vallée Interandine décrite au chapitre 1 (section 1.4).

Tableau 4.15. Quantité de pluie et sa composition isotopique en ^{18}O pondérée par la quantité de pluie, la période pour chaque année est indiquée.

Altitude (m)	Code	Station	2010 Avr - Déc		2011 Jan - Déc		2012 Jan - Sept		Total interannuel	
			Pluie (mm)	^{18}O (‰)	Pluie (mm)	^{18}O (‰)	Pluie (mm)	^{18}O (‰)	Pluie (mm)	^{18}O (‰)
2340	Pr4	Las Peñas	333	-14,95	840	-12,10	156	-10,73	1329	-12,66
2362	Pr3	Cumbayá	602	-12,59	1013	-11,42	574	-13,26	2189	-12,23
2480	Pr2	La Tola	573	-13,32	929	-11,71	431	-12,72	1933	-12,41
2976	Pr1	Rumipamba	1011	-14,52	1627	-12,13	886	-13,65	3524	-13,20
2850	Quito	Quito	1010	-12,78	1285	-12,98	659	-12,01	2954	-12,18

La même variabilité mensuelle et annuelle de la précipitation a été observée à Quito, où est maintenue une station de mesure isotopique des pluies depuis 2002. Cette station sera utilisée pour les calculs de gradient isotopique théorique (voir section 4.3.3.2) en raison de sa longue série de données, permettant de calculer une moyenne isotopique interannuelle stabilisée, de sa proximité à la zone d'étude et de sa similitude dans la répartition des pluies au cours de l'année (Tableau 4.15 et Figure 4.71).

La station Rumipamba – Pichincha (Pr1), la plus haute, a enregistré le plus de pluie ; elle est installée au pied du volcan Pasocha. Cette observation est en accord avec la distribution et le gradient de précipitation dans la zone d'étude (voir chapitre 1, section 1.4).

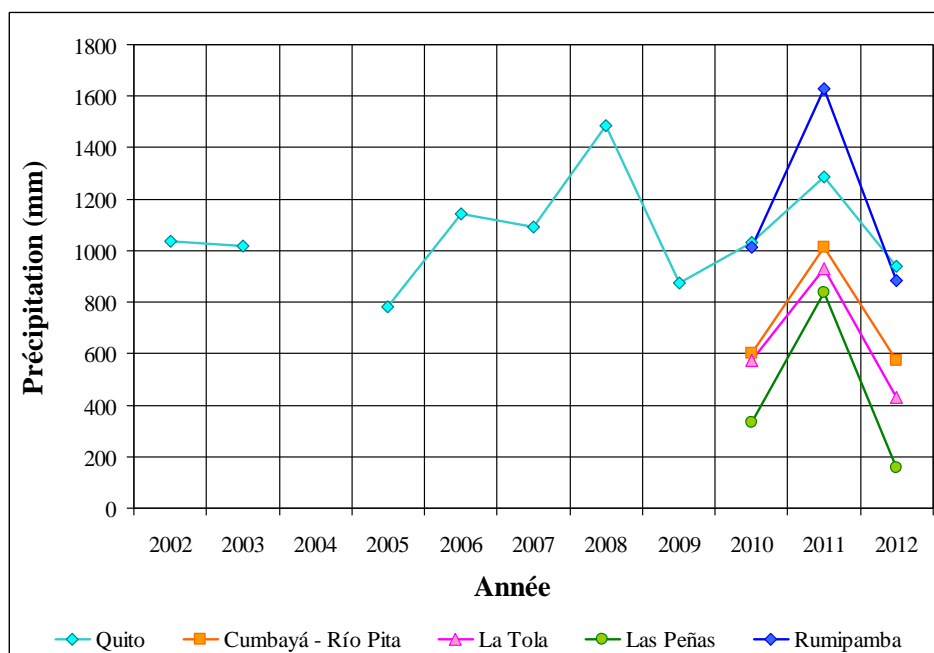


Figure 4.71. Répartition des pluies annuelles enregistrées dans la station Quito et les stations sur la zone d'étude.

4.3.3.1.2 Relations précipitation – isotopes stables : gradient altitudinal

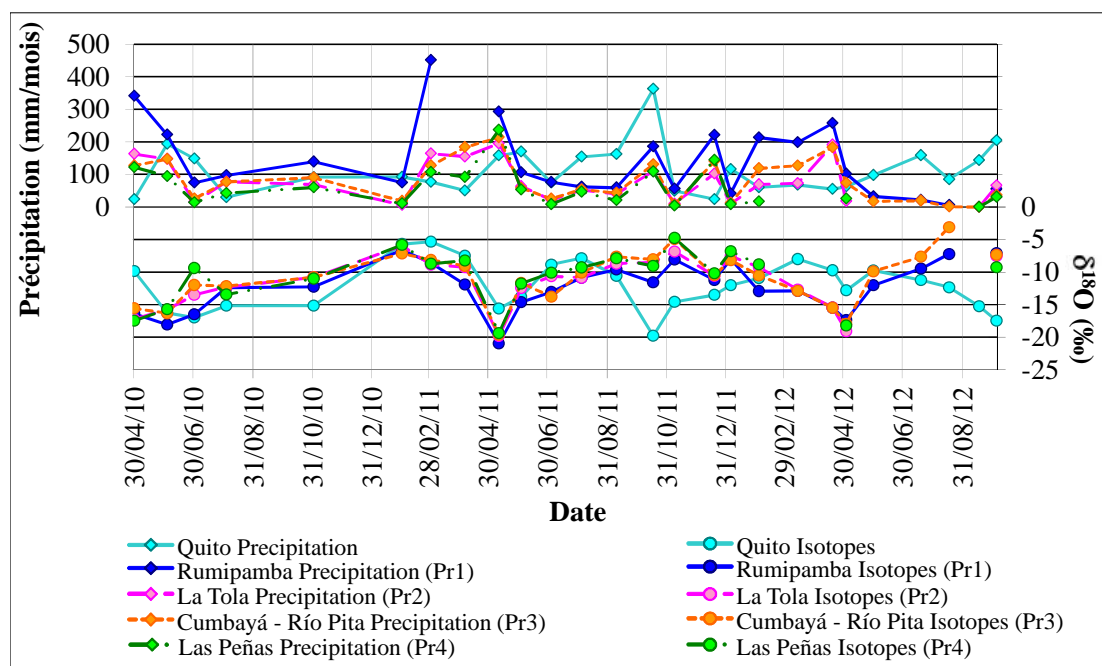


Figure 4.72. Variation de la précipitation et sa composition isotopique en ^{18}O sur les stations pluviométriques installées autour de la zone.

Les quatre stations ont des comportements extrêmement proches à l'échelle mensuelle et sont probablement représentatives de la dynamique régionale. Les hauteurs de pluie ont été comparées avec leur composition isotopique respective. La teneur isotopique a donc une saisonnalité similaire à la pluie : pendant les mois pluvieux, la composition isotopique est plus

appauvrie (Figure 4.72 et exemple sur la Figure 4.73) et à l'inverse, pendant la saison « sèche », les teneurs en isotopes sont plus enrichies. En effet, en zone équatoriale, la composition isotopique n'est pas contrôlée par la température qui varie peu, mais par la quantité de pluie (effet de masse) (Rozanski et al. 1993, Gonfiantini et al. 2001, Gallaire et al. 2010).

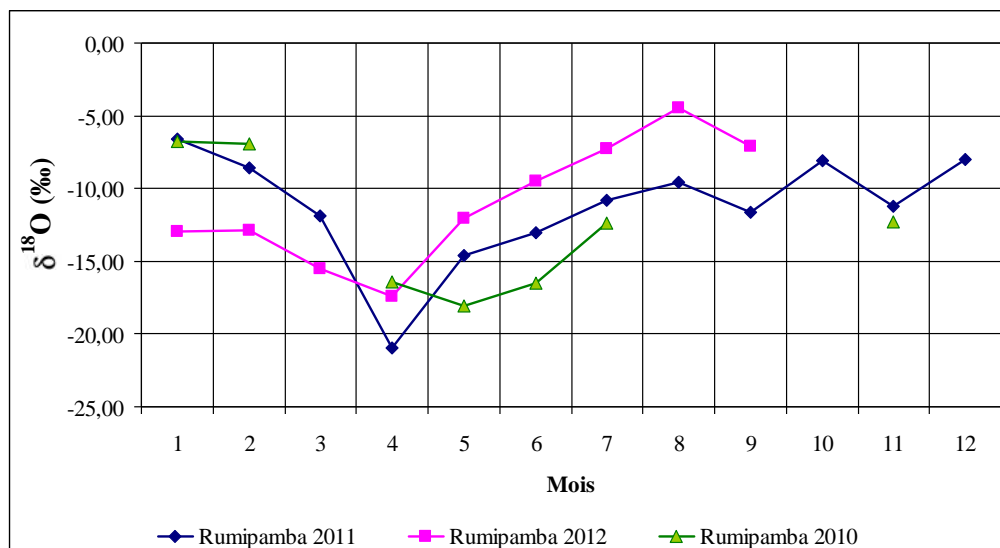


Figure 4.73. Exemple sur la variation mensuelle des isotopes au cours de l'année sur la station Rumipamba (Pr1).

Les données des isotopes des pluies des stations de la Vallée de Tumbaco, Los Chillos et Quito se positionnent globalement sur la Droite Météorique Mondiale définie par Craig (1961) (DMM) (Figure 4.74). Les droites des pluies locales sont très proches de la DMM. Pour cette raison, pour nos comparaisons avec les données isotopiques mesurées dans l'aquifère, nous allons utiliser la DMM comme référence pour les calculs de l'altitude des zones de recharge.

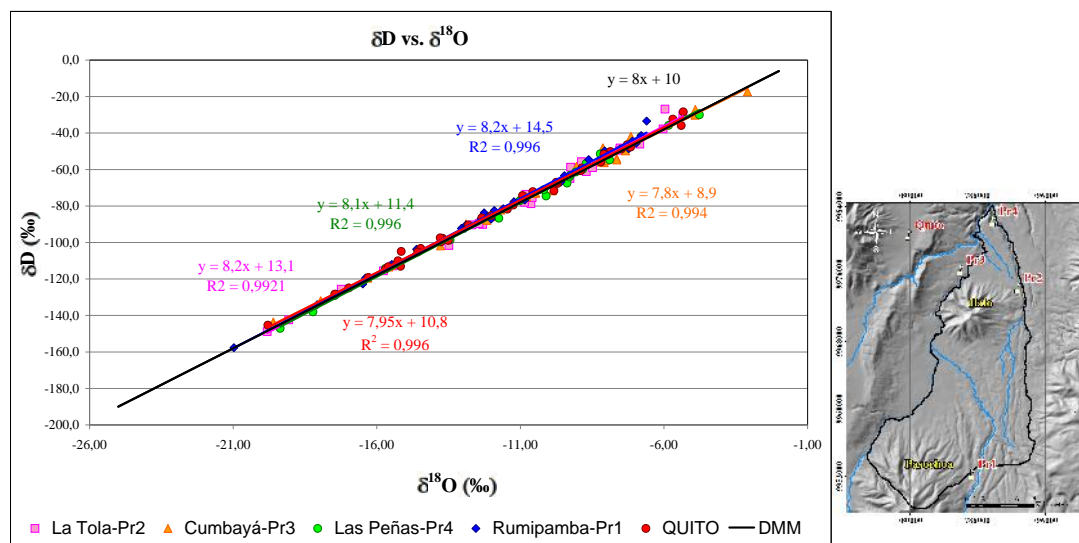


Figure 4.74. Droite Météorique Mondiale et pluies mensuelles mesurées sur les stations de la zone d'étude. Les couleurs des équations correspondent aux couleurs des stations indiquées sur la légende.

Une moyenne pondérée annuelle pour l'oxygène 18, a été calculée afin de la comparer avec la hauteur de pluie annuelle. Les résultats de la composition en ^{18}O montrent une distribution différente de la pluie à cette échelle (Tableau 4.15 et Figure 4.75). Sur la période 2010 – 2012, les teneurs en ^{18}O ne montrent pas un appauvrissement ou enrichissement par rapport à la quantité de pluie (Figure 4.76).

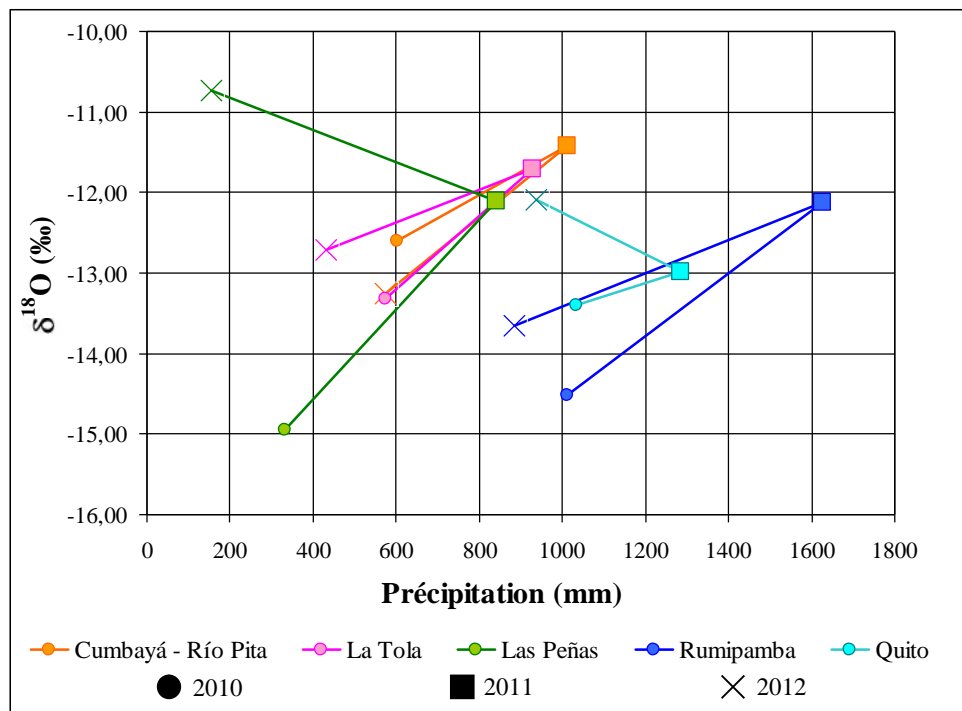


Figure 4.75. Relation précipitation et moyenne pondérée ^{18}O à l'échelle annuelle.

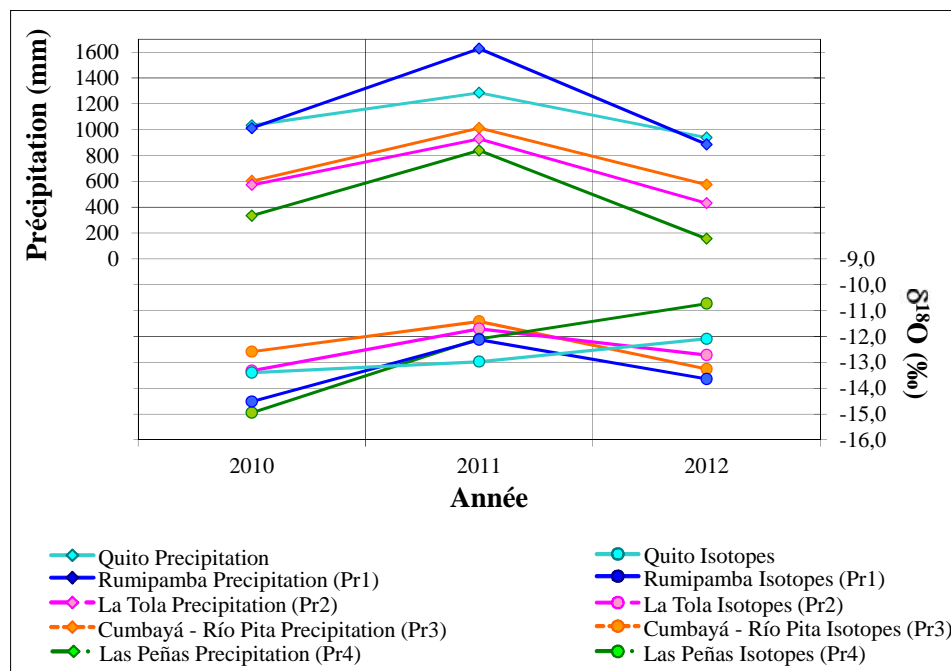


Figure 4.76. Variation de la précipitation et sa composition isotopique en ^{18}O sur les stations installées autour de la zone à l'échelle annuelle.

Les moyennes pondérées annuelles en ^{18}O sur les trois ans ont une variabilité similaire pour les 3 stations des Vallées de Tumbaco et Los Chillos et la station de Quito. La station Rumipamba (Pr1), plus haute, montre des précipitations plus appauvries, mais il n'est pas possible de calculer un gradient isotopique lié à l'altitude (Tableau 4.15). Cela est peut-être dû aux différences d'altitudes entre les stations qui ne sont pas très marquées, e.g. entre La Tola et Cumbayá il y a seulement 120 m de différence et l'effet d'altitude peut être atténué par l'effet de masse qui contrôle principalement les zones tropicales (Riatti-Shati et al. 2000). D'ailleurs, des gradients d'altitudes pour les isotopes ont été calculés souvent en zones tropicales mais il est important de remarquer que l'orientation du versant a des influences sur ce calcul. Dans les Andes les gradients ont été trouvés quand des stations, installées sur les flancs de montagne, sont orientées vers l'Amazonie (Gonfiantini et al. 2001), ou dans le cas, où un nombre de stations assez important est installé sur les deux versants : à l'intérieur de la chaîne et sur le versant amazonien (ou côtier) (García et al. 1997). Un autre phénomène qui a pu masquer l'effet d'altitude pendant ces 3 ans de mesures est la persistance durant les années 2011 et 2012 de la période froide de l'ENSO l'influence de « La Niña » fortement marquée (CPC 2013) conduisant à un appauvrissement isotopique, confirmé par les mesures du réseau d'observation de l'AIEA en Amérique Latine (moyenne pondérée de Quito entre 2002 – 2010 : -12,22‰, moyenne sur la période 2011 – 2012 : -12,60‰). Le phénomène ENSO en Amérique du Sud a une influence sur la température, la quantité de pluie et peut aussi influencer la contribution des différentes sources d'humidité (Vuille et al. 2003). L'ENSO est un facteur majeur qui contrôle les teneurs isotopiques dans la précipitation. En conséquence, ces données ne sont probablement pas assez longues pour calculer un gradient local qui représenterait les altitudes des zones de recharge à long terme.

Un gradient altitudinal sur des valeurs mensuelles de pluie a été calculé par Betancur (2008) pour la zone du « Bajo Cauca Antioqueño » au pied des Cordillères Occidentale et Centrale des Andes colombiennes, avec une configuration géographique similaire à la zone d'étude mais qui n'a pas subi l'influence d'un phénomène climatique ENSO au cours de la période de mesure. Ce gradient est de -0,21‰ / 100 m, mesuré entre 500 et 2300 m d'altitude à partir d'une année de données de précipitation (juin 2005 – juin 2006, 7 stations au total) pour lesquelles l' ^{18}O et l'altitude ont montré un coefficient de corrélation de 0,96 (Betancur 2008, Betancur et al. 2012). Ce gradient a été comparé avec celui calculé pour la zone de Quito par Aranyossy et al. (1989) qui est de -0,33‰ / 100 m obtenu à partir des teneurs isotopiques de sources situées dans la Vallée de Quito et la Vallée de Los Chillos à différentes altitudes et qui, selon ces auteurs et les évidence isotopiques, sont alimentées par les eaux météoriques récentes dans un bassin réduit (120 Km²) sans participation d'eaux d'origine différente (présence du tritium ~ 3 UT). Ces deux valeurs de gradients sont en accord avec la référence de -0,2 et -0,31‰ / 100 m pour les zones montagneuse donnée par Clark et Fritz (1997). La mesure d'un gradient sur des données des précipitations est plus précise que celui obtenu à partir de données de sources, qui elles peuvent être alimentées par une surface altitudinale plus importante. La discussion sur l'utilisation de ces gradients est présentée dans la section 4.3.3.2

4.3.3.1.3 Analyse de l'excès en deutérium

L'excès en deutérium a été calculé à partir des données d' ^{18}O et ^2H mensuelles (et moyenne pondérée annuelle). Ce paramètre a montré des valeurs similaires pour les trois années de mesures et il fluctue autour de 11‰, ce qui est un peu plus élevé que la moyenne mondiale de 10‰. En janvier 2011, une valeur exceptionnelle de +20‰ a été calculée qui est relié à un mois de janvier particulièrement sec (Figure 4.77). Un excès plus élevé que la

moyenne mondiale peut résulter d'un processus plus important de recyclage de l'humidité par évaporation des eaux de surface continentale, rechargeant la masse d'air au cours de son transport depuis la zone amazonienne (Gallaire et al. 2010). On a observé aussi des valeurs un peu plus basses, entre 6,5‰ et 7,5‰ entre juin et août, qui est la saison « sèche ». Les valeurs inférieures à 8,5‰ sont le signal d'une possible évaporation affectant les gouttes d'eau dans l'atmosphère sous les nuages (Figure 4.77).

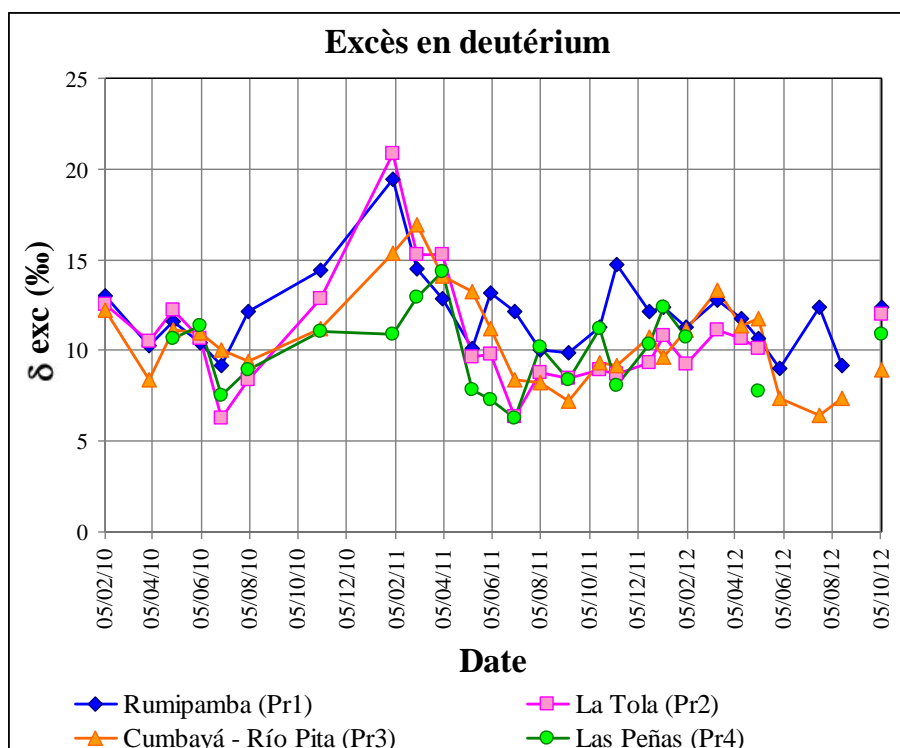


Figure 4.77. Variation mensuelle de l'excès en deutérium calculé à partir des données isotopiques de la pluie captée dans les stations installées sur la Vallée de Tumbaco et Los Chillos.

4.3.3.2 Isotopes stables dans l'aquifère de Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos. Calcul de l'altitude de la zone de recharge

L'échantillonnage isotopique dans l'aquifère ne montre pas de variation saisonnière (Tableau 4.16).

Tableau 4.16. Teneurs isotopiques de l'aquifère Chiche nord et l'aquifère Ilaló.

Date	El Carrizal	El Tingo Nuevo
	Chiche nord	Ilaló
23/04/2010	-10,88	-12,96
27/08/2010	-10,66	-12,65
21/04/2011	-10,79	-12,70
21/09/2011	-10,71	

L'aquifère Chiche nord a une composition isotopique globalement plus enrichie (entre - 9,80‰ et -11,56‰ en ^{18}O) que l'aquifère Ilaló (entre -11,32‰ et -12,94‰) (Figure 4.79 et Annexe 6B). Les valeurs des forages d'eaux mélangées se situent logiquement entre les deux pôles, avec des forages plus proches de la composition de l'aquifère Ilaló comme El Nacional

(M302) et le VCH 1 (M301) et d'autres plus proches de la composition de l'aquifère Chiche comme La Primavera (M303) (points en noir sur la Figure 4.79 et Tableau 4.17). Ces résultats sont proches des 21 valeurs de l'aquifère Chiche sud et 16 de l'Ilaló tirées de Changkuon et al. (1989) (points bleus sur la Figure 4.79 et Tableau 4.17, pour le détail de la localisation de ces points et les 5 points Ilaló en commun voir chapitre 3, Figure 3.13).

Les teneurs isotopiques en oxygène 18 et deutérium des aquifères ont été comparées avec la DMM (Figure 4.78). Les isotopes de l'aquifère Chiche nord sont en dessous de la DMM, avec une pente de 3,5, les isotopes du Chiche sud et de l'aquifère Ilaló échantillonnés et analysés dans cette étude, même s'ils sont séparés en deux groupes, sont sur la même droite de pente 6,7 (Figure 4.78) proche de la Droite Météorique Mondiale, ce qui indiquerait une faible modification des eaux d'origine météorique.

Tableau 4.17. Teneur en ^{18}O des eaux souterraines (données du Chiche sud tirées de Changkuon et al. (1989).

	Chiche Nord	Chiche Sud	Ilaló	Mélange
Moy	-10,66	-10,59	-11,84	-11,35
Max	-9,80	-9,75	-11,32	-10,42
Min	-11,56	-11,57	-12,96	-13,11
<i>ET</i>	0,47	0,47	0,53	0,75
n	33	24	20	22

Au contraire, la pente de 3,5 du Chiche nord semble liée à l'« oxygen-isotope shift » qui est caractéristique des eaux géothermales de haute température (Geyh 2000). Il y a deux processus physiques qui produisent cette tendance isotopique :

- i) Dans un système en pression : l'échange isotopique se fait entre l'eau et les minéraux de la roche, à condition d'être à plus de 220 °C. L'eau météorique qui s'infiltre en profondeur et forme un réservoir géothermal n'est pas en équilibre avec la roche. L'échange de l'isotope d'oxygène entre l'eau et la roche encaissante produit un enrichissement isotopique de l'eau, contrôlé par la température du réservoir. Ces eaux ont des pentes entre 0 et 1. (Geyh 2000).
- ii) Réchauffement d'une eau au contact ou non avec la roche dans un milieu sans pression : l'eau chauffe, il se crée de la vapeur, et un fractionnement se produit entre eau et vapeur sur les deux isotopes ^{18}O et ^2H , ce processus est hors équilibre et la vapeur peut être dissipée par les fractures. Ces eaux semblent évaporées et se situent sous la DMM avec une pente inférieure à 5

La pente de 3,5 pour les données du Chiche nord pourrait être le résultat de conditions géothermales supérieures à 120 °C (Geyh 2000). Une pente similaire a été observée dans des systèmes géothermaux pour des eaux qui résultent soit d'un mélange entre l'eau météorique et des eaux magmatiques profondes, soit par un réchauffement de l'eau provoqué par le dégazage du magma ou soit par des eaux dont le temps de résidence est suffisamment long pour que les eaux subissent un échange avec la roche, qui se reflèterait aussi dans les corrélations entre les isotopes et d'autres éléments comme les teneurs en bore ou les chlorures (Janik et al. 1992, Shevenell et Goff 1993, Goff et McMurtry 2000).

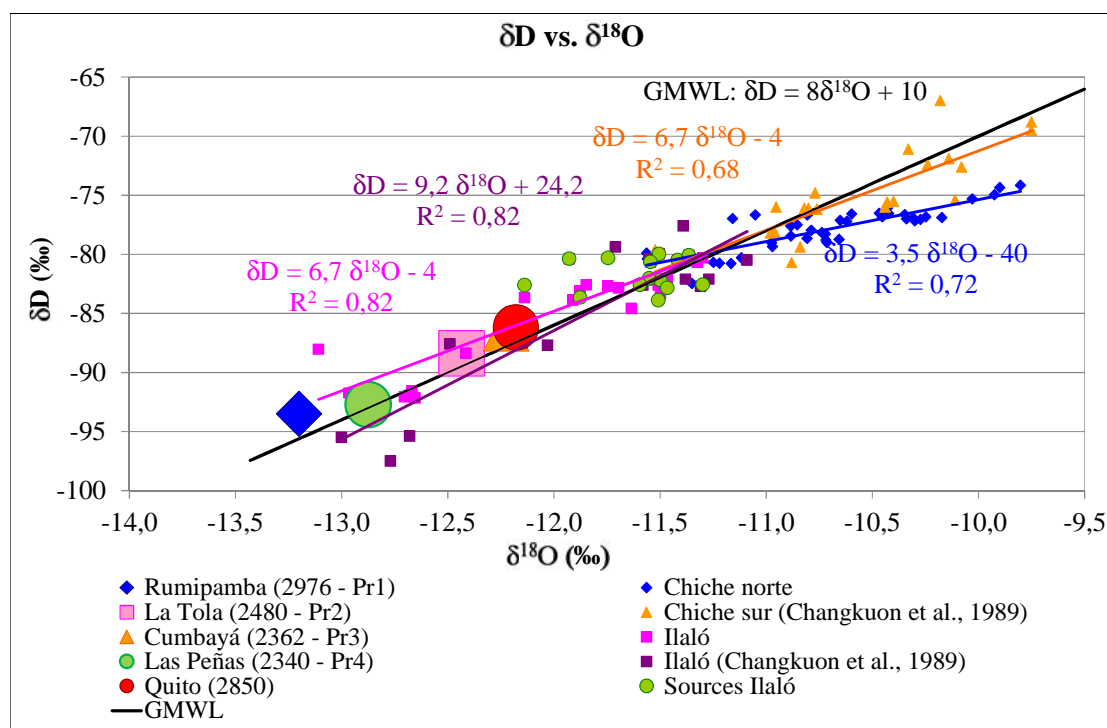


Figure 4.78. Relation $\delta D - \delta^{18}O$ des eaux des aquifères Chiche et Ilaló et de la pluie.

Deux causes pourraient expliquer la droite de pente 3,5 caractérisant l'aquifère Chiche nord : i) une distribution géographique des teneurs en ^{18}O liée à leur position par rapport au volcan Ilaló et ii) l'échange isotopique eau-roche magmatique.

La première hypothèse est infirmée par la Figure 4.79 qui ne montre pas d'organisation géographique des teneurs isotopiques par rapport au volcan Ilaló.

Pour la seconde hypothèse, la pente de 3,5 est caractéristique d'eaux géothermales, mais l'aquifère Chiche nord n'a pas montré d'indices d'hydrothermalisme en surface. On pourrait supposer un refroidissement des eaux dans la direction de flux ce qui a été montré dans le chapitre 4.2 (section 4.2.2) par la distribution géographique de la température par rapport au volcan Ilaló, et elles auraient perdu leur phase vapeur, évacuée à travers la fracturation présente dans la Formation Chiche. Ceci impliquerait aussi que les eaux seraient suffisamment anciennes, pour perdre leur caractéristique géothermale tout en conservant leur signature isotopique géothermale.

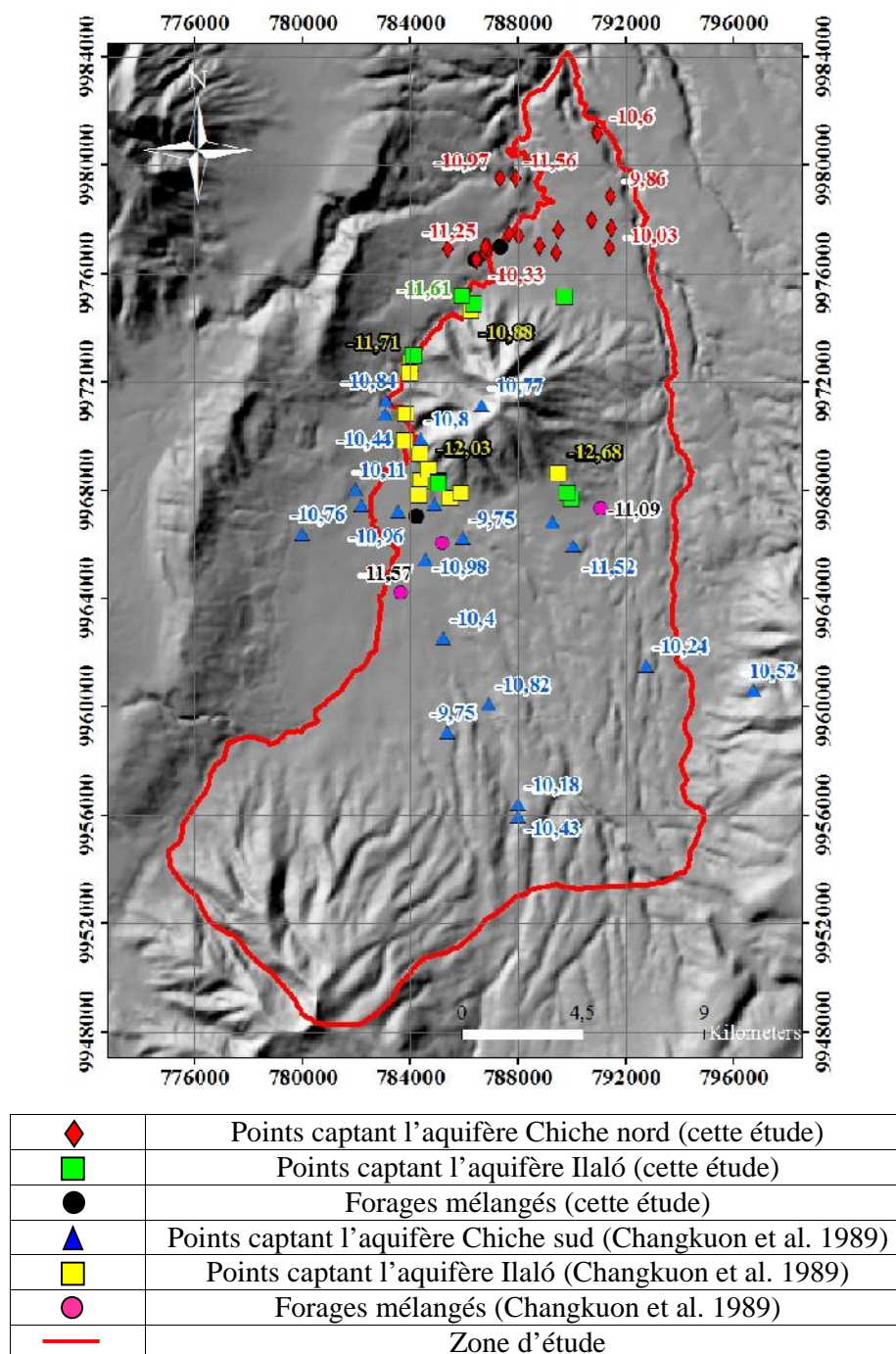


Figure 4.79. Distribution spatiale de ^{18}O .

La question qui se pose alors est pourquoi ce phénomène de géothermalisme à très haute température existerait dans l'aquifère Chiche nord mais pas dans l'aquifère Ilaló. L'aquifère Ilaló présente des caractéristiques hydrothermales, avec des eaux mesurées en surface entre 35 et 42 °C quand la température ambiante moyenne annuelle est de 18 °C. Les isotopes de cet aquifère sont alignés à proximité de la DMM, phénomène qui a été observé aussi dans d'autres systèmes marqués par le géothermalisme (Almeida et al. 1992, D'Amore et al. 1992, Giggenbach et al. 1992b, Scandiffio et Cassis 1992, Goff et McMurtry 2000). Les auteurs attribuent l'absence de marquage isotopique du géothermalisme à deux processus possibles : d'une part, la présence d'eau d'origine météorique qui n'a pas eu d'échange isotopique avec

la roche car la température est peu élevée (<80°C) ; et d'autre part des eaux météoriques qui ont été réchauffées par des gaz venant du magma (Janik et al. 1994, Scholl et al. 1996). Ces deux possibilités, qui pourraient expliquer ce que l'on observe sur l'aquifère Ilaló, ne sont pas pertinentes pour l'aquifère Chiche, qui paraît marqué isotopiquement par un géothermalisme alors que les températures mesurées en surface restent près de la moyenne annuelle de la température ambiante.

Dans l'état de connaissance du système, cette question ne peut pas être résolue avec précision. Pour calculer une zone de recharge pour l'aquifère Chiche nous allons considérer uniquement les points sur la DMM puisque les signatures des eaux évoluées dérivent de cette teneur météorique initiale et ceci afin d'éviter une interprétation erronée de l'altitude de recharge du fait d'une composition isotopique modifiée par les processus d'échange entre l'eau et la roche.

La zone de recharge sera calculée sur l'hypothèse que les conditions climatiques actuelles n'ont pas notablement changé depuis le début de l'Holocène, autour de 13.000 ans (van der Hammen 1974, Ledru et al. 2013), avec des conditions de température identiques aux moyennes actuelles (van der Hammen 1974).

Le problème de représentativité, mentionné précédemment, de la chronique isotopique des pluies sur la zone d'étude, nous a amené à utiliser la série longue de Quito (depuis 2002, -12,18‰ en ^{18}O et -86,2‰ en ^2H en moyenne interannuelle) pour le calcul théorique de l'altitude de la zone de recharge.

L'altitude de recharge va être obtenue par la formule suivante :

$$dh = \frac{(u^{18}\text{O}_{\text{Quito}} - u^{18}\text{O}_{\text{Aquifère}}) * 100}{\text{gradient}} \quad (13)$$

Cette dernière est calculée en soustrayant dh à l'altitude de la station Quito (2850 m) (Figure 4.80).

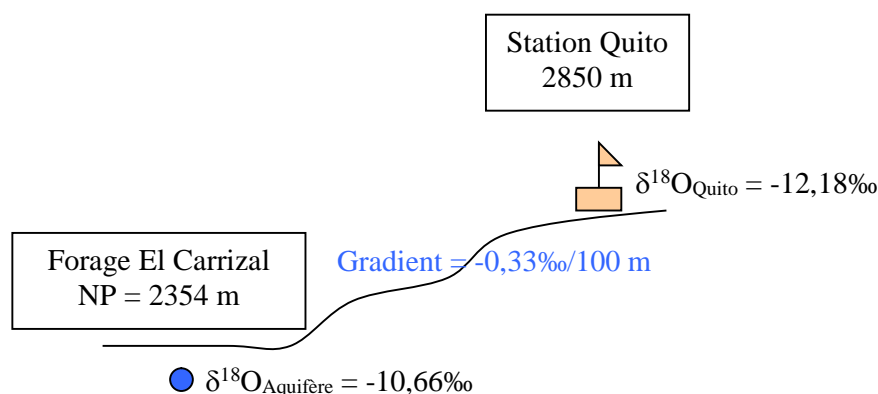


Figure 4.80. Schéma de calcul d'altitude d'infiltration sur le système aquifère. Exemple du forage El Carrizal de l'aquifère Chiche nord.

Pour l'aquifère Chiche, la zone de recharge a été évaluée entre 2300 et 2700 m. Ceci correspond à la surface recouverte par la formation Cangahua, supposée imperméable. Dans la partie sud, la zone de recharge pourrait se situer au pied du volcan Pasochoa. Au nord, elle

pourrait se localiser au pied du volcan Ilaló, et au niveau du lit des petites rivières qui prennent naissance et qui sont en contact avec la Formation Chiche en bas de pente du volcan (pour la localisation voir chapitre 4.4, section 4.4.3).

Pour l'aquifère Ilaló, la zone de recharge a été évaluée de la même façon, à partir du gradient mesuré par Aranyossy et al. (1989). L'infiltration se ferait entre 2600 et 3100 m, donc sur les zones d'affleurement de la Formation Ilaló selon la carte géologique de la Figure 2.5 (DGGM 1980). Si l'on considère des conditions climatiques d'infiltration similaires à l'actuel, cette hypothèse n'est pas cohérente avec la morphologie du volcan, où les pentes à cette altitude sont très prononcées. De plus, cette hypothèse de recharge pour l'aquifère Ilaló ne satisfait pas la condition d'aquifère captif qui le caractérise (voir chapitre 4.1). L'autre possibilité de recharge serait une infiltration régionale de circulation profonde. L'eau s'infiltrerait sur les flancs des volcans autour de la zone d'étude.

Une dernière hypothèse qui peut être abordée concernant la zone de recharge de l'aquifère Ilaló est une infiltration dans des conditions climatiques différentes, en particulier des conditions plus froides, ce qui serait cohérent avec les âges ^{14}C pour cet aquifère (section 4.3.4.2). Les eaux se seraient infiltrées pendant le Pléistocène supérieur où des conditions notablement plus froides ont été enregistrées (van der Hammen 1974). Cette hypothèse implique que l'infiltration locale sur les flancs du volcan Ilaló a été possible, mais, cette zone de recharge ne serait plus fonctionnelle actuellement en relation avec des dépôts de cendre conduisant à une imperméabilisation en surface et une mise en pression de l'aquifère.

4.3.3.3 Conclusion sur les isotopes stables

L'aquifère Chiche pourrait être marqué par un processus à haute température ($>120^\circ\text{C}$) qui a créé de la vapeur, conduisant à un fractionnement des deux isotopes sur la phase liquide résiduelle complété par un échange entre l'eau et la roche privilégiant l'enrichissement de l'oxygène 18, donnant un signal isotopique particulier à l'eau dont les points se situent sur une droite en dessous de la DMM de pente 3,5. Ce signal n'est pas observé dans les eaux hydrothermales de l'aquifère Ilaló, dont les points se situent à proximité de la Droite Météorique Mondiale, et dont l'origine est uniquement météorique, et pourtant ces eaux sont plus près de la source de chaleur. Dans l'état actuel de cette recherche, cette différence de comportement n'a pas pu être expliquée.

L'outil isotopique a permis de proposer une altitude pour les zones de recharge pour l'aquifère Chiche en accord avec les résultats hydrodynamiques. L'infiltration aurait lieu très probablement dans la partie la plus élevée de la zone d'étude au sud, sur les flancs du volcan Pasochoa et au pied du volcan Ilaló au nord. Pour l'aquifère Ilaló, la recharge s'est probablement produite sur les flancs du volcan Ilaló dans des conditions climatiques plus froides que les conditions climatiques actuelles.

4.3.4 INTERPRÉTATIONS DES ISOTOPES RADIOACTIFS

4.3.4.1 Tritium

Le tritium a une demi-vie de 12,43 ans. L'activité du tritium est exprimée en unités tritium (UT), correspondant à un atome de ^3H pour 10^{18} atomes d'hydrogène ou 1,185 Bq/L. Le tritium se comporte comme un traceur conservatif de la molécule de l'eau.

Le niveau naturel du ^3H dans la précipitation est de quelques UT, dépendant de la latitude, produit dans la haute atmosphère par interaction entre les rayons cosmiques et les atomes d'azote. A partir des années 1950, les niveaux de ^3H dans les précipitations ont fortement augmenté et ont atteint 6000 UT en 1963, en relation avec les essais atomiques effectués dans l'atmosphère, principalement dans l'hémisphère nord jusque dans les années 1963 / 1964. Après le moratoire sur ces essais en 1963, les niveaux de tritium dans l'atmosphère ont baissé, jusqu'à revenir dans les années 1990 à leur niveau naturel, soit inférieur à 10 UT dans l'hémisphère nord. Dans l'hémisphère sud, l'évolution du ^3H a été similaire, mais avec des teneurs beaucoup plus basses et un décalage de 2 ans. Le niveau naturel dans la zone tropicale de l'hémisphère sud est faible de l'ordre de 2 à 3 UT en moyenne annuelle.

Pour avoir une chronique de l'évolution du ^3H dans la précipitation, l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) a mis en place un réseau global de quelques centaines de stations dans 125 pays dans les années 1960 afin d'analyser les isotopes de l'eau de pluie (http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html).

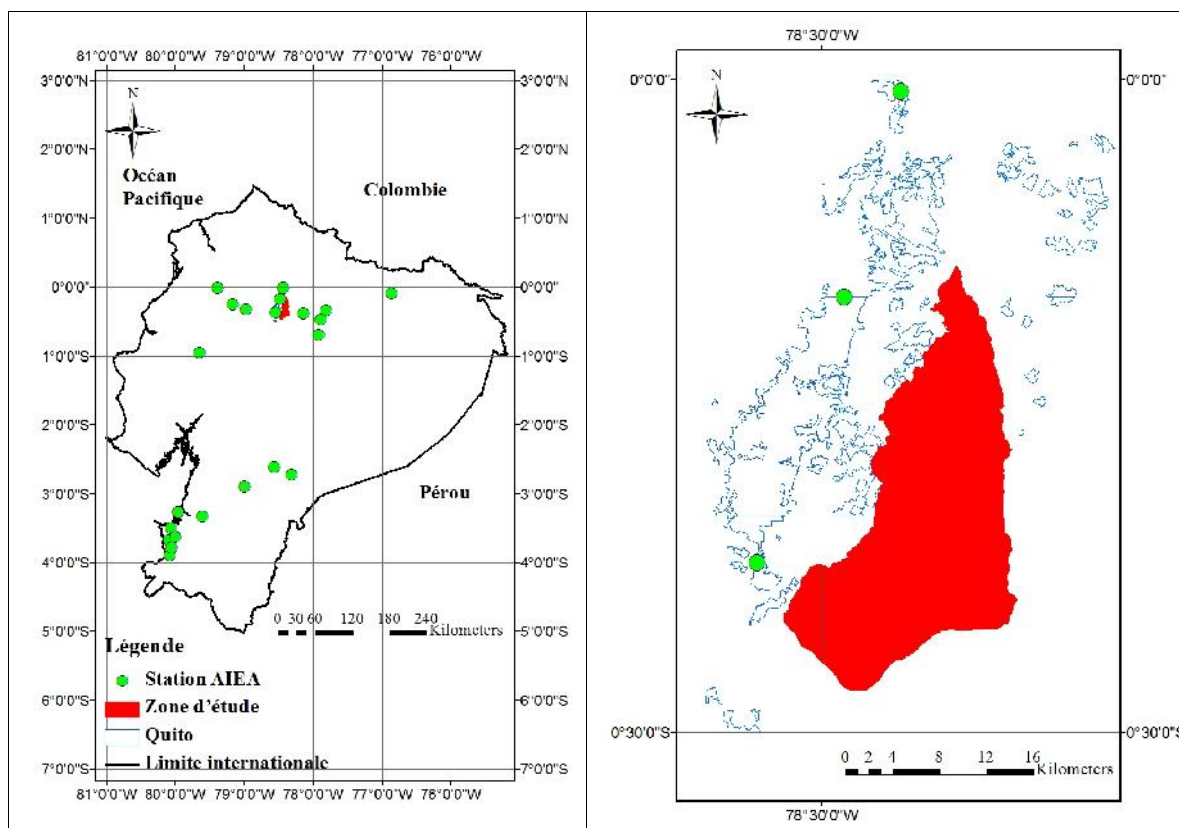


Figure 4.81. Localisation des stations de l'AIEA dans l'Equateur et stations près de la zone de Tumbaco.

En Equateur 20 stations sur une durée limitée (entre 1 ans et 4 ans) et 3 stations avec de longues séries de données ont été installées par l'AIEA (AIEA-GNIP 2012) dont 2 ont des mesures de tritium près de la zone d'étude (Figure 4.81). La pluie actuelle à Quito a une valeur annuelle de 3,0 UT.

Dans les aquifères de notre zone d'étude, à l'exception d'un point dans l'aquifère Chiche, (la source « Las Chirimoyas 1 » (C201), très au nord, sur la « quebrada » de la rivière Chiche avec 0,6 UT), le niveau de tritium reste sous la limite de détection (0,5 UT). Cette absence de tritium dans les eaux souterraines indique que l'infiltration a obligatoirement eu lieu avant 1950 dans le cas d'un modèle piston flow. Le point Las Chirimoyas sera discuté avec les résultats de carbone 14.

4.3.4.2 Carbone 14

Le ^{14}C a une demi-vie de 5730 ans et permet des datations jusqu'à 50.000 ans environ. Il est formé naturellement dans la haute atmosphère à partir de l'interaction des rayons cosmiques et des atomes d'azote, selon le même processus que le tritium. L'activité du ^{14}C est exprimée en pourcentage par rapport à un standard de carbone moderne (pmc). Le pic de ^{14}C lors des essais nucléaires atmosphériques offre la possibilité, sous certaines conditions, comme le ^3H , de dater les eaux souterraines récentes puisque les activités ^{14}C ont alors été supérieures à 100%.

La datation des eaux souterraines par la méthode du ^{14}C a été développée par Libby (1946) pour des échantillons organiques. Selon le modèle de Libby, le ^{14}C produit par les rayons cosmiques est oxydé en CO_2 dans l'atmosphère et intègre le cycle global du CO_2 , dont les plus importantes étapes sont l'assimilation par les plantes et le rejet par les racines et par sa minéralisation à travers le cycle du carbone dans la phase aqueuse ($\text{CO}_2\text{-H}_2\text{CO}_3\text{-HCO}_3\text{-CO}_3^{2-}$, CaCO_3). Le ^{14}C n'est pas un traceur conservatif sensu stricto de l'eau souterraine parce qu'il ne fait pas partie de la molécule d'eau mais du carbone inorganique dissous présent dans l'eau de l'aquifère. Cependant, le carbone issu principalement du CO_2 de la zone racinaire va être entraîné lors du transfert de l'eau de la zone de recharge jusqu'à l'aquifère. Dans ce contexte, le plus simple, la mesure du carbone minéral dans les eaux souterraines est une bonne approximation du temps écoulé entre le moment où l'eau s'infiltre dans la zone de recharge jusqu'au point d'aquifère où l'on effectue la mesure et représente assez bien le taux de résidence de l'eau.

En condition naturelle, le plus souvent, l'eau a un pH entre 6,5 et 8, et l'espèce prédominante est le bicarbonate. Le CO_2 gaz dans le sol est produit par la respiration des racines et la dégradation de la matière organique (activité du $^{14}\text{C} = 100$ pmc). Ce gaz est dissous par l'eau de pluie qui s'infiltre formant du H_2CO_3 qui peut ainsi attaquer la phase minérale silicatée des sols en particulier les plagioclases et les acides humiques, l'eau se basifiant progressivement on a déplacement du carbone vers les bicarbonates que l'on retrouve de manière prédominante dans les eaux de l'aquifère dans la gamme de pH de la plupart des eaux naturelles, 6,5 – 8. Dans ce cas de figure, l'activité initiale décroît au fur et à mesure et on peut calculer directement l'âge de l'eau suivant son chemin depuis la surface, on parlera de pôle biogénique. L'eau peut aussi dans certains cas avoir une autre source de carbone qu'elle peut dissoudre, formations carbonatée d'origine marine ou continentale, CO_2 d'origine volcanique qui par leur grand âge ont une activité carbone 14 de 0%, on parle dans ce cas de pôle minéral. Dans l'aquifère on peut donc avoir deux sources de bicarbonates, qui va au final donner une activité radiocarbone qui dépendra du mélange des deux pôles. Il est bien évident que dans ce cas on ne date plus le cheminement du carbone dans l'eau depuis le moment de son infiltration et la transformation en âge de l'activité n'est pas possible à partir de la seule équation de décroissance. Il est nécessaire de corriger l'activité initiale ($A_0 = 100$) pour dater les eaux.

Plusieurs modèles chimiques ou isotopiques permettent d'estimer l'activité initiale du ^{14}C tels que : Ingerson et Pearson (1964), Tamers (1967), Evans et al. (1979), Fontes et Garnier (1979), Mook (1980), Salem et al. (1980), Eichinger (1983), Fontes (1983), Olive (1999), ces modèles utilisent soit le bilan chimique des espèces carbonées, soit la composition isotopique en ^{13}C qui joue un rôle très important pour quantifier l'interaction eau - roche pour la correction d'âge du ^{14}C (Vogel et Ehhalt 1963) de la surface à l'aquifère et qui incluent le fractionnement isotopique et les possibilités de mélanges des deux pôles biogénique et minéral. A partir de la même information hydrochimique et isotopique, les corrections d'âges peuvent varier de quelques milliers d'années selon les modèles. Il est donc important de vérifier la cohérence des résultats et le choix du modèle. Il faut aussi être prudent sur la définition isotopique des pôles de référence biogénique et minéral, requis par les modèles mais en général seulement estimés et non mesurés. Les modèles estiment, de façon usuelle, que la source du pôle minéral est constituée par les carbonates contenus dans la formation géologique ; il n'existe pas de modèle qui prend en compte la possibilité d'un échange isotopique avec un CO_2 d'origine volcanique et son comportement dans la phase liquide (transformation totale ou partielle du gaz en bicarbonates...) d'où va dépendre la valeur du fractionnement isotopique en ^{13}C , il faut donc adapter les modèles à la réalité de l'aquifère étudié.

Le ^{13}C permet d'identifier les sources du CO_2 impliquées dans le système carbonate – CO_2 et les fractionnements isotopiques tout le long du chemin de l'eau en fonction du pH de la solution. La composition isotopique du carbone dans le carbone dissous dans les eaux souterraines est très variable. Les sources du carbone dissous sont le CO_2 du sol, CO_2 d'origine géogénique ou magmatique (de la croûte profonde ou du manteau terrestre) ou dans les inclusions fluides, la matière organique dans les sols ou les roches, le méthane, et les minéraux carbonatés. Chacune de ces sources a une teneur isotopique en ^{13}C différente et peut contribuer au total du carbone dissous. Pour cette raison, les teneurs isotopiques du ^{13}C du carbone inorganique dissous dans les eaux souterraines présentent une gamme assez large (Figure 4.82).

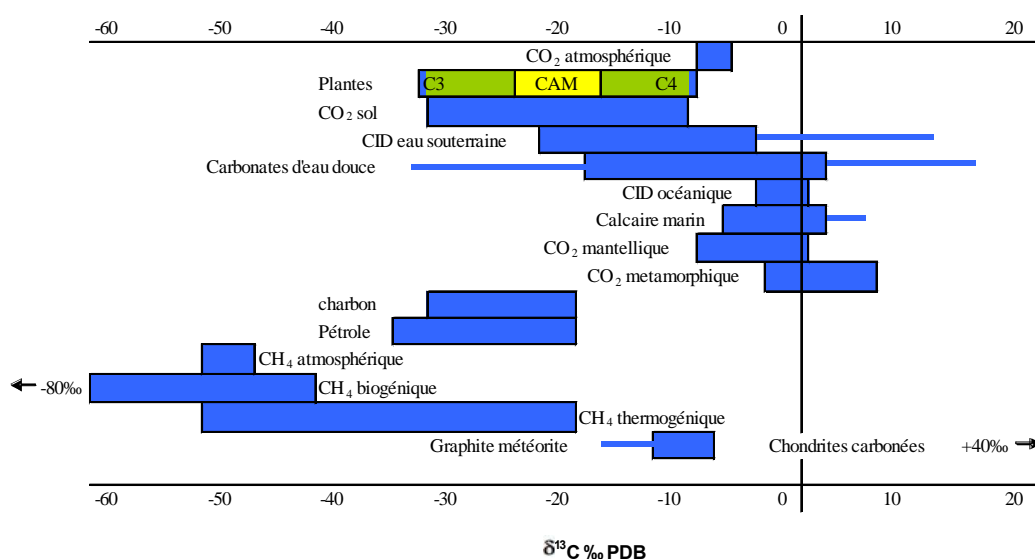


Figure 4.82. Gamme de valeurs du $\delta^{13}\text{C}$ dans plusieurs composés naturels sélectionnés. Modifié de Clark et Fritz (1997).

Dans l'aquifère Chiche, seul le point « Las Chirimoyas 1 » a une activité ^{14}C supérieure à 100%, ce qui correspond à des eaux récentes, infiltrées après 1950, en cohérence avec le

tritium. Les autres points de l'aquifère Chiche ont des activités ^{14}C entre 45,4 et 87,4 pmc, résultats cohérents avec l'absence de tritium, ce qui donne un âge apparent de l'eau entre 1000 et 6000 ans. Les points de l'aquifère Ilaló ont une activité ^{14}C plus faible, inférieure à 20 pmc, avec un âge apparent entre 11000 et 46000 ans (Tableau 4.18). Ces âges ont été calculés avec la loi de désintégration. On est dans un système volcanique, donc avec la possibilité de CO_2 d'origine profonde qui peut être en contact avec l'aquifère Ilaló, cas noté d'ailleurs pour le forage El Tingo Nuevo (I102) ou 5 Naval (I105). Les âges doivent donc être vérifiés et éventuellement corrigés à partir des teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ des bicarbonates, ce qui va permettre de discriminer le carbone biologique du CO_2 profond qui pourrait vieillir l'âge apparent de l'eau.

Par la présence de tritium et une activité ^{14}C supérieure à 100%, la source Las Chirimoyas 1 (C201) au nord de l'aquifère Chiche contient des eaux récentes, peut-être liées à un système de faille favorisant un transfert rapide de la surface jusqu'à l'aquifère et qui compartimente aussi l'aquifère. Ces eaux ayant une activité carbone 14 élevée, la valeur du ^{13}C représente très probablement principalement l'échange entre le CO_2 du sol et l'eau souterraine dans les conditions climatiques actuelle, et on peut donc assumer que cette valeur a une origine biologique exclusive qui représente la teneur en ^{13}C de la végétation locale.

Les autres forages et sources ont des valeurs de ^{13}C plus enrichies que « Las Chirimoyas ». Cet enrichissement est en possible relation avec un mélange de deux sources différentes de CO_2 , le CO_2 biogénique d'une part et le CO_2 profond d'autre part, ainsi pour estimer un temps de résidence de l'eau, les âges calculés devront être corrigés.

Pour la correction des âges nous avons utilisé le logiciel Diagrammes de l'Université d'Avignon (Simler 2004) qui propose les 9 modèles cités précédemment (Tableau 4.19). Tous les modèles, à l'exception de ceux de Mook, Fontes et Garnier eq. (F & G eq.) et Salem, sous-estiment A_0 , ce qui conduit à avoir des âges négatifs de l'eau dans l'aquifère Chiche. Par contre le modèle de Fontes (1983) (F & G eq.) surestime A_0 ; cette erreur est facilement détectable parce que l'âge de 600 ans ainsi donné à « Las Chirimoyas 1 » est incompatible avec les eaux post-1950. Le modèle de Mook (1980), négligeant les échanges isotopiques entre l'eau et le CO_2 d'origine minérale, ne nous permet pas d'inclure dans le modèle le gaz provenant du volcan et il a été rejeté pour cette raison.

On a utilisé, en conséquence, le modèle de simple mélange proposé par Gonfiantini (Salem et al. 1980) pour corriger les âges calculés en introduisant la teneur en ^{13}C du gaz biogénique et du CO_2 profond :

$$A_0 = \frac{100 \cdot ({}^{13}\text{C}_{\text{DIC}} - {}^{13}\text{C}_{\text{geo}})}{{}^{13}\text{C}_g - \varepsilon_{\text{CO}_2\text{-DIC}} - {}^{13}\text{C}_{\text{geo}}} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \varepsilon_{\text{CO}_2\text{-DIC}}}{1000} \right) \quad (14)$$

$$t = - \left(\frac{5730}{\ln 2} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{A}{A_0} \right) \right] \quad (15)$$

où t est l'âge calculé, A , l'activité du ^{14}C mesuré et A_0 , l'activité initiale du ^{14}C . Pour calculer A_0 , on utilise l'équation 16, où ${}^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ est la valeur de ^{13}C du carbone inorganique dissous mesuré dans l'eau souterraine, ${}^{13}\text{C}_{\text{geo}}$ est la valeur du ^{13}C provenant du CO_2 profond, ${}^{13}\text{C}_g$ est le ^{13}C provenant de la zone racinaire au moment de la recharge et $\varepsilon_{\text{CO}_2\text{-DIC}}$ est le facteur de fractionnement du CO_2 du sol et du carbone inorganique dissous dans l'eau (HCO_3^-) à la température mesurée dans les forages, ce coefficient a été calculé à partir de l'équation

Chapitre 4 : Interprétations des résultats

18 proposée par Mook et al. (1974) pour les températures entre 5°C et 125°C. Pour résoudre cette équation, il faut comprendre la dynamique du ^{13}C dans l'eau et définir la valeur du ^{13}C biogénique et du CO_2 profond.

$$V_{\text{CO}_2\text{-DIC}} = \frac{-9.483 \times 10^3}{T[^\circ\text{K}]} + 23.89\text{‰} \quad (16)$$

Tableau 4.18. ^{14}C et ^{13}C des eaux des aquifères Chiche et Ilaló (localisation en chapitre 3, Figure 3.13).

ID	Aquifère	Station	Date	^3H (UT)	Erreur \pm (UT)	^{14}C (pcm)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ vs PDB) ¹
C201	Chiche nord	Chirimoyas 1	19-avr.-10	0,6	0,5	$103,3 \pm 0,5$	-10,62
C109	Chiche nord	Diego Andrade	13-mai-10	b.d.l.	-	$55,5 \pm 0,4$	-9,41
C101	Chiche nord	Las Acacias	21-juin-10	b.d.l.	-	$69,9 \pm 0,3$	-10,44
C103	Chiche nord	El Carrizal	21-sept.-11			$87,4 \pm 0,4$	-9,40
C105	Chiche nord	Patagua	28-sept.-11			$58,8 \pm 0,3$	-8,18
C104	Chiche nord	MICEI	30-sept.-11			$45,4 \pm 0,3$	-7,99
C204	Chiche nord	EEQ	26-oct.-12			$83,8 \pm 0,4$	-10,88
M303	Mélangé	Primavera 1	24-juin-10	b.d.l.	-	$36,8 \pm 0,3$	-9,67
M302	Mélangé	El Nacional	19-avr.-10	b.d.l.	-	$13,4 \pm 0,5$	-7,38
I102	Ilaló	El Tingo Nuevo	21-avr.-10	b.d.l.	-	$0,3 \pm 0,6$	-8,48
I206	Ilaló	Rumiloma 1	19-avr.-10	b.d.l.	-	$14,9 \pm 0,4$	-10,26
I203	Ilaló	Cununyacu externe	10-mai-10	b.d.l.	-	$19,3 \pm 0,3$	-8,02

Tableau 4.19. Résultats de calculs d'A0 avec les modèles proposés par Diagrammes.

Aq.	Forage	A ¹⁴	Age brut	Tamers	Pearson	Mook	F & G	F & G éq	Salem	Evans	Eichinger	Olive
Chiche nord	El Carrizal	87,4	1113	-4063	-4682	-83	-4708	1725	112	-5025	-5311	-6081
Chiche nord	Acacias	69,9	2960	-2503	-1968	2673	-1572	3507	2818	-2243	-2416	-3917
Chiche nord	MICEI	45,4	6528	857	-611	4570	-684	4147	4023	-1141	-1276	-133
Chiche nord	Diego Andrade	55,5	4867	-96	-920	3438	-958	5968	3748	-1298	-1631	-2579
Chiche nord	Patagua	58,8	4390	-741	-2555	2280	-2629	4318	2352	-2960	-3409	-2857
Chiche nord	Chirimoyas 1	103,3	M	M	M	M	M	663	M	M	M	M
Chiche nord	EEQ	83,8	1461	-4121	-3126	1683	-2386	2187	1852	-3337	-3543	-5291
Ilaló	El Tingo Nuevo	0,3	48022	43589	41375	45038	41126	48776	44663	40327	39860	39883
Ilaló	Cununyacu 2	19,3	13599	8382	6491	11206	6379	12668	10914	5878	5581	6451
Ilaló	Rumiloma 1	14,9	15738	10186	10666	15049	10979	15427	14971	10260	10224	8955
Mélange	Primavera 1	36,8	8264	3011	2702	7220	2688	8708	7345	2338	2130	1157
Mélange	El Nacional	13,4	16615	11600	8820	13498	8630	15719	13117	8048	7549	9232

Les deux sources de carbone possibles dans notre contexte : CO₂ biogénique et CO₂ profond doivent être définies en terme isotopique. L'apport biologique peut être calculé à partir de la source au nord « Las Chirimoyas » qui a une teneur en ¹³C de -10,62‰ (Tableau 4.18), comme on l'a montré précédemment sa teneur en ¹⁴C, laisse supposer que l'origine de ce CO₂ est purement biologique. Le facteur de fractionnement entre le CO₂ gaz du sol et le HCO₃⁻ à 21°C (température moyenne de cette source) est de -8,33‰, la source biologique moyenne doit donc avoir une teneur d'environ -19‰. Cette valeur de ¹³C est cohérente avec le type de végétation prédominante observée dans la zone, de type C₃ constituée de pâturages (les espèces *Lolium perenne* et *Calamagrostis effusa* sont les plus abondantes dans les vallées andines), eucalyptus et légumes (haricots, patates et brocoli sont les plus cultivés dans la zone d'étude) mélangés à quelques plantes de type CAM comme le cactus et de plantes C₄ telles que le maïs ou l'espèce de pâturage *Pennisetum clandestinum* (kikuyu).

Le CO₂ profond, par contre, a des valeurs en ¹³C très variables. Sa composition isotopique dépend de son origine. Le CO₂ profond peut avoir pour origine i) la matière organique piégée dans les sédiments et dégradée, ii) le métamorphisme de roches carbonatées marines iii) le manteau terrestre en contact avec du magma. L'interprétation de l'origine du CO₂ profond se complique quand il y a des mélanges entre plusieurs origines, ce qui est parfaitement possible (Barnes et al. 1984). Il est donc nécessaire d'avoir une connaissance approfondie de la composition des formations géologiques de la zone d'étude, incluant le substratum.

Géographiquement, les études faites en Europe ou en Asie Mineure en milieux volcaniques sur des échantillons de CO₂ prélevés dans des forages ont montré que le ¹³C a une composition isotopique proche de 0‰ vs PDB (Barnes et al. 1984). Une étude en Italie centrale dans la région volcanique des Collines d'Albani, a montré des teneurs entre -3,5‰ et +0,9 ‰ (Chiodini et Frondini 2001). Ces auteurs ont montré que le CO₂ retrouvé dans ces forages, serait le produit du métamorphisme (du Précambrien au Paléogène – Néogène) de roches contenant des carbonates marins.

En Amérique du nord, des résultats identiques ont été obtenus quant à la composition du CO₂ provenant du métamorphisme de roches carbonatées. Au centre des Etats-Unis, dans le Colorado, dans le site de « Rocky Mountains » une source riche en CO₂ a donné des teneurs moyennes en ¹³C de -2‰ (Presser et al. 1981) attribuées à la présence de calcschiste (schiste provenant de marnes calcaires et métamorphisées) dans la formation géologique. Dans le parc de Yellowstone les teneurs en CO₂ des sources sont comprises entre -6‰ à -1‰, avec une valeur moyenne de -2,8‰ (Friedman 1970) associées aux travertins affleurant autour de ces sources, formés par dégazage du CO₂ dans l'eau au contact de l'atmosphère dont l'origine serait liée à la décarbonatation de calcaires marins. Le processus est expliqué ainsi : la décomposition thermique des roches carbonatées modifiées par le magma, entraîne par réaction entre les carbonates et la silice du magma un flux de CO₂ (Friedman 1970). Ce CO₂ chaud est dissous dans l'eau souterraine en profondeur. L'eau chargée avec le CO₂ réagit alors avec la roche calcaire formant une solution contenant du Ca²⁺, HCO₃⁻ et CO₃²⁻. Cette solution à sa sortie à l'air libre, dégaze du CO₂ en relation avec la baisse de pression. La perte de ce gaz monte le pH et donc il y a précipitation de CaCO₃ (Friedman 1970).

En Amérique Centrale, dans des systèmes géothermaux au Salvador et Honduras, la teneur isotopique en ¹³C du CO₂ récupéré dans des forages varie entre -3,7‰ et -0,3‰. Cette composition isotopique du gaz a de la même façon été associée à des carbonates marins et sédiments carbonatés métamorphisés en profondeur (Leeuw et al. 2007).

D'autres études en Amérique ont mis en évidence des teneurs en ^{13}C un peu plus appauvries dans le CO_2 de forages ou de sources. En Alaska, après un lâché explosif de CO_2 en 1977, un cratère de maar a été formé. Le CO_2 dans l'aquifère de « Gas Rocks » contenu dans ce maar avait une teneur en ^{13}C de -6,36‰, Barnes et McCoy (1979) ont interprété ce résultat comme l'apport de CO_2 magmatique (mantellique). Les mesures du CO_2 dans les complexes volcaniques de la Sierra Nevada aux Etats-Unis, dont l'origine est exclusivement liée à une source magmatique, ont montré des teneurs en ^{13}C variant de -10‰ à -6‰ (Barnes et al. 1981a), de -7‰ à -4‰ à « Long Valley » en Californie (Hilton 1996), et de -10,7‰ à -7,5‰ en Californie au complexe géothermal « Lassen » (Rose et al. 1996). Ces valeurs sont comparables avec celles retrouvées en Argentine au Copahue, un champ géothermal où les eaux ont une composante d'origine magmatique très élevée, la teneur du ^{13}C dans ce gaz varie entre -10,9‰ et -6,8‰ (Sierra et al. 1992).

Une compilation de valeurs de ^{13}C provenant du manteau terrestre, et mesurées sur des basaltes ou sur des inclusions contenant du CO_2 dans des diamants, indique une moyenne de -5‰ (Kyser 1986). Une valeur similaire a été trouvée par Sano et Marty (1995) au Japon, pour du CO_2 provenant du magma basaltique, où le ^{13}C a une teneur moyenne de -6,5‰. Geyh (2000) a proposé une valeur entre -8‰ et -3‰ pour le CO_2 magmatique avec une valeur moyenne de -6‰.

Dans le contexte de mélange de plusieurs sources, au Japon, les teneurs en ^{13}C du CO_2 dans des échantillons d'eau ont donné des valeurs entre -3‰ et -1‰ (Barnes et al. 1984). L'auteur interprète ces résultats comme un mélange entre le CO_2 magmatique et du CO_2 originaire de carbonates marins. Un cas un peu particulier a été observé en Californie au « Franciscan complex » où le CO_2 récupéré dans les forages a montré des teneurs en ^{13}C entre +5,2‰ et -14‰ (Barnes et al. 1984). Cette forte variabilité constatée ne permet pas de discriminer son origine et l'auteur conclut à un mélange entre les carbonates marins présents dans la formation géologique, le CO_2 magmatique et la dégradation de la matière organique dans les sédiments. Le même cas de mélange entre matière organique et CO_2 d'origine magmatique a été observé aux Etats-Unis au mont St. Helens. Après sa dernière éruption (mai 1980), la valeur du ^{13}C dans le CO_2 récupéré dans l'eau souterraine, avait des valeurs entre -11‰ et -10‰, teneurs plus enrichies qu' avant l'éruption (-19‰) (Evans et al. 1981). Un autre cas de mélange a été traité dans le système géothermal « Los Humeros » au Mexique, le ^{13}C a été mesuré à partir d'échantillons de CO_2 dans l'eau, avec une variabilité entre -5,8‰ et -3,2‰. Tello (1992) interprète ces résultats comme un possible mélange entre le CO_2 magmatique et le CO_2 provenant des sédiments carbonatés présents dans la formation encaissante.

En résumé, les teneurs en ^{13}C du CO_2 gaz, quand son origine est liée au métamorphisme de carbonates marins ou de sédiments carbonatés, ont des teneurs proches de zéro, dans une gamme qui peut varier entre -3,7‰ et +2‰. Les teneurs en ^{13}C sont plus appauvries quand le CO_2 est originaire du manteau terrestre, notamment de magma basaltique, les gammes de valeurs se trouvent entre -10,9‰ et -4‰ avec une valeur moyenne de -6‰. Ces valeurs peuvent devenir encore plus appauvries quand le CO_2 est issue de la dégradation de la matière organique avec des teneurs en ^{13}C entre -30‰ et -20‰.

Dans l'équation 16 qui permet le calcul hypothétique d' A_0 et donc une correction des âges ^{14}C , on peut faire varier la teneur isotopique en ^{13}C du CO_2 profond puisqu'on ne la connaît pas a priori. Dans cette modélisation on n'a pas pris en compte un possible fractionnement des isotopes du carbone entre la phase gazeuse du CO_2 profond et les bicarbonates. En Sierra Nevada, Barnes et al. (1981b) ont observé que si les bicarbonates sont

générés par la dissolution des plagioclases, le fractionnement isotopique entre le CO₂ profond dissous et les bicarbonates en solution est pratiquement négligeable, quand la totalité de ce CO₂ est transformé en bicarbonate. Les mesures de Barnes et al. (1981b) ont été faites sur des sources riches en CO₂ avec des températures comprises entre 8°C à 43°C. Selon l'information minéralogique des formations aquifères de Tumbaco, l'interaction eau-roche se fait avec des plagioclases.

Les résultats de la modélisation sont montrés sur le Tableau 4.20. Pour une teneur en ¹³C du CO₂ profond de -7‰, les résultats ne semblent pas satisfaisants pour certains points, par exemple « El Nacional » (M302) aurait une eau moderne (actuelle) ce qui est très peu probable étant donné sa ressemblance avec les eaux de l'aquifère Ilaló en terme chimique et isotopique stable.

Une teneur de -6‰ rajeunit une grande partie des forages présents dans l'aquifère Chiche nord jusqu'à l'actuel, ces résultats séparant le côté est de l'aquifère, aux eaux jeunes, et le côté ouest de l'aquifère, aux eaux plus anciennes (Aq. Diego Andrade C109 et EEQ C204). Cependant cette teneur en ¹³C ne satisfait pas le sens de flux tracé à partir des cartes piézométriques, puisque le forage Acacias (C101) serait plus ancien que le MICEI (C104) qui est le forage le plus au nord de l'aquifère Chiche.

De la même manière, une teneur du CO₂ profond de -5‰ est difficilement compatible en raison de la différence d'âges entre les forages Acacias (C101) et La Esperanza – MICEI (C104), ce dernier devrait avoir un âge plus ancien que les autres, or les résultats du modèle montrent l'inverse. Cette contradiction apparente pourrait être levée si on suggère que le forage MICEI est isolé du reste de la nappe par un système de faille, mais l'hydrodynamique ne soutient pas cette hypothèse.

Si l'on veut maintenir la logique des âges sur la totalité de l'aquifère (hors la source « Las Chirimoyas »), selon le modèle de correction, on doit proposer des valeurs moins négatives de ¹³C pour le CO₂ profond, en sachant que des valeurs plus enrichies signifieraient que son origine serait en relation avec le métamorphisme de sédiments carbonatés. A partir d'une teneur de -3‰ pour le CO₂ profond, les âges de l'eau de l'aquifère restent cohérents avec la direction de flux de l'aquifère Chiche nord, plus jeunes au sud (près de l'Ilaló) et plus anciennes au nord. Pour une teneur de 0‰, l'âge corrigé et l'âge calculé sont très proches et les eaux, à l'exception du point « Las Chirimoyas 1 » (C201), sont très anciennes.

Tableau 4.20. Temps de résidence de l'eau calculé (AC) à partir de la Loi de désintégration (L. dés) et corrigé (Acor) à partir du modèle de Gonfiantini en utilisant plusieurs teneurs possibles en ¹³C du CO₂ profond. Les pourcentages représentent le rapport entre l'âge corrigé et l'âge calculé. Les cases bleues correspondent aux forages de l'aquifère Chiche, les cases vertes aux forages d'eau mélangée et les cases rouges aux forages de l'aquifère Ilaló. M = Moderne.

	L. dés.	Modèle de Gonfiantini									
	¹³ C CO ₂ profond	-7		-6		-5		-2		0	
Station	AC	Acor	% cor/c	Acor	% cor/c	Acor	% cor/c	Acor	% cor/c	Acor	% cor/c
Chirimoyas 1	-268	M	0%	M	0%	M	0%	M	0%	M	0%
Aq Diego Andrade	4867	1242	26%	2179	45%	2740	56%	3582	74%	3864	79%
Acacias	2960	2618	88%	2723	92%	2791	94%	2898	98%	2936	99%
El Carrizal	1113	M	-154%	M	-85%	M	-45%	168	15%	388	35%
Patagua	4390	M	-101%	M	-33%	11	0%	1901	43%	2470	56%

	L. dés.	Modèle de Gonfiantini									
	$\delta^{13}\text{C CO}_2$ profond	-7		-6		-5		-2		0	
Station	AC	Acor	% cor/c	Acor	% cor/c	Acor	% cor/c	Acor	% cor/c	Acor	% cor/c
MICEI	6528	M	-60%	M	-3%	1522	23%	3704	57%	4352	67%
EEQ	1461	2686	184%	2452	168%	2301	157%	2058	141%	1972	135%
La Primavera 1	8264	5715	69%	6365	77%	6760	82%	7363	89%	7567	92%
El Nacional	16615	M	-19%	5715	34%	8776	53%	12272	74%	13265	80%
El Tingo Nuevo	48022	37002	77%	39930	83%	41577	87%	43992	92%	44797	93%
Rumiloma 1	15738	13439	85%	13947	89%	14279	91%	14820	94%	15013	95%
Cununyacu 2	13599	2194	16%	6045	44%	7894	58%	10297	76%	11029	81%

Cette teneur en ^{13}C de 0‰ paraît satisfaire la logique de circulation suggérée par les cartes piézométriques et effectivement elle indiquerait une origine du CO_2 plus profonde que le magma du volcan Ilaló. Ce CO_2 pourrait être issu du métamorphisme de carbonates d'une formation océanique beaucoup plus ancienne que le volcan Ilaló et qui serait connectée au système aquifère à travers des failles. Ce gaz viendrait de formations plus profondes, à travers des failles anciennes qui se connectent avec les terrains océaniques accrétés au continent, comme c'est le cas du système de failles de Quito (Alvarado 2012). Cependant, il a été observé sur des zones de subduction que 80% de ce CO_2 pourrait venir du magma dans sa forme de carbone recyclé et que ce gaz aurait une teneur isotopique en ^{13}C identique à celle des carbonates marins (Varekamp et al. 1992, Sano et Marty 1995). L'étude d'Inguaggiato et al. (2010) pourrait confirmer, que l'aquifère Ilaló a une composante magmatique très importante. Mais cette valeur enrichie serait contradictoire avec les valeurs moyenne du CO_2 observé en Colombie (Sturchio et al. 1993) et Pérou (Landis et Rye 1974) de -8,5‰ et -7,5‰. Il est à noter que sur la zone aquifère de Riobamba, dépendant du complexe volcanique du Chimborazo, à environ 250 km au sud de Quito, des eaux souterraines à caractère thermal et apparemment très anciennes (17 à 24 pmc) ont des valeurs de ^{13}C entre -5 et -6‰ (Taupin, com. personnelle), signe de la contribution d'un pôle fortement enrichi et qui validerait l'hypothèse de contribution de CO_2 lié au métamorphisme de carbonates dans la zone de subduction.

Les résultats publiés par Changkuon et al. (1989) du Chiche sud montrent que les forages qui ont des caractéristiques chimiques (ions majeurs et conductivité) et isotopiques qui correspondent bien à celles de l'aquifère Chiche (comparées avec nos mesures), ont des activités en ^{14}C qui varient entre 37% et 80%, ce qui donne des âges apparents entre 2000 et 8000 ans. Les forages au pied du volcan montrent des valeurs très proches de celles que nous avons mesurées avec un ^{14}C inférieur à 20% et des âges entre 13000 et 40000 ans. Avec la formule de Gonfiantini (Salem et al. 1980) on a corrigé les âges donnés par Changkuon et al. (1989), on arrive à avoir des âges identiques à ceux calculés sans correction avec un ^{13}C de 0‰, indiquant que ce CO_2 aurait une origine similaire à celle du Chiche nord.

Enfin, si l'on considère que le fractionnement isotopique a eu lieu entre le CO_2 profond et les bicarbonates dans l'aquifère Chiche nord pour un afflux progressif du gaz : en supposant qu'on a une valeur théorique de 0‰ en ^{13}C pour la part bicarbonatée venant du CO_2 profond, et en tenant compte des fractionnements à des températures qui varient entre 19 °C et 40 °C, on obtient une valeur de gaz de -8,6‰ à -6,4‰ qui correspondraient aux valeurs du CO_2 magmatique.

En l'absence de fractionnement, la part de mélange entre le CO₂ du pôle biologique et le CO₂ profond, avec une teneur en carbone 13 de 0‰, donne une valeur de près de 50% d'apport des deux pôles dans tous les forages. En terme de gestion de l'eau du système aquifère, les âges corrigés montrent que les eaux de toute façon, sont très anciennes, à l'exception de Las Chirimoyas (Tableau 4.20).

4.3.4.3 Conclusions sur les isotopes radioactifs

Un seul point de l'aquifère Chiche a une teneur en tritium dépassant le seuil de détection de 0,5 UT, indiquant que ces eaux se sont en partie infiltrées après 1950. L'activité en ¹⁴C de cette source, supérieure à 100 pmc, confirme une contribution d'eaux récentes. Les autres points de l'aquifère Chiche au nord ont des âges apparents ¹⁴C entre 1000 et 6000 ans et entre 2000 et 8000 ans au sud. L'aquifère Ilaló a des teneurs en ¹⁴C inférieures, donc des âges entre 11000 et 46000. Ces âges ont été corrigés à partir des teneurs en ¹³C mesurés dans l'eau en utilisant le modèle de Gonfiantini considérant deux sources d'origine du CO₂ : du CO₂ biogénique et du CO₂ profond.

Le modèle de Gonfiantini a montré que pour l'aquifère Chiche, au nord et au sud, si la teneur du ¹³C du CO₂ profond est liée au CO₂ magmatique (teneur de -5‰), la logique des âges dans l'aquifère se maintient, mais le système serait compartimenté vers le nord. D'autre part, si la composition isotopique du CO₂ a une teneur proche de celle qui a été observée dans des zones de subduction où les valeurs de teneurs isotopiques du ¹³C sont très enrichies, identiques à celles issues du métamorphisme de carbonates marins avec une teneur proche de 0‰, les âges, même corrigés, sont très grands, ce qui n'est pas cohérent avec les calculs de vitesse de circulation proposés dans le chapitre hydrodynamique.

4.4 MODELE CONCEPTUEL DU SYSTÈME AQUIFÈRE

4.4.1 ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES GEOCHIMIQUES

Les résultats chimiques et isotopiques précédents suggèrent des différences entre les aquifères Chiche nord, sud et Ilaló. Cependant, aucun d'eux ne différencie clairement ces aquifères. Pour cette raison, une Analyse de Composantes Principales (ACP) et une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) ont été réalisées pour tester la cohérence avec les résultats antérieurs. Les paramètres considérés sont les paramètres physiques de l'eau, ions majeurs, isotopes stables et éléments traces (arsenic, silice et fer).

Dans l'ACP la composante 1 explique le 64% de la variance et les éléments qui ont plus des poids en ordre d'importance sont : les bicarbonates, la conductivité électrique, les chlorures, le sodium et la température. La composante 2 (sulfates, oxygène 18 et deutérium) explique seulement 13% de la variance et la composante 3 (As surtout) 7%. L'ACP montre trois groupes de familles (Figure 4.83) : les points de l'aquifère Chiche nord, sud, les sources de l'aquifère Ilaló et les forages mélangés forment un groupe, les points « El Tingo » forment le deuxième groupe et le forage VCH 1 (M301), au sud du volcan, forme un troisième groupe.

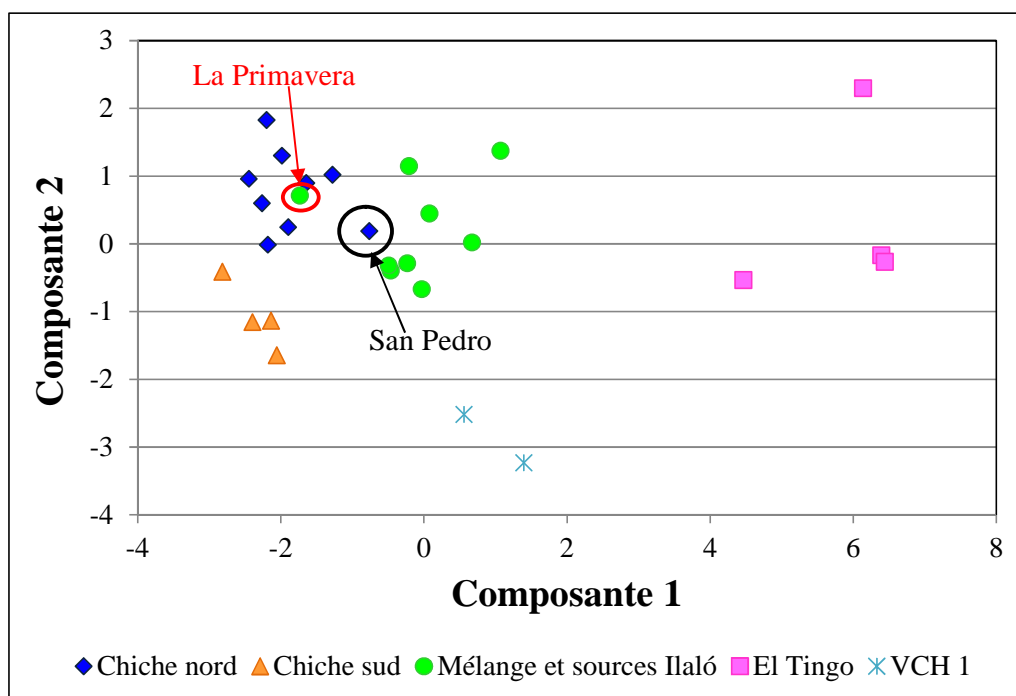


Figure 4.83. Résultats de l'Analyse en Composantes Principales.

La CAH montre les mêmes résultats, avec les mêmes groupes (Figure 4.84). La distribution géographique des groupes est indiquée sur la Figure 4.85.

Dendrogramme

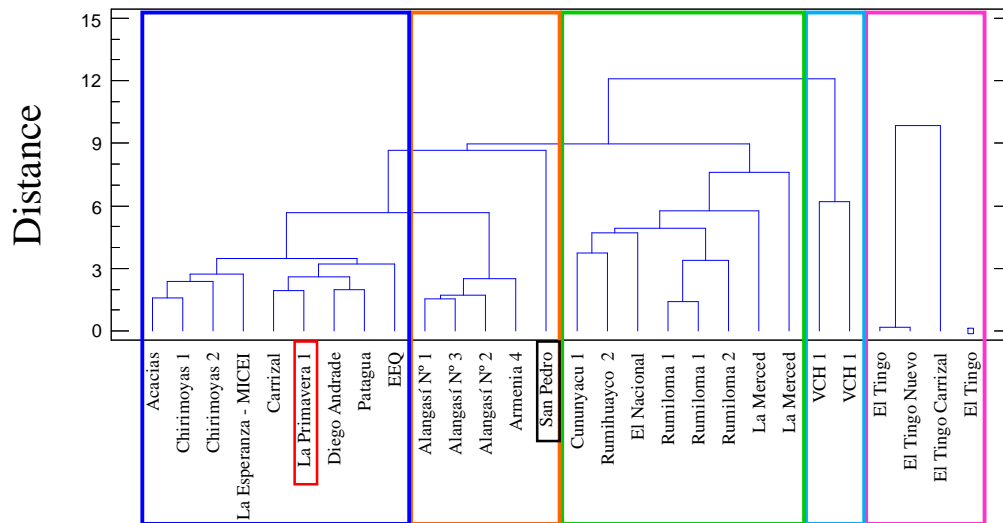


Figure 4.84. Résultats de la Classification Ascendante Hierarchique (CAH).

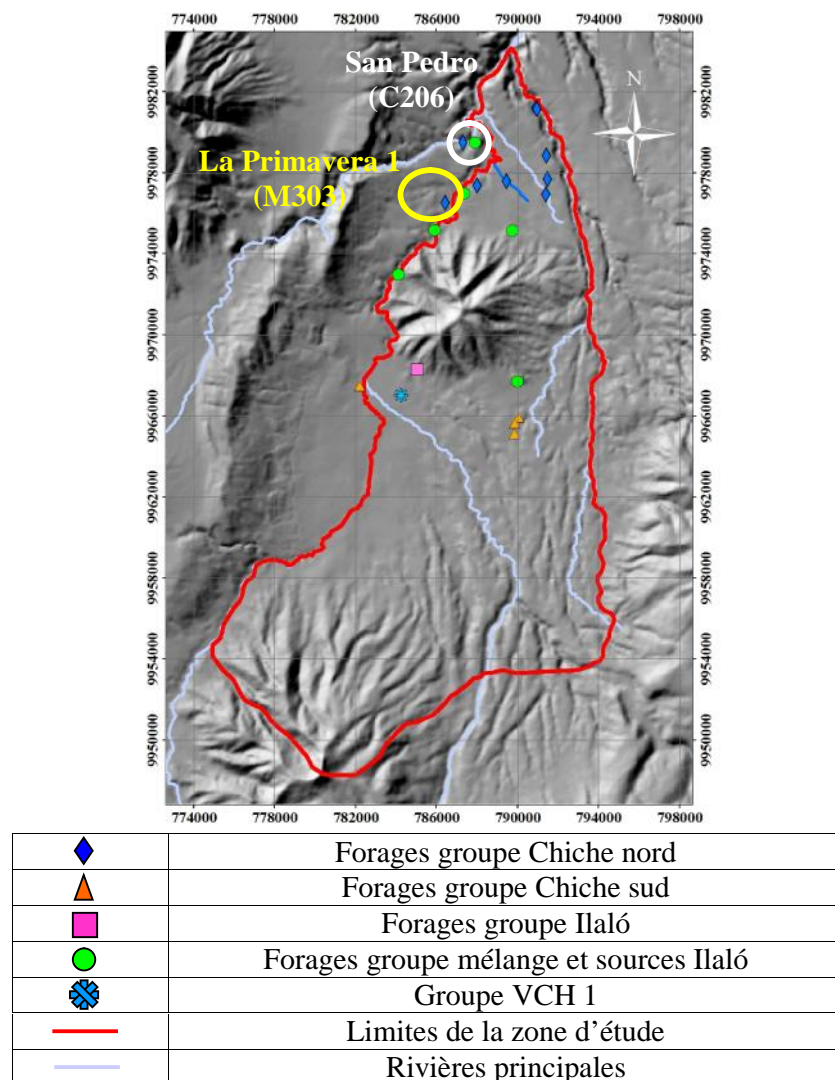


Figure 4.85. Distribution des groupes d'eaux souterraines définis par les analyses statistiques.

Les deux analyses mettent en doute la classification initiale de nos forages, notamment de La Primavera 1 (M303) qui se trouve dans le groupe du Chiche nord mais qui captent les deux formations Chiche et Ilaló. Également la source, San Pedro (C206) qui a été considérée pour nos analyses comme du groupe Chiche nord et les analyses statistiques la place dans le groupe de points de mélange. Cette source, comme il a été expliqué dans la section 4.1.2.1.3, ne montre aucun signal d'hydrothermalisme et selon nos calculs de la profondeur de la Formation Ilaló (voir section 2.2.2.3), à cet endroit elle aurait plus de 250 m, mais il n'y a pas d'affleurements et la sortie de cette source n'est pas connue avec précision.

Les analyses statistiques nous ont permis de distinguer des familles de points. Les paramètres avec plus des poids de la composante 1 et dans une moindre mesure ceux de la composante 2, sont les paramètres qui permettraient distinguer les aquifères Chiche et Ilaló. Ainsi, en accord avec les résultats statistiques, les paramètres physiques de l'eau, comme la conductivité électrique (Figure 4.51) ou la température (Figure 4.52) nous ont permis de distinguer une interaction entre l'aquifère Chiche nord et Ilaló. De la même manière sur le graphique $^{18}\text{O} - \text{D}$ (Figure 4.85) existent des points clairement distincts qui appartiennent aux aquifères Chiche, soit nord ou sud, et Ilaló, mais, il y a aussi les groupes des points qui se superposent et qui se mélangent qui correspondent aux sources Ilaló et les points qui captent les deux formations (Figure 4.85).

4.4.2 BILAN HYDRIQUE

Les informations sur les aquifères Ilaló et Chiche sud étant trop peu denses, ce sous-chapitre se limitera à l'aquifère Chiche nord, en confrontant les différents résultats hydrodynamiques et géochimiques pour proposer un bilan hydrique.

4.4.2.1 Calcul 1: Volume d'aquifère et âges ^{14}C .

Le volume d'eau stockée dans l'aquifère Chiche nord ($V_{\text{stocké}}$) sera calculé dans une surface de 37 Km^2 (S). L'épaisseur mouillée de cet aquifère varie entre 70 et 140 m (e_m), on va considérer pour les calculs une valeur moyenne de 100 m (Figure 4.86). De plus, on prend en compte pour ce chapitre, une porosité (n) qui varie entre 2% et 20%. Les valeurs extrêmes vont permettre d'évaluer la sensibilité de ce calcul.

$$V_{\text{stocké}} = S \cdot e_m \cdot n \quad \text{en million de m}^3 \text{ (Mm}^3\text{)} \quad (17)$$

$V_{\text{stocké}}$ varie entre 70 et 700 Mm^3 avec les deux extrêmes de porosité choisis.. Si l'on considère l'âge le plus élevé issu du ^{14}C dans l'aquifère Chiche (4000 ans au forage La Esperanza – MICEI, C104), il faudrait imaginer un flux d'entrée et sortie ne dépassant pas 0,02 à 0,2 $\text{M m}^3/\text{an}$. Mais cette valeur est du même ordre de grandeur que les pompages estimés par la SENAGUA alors qu'on n'a observé aucune baisse sensible de la piézométrie. Il faut donc remettre en cause au moins un des éléments de cette comparaison grossière.

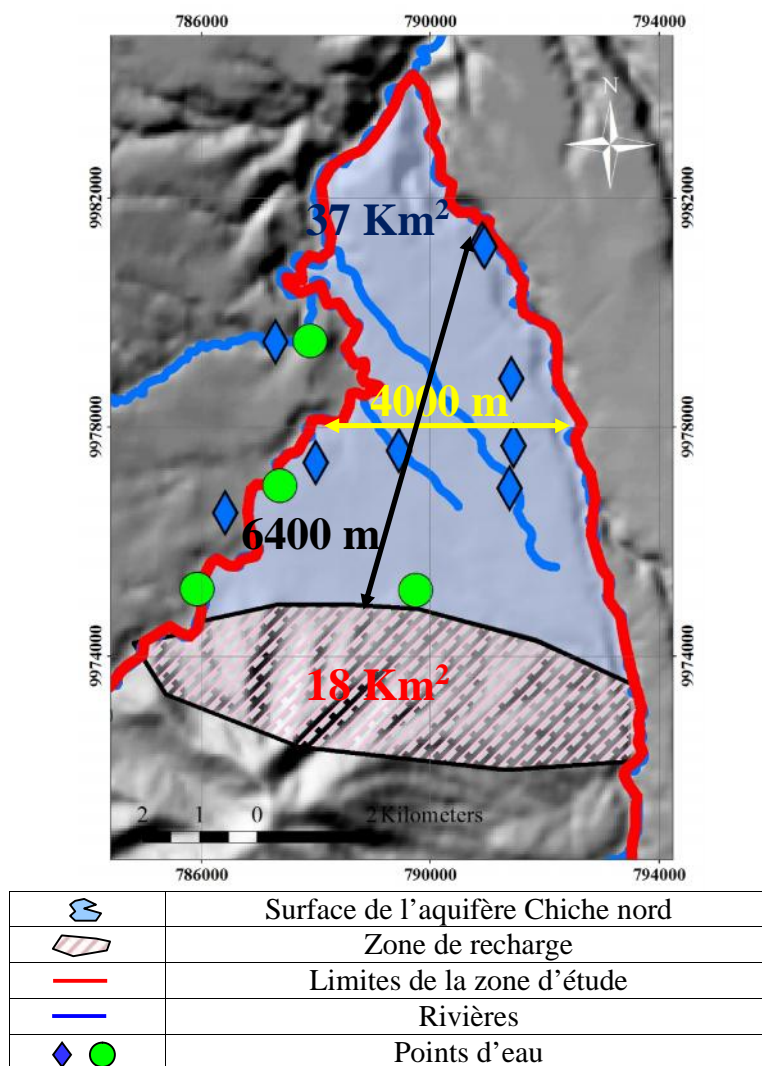


Figure 4.86. Surface de l'aquifère de Tumbaco utilisé pour le calcul de bilan hydrique et zone de recharge.

Ces résultats suggèrent que peut-être les âges calculés à partir du carbone 14 et corrigés avec le carbone 13 n'est pas la méthode plus adéquate pour ce type de système, ou bien, il faut trouver une méthode différente de corrections des âges pour la présence de CO₂ volcanique afin d'arriver à un résultat plus cohérent avec les observations de niveaux et des caractéristiques physique de l'eau.

4.4.2.2 Calcul 2: Loi de Darcy et ³H.

Si l'on considère pour l'aquifère Chiche nord une épaisseur mouillée moyenne de 100 m, comme pour le Calcul 1, une perméabilité moyenne k de 2×10^{-5} m/s et un gradient hydraulique i moyen de 3 %, l'équation de Darcy permet de calculer un débit de sortie de l'aquifère Q_s [$L^3 T^{-1}$] :

$$Q_s = k \cdot A \cdot i \quad (18)$$

où :

A est la surface transversale de l'aquifère (épaisseur mouillée de l'aquifère * une largeur du bassin considéré, 4000 m, voir la Figure 4.86 [L²].

Le débit de sortie serait ainsi de 8 Mm³/an, sans prendre en compte les prélèvements. Les prélèvements déclarés officiellement à la SENAGUA sont de 0,2 Mm³/an. Dans la section 4.1.2.1.2 les analyses de la piézométrie avec les enregistreurs automatiques ont montré que du côté nord l'aquifère est très perturbé par les pompes (e.g. Patagua C105, El Carrizal C103). Cependant, on n'a pas observé de baisse sensible de niveaux piézométrique donc les volumes exploités restent négligeables pour ce calcul.

La piézométrie a une relative stabilité saisonnière et interannuelle, ce qui indique soit une recharge ponctuelle mais éloignée des points d'observation, soit une recharge très diffuse, ce qui impliquerait que la Fm. Cangahua est moins imperméable que considéré initialement. Du fait de cette apparente stabilité piézométrique, nous allons faire l'hypothèse dans les calculs suivants que les débits entrant sont égaux aux débits sortants.

La surface d'infiltration supposée, en piémont du volcan Ilaló (surface hachurée des Figure 4.86 et Figure 4.87), s'étend sur environ 18 Km². La variation altitudinale de la pluie dans cette zone n'est pas mesurée spécifiquement. Elle est estimée à partir d'une station de l'INAMHI au pied du volcan (Figure 4.87), La Tola (moyenne entre 1963 – 2011 de 880 mm/an).

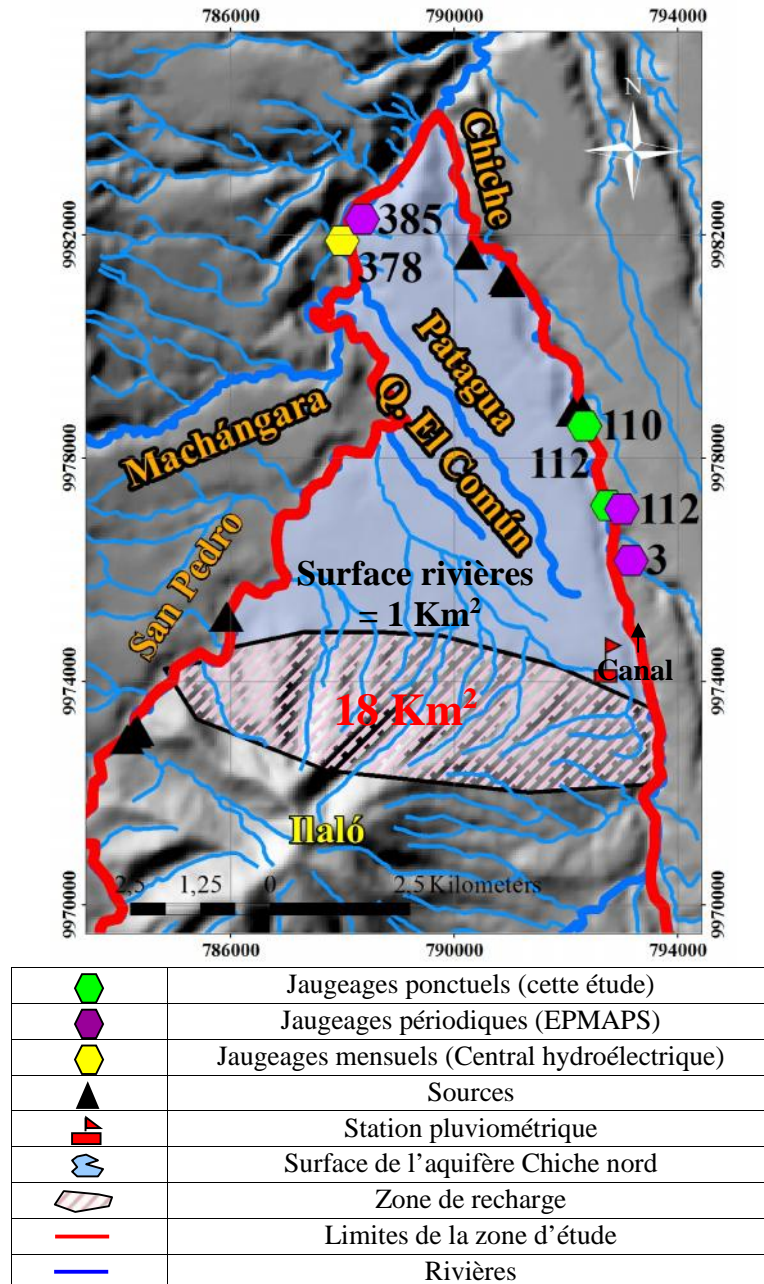


Figure 4.87. Débits des rivières principales de la zone d'étude en Mm^3/an .

En respectant l'hypothèse de l'imperméabilité de la Cangahua, l'infiltration diffuse sur la surface de 18 Km^2 au pied du volcan Ilaló devrait être de 400 mm/an pour atteindre le chiffre de $8 \text{ Mm}^3/\text{an}$, c'est-à-dire environ la moitié de la pluie annuelle. Si l'on considère par contre une infiltration ponctuelle faite principalement dans les ravines profondes du volcan, les surfaces se réduisent d'une façon très importante. D'après nos observations de terrain, la largeur de ces ravines ne dépasse pas 10 m . On peut alors considérer une surface totale équivalente de 1 Km^2 (longueur totale des rivières parcourant l'Ilaló, 100 Km). Il faudrait donc une infiltration localisée au niveau des cours d'eau de 8000 mm/an ou 40 mm/j , ce qui semble possible dans une zone où il pleut 60% du total des jours par an.

Avec ces valeurs d'infiltration, on peut calculer la vitesse de Darcy, avec l'équation :

$$v = k \cdot i \quad (19)$$

où

v vitesse de Darcy (m/s)

k perméabilité (2×10^{-5} m/s)

i gradient hydraulique (3%)

L'eau avance à peu près à 6×10^{-7} m/s (20 m/an), et si on prend la distance entre la zone de recharge et les sources de l'aquifère Chiche nord à 6400 m de distance (Figure 4.86) donc, le temps de transit de ces eaux est de 340 ans. Ce résultat est cohérent avec la non détection de tritium dans les forages.

On peut confronter ce calcul de temps de transit de l'eau avec les résultats du calcul 1. Si l'on prend le volume cumulé de l'aquifère ($V_{\text{stocké}}$ entre 70 et 700 Mm³) et on divise par le débit d'entrée de Darcy de 8 Mm³/an, on obtient un taux de renouvellement de l'eau. Cette valeur se trouve entre 10 et 100 ans. Le premier résultat de 10 ans est contradictoire avec les analyses d'isotopes radioactifs, puisque le tritium dans l'eau est en dessous de la limite de détection. Cependant la valeur de 100 ans est compatible avec les résultats de tritium, mais cette valeur est sensiblement différente aux 340 ans obtenu avec la vitesse de Darcy et il est aussi très distincte des valeurs d'âges corrigés avec le ¹⁴C de 4000 ans.

Ces différences peuvent être expliquées parce que, pour les calculs du temps de transit de l'eau à partir des propriétés hydrodynamiques, on a pris une valeur moyenne de la perméabilité pour tout l'aquifère, afin de lisser un peu les hétérogénéités, à comparer avec la valeur du ¹⁴C qui est une mesure locale. Cette hétérogénéité produirait des couches moins perméables au nord de l'aquifère, qui donne origine (cf chapitre hydrodynamique), aux différents niveaux altitudinaux de sources, et probablement, un temps de résidence plus long. Dans la partie nord de l'aquifère, on ne dispose pas d'essais de pompage pour connaître avec précision la valeur de k. Cependant les essais des deux forages les plus proches à La Esperanza – MICEI (C104) ont des valeurs de k de l'ordre de 10^{-5} m/s (K d'El Carrizal C103 = $1,2 \times 10^{-5}$ m/s et K d'Acacias C101 = $1,9 \times 10^{-5}$ m/s). En conséquence, une baisse importante de la perméabilité vers le nord de l'aquifère n'est pas totalement justifiée. L'âge ¹⁴C a été corrigé, par une contamination du CO₂ profond, mais malgré cela, l'âge de ce forage continue à être très important, donc ces différences, dans l'état actuel de nos recherches ne peuvent pas être expliquées.

4.4.2.3 Calcul 3: Variables en surface : précipitation, débit de rivières.

Les deux calculs précédents prennent en compte uniquement les données souterraines qui devraient être confrontées avec les données de la partie superficielle.

L'estimation de l'évapotranspiration dans la zone a été sujet d'une discussion exhaustive. L'évapotranspiration potentielle (ETP) a été calculée à partir de la méthode de Penman-Monteith (Allen et al. 1998), utilisée par la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) et appliquée souvent dans la zone d'étude (Pouget 2007). Ce modèle nécessite de nombreuses données climatiques : température, humidité relative, durée d'ensoleillement, vitesse du vent, radiation nette, avec l'hypothèse d'une couverture uniforme de pâturage. Or, comme indiqué dans le chapitre 1, la zone n'est recouverte qu'à 60% par des pâturages, le reste étant des cultures de légumes, de la végétation sèche et des

forêts. En conséquence, la méthode de Penman-Monteith peut être utilisée mais avec des décalages non négligeables, notamment pour les zones au pied des volcans Ilaló et Pasochoa recouvertes de forêts. Nos calculs estiment l'ETP à 800 mm/an. Cette valeur est à comparer avec la littérature existante. Par exemple, Henning et Henning (1981) ont comparé les valeurs d'ETP Penman de plusieurs bassins d'altitude non-glaciaire au niveau mondial (dont un bassin en Equateur, un au Pérou et trois en Bolivie) et proposent une valeur d'ETP moyenne de 1200 mm/an pour les stations andines à 3600 m, supérieure à la précipitation moyenne indiquée par les mêmes auteurs (1000 mm/an dans ces zones). Ces auteurs signalent que la précipitation est systématiquement inférieure à l'ETP aussi à l'échelle mensuelle. Au nord de l'Equateur, Le Goulven et al. (1992), Rivadeneira et al. (1993) et Evans et al. (2003) ont calculé à partir des formules de Penman et Penman-Monteith une ETP d'environ 1100 mm/an pour des stations entre 2300 m et 2700 m d'altitude, avec une pluie annuelle de 800 mm similaire à celle de Tumbaco. Finalement Girard (1987) pour le bassin de l'aquifère de Quito a estimé l'ETP et la précipitation à 1200 mm/an et l'ETR entre 780 et 930 mm/an, sans préciser la méthode de calcul. Il est difficile d'accepter des valeurs d'ETP aussi élevées et dans tous les cas supérieures à la précipitation à l'échelle annuelle et mensuelle, en discordance avec les écoulements superficiels et leur variabilité temporelle constatés sur la zone d'étude.

Il est aussi évident que, la zone de recharge que nous considérons au pied du volcan Ilaló pour l'aquifère Chiche nord est une zone à forte pente, où l'évapotranspiration est négligeable à cause de la rapidité de la circulation de l'eau. Donc, l'équation qui va approximativement définir les débits Q passant dans les rivières au pied du volcan est :

$$Q \approx \text{ruissellement} + \text{infiltration} \quad (20)$$

Hypothétiquement, on peut calculer un taux de production du bassin par Km^2 , des rivières principales. Ainsi, la surface du bassin de la rivière Chiche est de 400 Km^2 et la surface de la rivière San Pedro est de 920 Km^2 . Les débits moyens de la rivière Chiche est de $110 \text{ Mm}^3/\text{an}$ et de la San Pedro est de $380 \text{ Mm}^3/\text{an}$ (Figure 4.87). Le taux de production au nord, dans la zone d'étude de l'aquifère Chiche, de ces deux bassins est égal à $0,3 \text{ Mm}^3/\text{an}/\text{Km}^2$. Les débits de sortie des aquifères et des rivières ont été comparés afin de repérer l'apport de l'aquifère. Même si les incertitudes sur les données de débits de rivières sont assez grandes (entre 10% et 30%), les débits de sortie de l'aquifère Chiche nord constituent un petit pourcentage des débits totaux de rivières (autour de 4% au nord voir Figure 4.87), ce qui nous permet de négliger cet apport dans ce calcul.

Ce taux de production pourrait être le même dans la zone de recharge au pied du volcan Ilaló. Pour une surface de 18 Km^2 le débit est alors estimé à $5 \text{ Mm}^3/\text{an}$. Si l'infiltration se fait d'une manière diffuse dans toute la zone de recharge, la lame infiltrée serait de 300 mm/an. Si cette infiltration se fait uniquement dans le fond de ravines, la lame infiltrée ponctuellement serait de 5000 mm/an ou 25 mm/j (pluie dans 60% de jours par an). Ce résultat est compatible avec le calcul 2 de la lame d'infiltration obtenue à partir de la formule de Darcy. En comparant les deux méthodes, la valeur d'infiltration se trouve entre 300 et 400 mm/an, si cela se produit d'une manière diffuse ou entre 25 et 40 mm/j, si l'infiltration est localisée.

Penser à une infiltration diffuse remet en cause l'imperméabilité de la Cangahua sur le volcan Ilaló mais, comme nous avons discuté dans la section 2.3 la végétation pourrait faciliter l'infiltration dans cette formation, de plus, sur la Figure 2.8 il y a des forages qui captent de l'eau dans la Cangahua, ce qui suggère qu'elle peut cumuler de l'eau dans des

lentilles et qui pourrait permettre une infiltration ponctuelle descendant jusqu’à la Formation Chiche.

4.4.3 MODELE CONCEPTUEL DE L’AQUIFÈRE CHICHE NORD

A partir des résultats précédents, on peut tenter d’élaborer un modèle conceptuel de l’aquifère Chiche nord synthétisant les interactions avec l’aquifère Chiche sud et l’aquifère Ilaló, voire avec la Formation Guayllabamba (Figure 4.88 et Figure 4.89).

Les limites latérales, à l’ouest et à l’est de l’aquifère Chiche nord sont bien définies hydrauliquement par les rivières Chiche et San Pedro qui drainent l’aquifère. Au sud, le volcan Ilaló, structure plus ancienne que la Formation Chiche, est une barrière géologique au passage de l’eau de l’aquifère Chiche sud qui est ainsi drainé par la rivière San Pedro.

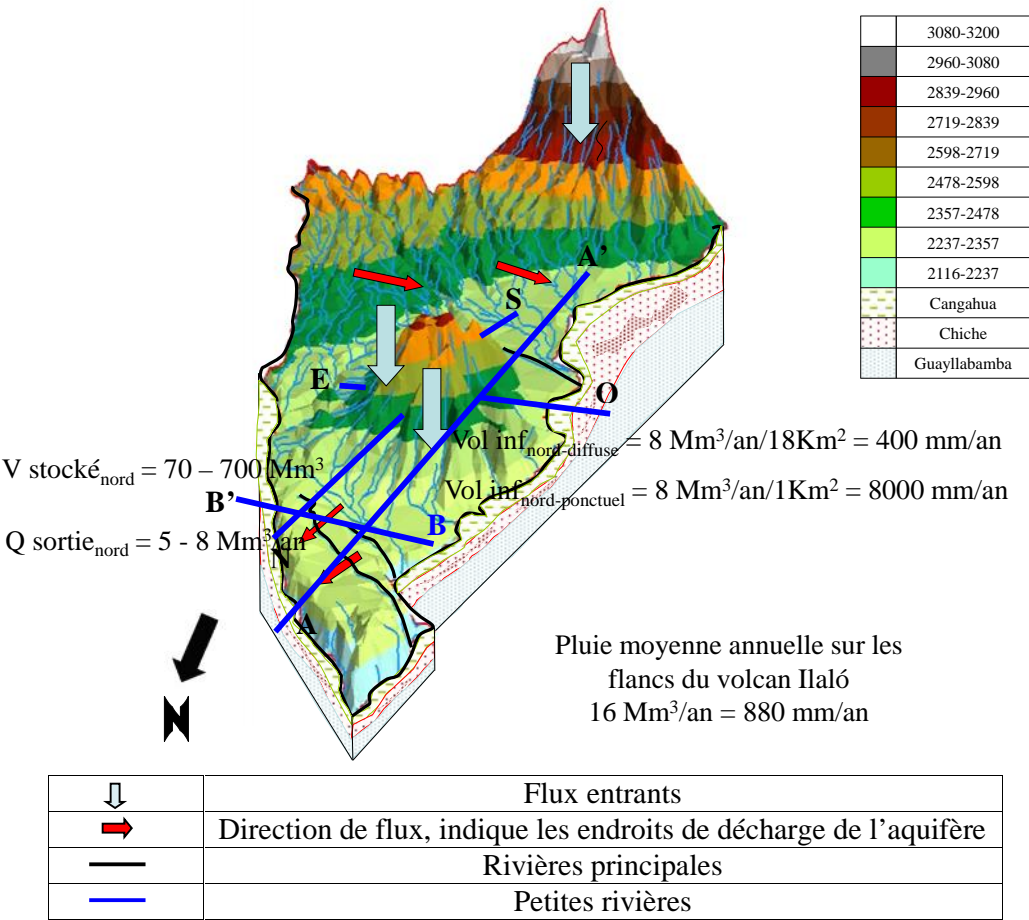
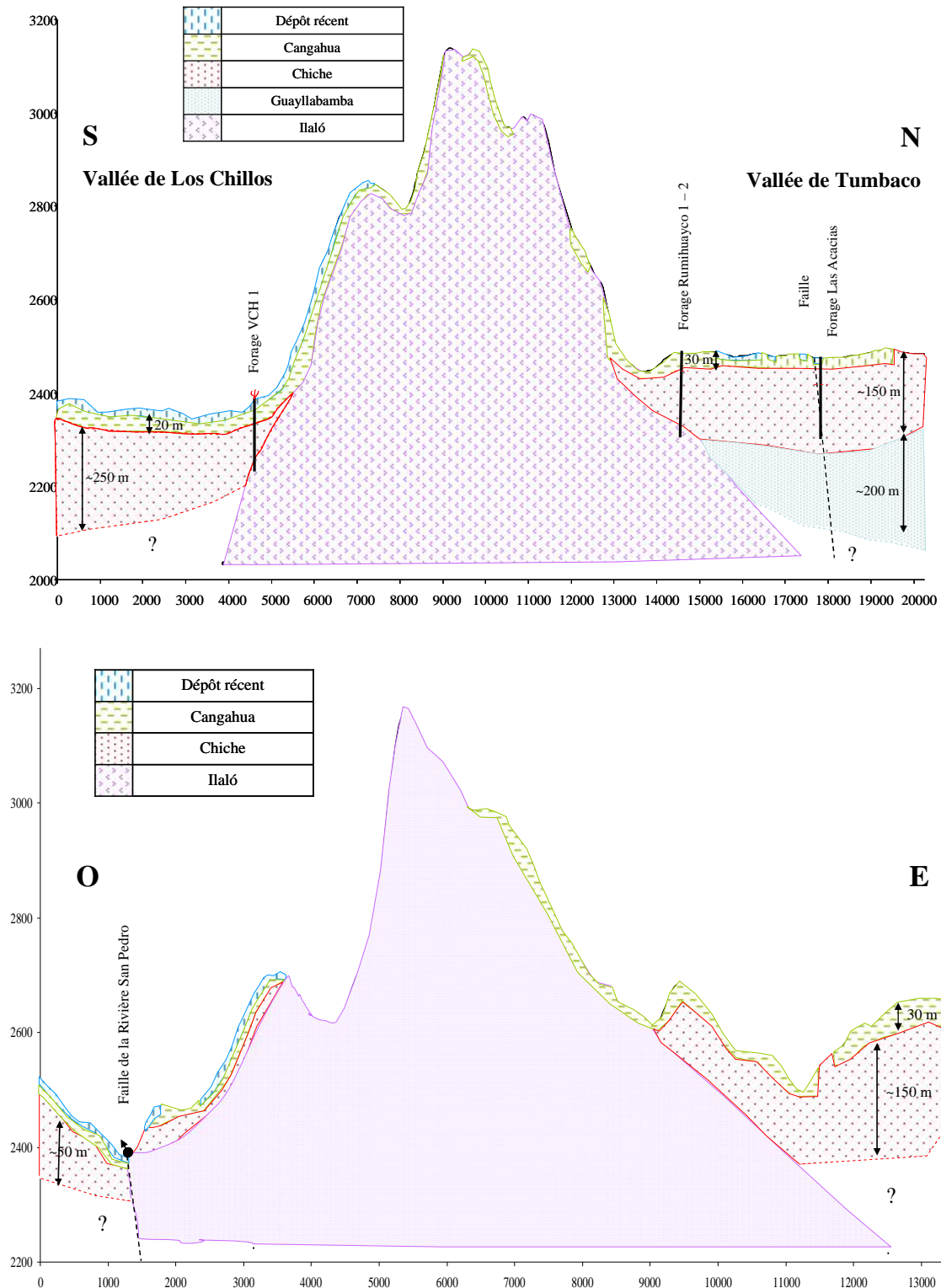


Figure 4.88. Modèle conceptuel de l’aquifère Chiche. Mm^3 = millions de m^3 .



Le bilan hydrique a permis d'estimer une infiltration pour la partie nord entre 30% et 50% de la pluie annuelle (entre 5 et 8 Mm³/an). Ce volume est sûrement concentré sur des surfaces réduites, fonds de ravines et bas de pente du volcan Ilaló. Le volume d'eau stocké, entre 70 et 700 Mm³ permet de réguler le système et maintenir en équilibre l'aquifère. Les

débits de sortie estimés (pompages 0,2 Mm³/an et sortie de sources entre 5 et 8 Mm³/an) restent cependant beaucoup plus importants (+800%) que les mesures de terrain effectuées au niveau des sources.

Les temps de transfert obtenus à partir des calculs de bilan hydrique et les temps de résidence acquis à partir du carbone 14 diffèrent parfois d'un facteur 10. Pour expliquer les résultats ¹⁴C, on peut faire l'hypothèse d'un flux de l'aquifère Ilaló vers le nord rechargeant l'aquifère Chiche et vieillissant ainsi l'âge de l'eau du Chiche.

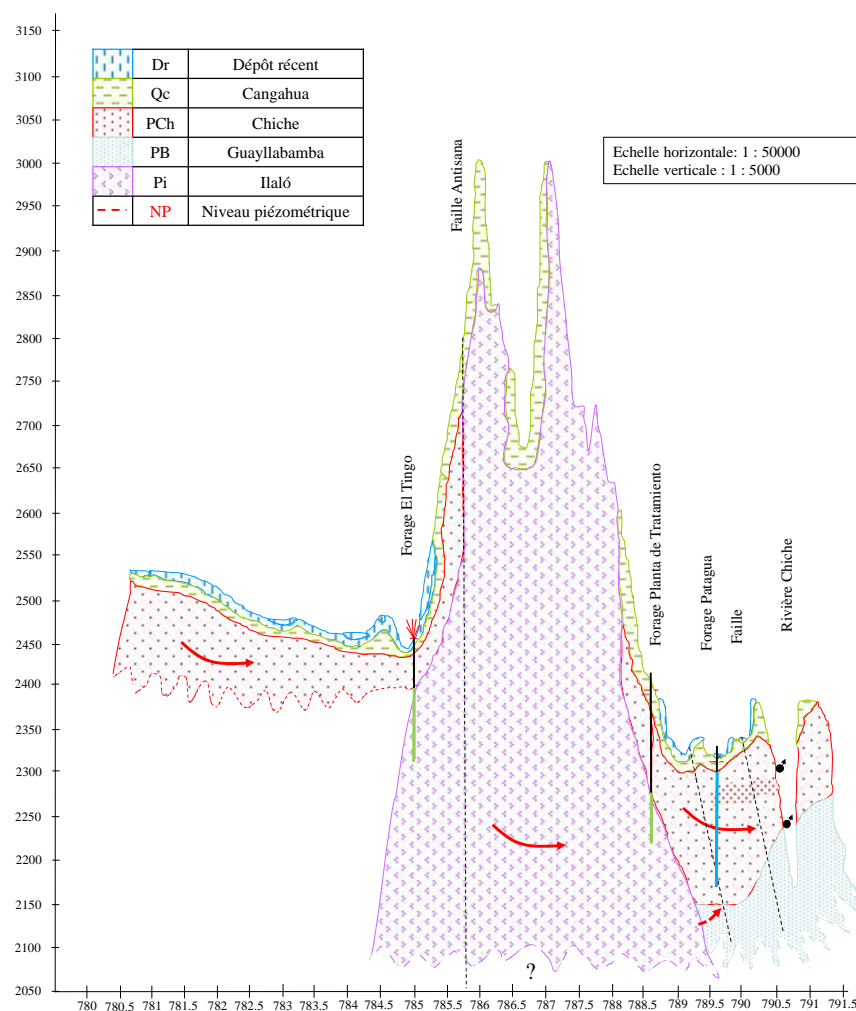


Figure 4.90. Coupe A-A'. Modification des failles par rapport aux coupes géologiques et aux hypothèses faites à partir des résultats obtenus. Les flèches rouges représentent le sens du flux. Les lignes verticales vertes et bleues sur les forages représentent les formations captées : vert pour Ilaló et bleu pour Chiche.

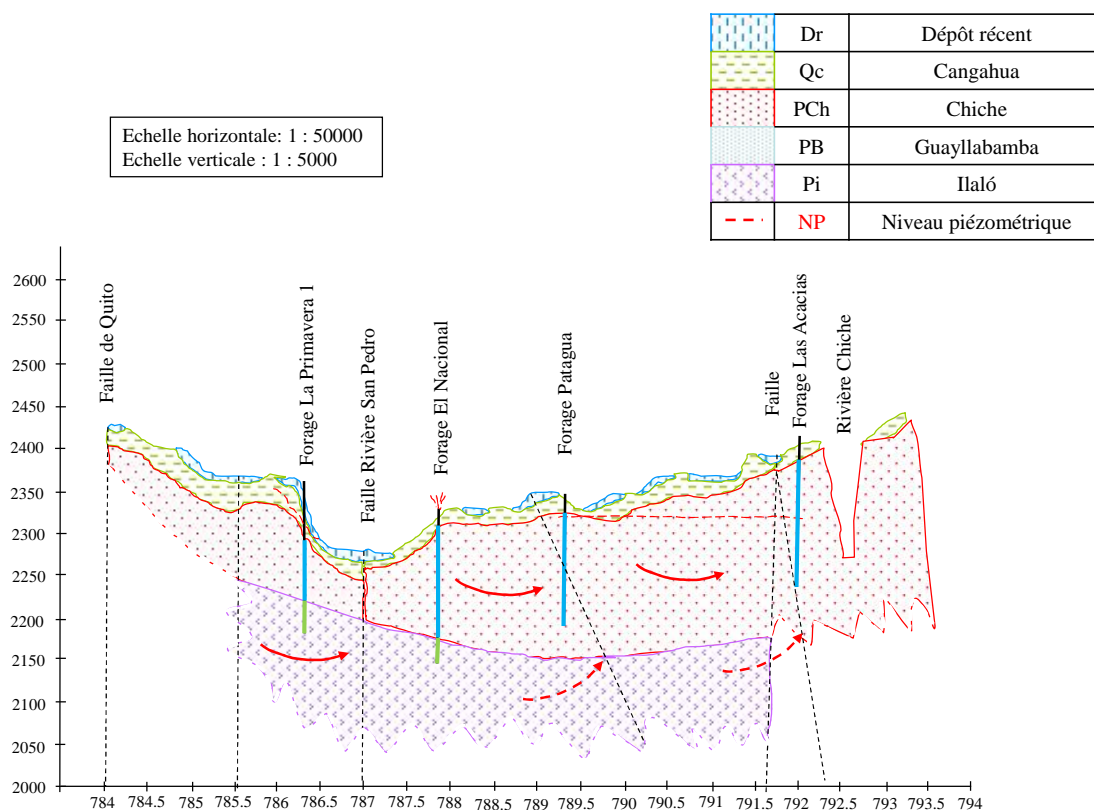


Figure 4.91. Coupe B-B'. Modification des failles par rapport aux coupes géologiques et aux hypothèses faites selon nos résultats. Variation des contributions de chaque aquifère dans les forages. Les flèches rouges représentent le sens du flux. Les flèches rouges en pointillé sont les apports de la Formation Ilaló. Les lignes verticales vertes et bleues sur les forages représentent les formations captées.

Cette connexion entre les deux formations Chiche nord et Ilaló (ou une autre formation plus profonde) à travers des failles expliquerait aussi l'arrivée du CO₂ profond qui donne un signal enrichi en carbone 13 dans l'aquifère Chiche.

Au sud, l'aquifère Chiche ne présente globalement pas de caractéristiques pouvant l'associer au volcan Ilaló. Il y a cependant une exception : le forage VCH 1 (M301, * sur la Figure 4.85) a des caractéristiques géochimiques apparemment plus proches de l'aquifère Ilaló que des autres points de l'aquifère Chiche. Cette singularité pourrait être liée à une faille identifiée par Rios-Sanchez (2012) par des mesures géophysiques. La connexion à travers des failles avec une autre formation volcanique expliquerait aussi la présence du CO₂ d'origine profonde que l'on retrouve dans la signature isotopique de ce site.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE LA THÈSE

5.1 CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Les aquifères volcano-sédimentaires de montagne sont des structures complexes. D'une part, l'histoire de l'activité volcanique a influencé le dépôt des formations géologiques qui peuvent ainsi avoir différentes origines et se superposer, donnant des caractéristiques hydrodynamiques aux couches très variées et qui peuvent changer sur des distances courtes ou au contraire sur des grandes étendues. Si il existe un volcanisme actif ou récent, la couche de surface (cendre, lahar...) qui recouvre les formations aquifères peut avoir des propriétés hydrauliques très différentes dépendant, du type de dépôt volcanique, de la distance à la source, du degré de compactage et d'érosion, qui vont directement influencer les possibilités de recharge des aquifères. De plus, la topographie irrégulière peut influencer les gradients de circulation de l'eau qui généralement sont très prononcés, induisant théoriquement des vitesses de transfert des flux très rapides. De même l'existence d'une chambre magmatique active produisant des systèmes géothermaux, peuvent échanger avec des couches aquifères moins profondes par transfert de flux, conduisant à un marquage spécifique de la géochimie de l'eau, majeurs et traces, et à des anomalies de température.

Le système aquifère de Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos est un cas typique d'aquifère volcano-sédimentaire de montagne. Après une synthèse de la géologie, il a été étudié à partir de trois axes principaux : i) l'hydrodynamique, ii) la chimie de l'eau qui comprend les ions majeurs et les éléments traces, notamment l'arsenic, et iii) les isotopes stables de l'eau et radioactifs, le tritium et le ^{14}C .

Cette triple approche a permis de différencier deux aquifères : l'aquifère Chiche et l'aquifère hydrothermal Ilaló. Une question essentielle est la relation entre ces deux formations. Aucune coupe n'a montré de contact direct entre elles. Nous avons donc considéré la Formation Chiche comme plus jeune que la Formation Ilaló mais cette hypothèse raisonnable n'est pas définitivement assurée.

L'aquifère Chiche est divisé en deux parties (Chiche nord et sud) par le volcan Ilaló, qui forme une barrière hydraulique. Le système est recouvert complètement par une couche supposée imperméable en surface, la Formation Cangahua. Les différences entre les aquifères Chiche et Ilaló ont été reconnues parce que les CE sont plus élevées autour du volcan, et au fur et à mesure que l'on s'éloigne du cône, on observe des valeurs plus basses qui après s'uniformisent dans les vallées. L'aquifère Chiche présente des différences entre le nord et le sud avec des conductivités électriques plus faibles dans la Vallée de Los Chillos au sud que dans la Vallée de Tumbaco au nord.

La faible variation temporelle des niveaux piézométriques de l'aquifère Chiche à l'échelle mensuelle est erratique et ne semble pas influencée par la saisonnalité des précipitations. A l'échelle horaire, les sondes automatiques Diver montrent des perturbations par des pompages tant au nord qu'au sud de l'aquifère. Cependant, malgré ces perturbations, les niveaux piézométriques et les débits des sources sont relativement stables dans le temps. Les niveaux piézométriques sont généralement plus hauts que les niveaux de rivières les plus importantes comme les rivières Chiche et San Pedro. Au fur et à mesure que les rivières avancent vers le nord, elles creusent l'aquifère et le fragmentent par une série d'axes de drainage qui constituent des discontinuités hydrauliques fortes. Cependant dans la partie sud

de l'aquifère Chiche, les rivières Chiche et Pita coulent sur la Formation Chiche et les limites de la zone d'étude ne correspondent plus à des discontinuités hydrodynamiques fortes.

La perméabilité de l'aquifère Chiche n'est pas uniforme. Ceci est particulièrement visible dans la partie nord où des sources apparaissent à des altitudes différentes.

Un bilan hydrique grossier de l'aquifère Chiche nord a été proposé et est basé sur des hypothèses sur la porosité de la Formation Chiche et le relatif équilibre piézométrique observé durant le temps de l'étude. La lame infiltrée ainsi calculée correspond de 30% à 50% du total des pluies. Pour l'aquifère Chiche nord, la zone de recharge identifiée par l'outil isotopique est le pied du volcan Ilaló. Cependant, des incohérences existent dans les différents calculs du temps de transit (à partir des paramètres hydrodynamiques, par décroissance radioactive du carbone 14). Cela souligne la complexité et l'hétérogénéité de la zone d'étude.

Il est probable qu'une partie de la recharge se fasse par infiltration diffuse au pied des volcans et qu'une autre partie provienne de la concentration du ruissellement dans les ravines profondes. Par ailleurs, la végétation, essentiellement constituée de forêt sur le volcan pourrait faciliter le passage de l'eau à travers la Formation Cangahua vers l'aquifère Chiche.

L'aquifère Ilaló semble être une entité à part sur le plan hydrodynamique, car l'information piézométrique disponible, malheureusement très rare, n'a pas permis de mettre en évidence des interactions avec l'aquifère Chiche. Les isotopes radioactifs indiquent des âges apparents de l'eau très anciens, entre 11000 et 46000 ans, impliquant que les éruptions les plus récentes du volcan auraient recouvert la zone de recharge. Dans ce cas, les isotopes stables ne seraient pas la marque des conditions actuelles climatiques, mais des conditions passées plus froides montrant que la recharge devait se faire sur les flancs du volcan Ilaló.

De même que pour la piézométrie, les paramètres physico-chimiques de l'eau ne signalent pas de saisonnalité. L'aquifère Chiche dans sa totalité et l'aquifère Ilaló ont un faciès d'eau bicarbonaté magnésien qui évolue vers un pôle bicarbonaté sodique. L'eau de l'aquifère Chiche sud a d'importantes teneurs en magnésium, et celle de l'aquifère Ilaló a des teneurs non négligeables en chlorures. Les teneurs en sodium et magnésium pour les aquifères Chiche nord et Ilaló s'expliquent bien à partir de la minéralogie de ces formations, la teneur plus élevée en magnésium trouvée dans la partie sud du Chiche est encore non expliquée, peut-être en lien avec une variation locale de la minéralogie. La teneur élevée en chlorures dans l'aquifère Ilaló est à relier à un mélange avec des fluides géothermaux. Le faciès bicarbonaté sodique soutient les résultats des isotopes radioactifs qui donnent un âge de l'eau suffisamment long pour permettre des échanges entre les ions Ca^{2+} et Na^+ entre les argiles de ces formations et l'eau.

Toutes ces interactions eau-roche, les arrivées d'eau hydrothermale et de gaz géothermaux vont modifier la température de l'eau, le pH et l'Eh et favoriser les migrations de certains éléments traces. L'As, bien présent dans les eaux du Chiche, vient des formations géologiques composées de matériaux volcaniques. La distribution de l'arsenic n'est pas uniforme, mais les teneurs les plus élevées autour du volcan et leur décroissance avec la distance au volcan justifient l'hypothèse d'une origine géothermale. L'aquifère Chiche nord présente des teneurs en arsenic, moins élevées et qui diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du volcan, mais il est encore difficile d'expliquer la dynamique temporelle ou spatiale de l'As dans cette partie de l'aquifère Chiche. De ces observations on peut mettre en évidence les interactions entre l'aquifère Ilaló et l'aquifère Chiche, d'une part on est dans le

sens du flux et d'autre part la fracturation localement enregistrée dans la Formation Chiche permettrait ces contacts par remontée d'eau issues de la formation Ilaló.

Dans l'aquifère Chiche, les conditions d'oxydoréduction ne sont pas totalement homogènes, même si l'As (V) et le Fe (III) prédominent. L'aquifère Ilaló, par la présence prédominante d'As (III) et du Fe (II) dans les forages, a des conditions réductrices. Cependant sur les sources de l'aquifère Ilaló, les résultats sont contradictoires les observations des forages, ceci peut être mis en relation avec la possibilité de dissolution de l'oxygène, à partir des remontées de fluides par des fractures, conduisant à une oxydation d'As.

L'aquifère Chiche nord semble marqué par un fractionnement sur les deux isotopes en relation avec la température de la roche ($>120^{\circ}\text{C}$) en condition d'aquifère non confiné. Ceci a généré de la vapeur, probablement évacuée par le système de failles, et conduit à un fractionnement isotopique sur la phase liquide restante, marquée par des teneurs isotopiques s'alignant sur une droite de pente 3,5 située en dessous de la DMM. La marque de géothermalisme n'est par contre pas observée dans les eaux hydrothermales de l'aquifère Ilaló, dont les teneurs isotopiques se situent proche de la Droite Météorique Mondiale, les conditions de confinement peuvent induire un échange entre l'eau et la roche pour l'oxygène 18 uniquement, mais la température dans le réservoir n'était peut-être pas assez élevée. Dans l'état actuel de cette étude, cette différence de comportement a besoin d'être plus argumentée.

L'hydrodynamique et la chimie des eaux ont suggéré un temps de résidence de l'eau assez long. Un seul point de l'aquifère Chiche a une teneur en tritium dépassant le seuil de détection de 0,5 UT, indiquant que ces eaux ont été du moins en partie infiltrées après 1950. La teneur en ^{14}C de cette source confirme une contribution d'eaux récentes. Les autres points de l'aquifère Chiche au nord ont des âges apparents ^{14}C entre 1000 et 6000 ans ; au sud entre 2000 et 8000 ans. L'aquifère Ilaló a des teneurs en ^{14}C inférieures et montrent des âges apparents entre 11000 et 46000 ans. Ces âges ont été corrigés à partir des teneurs en ^{13}C en utilisant le modèle de Gonfiantini qui considère deux sources d'origine du CO_2 . Dans notre cas, on peut penser à un mélange avec du CO_2 profond qui donnerait un âge apparent à l'eau plus ancien. Les résultats du modèle de Gonfiantini ont montré que, au nord et au sud de l'Ilaló, la teneur du ^{13}C du CO_2 profond dans l'aquifère Chiche peut être corrélée au CO_2 magmatique en zone de subduction. Ce CO_2 pourrait avoir des teneurs isotopiques du ^{13}C très enrichies, identiques à celles issues du métamorphisme de carbonates marins avec une valeur proche de 0‰ indiquant des connexions avec les systèmes de failles très profonds. Les âges, même corrigés, restent très vieux.

5.2 PERSPECTIVES ET RECHERCHES FUTURES

Cette étude n'a pas pu répondre à toutes les questions posées. Le projet a démarré sur l'hypothèse d'un aquifère en état d'équilibre sans perturbations depuis l'arrêt de son exploitation par l'EPMAPS en 2006, ce que les données de terrain n'ont pas confirmé. Le nombre de forages exploitant actuellement le système aquifère est inconnu. Ces forages non répertoriés ont compliqué nos interprétations. Pour améliorer la compréhension de la dynamique du système aquifère, il serait nécessaire, d'avoir un inventaire complet des points d'eau, ce qui améliorerait la précision des cartes piézométriques et géochimiques.

Pour répondre aux multiples questions soulevées, il serait nécessaire de faire une étude approfondie des volcans Ilaló et Pasochoa avec d'autres outils, géophysiques et géothermomètres, afin de localiser les chambres magmatiques, connaître avec un peu plus de

certitude les âges de ces formations, leur épaisseur, la température probable de leurs réservoirs. Cela permettrait d'améliorer notre connaissance sur la géologie locale, de confirmer les hypothèses de disposition des couches, pour mieux comprendre le fonctionnement de l'aquifère Ilaló et son géothermalisme.

Il faudra continuer les campagnes de mesure des niveaux piézométriques à un pas de temps mensuel, pour avoir une série plus longue de données et observer s'il existe une variabilité saisonnière naturelle de l'aquifère pour explorer la possibilité d'une variabilité pluriannuelle.

Pour améliorer les connaissances de la dynamique de l'arsenic, qui est un enjeu crucial pour les gestionnaires de l'eau, il serait nécessaire de compléter par des analyses des sédiments notamment dans les galeries de captation des sources et autour du volcan Ilaló, et également, des analyses des gaz dans les forages près du volcan et dans les forages mélangés.

En Equateur, il existe beaucoup de régions similaires à notre zone d'étude où pourrait être appliquée la même méthodologie. Cette thèse exploratoire laisse un certain nombre de questions sans réponse. Cependant en Equateur plusieurs études dans d'autres sites ont démarré depuis quelques années, les nouvelles connaissances ainsi acquises devraient permettre d'améliorer notre compréhension des dynamiques des aquifères volcano-sédimentaire andins.

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdullah, M., Shiyu, Z. et Mosgren, K., 1995. Arsenic and selenium species in the oxic and anoxic waters of the Oslofjord, Norway. *Marine Pollution Bulletin*, 31(1-3): 116-126
- Acosta, M., 1985. Estudio Geológico Estructural para el proyecto geotérmico Valle de Los Chillos, Provincia de Pichincha. Thèse de Ingénieur Géologue, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 348 p.
- Adams, A., Dennis, B., Eeckhout, E. V., Goff, F., Lawton, R., Trujillo, G., Counce, D., Medina, V. et Archuleta, J., 1991. Results of Investigations at the Zunil Geothermal Field, Guatemala: Well Logging and Brine Geochemistry, Los Alamos National Laboratory, Guatemala, Guatemala. 64 pp.
- AIEA-GNIP, 2012, Global Network of Isotopes in Precipitation [online], AIEA, Disponible sur: http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html, [date d'accès: le 22 janvier 2014]
- Almeida, E., Sandoval, G., Panichi, C., Noto, P. et Belluci, L., 1992, Modelo geotérmico preliminar de áreas volcánicas del Ecuador, a partir de estudio químicos e isotópicos de manifestaciones termales., *Geothermal investigations with isotope and geochemical techniques in Latin America (Résumés d'un symposium international tenu à San José, Costa Rica le 12-16 November 1990)*, IAEA, IAEA-TECDOC-641, 219-236 pp.
- Alulema, R., 2008. El Arsenico en el Acuífero - Volcan Ilaló Quito - Ecuador, EPMAPS, Quito. 10
- Alulema, R., Rosero, M. E. et Pasquel, E., 2000. Proyecto RLA/8/023. Estudio Hidrológico - Isotópico del Acuífero de Quito". Informe Técnico Final, CEEA, DMA-Q, EMAAP-Q, INAMHI. 59 p. y anexos
- Alvarado, A., 2012. Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur. Thèse de PhD, Université Joseph Fourier, Grenoble - France, 259.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. et Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 326 p. pp.
- Aranyossy, J.-F., Pourrut, P. et Maldonado, A., 1989, Cubeta de Quito: Comportamiento general y problemática de la recarga natural del acuífero, *Estudios de hidrología isotópica en América latina (Résumés d'un symposium international tenu à Mexico le September 28 - October 2, 1987)*, IAEA, 305-317 pp.
- Arias, N., 2008. Caracterización Hidrogeológica del Acuífero Cumbayá – Tumbaco-Ilaló, EMAAP - Q, Quito. 84 p.
- Armienta, M. et Segovia, N., 2008. Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 30(4): 345–353
- Arújo, L., França, A. et Potter, P., 1999. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA. *Hydrogeology journal*, 7(3): 317-336
- Aspden, J. et Litherland, M. , 1992. The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics*, 205(1-3): 187-204
- Baldock, J., 1982. Geología del Ecuador, boletín de explicación del mapa geológico de la República del Ecuador escala 1:1000000., DGGM, Quito - Equateur. 66 p.
- Barberi, F., Coltelli, M., Ferrara, G., Innocenti, F., Navarro, J. et Santacroce, R., 1988. Plio-Quaternary volcanism in Ecuador. *Geological Magazine*, 125(1): 1-14
- Barnes, I., Irwin, W. et White, D., 1984. Map showing world distribution of carbon-dioxide springs and major zones of seismicity, USGS. 11
- Barnes, I., Johnston, D., Evans, W., Presser, T., Mariner, R. et White, L., 1981a. Properties of gases and waters of deep origin. Near Mount St. Helens In: Lipman, P. et Mullineaux,

- D. (Editors), The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington. USGS, Washington, USA, pp. 233-237.
- Barnes, I., Kistler, R., Mariner, R. et Presser, T., G.P.O., U.S., 1981b. Geochemical evidence on the nature of the basement rocks of the Sierra Nevada, California, USGS, USA. 13
- Barnes, I. et McCoy, G., 1979. Possible role of mantle-derived CO₂ in causing two “phreatic” explosions in Alaska Geology, 7(9): 434-435
- Baudino, R., 1995. Evolution des Andes d’Equateur au néogène : Les enseignements de l’étude des bassins intramontagneux. Thèse de PhD, Université de Pau, Pau, France, 473 p.
- Bertrand, G., Celle-Jeanton, H., Huneau, F., Looock, S. et Renac, C., 2010. Identification of different groundwater flowpaths within volcanic aquifers using natural tracers for the evaluation of the influence of lava flows morphology (Argnat basin, Chaîne des Puys, France). Journal of Hydrology, 391(3-4): 223–234
- Betancur, T., 2008. Una aproximación al conocimiento de un sistema acuífero tropical. Caso de estudio: Bajo Cauca antioqueño. Thèse de PhD, Universidad de Antioquia, Medellín, 221.
- Betancur, T., Palacio, C. et Escobar, J., 2012. Conceptual Models in Hydrogeology, Methodology and Results. In: Kazemi, G. (Editor), Hydrogeology - A Global Perspective. InTech, pp. 203-222.
- Bhattacharya, P., Claesson, M., Bundschuh, J., Sracek, O., Fagerberg, J., Jacks, G., Martin, R., Storniolo, A. et Thir, J., 2006. Distribution and mobility of arsenic in the Río Dulce Alluvial aquifers in Santiago del Estero Province, Argentina. Science of The Total Environment, 358(1-3): 97-120
- Birkle, P., Bundschuh, J. et Sracek, O., 2010. Mechanisms of arsenic enrichment in geothermal and petroleum reservoirs fluids in Mexico. Water Research, 44(19): 5605–5617
- Bisson, R. et Lehr, J., 2004. Modern groundwater exploration. Discovering new water resources in consolidated rocks using innovative hydrogeologic concepts, exploration, drilling, aquifer testing, and management methods. John Wiley & Sons, New Jersey, 309 pp.
- Bourdon, E., Eissen, J.-P., Monzier, M., robin, C., Martin, H., Cotten, J. et Hall, M., 2002. Adakite-like Lavas from Antisana Volcano (Ecuador): Evidence for Slab Melt Metasomatism Beneath Andean Northern Volcanic Zone. Journal of Petrology, 43(2): 199-217
- Brozena, J., 1986. Temporal and Spatial Variability of Seafloor Spreading Processes in the Northern South Atlantic. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 91(B1): 497–510
- Bundschuh, J., Farias, B., Martin, R., Storniolo, A., Bhattacharya, P., Cortes, J., Bonorino, G. et Albouy, R., 2004. Groundwater arsenic in the Chaco-Pampean Plain, Argentina: case study from Robles county, Santiago del Estero Province. Applied Geochemistry, 19(2): 231-243
- Bundschuh, J., García, M., Birkle, P., Cumbal, L., Bhattacharya, P. et Matschullat, J., 2009. Occurrence, health effects and remediation of arsenic in groundwaters of Latin America. In: Bundschuh, J., Armienta, M., Birkle, P., Bhattacharya, P., Matschullat, J. et Mukherjee, A. (Editors), Natural arsenic in Groundwater of Latin America. CRC Press/Balkema, London, UK, pp. 3-15.
- Bundschuh, J., Litter, M., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H., Jean, J.-S., Liu, C.-W., López, D., Armienta, M., Guilherme, L., Gomez Cuevas, A., Cornejo, L., Cumbal, L. et Toujaguez, R., 2012a. One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. Science of The Total Environment,

- 429(Special Section - Arsenic in Latin America, An Unrevealed Continent: Occurrence, Health Effects and Mitigation): 2–35
- Bundschuh, J., Nath, B., Bhattacharya, P., Liu, C.-W., Armienta, M., Moreno, M., Lopez, D., Jean, J.-S., Cornejo, L., Macedo, L. et Filho, A., 2012b. Arsenic in the human food chain: the Latin American perspective. *Science of The Total Environment*, 429(Special Section - Arsenic in Latin America, An Unrevealed Continent: Occurrence, Health Effects and Mitigation): 92-106
- Bundschuh, J., Litter, M., Ciminelli, V., Morgada, M. E., Cornejo, L., Garrido, S., Hoinkis, J., Alarcón-Herrera, M. T., Armienta, M. A. et Bhattacharya, P., 2010. Emerging mitigation needs and sustainable options for solving the arsenic problems of rural and isolated urban areas in Latin America - A critical analysis. *Water Research*, 44(19): 5828-5845
- Cabrera, M. et Custodio, E., 2004. Groundwater flow in a volcanic–sedimentary coastal aquifer: Telde area, Gran Canaria, Canary Islands, Spain. *Hydrogeology journal*, 12(3): 305–320
- Carreira, P., Marques, J., Graça, R. et Aires-Barros, L., 2008. Radiocarbon application in dating “complex” hot and cold CO₂-rich mineral water systems: A review of case studies ascribed to the northern Portugal. *Applied Geochemistry*, 23(10): 2817-2828
- Carreón-Díazconti, C., Nelson, S., Mayo, A., Tingey, D. et Smith, M., 2003. A mixed groundwater system at Midway, UT: discriminating superimposed local and regional discharge. *Journal of Hydrology*, 273(1-4): 119–138
- Cassan, M., 2005. Les essais de perméabilité sur site dans la reconnaissance des sols. Nouvelle édition. Presses des Ponts et Chaussées, Paris - France, 568 pp.
- Castillo, M., 1982. Estudio Geotécnico de la cangahua en los alrededores de Quito. Thèse de Ingénieur Géologue, EPN, Quito, 164 p.
- Castro de Esparza, M., 2009. The presence of arsenic in drinking water in Latin America and its effects on public health. In: Bundschuh, J., Armienta, M., Birkle, P., Bhattacharya, P., Matschullat, J. et Mukherjee, A. (Editors), *Natural arsenic in Groundwater of Latin America*. CRC Press/Balkema, London, UK, pp. 17-29.
- Clapperton, C. et Vera, R., 1986. La Secuencia Glacial del Cuaternario en el Ecuador: una Interpretación al Modelo de W. Sauer, Paisajes Geográficos. Centro Panamericano de Estudios e Investigaciones Geográficas, Quito - Ecuador, pp. 3-20.
- Clark, I. et Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press / Lewis Publishers, Boca Raton - USA, 352 pp.
- Coello, X., 2002. Análisis comparativo de la vulnerabilidad del acuífero norte de Quito. Thèse de Ingénieur Civil, EPN, Quito, 166 p. y anexos.
- Comte, J.-C., Cassidy, R., Nitsche, J., Ofterdinger, U., Pilatova, K. et Flynn, R., 2012. The typology of Irish hard-rock aquifers based on an integrated hydrogeological and geophysical approach. *Hydrogeology journal*, 20(8): 1569–1588
- Cooper, H. et Jacob, C., 1946. A generalized graphical method of evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Transactions, American Geophysical Union*, 27(4): 526-534
- Cornejo, R., 1983. Estudio Geotérmico en el Valle de los Chillos. II Fase. Los Volcánicos Ilaló, INE - EPN, Quito. 17
- Correa, C., 2002. Relación entre la tectónica y la erosión en el borde oriental de la cuenca de Quito. Thèse de Ingénieur Géologue, Universidad Central del Ecuador, Quito - Ecuador, 128 p. y anexos.
- Courteaud, M., Ritz, M., Robineau, B., Join, J.L. et Coudray, J., 1997. New geological and hydrogeological implications of the resistivity distribution inferred from audiomagnetotellurics over La Fournaise young shield volcano (Reunion Island). *Journal of Hydrology*, 203(1-4): 93-100

- CPC, 2013, El Niño - Southern Oscillation (ENSO) [online], National Weather Service - Climate Prediction Center, Disponible sur: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml#history>, [date d'accès: le 24 septembre 2013]
- Craig, H., 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133(3465): 1702-1703
- Cumbal, L., Vallejo, P., Rodriguez, B. et Lopez, D., 2010. Arsenic in geothermal sources at the north-central Andean region of Ecuador: concentrations and mechanisms of mobility. *Environmental Earth Sciences*, 61(2): 299 - 310
- Cuoco, E., Verrengia, G., De Francesco, S. et Tedesco, D., 2010. Hydrogeochemistry of Roccamonfina volcano (Southern Italy). *Environmental Earth Sciences*, 61(3): 525–538
- Custodio, E., 2004. Hydrogeology of volcanic rocks. In: Kovalevsky, V., Kruseman, G. et Rushton, K. (Editors), *Groundwater studies. An international guide for hydrogeological investigations*. UNESCO, Paris, pp. 395-425.
- Custodio, E., 2007, Groundwater in volcanic hard rocks, *Groundwater in Fractured Rocks International Conference (Résumés d'un symposium international tenu à Prague, Czech Republic le 2003)*, Taylor & Francis, 95-108 pp.
- Changuon, L., Aranyossy, J.F., Oleas, M. et Lopoukine, M. , 1989, Determinación del modelo geotérmico del Valle de los Chillos (Ecuador) en base a isótopos ambientales, *Estudios de hidrología isotópica en América latina (Résumés d'un symposium international tenu à Mexico le September 28 - October 2, 1987)*, AIEA, 291-303 pp.
- Chapin, Ch. et Dunbar, N., 1995, A regional perspective on arsenic in waters of the middle Rio Grande basin, New Mexico, *The water future of Albuquerque and Middle Río Grande Basin - proceedings of the 39th annual New Mexico Water Conference (Résumés d'un symposium international tenu à Albuquerque, NM le November 3 - 4, 1994)*, New Mexico State University, Water Resources Research Institute, 290, 257-276 pp.
- Chenevoy, M. et Piboule, M., 2007. *Hydrothermalisme. Spéciation métallique hydrique et systèmes hydrothermaux*. EDP Sciences, Grenoble, 619 pp.
- Cherry, J., Shaikh, A., Tallman, D. et Nicholson, R., 1979. Arsenic species as an indicator of redox conditions in groundwater. *Journal of Hydrology*, 43(1-4): 373–392
- Chiodini, G. et Frondini, F., 2001. Carbon dioxide degassing from the Albani Hills volcanic region, Central Italy. *Chemical Geology*, 177(1-2): 67-83
- Chiodini, G., Marini, L. et Russo, M., 2001. Geochemical evidence for the existence of high-temperature hydrothermal brines at Vesuvio volcano, Italy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(13): 2129 –2147
- D'Amore, F., Gianelli, G., Corazza, E., Jauregui, J. et Varela, P., 1992, Geothermal exploration by geochemical methods of the thermal area El Pilar - Mundo Nuevo, State of Sucre, Venezuela, *Geothermal investigations with isotope and geochemical techniques in Latin America (Résumés d'un symposium international tenu à San José, Costa Rica le 12-16 November 1990)*, IAEA, IAEA-TECDOC-641, 379-422 pp.
- Dall'Aglio, M., Duchi, V., Minissale, A., Guerrini, A. et Tremori, M., 1994. Hydrogeochemistry of the volcanic district in the Tolfa and Sabatini Mountains in central Italy. *Journal of Hydrology*, 154(1-4): 195-217
- Davis, S., 1988. Sandstones and Shales. In: Back, W., Rosenshein, J.S. et Seaber, P.R. (Editors), *The Geology of North America. Hydrogeology: The Geological Society of America*, Boulder, Colorado, pp. 524.
- Delgado, C., 2008. *Hidrogeología y modelación del Acuífero Pifo - El Quinche*. Thèse de Ingénieur Géologue, EPN, Quito, 158 pp.

- Deniaud, Y., 2000. Enregistrement sédimentaire et structural de l'évolution géodynamique des Andes Equatoriennes au cours du néogène : Etude des bassins d'avant-arc et bilans de masse. Thèse de PhD, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 257 pp.
- Descloitres, M., 1985. Modèle de glissement associés à une tectonique d'effondrement dans la dépression de Guayllabamba. Province de Pichincha - Equateur, ORSTOM - EPN - IPGH, Quito. 42 p.
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Boudier, F., Al-Hattali, S., Ladouche, B., Pinault, J.-L. et Al-Suleimani, Z., 2005. A conceptual hydrogeological model of ophiolite hard-rock aquifers in Oman based on a multiscale and a multidisciplinary approach. *Hydrogeology journal*, 13(5-6): 708–726
- DGGM, 1980. Mapa Geológico. Hoja Sangolquí. Dirección General de Geología y Minas. Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos, Quito.
- Domenico, P. et Schwartz, F., 1997. *Physical and Chemical Hydrogeology*. 2 nd edition. John Wiley and Sons, U. S., 528 pp.
- Dreher, J., 2001. Propuesta preliminar proyecto RLA/8/031-05. Programa para la Gestión Sostenible de los Acuíferos de Quito, EMAAP-Q, Viena. 48 p.
- Duque-Caro, H., 1990. The Chocó block in the northwestern corner of South America: Structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 3(1): 71–84
- Eary, E. et Schramke, J., 1990. Rates of Inorganic Oxidation Reactions Involving Dissolved Oxygen. In: Melchior, D. et R., Bassett; (Editors), *Chemical Modeling of Aqueous Systems II*. American Chemical Society, pp. 379-396.
- Ego, F., Sébrier, M., Lavenue, A., Yepes, H. et Egues, A., 1996. Quaternary state of stress in the Northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes. *Tectonophysics*, 259(1-3): 101–116
- Eichinger, L., 1983. A contribution to the interpretation of ^{14}C groundwater ages considering the example of a partially confined sandstone aquifer. *Radiocarbon*, 25(2): 347-356
- Espinoza, J., Ronchail, J., Guyot, J.-L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., De Oliveira, E., Pombosa, R. et Vauchel, P., 2009. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *Journal of Climatology*, 29(11): 1574-1594
- Evans, E., Lee, D., Boisvert, R., Arce, B., Steenhuis, T., Praño, M. et Poats, S., 2003. Achieving efficiency and equity in irrigation management: an optimization model of the El Angel watershed, Carchi, Ecuador. *Agricultural Systems*, 77(1): 1-22
- Evans, G., Otlet, R., Downing, R. et Monkhouse, G., 1979, Some problems in the interpretation of isotope measurements in United Kindom aquifers, *Isotopes Hydrology Vol. II (Résumés d'un symposium international tenu à Vienna le 19 - 23 june 1978)*, IAEA, 679-706 pp.
- Evans, W., Banks, N. et White, L., 1981. Analyses of gas samples form the summit crater. In: Lipman, P. et Mullineaux, D. (Editors), *The 1980 eruptions of Mount St. Helens*, Washington. USGS, Washington, USA, pp. 227-231.
- Faccenna, C., 1994. Structural and hydrogeological features of Pleistocene shear zones in the area of Rome (Central Italy). *Annals of Geophysics*, 37(1): 121-133
- Fajar, R., Sakura, Y. et Delinom, R., 2008. Groundwater recharge and discharge processes in the Jakarta groundwater basin, Indonesia. *Hydrogeology journal*, 16(5): 927-938
- Favier, V., 2004. Etude du bilan d'énergie de surface et de la production des écoulements de fonte d'un glacier des Andes d'Equateur : Relation glacier - climat en zone tropicale. Thèse de PhD, Université de Montpellier II, Montpellier, 243.
- Fernandez-Turiel, J., Garcia-Valles, M., Gimeno-Torrente, D., Saavedra-Alonso, J. et Martinez-Manent, S., 2005. The hot spring and geyser sinters of El Tatio, Northern Chile. *Sedimentary Geology*, 180(3-4): 125–147

- Figuerola, J., 2003. Estudio Geoelectrico Acuífero de Quito, EMAAP-Q, Quito. 13 p. y anexos
- Fontes, J.-C., 1983. Dating of groundwater, Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology. IAEA, Vienna, pp. 285-317.
- Fontes, J.-C., Andrews, J., Edmunds, W., Guerre, A. et Travi, Y., 1991. Paleorecharge by the Niger River (Mali) deduced from groundwater geochemistry. *Water Resources Research*, 27(2): 199-214
- Fontes, J.-C. et Garnier, J.-M., 1979. Determination of the initial ^{14}C activity of the total dissolved carbon: A review of the existing models and a new approach. *Water resources research*, 15(2): 399-413
- Foster, S., 2012. Hard-rock aquifers in tropical regions: using science to inform development and management policy. *Hydrogeology journal*, 20(4): 659-672
- Friedman, I., 1970. Some investigations of the deposition of travertine from Hot Springs—I. The isotopic chemistry of a travertine-depositing spring. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34(12): 1303-1315
- Gallaire, R., Taupin, J.-D. et Coudrain, A., 2010. Evolution récente des paramètres cryoclimatiques et des teneurs isotopiques des précipitations dans les Andes Boliviennes: La Paz et Glacier du Zongo. *Hydrological Sciences Journal*, 55(4): 467-483
- García, M., 2004. Interpretación Isotópica del acuífero de Quito, Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica, Quito. 12 p.
- García, M., Villalba, F., Araguás-Araguás, L. et Rozanski, K., 1997, The role of atmospheric circulation patterns in controlling the regional distribution of stable isotope contents in precipitation: preliminary results from two transects in the Ecuadorian Andes, *Isotope Techniques in the Study of Environmental Change (Résumés d'un symposium international tenu à Vienna le April 14 - 18, 1997)*, AIEA, 127-140 pp.
- Gat, J., Mook, W. et Meijer, H., 2001. Isotopes de l'Environnement dans le Cycle Hydrologique, Volume II. Eau Atmosphérique. IAEA - UNESCO, 114 pp.
- Geyh, M., 2000. Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principles and applications, Volume IV. Groundwater. Saturated and unsaturated zone. IAEA - UNESCO, 200 pp.
- Geyh, M. et Söfner, B., 1989. Groundwater analysis of environmental carbon and other isotopes from the Jakarta basin aquifer, Indonesia. *Radiocarbon*, 31(3): 919-925
- Giggenbach, W., Corrales, R. et Vaca, L., 1992a, Isotopic composition and origin of thermal and non-thermal waters from the Miravalles Geothermal field, Costa Rica, *Geothermal investigations with isotope and geochemical techniques in Latin America (Résumés d'un symposium international tenu à San José, Costa Rica le 12-16 November 1990)*, IAEA, IAEA-TECDOC-641, 201-218 pp.
- Giggenbach, W., Paniagua du Gudiel, D. et Roldán, A., 1992b, Isotopic and chemical composition of water and gas discharges from the Zunil geothermal system, Guatemala., *Geothermal investigations with isotope and geochemical techniques in Latin America (Résumés d'un symposium international tenu à San José, Costa Rica le 12-16 November 1990)*, IAEA, IAEA-TECDOC-641, 245-278 pp.
- Girard, G., 1987, Modélisation hydrologique des bassins versants et des nappes d'eau souterraine en région montagneuse subtropicale : application de ce modèle à la gestion des eaux de la nappe de Quito, *Méthodes de simulation du ruissellement et du débit appliquées à diverses conditions physiographiques et climatiques (Résumés d'un symposium international tenu à Vancouver - Canada le 9 - 22 août 1987)*, Union Géodésie et Géophysique Internationale. Atelier de l'AISH, 18 p. pp.
- Goff, F., Janik, C., Gutierrez, J., Truesdell, A., Shevenell, L., Trujillo, G., Grigsby, C., Paredes, J. et Counce, D., 1987. Hydrogeochemical Investigation of Six Geothermal Sites in Honduras, Central America, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, US. 186

- Goff, F. et McMurtry, G., 2000. Tritium and stable isotopes of magmatic waters. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97(1-4): 347-396
- Goff, F., Truesdell, A., Janik, C., Adams, A., Roldán, A. et Meeker, K., 1989. Hydrogeochemical exploration of the Tecuamburro volcano region, Guatemala, Los Alamos National Laboratory, California, US. 9
- Goldberg, S. et Glaubig, R., 1988. Anion Sorption on a Calcareous, Montmorillonitic Soil—Arsenic. *Soil Science Society of America*, 52(5): 1297-1300
- Gonfiantini, R., Roche, M.-A., Olivry, J.-C., Fontes, J.-C. et Zuppi, G., 2001. The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains. *Chemical Geology*, 181(1-4): 147-167
- Halford, K. et Kuniansky, E., USGS, 2002. Documentation of Spreadsheets for the Analysis of Aquifer-Test and Slug-Test Data, USGS, Carson City, Nevada. 54 pp.
- Hall, M. et Beate, B., 1991. El volcanismo Plio-Cuaternario en los Andes del Ecuador. In: Mothes, P. (Editor), *El Paisaje Volcánico de la Sierra Ecuatoriana*. Estudios de Geografía, Quito, pp. 5-18.
- Hall, M. et Mothes, P., 1996, El origen y la edad de la cangahua superior, valle de Tumbaco (Ecuador), *Memorias del III Simposio Internacional sobre Suelos volcánicos endurecidos (Résumés d'un symposium international tenu à Quito le Diciembre de 1996)*, ORSTOM, PUCE, UCE, Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador, 19-28 pp.
- Hall, M. et Mothes, P., 1998. La actividad volcánica del Holoceno en el Ecuador y Colombia austral. Impedimento al desarrollo de las civilizaciones pasadas. In: Ediciones, Abya - Yala (Editor), *Actividad volcánica y pueblos pre-colombinos en el Ecuador*. Abya - Yala, Quito, pp. 11-40.
- Hall, M. et Mothes, P., 2008. The rhyolitic-andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 70(6): 675-702
- Henning, I. et Henning, D., 1981. Potential Evapotranspiration in Mountain Geoeosystems of Different Altitudes and Latitudes. *Mountain research and Development*, 1(3-4): 267-274
- Hilton, D., 1996. The helium and carbon isotope systematics of a continental geothermal system: results from monitoring studies at Long Valley caldera (California, U.S.A.). *Chemical Geology*, 127(4): 269-295
- INEC, 2010. Ecuador: Censo de Población y Vivienda. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, Quito.
- Ingerson, E. et Pearson, F., 1964. Estimation of age and rate of motion of groundwater by the ^{14}C -method. In: Miyake, Y. et Koyama, T. (Editors), *Recent researches in the fields of hydrosphere, atmosphere and nuclear geochemistry* Editorial Committee for Sugawara Volume, Nayoga University, Tokyo, pp. 263-268.
- Inguaggiato, S., Hidalgo, S., Beate, B. et Bourquin, J., 2010. Geochemical and isotopic characterization of volcanic and geothermal fluids discharged from the Ecuadorian volcanic arc. *Geofluids*, 10(4): 525-541
- Iriondo, M. et Kröhling, D., 2007. Non-classical types of loess. *Sedimentary Geology*, 202(3): 352-368
- Jacobsen, D., Dangles, O., Andino, P., Espinosa, R., Hamerlik, L. et Cadier, E., 2010. Longitudinal zonation of macroinvertebrates in an Ecuadorian glacier-fed stream: do tropical glacial systems fit the temperate model? *Freshwater Biology*, 55(6): 1234-1248
- Janik, C., Goff, F., Fahlquist, L., Adams, A., Roldan, M., Chipera, S., Trujillo, P. et Counce, D., 1992. Hydrogeochemical exploration of geothermal prospects in the Tecuamburro Volcano region, Guatemala. *Geothermics*, 21(4): 447-481

- Janik, C., Nathenson, M. et Scholl, M., 1994. Chemistry of spring and well waters on Kilauea Volcano, Hawaii, and vicinity, U.S. Geological Survey. 166
- Johnson, D. et Pilson, M., 1975. The Oxidation of Arsenite in Seawater. *Environmental Letters*, 8(2): 157-171
- Johnson, R. I., Unda, G., Sosa, J. et Matamoros, J., 1980. Informe Geotécnico del Area Metropolitana de Quito. Area 1. Vol. 1. Geología del Area del Quinche, Dirección General de Geología y Minas. Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos. Ministerio de Desarrollo de Ultramar. 47 p.
- Jouzel, J., 1986. Isotopes in Cloud Physics: Multiphase and Multistage Condensation Processes. In: Fritz, P. et Fontes, J.-C. (Editors), *Handbook of environmental isotope geochemistry. The terrestrial environment*, B. Elsevier, pp. 61-112.
- Kebede, S., Travi, Y., Asrat, A., Alemayehu, T., Ayenew, T. et Tessema, Z., 2008. Groundwater origin and flow along selected transects in Ethiopian rift volcanic aquifers. *Hydrogeology journal*, 16(1): 55-73
- Kellogg, J., Vega, V., Stailings, T. et Aiken, C., 1995. Tectonic Development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System Geodetic Studies and Gravity. In: Mann, P. (Editor), *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America*. Geological Society of America Special Paper, pp. 75-90.
- Krauskopf, K. et Bird, D., 1995. *Introduction To Geochemistry*. 3rd edition. McGraw-Hill Science, University of California, 647 pp.
- Kulkarni, H., Deolankar, S., Lalwani, A., Joseph, B. et Pawar, S., 2000. Hydrogeological framework of the Deccan basalt groundwater systems, west-central India. *Hydrogeology journal*, 8(4): 368-378
- Kyser, T., 1986. Stable Isotope Variations in the Mantle In: Valley, J., Taylor, H. et O'Neil, J. (Editors), *Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes*. Mineralogical Society of America, pp. 141-164.
- Lachassagne, P., Wyns, R., Bérard, P., Bruel, T., Chéry, L., Coutand, T., Desprats, J.-F. et Le Strat, P., 2001. Exploitation of High-Yields in Hard-Rock Aquifers: Downscaling Methodology Combining GIS and Multicriteria Analysis to Delineate Field Prospecting Zones. *Ground Water*, 39(4): 568-581
- Landis, G. et Rye, R., 1974. Geologic, Fluid Inclusion, and Stable Isotope Studies of the Pasto Buena Tungsten-Base Metal Ore Deposit, Northern Peru *Economic Geology*, 69(7): 1025-1059
- Laraque, A., Ronchail, J., Cochonneau, G., Pombosa, R. et Guyot, J.-L., 2007. Heterogeneous Distribution of Rainfall and Discharge Regimes in the Ecuadorian Amazon Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 8(6): 1364-1381
- Lavenu, A., Baudino, R. et Ego, F., 1996. Stratigraphie des dépôts tertiaires et quaternaires de la dépression interandine d'Equateur (entre 0° et 2°15'S). *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*, 25(1): 1-15
- Lavenu, A., Winter, T. et Dávila, F., 1995. A Pliocene-Quaternary compressional basin in the Interandean Depression, Central Ecuador. *Geophysical Journal International*, 121(1): 279-300
- Le Goulven, P., Ruf, T., Dattée, E., Linossier, I. et Gilot, L., INERHI, ORSTOM, 1992. Localisation, organisation et caractérisation de l'irrigation dans les Andes équatoriennes. Bassin du Rio Mira. Irrigation d'état, Résumés par ZARI et par bassin, CONADE, INERHI, ORSTOM, Quito - Equateur. 231
- Le Voyer, M., Rose-Koga, E., Laubier, M. et Schiano, P., 2008. Petrogenesis of arc lavas from the Rucu Pichincha and Pan de Azucar volcanoes (Ecuadorian arc): Major, trace element, and boron isotope evidences from olivine-hosted melt inclusions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(12): 27 pp.

- Ledru, M.-P., Jomelli, V., Samaniego, P., Vuille, M., Hidalgo, S., Herrera, M. et Ceron, C., 2013. The Medieval Climate Anomaly and the Little Ice Age in the eastern Ecuadorian Andes. *Climate of the Past*, 9: 307-321
- Leeuw, G., Hilton, D., Fischer, T. et Walker, J., 2007. The He-CO₂ isotope and relative abundance characteristics of geothermal fluids in El Salvador and Honduras: New constraints on volatile mass balance of the Central American Volcanic Arc. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 258(1-2): 132-146
- Libby, W., 1946. Atmospheric Helium Three and Radiocarbon from Cosmic Radiation. *Physical Review Online Archive*, 69(11-12): 671-672
- Lindberg, R. et Runnells, D., 1984. Ground Water Redox Reactions: An Analysis of Equilibrium State Applied to Eh Measurements and Geochemical Modeling. *Sciences*, 225(4665): 925 - 927
- Logan, J., 1961. Estimation of electrical conductivity from chemical analyses of natural waters. *Journal of Geophysical Research*, 66(8): 2479-2483
- Lonsdale, P., 1978. Ecuadorian subduction system AAPG Bulletin, 62(12): 2454-2477
- López, D., Bundschuh, J., Birkle, P., Armienta, M. A., Cumbal, L., Sracek, O., Cornejo, L. et Ormachea, M., 2012. Arsenic in volcanic geothermal fluids of Latin America. *Science of The Total Environment*, 429(Special Section - Arsenic in Latin America, An Unrevealed Continent: Occurrence, Health Effects and Mitigation): 57-75
- Lopez, D., Ransom, L., Monterrosa, J., Soriano, T., Barahona, F., Olmos, R. et Bundschuh, J., 2009. Volcanic arsenic and boron pollution of Ilopango lake, El Salvador. In: Bundschuh, J., Armienta, M., Birkle, P., Bhattacharya, P., Matschullat, J. et Mukherjee, A. (Editors), *Natural arsenic in Groundwater of Latin America*. CRC Press/Balkema, London, UK, pp. 129-143.
- Manganelli, A., Goso, C., Guerequiz, R., Fernández Turiel, J. L., García Vallès, M., Gimeno, D. et Pérez, C., 2007. Groundwater arsenic distribution in South-western Uruguay. *Environmental Geology*, 53(4): 827-834
- Mansilla, H. et Cornejo, L., 2002. Relevamiento de Comunidades Rurales de América Latina para la aplicación de Tecnologías Económicas para la Potabilización de Aguas. Chile. Proyecto OEA AE 141/2001. 43-58 pp.
- Martínez, D., 2004. Informe del avance sobre hidrogeoquímica del acuífero de Quito, EMAAP-Q, CEEA, DMA. 16 p. y anexos
- Merla, A., 1980. Proyecto de Investigación Geotérmica de la República del Ecuador. Informe Final, OLADE, Aquatec, INECCEL, Quito. 67 p.
- Merlivat, L. et Jouzel, J., 1979. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 84(C8): 5029-5033
- Michard, G., 2002. Chimie des eaux naturelles. Principes de Géochimie des Eaux. Collection Sciences et Techniques. PUBLISUD, Paris, 466 pp.
- Minissale, A., Magro, G., Vaselli, O., Verrucchi, C. et Perticone, I., 1997. Geochemistry of water and gas discharges from the Mt. Amiata silicic complex and surrounding areas (central Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 79(3-4): 223-251
- Moench, A. et Hsieh, P., 1985, Slug testing in wells with finite-thickness skin, Conference: 10. annual workshop on geothermal reservoir engineering (Résumés d'un symposium international tenu à Stanford, CA, USA le USDOE, SGP-TR-84; CONF-850107-29, 169-175 pp.
- Mook, W., 1980. Carbon-14 in hydrogeological studies. In: Fritz, P. et Fontes, J.-C. (Editors), *Handbook of environmental isotope geochemistry*. Elsevier Scientific Pub. Co., University of California, pp. 49-74.

- Mook, W., Bommerson, J. et Staverman, W., 1974. Carbon isotope fractionation between dissolved bicarbonate and gaseous carbon dioxide. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 22(2): 169-176
- Mothes, P. et Hall, M., 1991. Eventos volcánicos de Gran Magnitud. In: Mothes, P. (Editor), *El Paisaje Volcánico de la Sierra Ecuatoriana*. Estudios de Geografía, Quito, pp. 19-38.
- Mothes, P., Hall, M. et Janda, R., 1998. The enormous Chillos Valley Lahar: an ash-flow-generated debris flow from Cotopaxi Volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 59(4): 233-244
- Muñoz, T., 2005. Modelación del nivel principal del acuífero centro norte de Quito. Thèse de Ingénieur Géologue, EPN, Quito, 107 p. y anexos.
- Nickson, R., McArthur, J., Ravenscroft, P., Burgess, W. et Ahmed, K., 2000. Mechanism of arsenic release to groundwater, Bangladesh and West Bengal. *Applied Geochemistry*, 15(4): 403-413
- Nicolli, H., Bundschuh, J., Blanco, M., Tujchneider, O., Panarello, H., Dapeña, C. et Rusansky, J., 2012a. Arsenic and associated trace-elements in groundwater from the Chaco-Pampean plain, Argentina: Results from 100 years of research. *Science of The Total Environment*, 429(Special Section - Arsenic in Latin America, An Unrevealed Continent: Occurrence, Health Effects and Mitigation): 36-56
- Nicolli, H., García, J., Falcón, C. et Smedley, P., 2012b. Mobilization of arsenic and other trace elements of health concern in groundwater from the Salí River Basin, Tucumán Province, Argentina. *Environmental Geochemistry and Health*, 34(2): 251-262
- Nicolli, H., Suriano, J., Gomez, M., Ferpozzi, L. et Baleani, O., 1989. Groundwater Contamination with Arsenic and Other Trace Elements in an Area of the Pampa, Province of Córdoba, Argentina. *Environmental Geology and Water Sciences*, 14(1): 3-16
- Nur, A. et Ben-Avraham, Z., 1983. Volcanic gaps due to oblique consumption of aseismic ridges. *Tectonophysics*, 99(2-4): 355-362
- Olive, P., 1999. La datation des eaux souterraines à long temps de résidence par le radiocarbone, Mode d'emploi. *Hydrogéologie*, 1: 3-19
- OMS, 2001. *Environmental Health Criteria 224: Arsenic and Arsenic Compounds*, Second edition. Second edition. World Health Organization, Geneva, 114 pp.
- OMS, 2008. *Guidelines for Drinking-water Quality, Vol 1. Recommendations*. 3rd edition, incorporating the first and second addenda. World Health Organization, Geneva, 668 pp.
- Otálvaro, D., Arias, G., Vélez, M., García, J., De La Rosa, P., Taupin, J.-D. et Vargas, M., 2006. Plan de Manejo Integral del Agua Subterránea. Modelo Hidrogeológico Conceptual Preliminar del Acuífero de Pereira, Colombia. In: OIEA (Editor), *Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 2006*. OIEA, Viena, Austria, pp. 11-27.
- Oyarzun, R., Lillo, J., Higuera, P., Oyarzún, J. et Maturana, H., 2004. Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: industrial (gold mining at El Indio-Tambo district) vs. geologic processes. *Journal of Geochemical Exploration*, 84(2): 53-64
- Pan, F., McKane, R. et Stieglitz, M., 2012. Identification of optimal soil hydraulic functions and parameters for predicting soil moisture. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4): 723-737
- Pardo-Casas, F. et Molnar, P., 1987. Relative motion of the Nazca (Farallon) and South America Plates since late Cretaceous Time. *Tectonics*, 6(3): 233-248
- Paredes, D. et Zanafría, N., 2002. Características hidrogeológicas del Valle de Los Chillos y del Valle de Tumbaco. Thèse de Ingénieur Géologue, UCE, Quito, 195 p. y anexos.

- Pennington, W., 1981. Subduction of the Eastern Panama Basin and Seismotectonics of Northwestern South America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11): 10753–10770
- Peñañiel, L., 2009. Geología y análisis del Recurso Hídrico Subterráneo de la Subcuenca del Sur de Quito. Thèse de Ingénieur Géologue, EPN, Quito, 169 pp.
- Pila, G., 2011. Análisis de los parámetros de la demanda hídrica: Casos de estudio Cuencas del Pita y San Pedro. Thèse de Ingénieur Civil, EPN, Quito, 327.
- Pilger, R., 1983, Kinematics of the south american subduction zone from global plate reconstructions, *Geodynamics of the Eastern Pacific region, Caribbean and Scotia arcs* (Résumés d'un symposium international tenu à Washington, D. C. le AGU, Geodynamics series, Vol. 9, 113–125 pp.
- Plummer, L., Prestemon, E. et Parkhurst, D., Survey, U. S. Geological, 1994. An interactive code (NETPATH) for modeling NET geochemical reactions along a flow PATH, U. S. Geological Survey, Reston, Virginia. 133
- Podwojewski, P., Janeau, J.L. et Leroux, Y., 2008. Effects of agricultural practices on the hydrodynamics of a deep tilled hardened volcanic ash–soil (Cangahua) in Ecuador. *Catena*, 72(1): 179-190
- Pokrovski, G., Zakirov, I., Roux, J., Testemale, D., Hazemann, J.-L., Bychkov, A. et Golikova, G., 2002. Experimental study of arsenic speciation in vapor phase to 500°C: Implications for As transport and fractionation in low-density crustal fluids and volcanic gases. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(19): 3453-3480
- Pouget, J.-C., 2007, AguAndes [online], IRD - G-EAU, Disponible sur: <http://www.aguandes.org/>, [date d'accès: le Octobre 2013]
- Poulenard, J., 2000. Les sols des páramos d'Equateur sur couverture pyroclastique. Diversité, génèse et propriétés physiques. Thèse de PhD, Université Henry Poincaré-Nancy I, Nancy - France, 296.
- Poulenard, J., Michel, J. C., Bartoli, F., Portal, J. M. et Podwojewski, P., 2004. Water repellency of volcanic ash soils from Ecuadorian páramo: effect of water content and characteristics of hydrophobic organic matter. *European Journal of Soil Science*, 55(3): 487-496
- Pourrut, P., 1995. El Agua en el Ecuador : clima, precipitaciones, escorrentía, Estudios de Geografía, Vol. 7. ORSTOM, Colegio de Ingenieros Geógrafos del Ecuador, INAMHI, MAG, Quito, 120 pp.
- Pourrut, P. et Aranyossy, J.- F., 1988. Nappe aquifère de Quito (Equateur): caractéristiques générales, réponse à l'exploitation et perspectives. *Hidrologie Continentale*, 3(1): 41-56
- Presser, T., Evans, W., White, L. et Barnes, I., 1981. Chemical and isotopic compositions of selected soda and hot spring waters and gases, Colorado, USGS, USA. 9
- Proaño, D., 2010. Modelación oferta-demanda de agua en cuencas desarrolladas - Cuenca Alta del Río Guayllabamba y Cuencas de abastecimiento de agua para la ciudad de Quito, con la ayuda de la herramienta WEAP. Thèse de Ingénieur Civil, EPN, Quito, 178 pp.
- Procel, S., 2008. Modelación del Acuífero Pusuquí - San Antonio de Pichincha. Thèse de Ingénieur Géologue, EPN, Quito, 228 pp.
- Quantin, P. et Zebrowsky, C., 1996, Caractérisation et formation de la cangahua en Equateur. Analyse préliminaire (chimie, minéralogie, pétrographie) de quelques types de cangahua, *Memorias del III Simposio Internacional sobre Suelos volcánicos endurecidos* (Résumés d'un symposium international tenu à Quito le décembre 1996), ORSTOM, PUCE, UCE, Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador, 29-47 pp.

- Ramey, H., Agarwal, R. et Martin, I., 1975. Analysis of "Slug Test" Or DST Flow Period Data. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 14(3): 37-47
- Ramos, O., Cáceres, L., Ormachea, M., Bhattacharya, P., Quino, I., Quintanilla, J., Sracek, O., Thunvik, R., Bundschuh, J. et García, M. E., 2012. Sources and behavior of arsenic and trace elements in groundwater and surface water in the Poopó Lake Basin, Bolivian Altiplano. *Environmental Earth Sciences*, 66(3): 793-807
- Rat, M., Laviron, F. et Jorez, J.-C., 1970, Essai Lefranc, *Hydraulique des sols* (Résumés d'un symposium international tenu à Paris - France le Ministère de l'Équipement et du Logement - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers, No. Spécial N, 56-66 pp.
- Ravenscroft, P., Burgess, W., Ahmed, K., Burren, M. et Perrin, J., 2005. Arsenic in groundwater of the Bengal Basin, Bangladesh: Distribution, field relations, and hydrogeological setting. *Hydrogeology journal*, 13(5-6): 727-751
- Raymond, J., Williams-Jones, A. et Clark, J., 2005. Mineralization associated with scale and altered rock and pipe fragments from the Berlín geothermal field, El Salvador; implications for metal transport in natural systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 145(1-2): 81-96
- Rietti-Shati, M., Yam, R., Karlen, W. et Shemesh, A., 2000. Stable isotope composition of tropical high-altitude fresh-waters on Mt. Kenya, Equatorial East Africa. *Chemical Geology*, 166(3-4): 341-350
- Rios-Sanchez, M., 2012. A Remote sensing approach to characterize the hydrogeology of mountainous areas: Application to the Quito Aquifer System (QAS), Ecuador. Thèse de PhD, Michigan Technological University, Michigan - United States, 169.
- Rios-Sanchez, M., Gierke, J. et Muñoz, T., 2012, Hydrogeological Characterization of the Plateaus Region of the Quito Aquifer System Using Remote Sensing, Digital Geomorphology, and Geophysics, World Environmental and Water Resources Congress 2012 : Crossing Boundaries (Résumés d'un symposium international tenu à Albuquerque, New Mexico, United States le May 20-24, 2012), American Society of Civil Engineers, 85-97 pp.
- Rivadeneira, H., Alemán, M., Ruf, T., Le Goulven, P., Sabatier, J.-L., Nuñez, P. et Nouvelot, J.-F., 1993. Funcionamiento del riego particular en los Andes ecuatorianos : recomendaciones para el Plan Nacional de Riego : artículos publicados sobre el riego tradicional en los Andes del Ecuador : periodo 1987-1992, INERHI, ORSTOM, Quito-Equateur. 204
- Rose, T., Davisson, M. et Criss, R., 1996. Isotope hydrology of voluminous cold springs in fractured rock from an active volcanic region, northeastern California. *Journal of Hydrology*, 179(1-4): 207-236
- Rozanski, K., Araguás-Araguás, L. et Gonfiantini, R., 1993. Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation. *Geophysical Monograph Series*, 78 Climate Change in Continental Isotopic Records. American Geophysical Union, 1-36 pp.
- Salem, O., Visser, J., Deay, M. et Gonfiantini, R., 1980. Groundwater flow patterns in the western Lybian Arab Jamahitiya evaluated from isotope data. In: IAEA (Editor), *Arid Zone Hydrology: Investigations with Isotope Techniques*. IAEA, Vienna, pp. 165-179.
- Sancha, A. M. et O'Ryan, R., 2008. Managing Hazardous Pollutants in Chile: Arsenic. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 196: 123-146
- Sano, Y. et Marty, B., 1995. Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs. *Chemical Geology*, 119(1-4): 265-274
- Scandiffio, G. et Cassis, W., 1992, Geochemical report on the Empexa geothermal area. Bolivia., *Geothermal investigations with isotope and geochemical techniques in Latin America* (Résumés d'un symposium international tenu à San José, Costa Rica le 12-16 November 1990), IAEA, IAEA-TECDOC-641, 113-139 pp.

- Scholl, M. A., Ingebritsen, S. E., Janik, C. J. et Kauahikaua, J. P., 1996. Use of precipitation and groundwater isotopes to interpret regional hydrology on a tropical volcanic island: Kilauea volcano area, Hawaii. *Water resources research*, 32(12): 3525–3537
- Serrano, J., 2011. Regionalización espacial de series climáticas mensuales. Caso de Estudio: Cuenca del Río Guayllabamba. Thèse de Ingénieur Civil, EPN, Quito, 397.
- Seyier, P. et Martin, J.-M., 1989. Biogeochemical Processes Affecting Arsenic Species Distribution in a Permanently Stratified Lake *Environmental Sciences & Technology*, 23(10): 1258-1263
- Shevenell, L. et Goff, F., 1993. Addition of Magmatic Volatiles into the Hot Spring Waters of Loowit Canyon, Mount St. Helens, Washington, USA. *Bulletin de Volcanology*, 55(7): 489-503
- Sierra, J., D'Amore, F., Panarello, H. et Pedro, G., 1992, Reservoir characteristics of the vapor dominated geothermal field of Copahue, Neuquen, Argentina, as established by isotopic and geochemical techniques, *Geothermal investigations with isotope and geochemical techniques in Latin America (Résumés d'un symposium international tenu à San José, Costa Rica le 12-16 November 1990)*, IAEA, IAEA-TECDOC-641, 13 - 30 pp.
- Simler, R., 2004. Diagrammes: Logiciel d'hydrochimie. Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon.
- Sklená, P. et Laegaard, S., 2003. Rain-Shadow in the High Andes of Ecuador Evidenced by Páramo Vegetation. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35(1): 8-17
- Smedley, P., Kinniburgh, D., Macdonald, D., Nicolli, H., Barros, A., Tullio, J., Pearce, J. et Alonso, M., 2005. Arsenic associations in sediments from the loess aquifer of La Pampa, Argentina. *Applied Geochemistry*, 20(5): 989-1016
- Smedley, P. L. et Kinniburgh, D. G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5): 517-568
- Smedley, P.L., Nicolli, H.B., Macdonald, D.M.J., Barros, A.J. et Tullio, J.O., 2002. Hydrogeochemistry of arsenic and other inorganic constituents in groundwaters from La Pampa, Argentina. *Applied Geochemistry*, 17(5): 259-284
- Smith, G., 1987. The influence of explosive volcanism on fluvial sedimentation; the Deschutes Formation (Neogene) in central Oregon. *Journal of Sedimentary Research*, 57(4): 613-629
- Soler, P., 1991. Contribution à l'étude du magmatisme associé aux marges actives. Pétrographie, géochimie et géochimie isotopique du magmatisme Crétacé à Pliocène le long d'une transversale des Andes du Pérou Central. Implications géodynamiques. Thèse de PhD, Université de Paris 6, Paris - France, 846 pp.
- Steinmann, M., 1997. The Cuenca basin of southern Ecuador: tectono-sedimentary history and the Tertiary Andean evolution. Thèse de PhD, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich - Suisse, 176 pp.
- Steinmann, M., Hungerbühler, D., Seward, D. et Winkler, W., 1999. Neogene tectonic evolution and exhumation of the southern Ecuadorian Andes: a combined stratigraphy and fission-track approach. *Tectonophysics*, 307(3-4): 255–276
- Stern, M., 1995. An Inter-Andean Forest Relict: Vegetation Change on Pasochoa Volcano, Ecuador. *Mountain research and Development*, 15(4): 339-348
- Struckmeier, W., Gilbrich, W., Richts, A. et Zaepke, M., 2004. WHYMAP and the Groundwater Resources Map of the World at the scale of 1:50 000 000. UNESCO, BGR, AIEA, WMO, IAH, CGMW, Florence, Italy.
- Sturchio, N., Williams, S. et Sano, Y., 1993. The hydrothermal system of Volcan Puracé, Colombia. *Bulletin of Volcanology*, 55(4): 289-296

- Tamers, M., 1967. Radiocarbon Ages of Groundwater in an Arid Zone Unconfined Aquifer, Isotope Techniques in the Hydrologic Cycle. American Geophysical Union, pp. 143 - 152.
- Taupin, J.-D., 2004. Interpretación isotópica de los datos existentes del Acuífero de Quito, propuesta de un plan de muestreo para completar el estudio, EMAAP-Q - AIEA, Quito. 25
- Tello, E., 1992, Características geoquímicas e isotópicas de los fluidos producidos por los pozos de Los Humeros, Puebla, México, Geothermal investigations with isotope and geochemical techniques in Latin America (Résumés d'un symposium international tenu à San José, Costa Rica le 12-16 November 1990), IAEA, IAEA-TECDOC-641, 306-344 pp.
- Torres, L., 1975. Investigación geotécnica de la zona de Tumbaco y Cumbayá, Provincia de Pichincha. Thèse de Ingénieur Géologue, EPN, Quito, 241 p. + anexos.
- Trenkamp, R., Kellogg, J., Freymueller, J. et Mora, H., 2002. Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(2): 157-171
- Valencia, R. et Jorgensen, P., 1992. Composition and structure of a humid montane forest on the Pasochoa volcano, Ecuador. *Nordic Journal of Botany*, 12(2): 239-247
- van der Hammen, T., 1974. The Pleistocene Changes of Vegetation and Climate in Tropical South America. *Journal of Biogeography*, 1(1): 3-26
- Vanderkluisen, L., Mahoney, J., Hooper, P., Sheth, H. et Ray, R., 2011. The Feeder System of the Deccan Traps (India): Insights from Dike Geochemistry. *Journal of Petrology*, 52(2): 315-343
- Varekamp, J., Kreulen, R., Poorter, R. et Van Bergen, M., 1992. Carbon sources in arc volcanism, with implications for the carbon cycle. *Terra Nova*, 4(3): 363-373
- Vera, R., 1983. Características Petrográficas y Paleográficas del Conglomerado Chiche en los alrededores del Ilaló, EPN, Quito. 4
- Villacís, M., 2008. Ressources en eau glaciaire dans les Andes d'Equateur en relation avec les variations du climat : Le cas du volcan Antisana. Thèse de PhD, Université de Montpellier II, Montpellier - France, 250.
- Villagómez, D., 2003. Evolución geológica plio-cuaternaria del Valle Interandino central en Ecuador. Thèse de Ingénieur Géologue, EPN, Quito, 135.
- Villarreal, V., 2006. Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del valle de los chillos en base de parámetros hidrogeológicos. Thèse de Ingénieur Géologue, Universidad Central del Ecuador, Quito, 189 pp. y anexos.
- Violette, S., Ledoux, E., Goblet, P. et Carbonnel, J.-P., 1997. Hydrologic and thermal modeling of an active volcano: the Piton de la Fournaise, Reunion. *Journal of Hydrology*, 191(1-4): 37-63
- Vogel, J. et Ehhalt, D., 1963, The use of carbon isotopes in ground-water studies, Radioisotopes in hydrology (Résumés d'un symposium international tenu à Tokyo le March, 5 -9), IAEA, 383-396 pp.
- Vsevolozhskii, V. A., Kochetkova, R. P. et Fidelli, I. F., 2003. Principles of Hydrogeological Zoning by the Conditions of Formation and the Distribution of the Natural Resources of Fresh Groundwater. *Water Resources*, 30(3): 233-245
- Vuille, M., Bradley, R., Werner, M., Healy, R. et Keimig, F., 2003. Modeling $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the tropical Americas: 1. Interannual variability and climatic controls. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D6): 24 p.
- Webster, J. et Nordstrom, K., 2003. Geothermal Arsenic. The source, transport and fate of arsenic in geothermal systems. In: Welch, A. et Stollenwerk, K. (Editors), *Arsenic in Ground water*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, USA, pp. 101-126.

- Welch, A., Westjohn, D., Helsel, D. et Wanty, R., 2000. Arsenic in Ground Water of the United States: Occurrence and Geochemistry. *Ground Water*, 38(4): 589-604
- White, N. et Hedenquist, J., 1995. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 23(1): 9-13
- Williams, M., Hood, E., Ostberg, G., Francou, B. et Galarraga, R., 2001. Synoptic Survey of Surface Water Isotopes and Nutrient Concentrations, Páramo High-Elevation Region, Antisana Ecological Reserve, Ecuador. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 33(4): 397-403
- Winkler, W., Villagómez, D., Spikings, R., Abegglen, P., Tobler, St. et Egüez, A., 2005. The Chota basin and its significance for the inception and tectonic setting of the inter-Andean depression in Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 19(1): 5-19
- Winter, Th., 1990. Mécanismes des déformations récentes dans les Andes Equatoriennes. Thèse de PhD, Université de Paris-Sur, Orsay, 167 pp.
- Yasukawa, K., Mogi, T., Widarto, D. et Ehara, S., 2003. Numerical modeling of a hydrothermal system around Waita volcano, Kyushu, Japan, based on resistivity and self-potential survey results. *Geothermics*, 32(1): 21-46

ANNEXES

ANNEXE 2A

COLONNE STRATIGRAPHIQUE DE LA FORMATION CANGAHUA

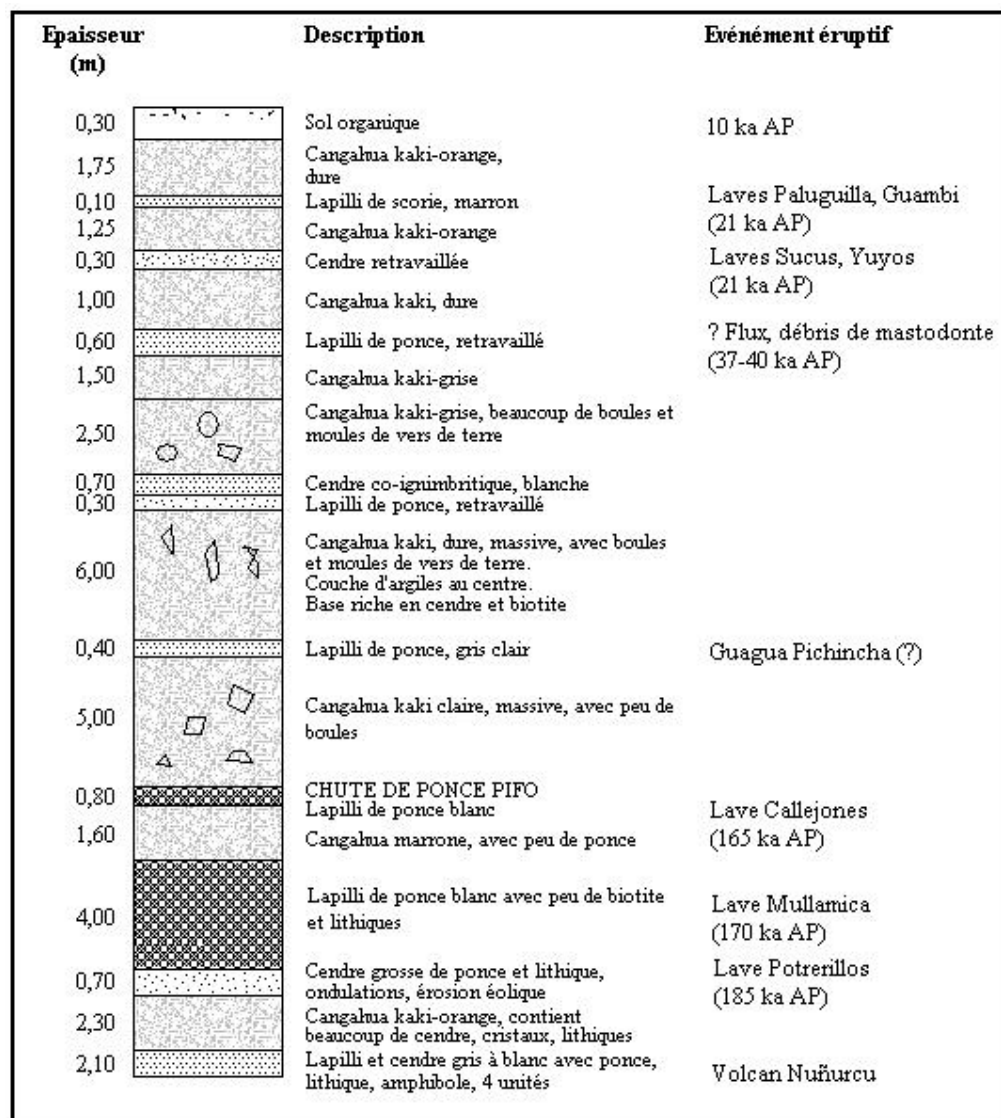


Figure 1. Colonne stratigraphique de la formation Cangahua dans la Vallée de Tumbaco par Hall et Mothes (1996)

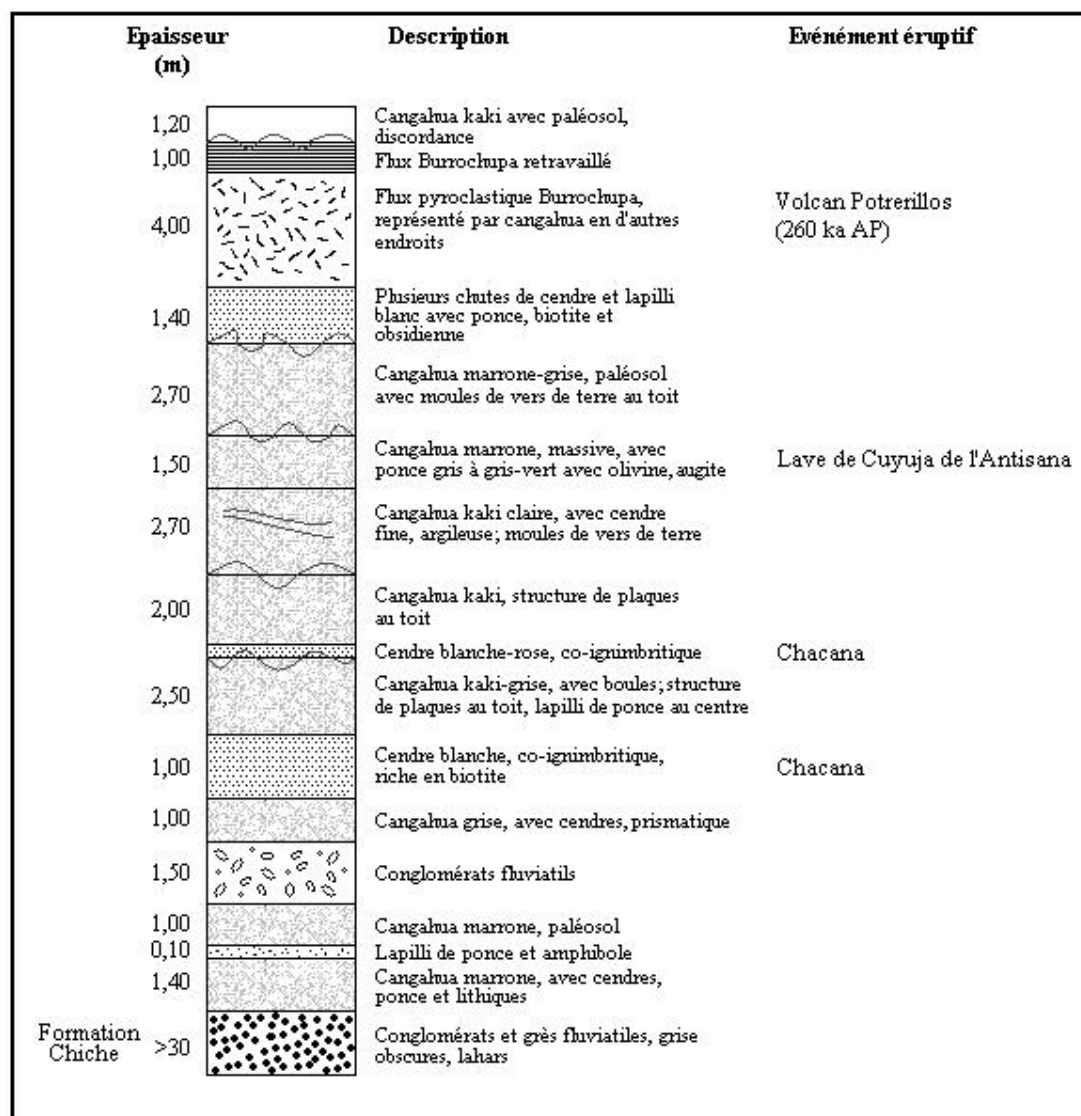


Figure 2. Suite de la colonne stratigraphique de la Cangahua dans la Vallée de Tumbaco par Hall et Mothes (1996)

ANNEXE 2B

Tableau 1. Information sur les forages et sources sur la zone d'étude. Les coordonnées sont exprimées en UTM dans le système WGS84, les cotes sont en m. En rouge les forages artésiens jaillissants.

ID	Origine	Type	Prop.	Forages/Source	Long WGS84	Lat WGS84	Cote
C101	Chiche nord	Forage	EPMAPS	Acacias	791464	9977674	2427
C102	Chiche nord	Forage	EPMAPS	Cementerio	789389	9976757	2382
C103	Chiche nord	Forage	EPMAPS	El Carrizal	791390	9976935	2419
C104	Chiche nord	Forage	EPMAPS	La Esperanza - MICEI	791416	9978851	2418
C105	Chiche nord	Forage	EPMAPS	Patagua	789464	9977585	2360
C106	Chiche nord	Forage	EPMAPS	San Patricio	785388	9976898	2409
C107	Chiche nord	Forage	EPMAPS	Santa Rosa	790706	9977951	2392
C107_1	Chiche nord	Piézo mètre	EPMAPS	Santa Rosa pz	790706	9977951	2392
C108	Chiche nord	Forage	Privé	Arq. Diego Andrade 17m	788777	9977008	2300
C109	Chiche nord	Forage	Privé	Arq. Diego Andrade Casa	788002	9977381	2349
C110	Chiche nord	Forage	Privé	Casa Baca (Collaqui)	786762	9976985	2315
C111	Chiche nord	Forage	EPMAPS	El Aromito	787019	9978477	2345
C113	Chiche nord	Forage	Privé	Hospital de los Valles	786762	9976985	2315
C151	Chiche sud	Forage	EPMAPS	Acosta Soberón	780002	9966384	2540
C152	Chiche sud	Forage	EPMAPS	Alangasí N° 1	789851	9965096	2600
C153	Chiche sud	Forage	EPMAPS	Alangasí N° 2	790051	9965918	2580
C154	Chiche sud	Forage	EPMAPS	Alangasí N° 3	789870	9965618	2590
C155	Chiche sud	Forage	EPMAPS	Armenia 1	782093	9967750	2460
C156	Chiche sud	Forage	EPMAPS	Armenia 3	782189	9967416	2456
C157	Chiche sud	Forage	Privé	La Armada	787362	9964254	2570
C158	Chiche sud	Forage	EPMAPS	Lasallinos	779260	9965778	2595
C159	Chiche sud	Forage	EPMAPS	Moya 1	781188	9966731	2495
C160	Chiche sud	Forage	EPMAPS	Moya 2	781730	9966676	2488
C161	Chiche sud	Forage	EPMAPS	Moya 3	781486	9966860	2474
C162	Chiche sud	Forage	EPMAPS	Pintag 1	791333	9962958	2722
C163	Chiche sud	Forage	EPMAPS	Pintag 2	791004	9961146	2767
C164	Chiche sud	Forage	EPMAPS	San Germán	780499	9966254	2522
C165	Chiche sud	Forage	Privé	Selva Alegre	785707	9961935	2522
C166	Chiche sud	Forage	EPMAPS	San Juan de Conocoto	779032	9966190	2622
C167	Chiche sud	Forage	EPMAPS	Armenia 4	782207	9967452	2455
C168	Chiche sud	Forage	EPMAPS	Armenia 2	782067	9967844	2462
C169	Chiche sud	Forage	Privé	Ushimana 1	785461	9966014	2500
C170	Chiche sud	Forage	Privé	Ushimana 2	785475	9965913	2506
C201	Chiche nord	Source	EPMAPS	Chirimoyas 1	790910	9981198	2225
C202	Chiche nord	Source	EPMAPS	Chirimoyas 2	790956	9981149	2225
C203	Chiche nord	Source	EPMAPS	Chirimoyas 3	790291	9981649	2225
C204	Chiche nord	Source	EEQ	EEQ	787304	9979491	2230
C205	Chiche nord	Source	Privé	John Daane	787669	9977434	

ID	Origine	Type	Prop.	Forages/Source	Long WGS84	Lat WGS84	Cote
C206	Chiche nord	Source	Publique	San Pedro	787900	9979498	2226
C207	Chiche nord	Source	Privé	Cañon Chiche	792120	9978833	2225
C208	Chiche nord	Source	Publique	Chiche Ferrocarril	792323	9978581	2250
C209	Chiche sud	Source	EPMAPS	Chunchi 1	783810	9972380	2345
C210	Chiche sud	Source	EPMAPS	Chunchi 2	783810	9972380	2345
I101	Ilaló	Forage	Municipal	El Tingo	785049	9968288	2470
I102	Ilaló	Forage	Municipal	El Tingo Nuevo	785052	9968282	2470
I103	Ilaló	Forage	EPMAPS	Planta de Tratamiento	788604	9975092	2407
I104	Ilaló	Forage	EPMAPS	Rumihuayco 2	789745	9975146	2429
I105	Ilaló	Forage	Privé	5 Naval	789834	9967898	2570
I106	Ilaló	Forage	Municipal	La Merced	790006	9967694	2578
I201	Ilaló	Source	Privé	Balneario Ilaló	791558	9968923	2560
I202	Ilaló	Source	Municipal	Cununyacu 1	785926	9975165	2320
I203	Ilaló	Source	Municipal	Cununyacu 2	785926	9975165	2320
I204	Ilaló	Source	Municipal	El Tingo Carrizal	785039	9968303	2480
I205	Ilaló	Source	Municipal	El tingo piscina	785052	9968282	2470
I206	Ilaló	Source	Municipal	Rumiloma 1	784143	9972970	2320
I207	Ilaló	Source	Privé	Rumiloma 2	784143	9972970	2320
I208	Ilaló	Source	Publique	Rumiloma 3	784143	9972970	2320
M301	Mélange	Forage	EPMAPS	VCHI	784248	9967012	2471
M302	Mélange	Forage	Privé	El Nacional	787374	9976976	2326
M303	Mélange	Forage	EPMAPS	La Primavera 1	786428	9976511	2360
M303 _1	Chiche	Piézo mètre	EPMAPS	La Primavera pz	786428	9976511	2360
M303 _2	Chiche	Piézo mètre	EPMAPS	La Primavera 1A	786428	9976511	2360
M304	Mélange	Forage	EPMAPS	La Primavera 2	786043	9976265	2390
M305	Mélange	Forage	EPMAPS	Rumihuayco 1	789745	9975146	2429
S576	Chiche sud	Source	Privé	Parque ecológico	778129	9959224	2566
S586	Chiche sud	Source	Publique	Amaguaña 4	778912	9958846	2566
S589	Chiche sud	Forage	Privé	Los Bohíos	784012	9961656	2562
S590	Chiche sud	Source	Municipal	Municipio Rumiñahui	783657	9959334	2587
S591	Chiche sud	Forage	Privé	Molinuco	782935	9957578	2724
S592	Chiche sud	Source	Municipal	Sangolquí	782627	9961138	2541
S595	Chiche sud	Forage	Privé	Fernando Hidalgo	779201	9961528	2578
S599	Chiche sud	Forage	Privé	Banco del Fomento	785545	9958498	2702
S600	Chiche sud	Source	Municipal	Municipio Rumiñahui	786432	9961904	2561
S601	Chiche sud	Forage	Privé	Fábrica Enkador	787280	9960756	2616
S602	Chiche sud	Source	Privé	Manuel Aldaz	787653	9959548	2697
S607	Chiche sud	Forage	Privé	Peter Mertens	794526	9959022	2893
S608	Chiche sud	Forage	Privé	General Calicuchima	787810	9964524	2586
S610	Chiche sud	Forage	Privé	Superintendencia de Ceos	785789	9966340	2547

ID	Origine	Type	Prop.	Forages/Source	Long WGS84	Lat WGS84	Cote
S611	Ilaló	Forage	Privé	Norma Cordobés	791642	9968512	2564
S621	Chiche sud	Forage	Privé	Parroquia San Pedro	782677	9964368	2505
S628	Chiche sud	Forage	EPMAPS	EMAAP	781183	9968828	2538
S629	Chiche sud	Forage	Privé	INFA - Hospital	780758	9968826	2559
S634	Chiche sud	Source	Privé	Comunidad de la Luz	778892	9969928	2773
S637	Ilaló	Source	Privé	Manuel Guazumba	783838	9971330	2384
S640	Chiche nord	Forage	Privé	Urb. Las Yadias	785049	9977038	2415
S641	Chiche nord	Forage	Publique	Riego	784304	9974826	2458
S643	Chiche nord	Forage	Privé	Emanuel - Lepoutre	786208	9978304	2374
V1	Chiche sud	Forage	Privé	Arquitecto Luis Mosquera	783376	9967728	2440
V2	Chiche sud	Forage	Privé	Barrio Inchalillo	785317	9958114	2708
V3	Chiche sud	Source	Privé	Cachaco	778381	9959098	2558
V4	Chiche sud	Forage	Privé	Campamento Vida Nueva	789318	9967517	2575
V5	Chiche sud	Forage	Privé	Casa Reeducción 1	781490	9966510	2487
V6	Chiche sud	Forage	Privé	Casa Reeducción 2	781485	9966504	2491
V7	Chiche sud	Forage	Privé	Cashapamba	787147	9962788	2610
V8	Chiche sud	Forage	Privé	Centro del Muchacho Trabajador	781055	9967021	2540
V9	Chiche sud	Forage	Privé	Cigarrillos El Progreso	784551	9966128	2500
V10	Chiche sud	Forage	Privé	CIGMPA	781762	9970666	2492
V11	Chiche sud	Forage	Privé	Ciudad del Niño	781168	9968823	2529
V12	Chiche sud	Forage	Privé	Conocoto2-Ciudad del Niño	780362	9968548	2570
V13	Chiche sud	Forage	Privé	Coop. 14 de Marzo	778797	9969359	2700
V14	Chiche sud	Source	Privé	Cristalinas 1	778863	9958976	2532
V15	Chiche sud	Source	Privé	Cristalinas 3	778794	9959012	2538
V16	Chiche sud	Forage	Privé	Enkador	786998	9960396	2598
V17	Chiche sud	Forage	Privé	Exportadora San Pietro	781860	9960112	2550
V18	Chiche sud	Forage	Privé	Fruit	781239	9966349	2490
V19	Chiche sud	Forage	Privé	Hospital Julio Endara	780605	9970160	2579
V20	Chiche sud	Forage	Privé	Hospital Militar	778711	9965098	2626
V21	Chiche sud	Forage	Privé	IEOS	779478	9970004	2640
V22	Chiche sud	Forage	Privé	IERAC	781458	9969541	2520
V23	Chiche sud	Forage	Privé	Ing. Geólogos	782012	9971035	2480
V24	Chiche sud	Forage	Privé	Ing. Karolys	783316	9966934	2440
V25	Chiche sud	Forage	Privé	Justicia Social	779000	9965683	2614
V26	Chiche sud	Forage	Privé	La Leticia	782655	9957222	2724
V27	Chiche sud	Forage	Privé	La Ribera	783095	9970748	2471
V28	Chiche sud	Forage	Privé	Laboratorios INEN	779512	9969549	2640
V29	Chiche sud	Forage	Privé	Liversan	782170	9971023	2440
V30	Chiche sud	Forage	Privé	MAG-Los Arupos	780508	9970019	2570
V31	Chiche sud	Source	Privé	Medrano	775763	9955498	2666
V32	Chiche sud	Forage	Privé	Ontaneda	778726	9966583	2629

Annexe 2B

ID	Origine	Type	Prop.	Forages/Source	Long WGS84	Lat WGS84	Cote
V33	Chiche sud	Forage	Privé	Petroproducción	784452	9965721	2482
V34	Chiche sud	Forage	Privé	Pozo Innfa	780912	9968446	2537
V35	Chiche sud	Forage	Privé	San Pedro de Taboada	782388	9964176	2518
V36	Chiche sud	Forage	Privé	Santa Mónica	779726	9967708	2575
V37	Chiche sud	Forage	Privé	Servidores de la Salud	778922	9965276	2650
V38	Chiche sud	Forage	Privé	Textiles Padilla	782571	9966498	2460
V39	Chiche sud	Forage	Privé	Unidad Educativa Naval	786964	9964989	2640
V40	Chiche sud	Forage	Privé	Urb. Riviera	782858	9970383	2471

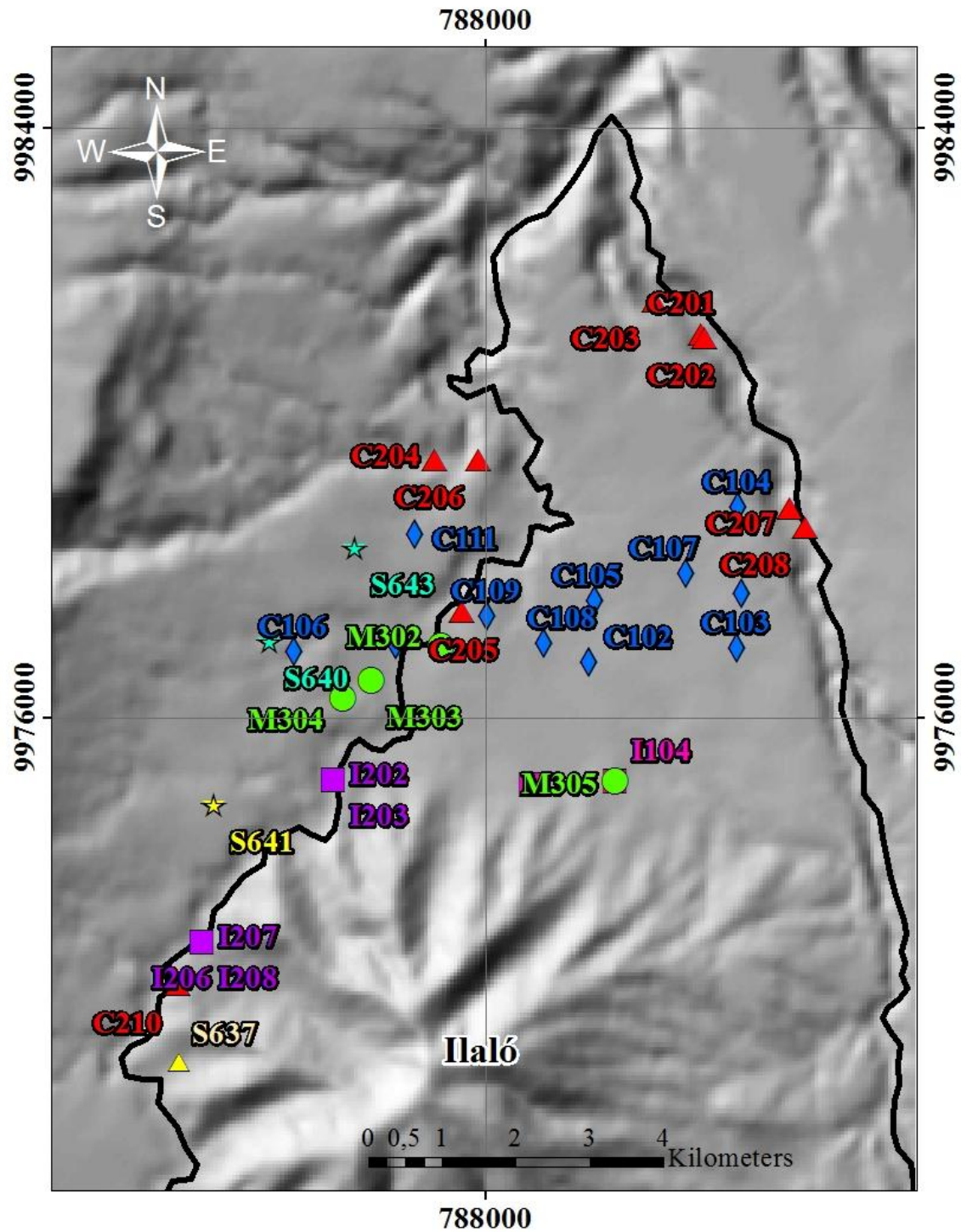


Figure 3. Localisation de forages selon le code d'identification sur la Vallée de Tumbaco

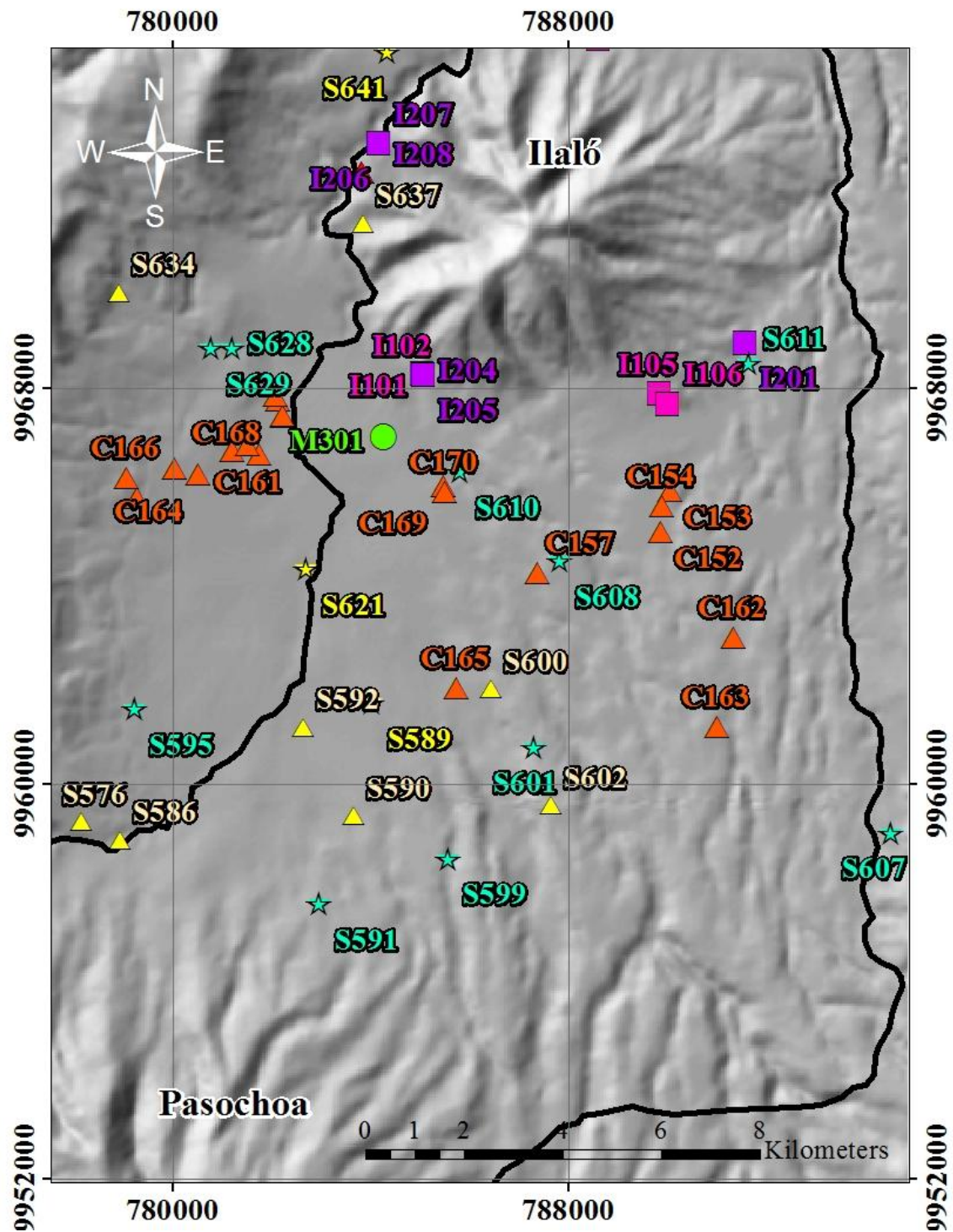


Figure 4. Localisation de forages selon le code d'identification sur la Vallée de Los Chillos

ANNEXE 2C

Figure 5. Exemple de photo des carottes témoins de perforation du piézomètre La Primavera (M303_1). Images provenant du rapport d'Arias (2008).





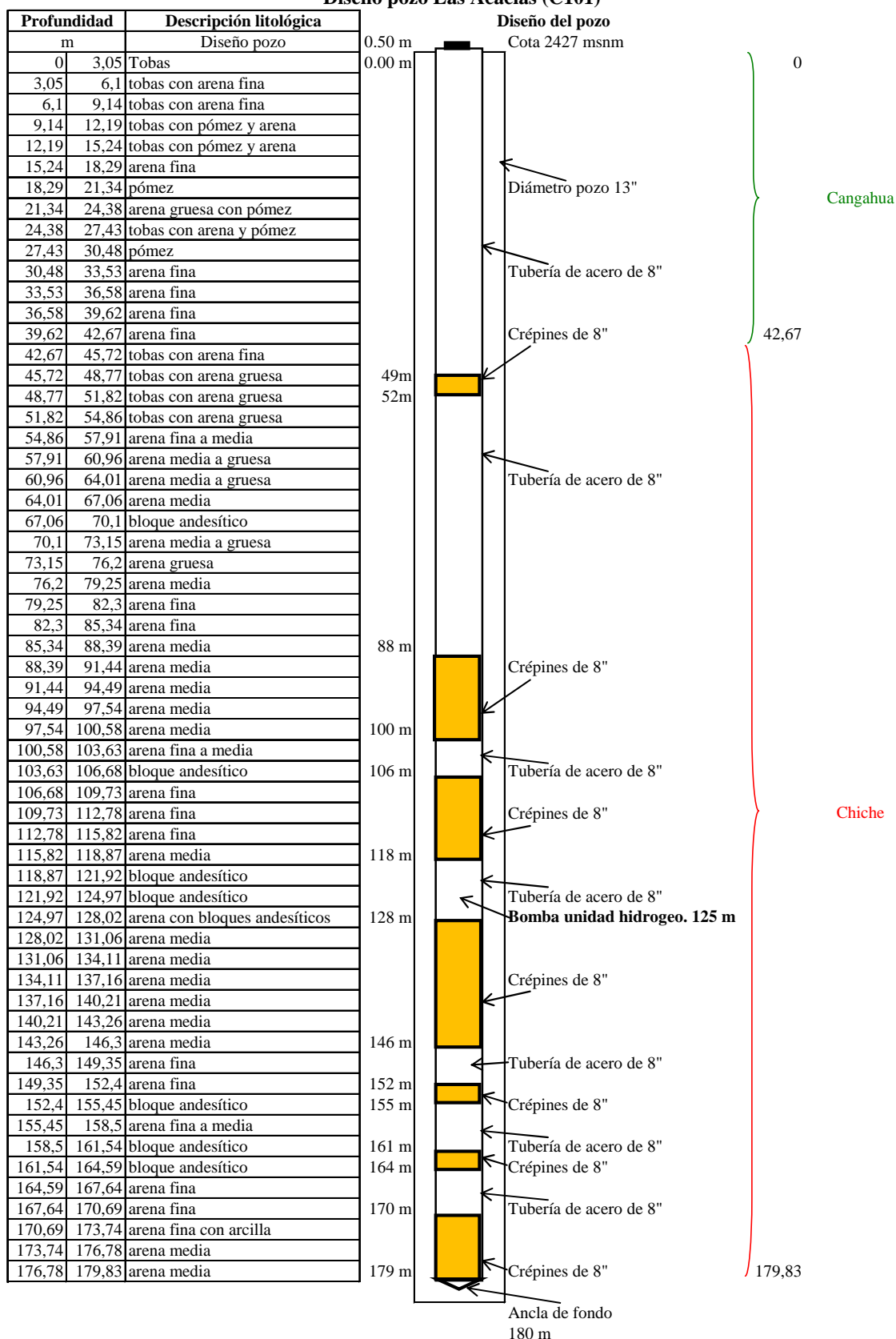
Figure 6. Exemple de photo des carottes témoins de perforation du piézomètre Santa Rosa (C107_1).
Images provenant du rapport d'Arias (2008).





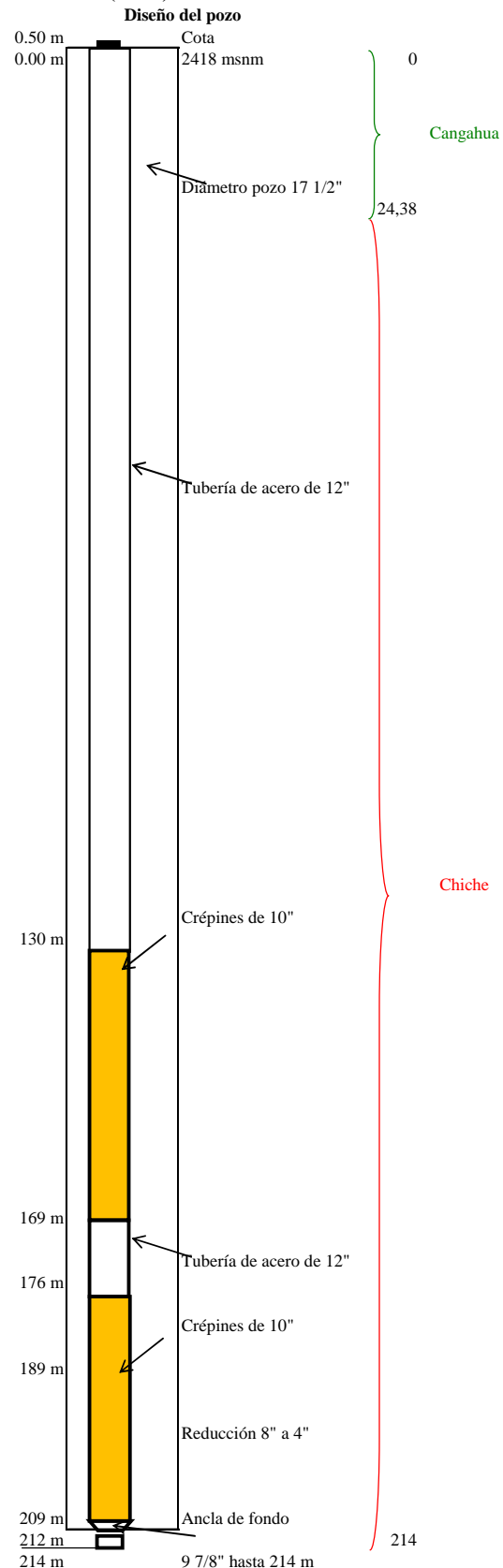
ANNEXE 2D

Diseño pozo Las Acacias (C101)

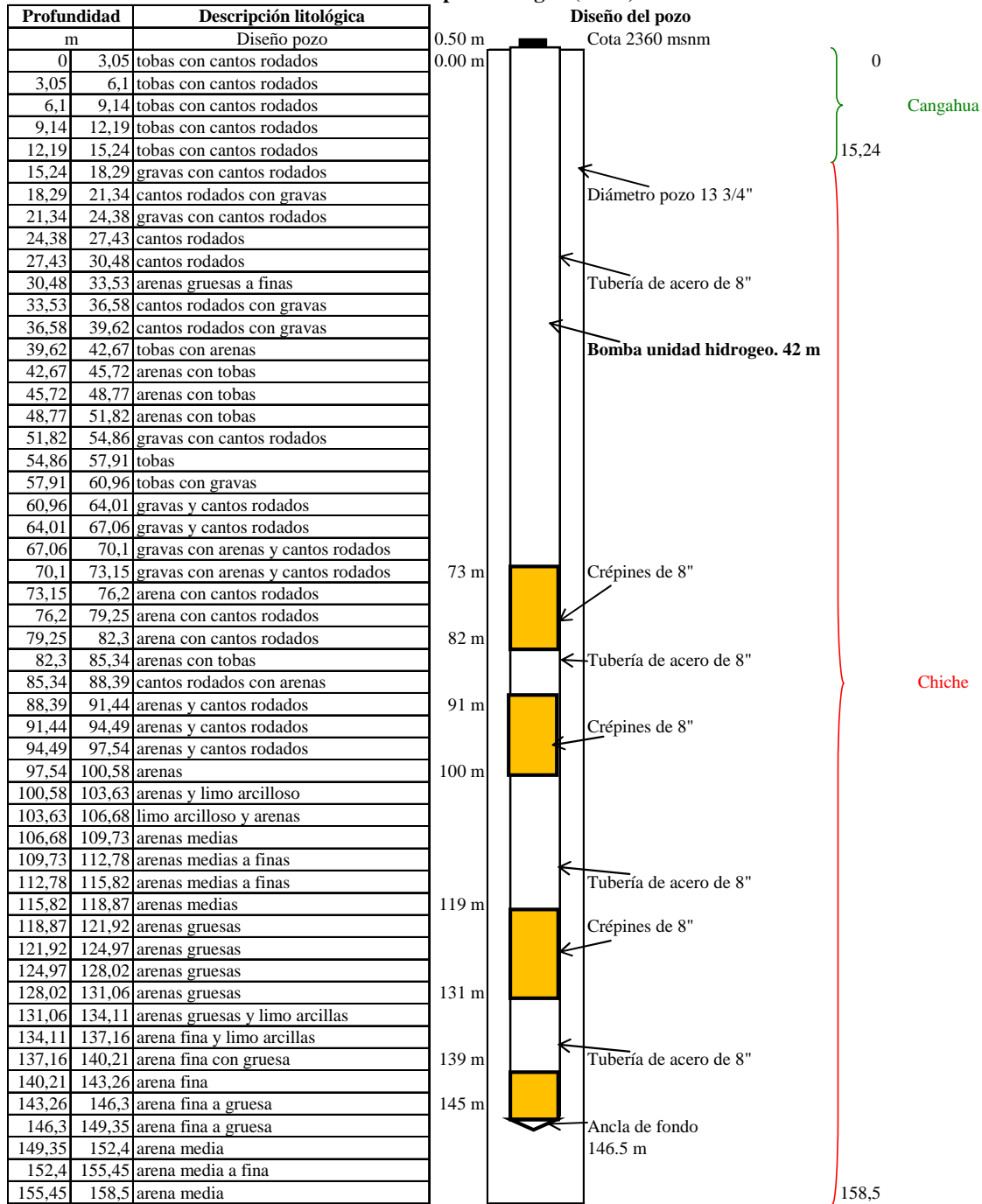


Diseño pozo La Esperanza - MICEI (C104)

Profundidad	Descripción litológica	
m	Diseño pozo	
0	3,05	Limo arenoso
3,05	6,1	Limo arenoso
6,1	9,14	Arena fina a media limosa
9,14	12,19	Arena fina a media limosa
12,19	15,24	Arena fina a media limosa
15,24	18,29	Arena fina a media limosa
18,29	21,34	Arena fina a media limosa
21,34	24,38	Arena fina a media limosa
24,38	27,43	Arena media a gruesa con limo y pómez
27,43	30,48	Arena media a gruesa con limo y pómez
30,48	33,53	Arena media a gruesa con SiO ₂ gris y pómez
33,53	36,58	Arena media a gruesa con SiO ₂ gris y pómez
36,58	39,62	Arena media a gruesa con SiO ₂ gris y pómez
39,62	42,67	Arena media a gruesa con SiO ₂ gris y pómez
42,67	45,72	Arena media a gruesa con SiO ₂ gris y pómez
45,72	48,77	Arena media a gruesa con SiO ₂ gris y pómez
48,77	51,82	Clastos volcánicos y arenas gruesas con SiO ₂
51,82	54,86	Arcilla amarilla y clastos volcánicos
54,86	57,91	Clastos volcánicos, rodados, poca arcilla
57,91	60,96	Clastos volcánicos, rodados, poca arcilla
60,96	64,01	Clastos volcánicos, rodados, poca arcilla
64,01	67,06	Clastos volcánicos, rodados, poca arcilla
67,06	70,1	Clastos volcánicos, rodados, poca arcilla
70,1	73,15	Clastos volcánicos, rodados, poca arcilla
73,15	76,2	Clastos volcánicos, rodados, poca arcilla
76,2	79,25	Clastos volcánicos, rodados, poca arcilla
79,25	82,3	Clastos volcánicos, rodados, poca arcilla
82,3	85,34	Clastos volcánicos, rodados, poca arcilla
85,34	88,39	Clastos volcánicos, rodados, poca arcilla
88,39	91,44	Clastos volcánicos, rodados, poca arcilla
91,44	94,49	Clastos volcánicos, rodados, poca arcilla
94,49	97,54	Clastos volcánicos, rodados, poca arcilla
97,54	100,58	Clastos volcánicos, rodados, poca arcilla
100,58	103,63	Clastos volcánicos, rodados, poca arcilla
103,63	106,68	Clastos volcánicos, arenas variadas y 15% arc
106,68	109,73	Clastos volcánicos, arenas variadas y 15% arc
109,73	112,78	Clastos volcánicos, arenas variadas y 15% arc
112,78	115,82	Clastos volcánicos, arenas variadas y 15% arc
115,82	118,87	Clastos volcánicos, arenas variadas y 15% arc
118,87	121,92	Clastos volcánicos, arenas variadas y 15% arc
121,92	124,97	Arenas variadas, clastos volcánicos y gravas
124,97	128,02	Arenas variadas, clastos volcánicos y gravas
128,02	131,06	Arenas variadas, clastos volcánicos y gravas
131,06	134,11	Arenas variadas, clastos volcánicos y gravas
134,11	137,16	Arenas variadas, clastos volcánicos y gravas
137,16	140,21	Arenas variadas, clastos volcánicos y gravas
140,21	143,26	Clastos volcánicos y arenas variadas
143,26	146,3	Clastos volcánicos y arenas variadas
146,3	149,35	Clastos volcánicos y arenas variadas
149,35	152,4	Clastos volcánicos y arenas variadas
152,4	155,45	Clastos volcánicos y arenas variadas
155,45	158,5	Clastos volcánicos y arenas variadas
158,5	161,54	Arena media a gruesa, clastos volcánicos, arcilla ploma
161,54	164,59	Arena media a gruesa, clastos volcánicos, arcilla ploma
164,59	167,64	Clastos volcánicos, areniscas y arenas
167,64	170,69	Clastos volcánicos, areniscas y arenas
170,69	173,74	Clastos volcánicos y arenas variadas
173,74	176,78	Clastos volcánicos y arenas variadas
176,78	179,83	Clastos volcánicos y arenas variadas
179,83	182,88	Clastos volcánicos y arenas variadas
182,88	185,93	Arenisca grano medio gris oscuro, algo de arcilla
185,93	188,98	Arenisca grano medio gris oscuro, algo de arcilla
188,98	192,02	Alternancia clastos volcánicos con arcillas y arenas
192,02	195,07	Alternancia clastos volcánicos con arcillas y arenas
195,07	198,12	Alternancia clastos volcánicos con arcillas y arenas
198,12	201,17	Clastos volcánicos, arenas y capas delgadas de arcilla
201,17	204,22	Clastos volcánicos, arenas y capas delgadas de arcilla
204,22	207,26	Clastos volcánicos, arenas y capas delgadas de arcilla
207,26	210,31	Clastos volcánicos, arenas y más arcillas
210,31	214	Clastos volcánicos, arenas y más arcillas

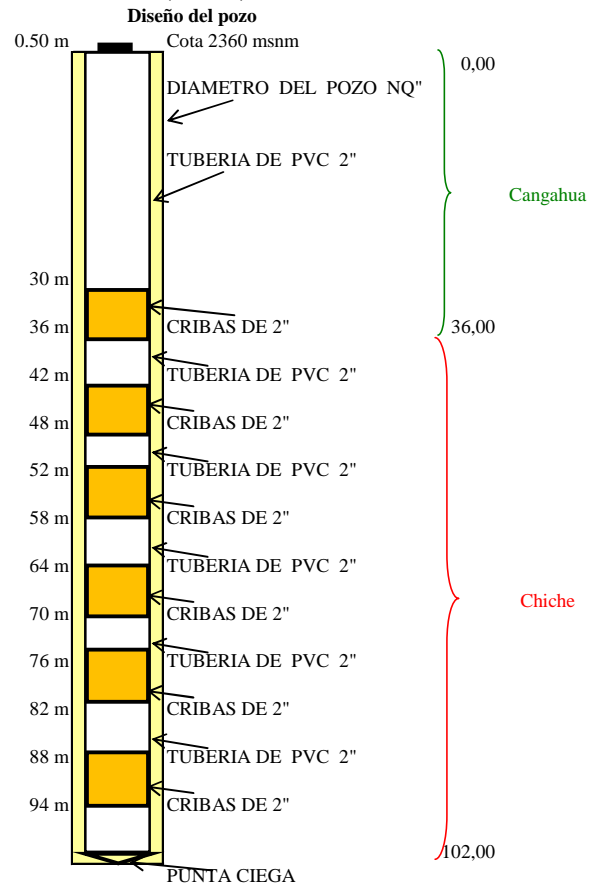


Diseño pozo Patagua (C105)



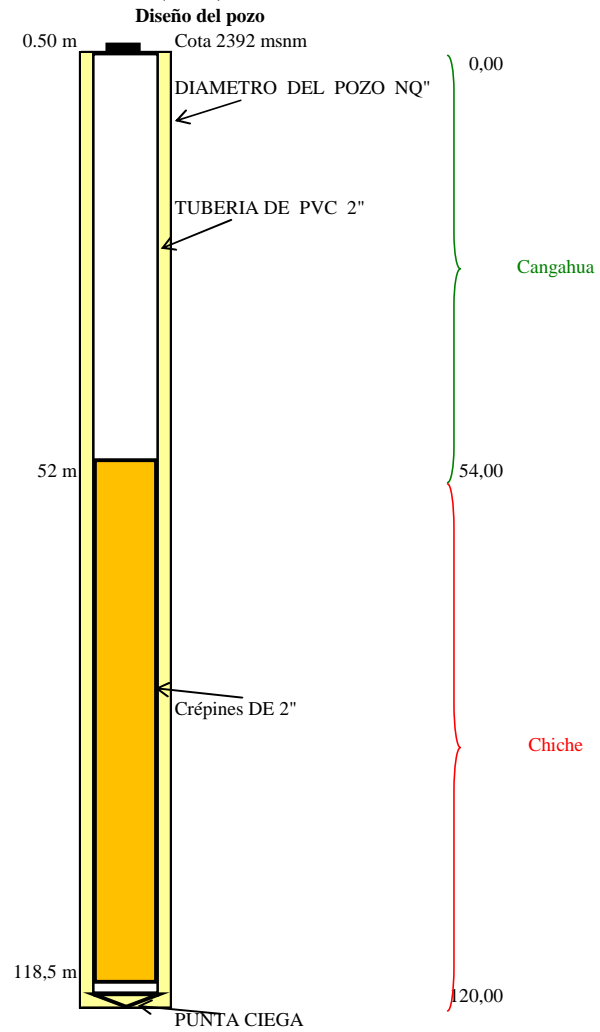
Diseño piezómetro La Primavera 1 (M303_)

Profundidad	Descripción litológica	
m	Diseño pozo	
0,00	3,00	Limo
3,00	6,00	Limo
6,00	9,00	Limo
9,00	12,00	Limo
12,00	15,00	Pómez color blanco
15,00	18,00	Arena fina
18,00	21,00	Arena fina
21,00	24,00	Toba + arena
24,00	27,00	Toba + arena
27,00	30,00	Toba + arena
30,00	33,00	Toba + arena
33,00	36,00	Toba + arena
36,00	39,00	Conglomerado
39,00	42,00	Conglomerado
42,00	45,00	Conglomerado
45,00	48,00	Grava
48,00	51,00	Brecha volcánica
51,00	54,00	Arena fina + grava
54,00	57,00	Arena fina + grava
57,00	60,00	Brecha volcánica
60,00	63,00	Brecha volcánica
63,00	66,00	Brecha volcánica
66,00	69,00	Brecha volcánica
69,00	72,00	Brecha volcánica
72,00	75,00	Brecha volcánica
75,00	78,00	Brecha volcánica
78,00	81,00	Brecha volcánica
81,00	84,00	Brecha volcánica
84,00	87,00	Brecha volcánica
87,00	90,00	Grava
90,00	93,00	Arena media
93,00	96,00	Arena media
96,00	99,00	Arena gruesa
99,00	102,00	Limo + materia orgánica

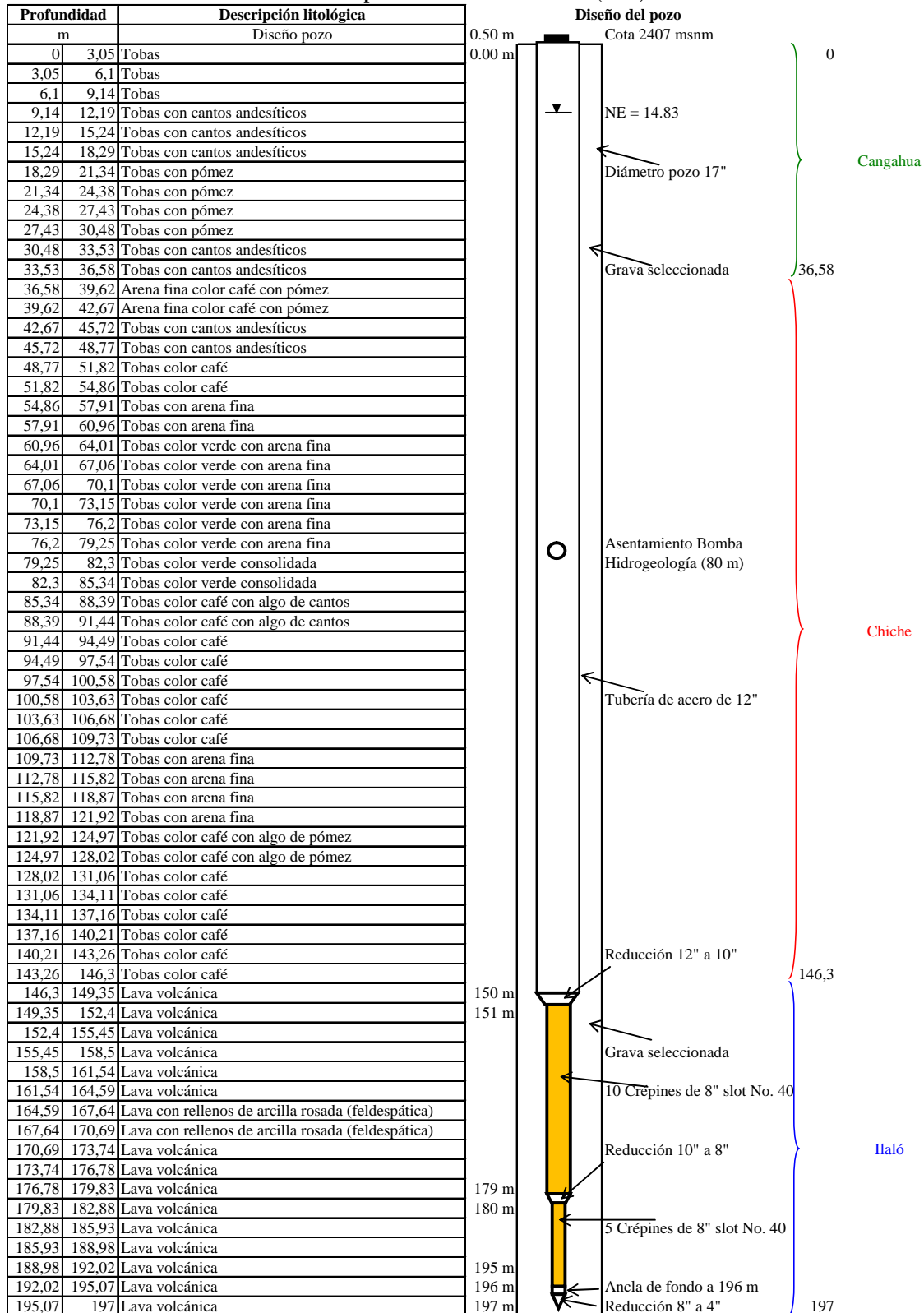


Diseño piezómetro Santa Rosa (C107)

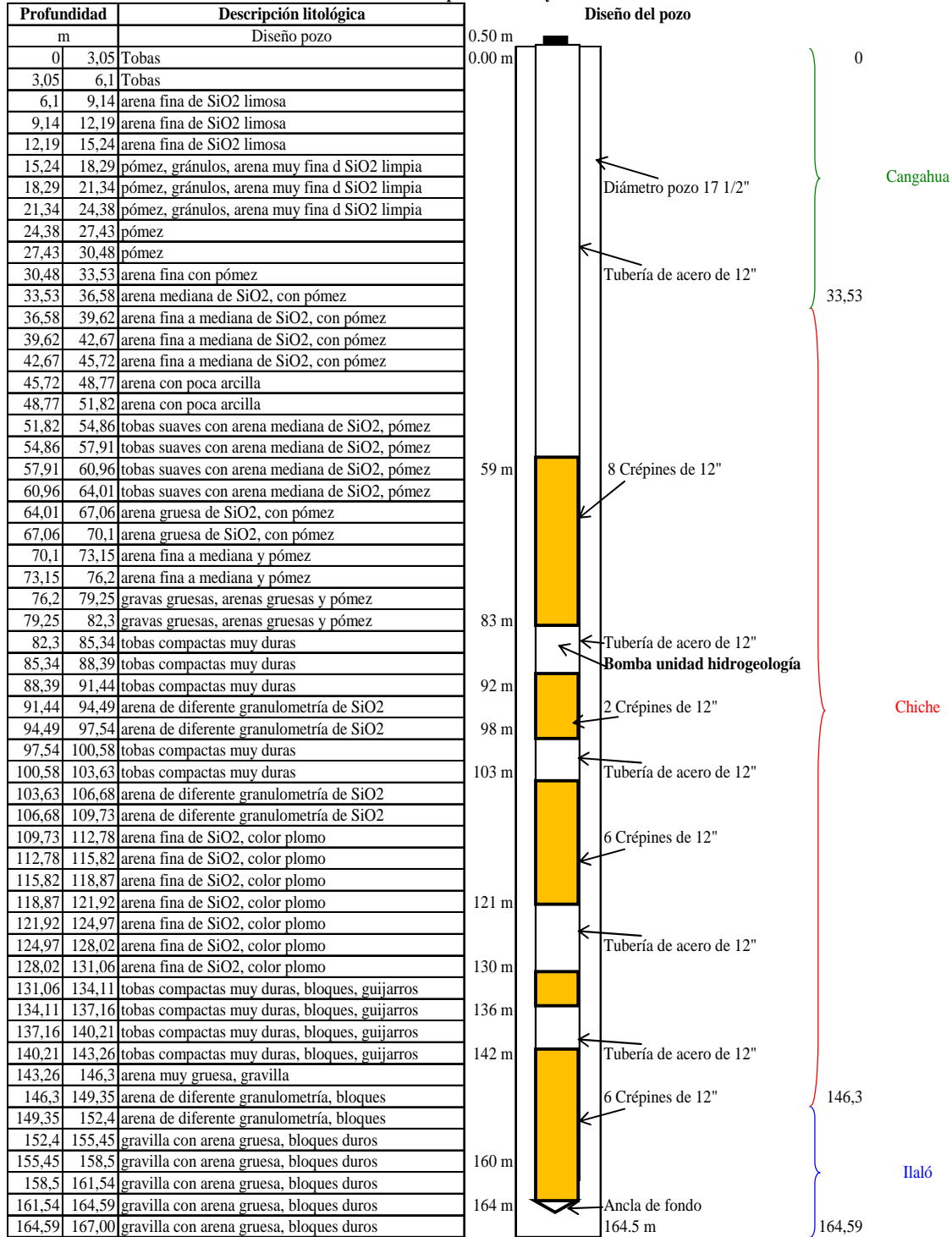
Profundidad	Descripción litológica	
m	Diseño pozo	
0,00	3,00	Limo
3,00	6,00	Limo
6,00	9,00	Arena fina
9,00	12,00	Limo
12,00	15,00	Arena media
15,00	18,00	Limo
18,00	21,00	Arena fina
21,00	24,00	Arena fina
24,00	27,00	Arena media
27,00	30,00	Arena media
30,00	33,00	Arena fina
33,00	36,00	Arena media
36,00	39,00	Limo
39,00	42,00	Limo
42,00	45,00	Arena fina
45,00	48,00	Limo
48,00	51,00	Limo
51,00	54,00	Pómez
54,00	57,00	Toba
57,00	60,00	Limo
60,00	63,00	Limo
63,00	66,00	Limo
66,00	69,00	Arena gruesa
69,00	72,00	Limo
72,00	75,00	Brecha volcánica
75,00	78,00	Brecha volcánica
78,00	81,00	Brecha volcánica
81,00	84,00	Lahar
84,00	87,00	Lahar
87,00	90,00	Lahar
90,00	93,00	Lahar
93,00	96,00	Lahar
96,00	99,00	Brecha volcánica
99,00	102,00	Brecha volcánica
102,00	105,00	Brecha volcánica
105,00	108,00	Brecha volcánica
108,00	111,00	Brecha volcánica
111,00	114,00	Brecha volcánica
114,00	117,00	Lahar
117,00	120,00	Lahar



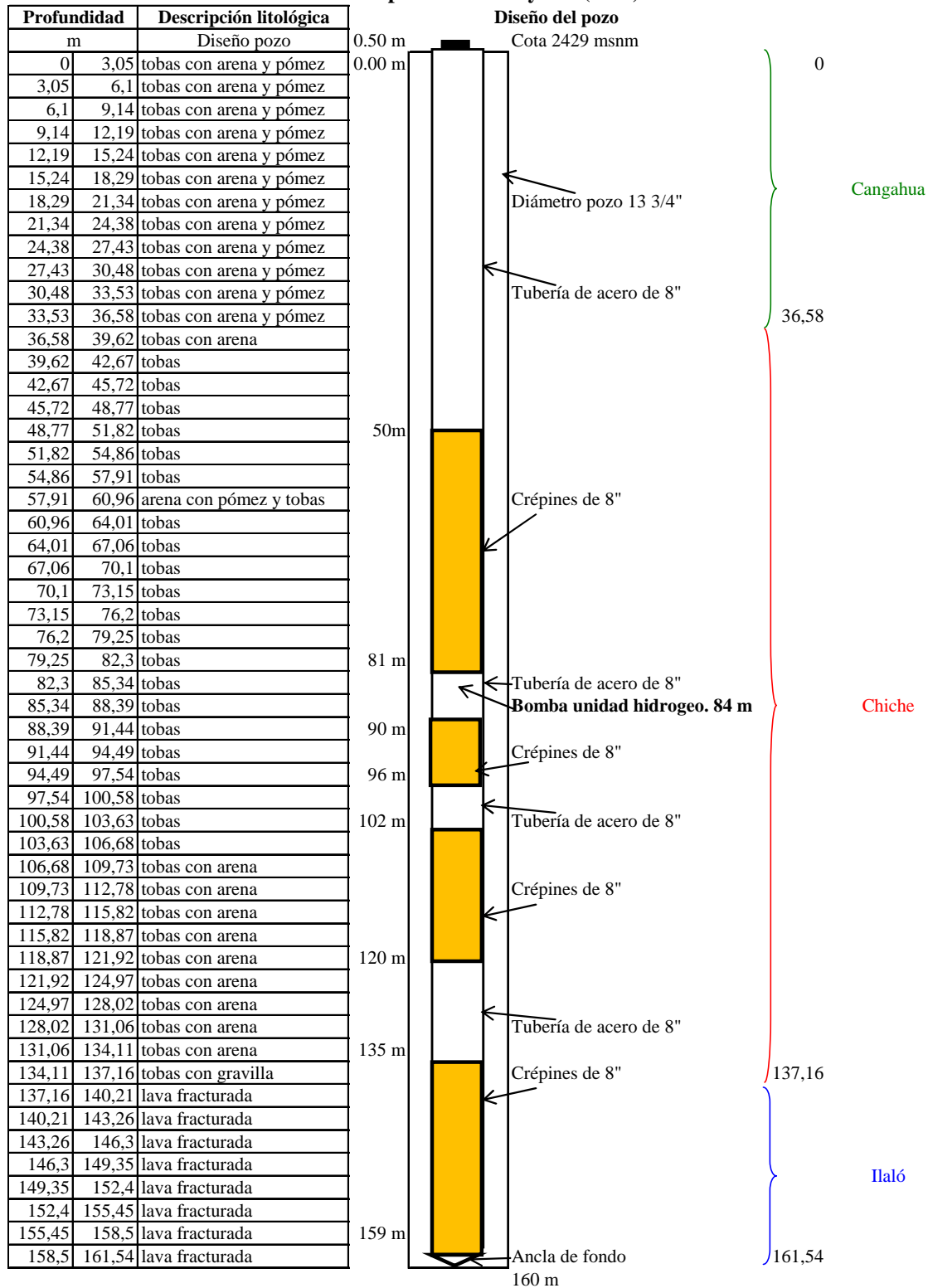
Diseño pozo Planta de Tratamiento (I103)



Diseño pozo Rumihuayco 1

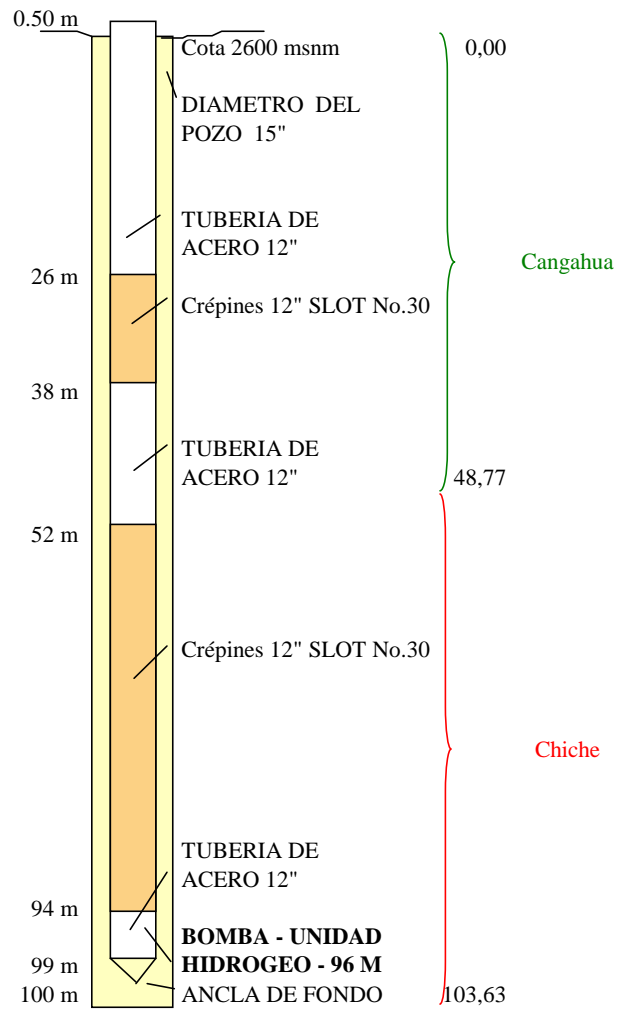


Diseño pozo Rumihuayco 2 (I104)



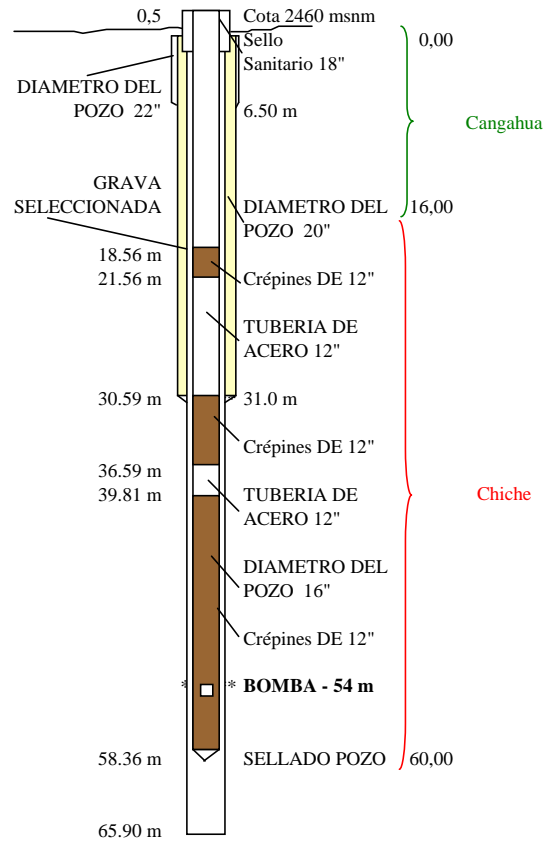
Diseño pozo Alangasí No. 1 (C152)

Profundidad		Descripción Litológica
m		Diseño Pozo
-	3,05	cenizas
3,05	6,10	cenizas
6,10	9,14	cenizas
9,14	12,19	cenizas
12,19	15,24	cenizas
15,24	18,29	cenizas
18,29	21,34	tobas con pómez
21,34	24,38	tobas con pómez
24,38	27,43	tobas con pómez
27,43	30,48	tobas con pómez
30,48	33,53	pómez con tobas
33,53	36,58	pómez con tobas
36,58	39,62	cenizas con limos
39,62	42,67	cenizas con limos
42,67	45,72	cenizas con limos
45,72	48,77	cenizas con limos
48,77	51,82	tobas con cantos sueltos
51,82	54,86	tobas con cantos sueltos
54,86	57,91	lavas andesíticas
57,91	60,96	lavas andesíticas
60,96	64,01	lavas andesíticas
64,01	67,06	lavas andesíticas
67,06	70,10	lavas andesíticas
70,10	73,15	lavas andesíticas
73,15	76,20	arenas con pómez
76,20	79,25	arenas con pómez
79,25	82,30	arenas con pómez
82,30	85,34	arenas con pómez
85,34	88,39	lavas andesíticas de color plomo
88,39	91,44	lavas andesíticas de color plomo
91,44	94,49	lavas andesíticas de color plomo
94,49	97,54	tobas con pómez y arcilla verde
97,54	100,58	tobas con pómez y arcilla verde
100,58	103,63	tobas con pómez y arcilla verde



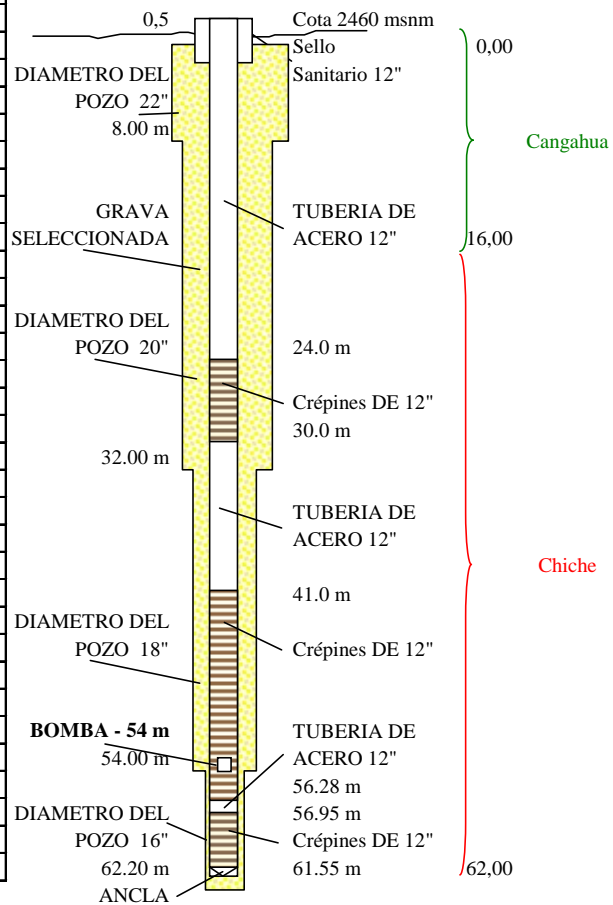
Diseño Pozo Armenia No. 1 (C155)

Profundidad		Descripción Litológica
m		Diseño Pozo
0,00	2,00	suelos
2,00	4,00	suelos
4,00	6,00	arcilla,poca arena fina,gravilla,cantos
6,00	8,00	arcilla,poca arena fina,cantos
8,00	10,00	arcilla, poca arena , piedra
10,00	12,00	arcilla, poca arena , piedra
12,00	14,00	arcilla arenosa, trazas de ceniza volcánica
14,00	16,00	arcilla arenosa, piedra, ceniza volcánica
16,00	18,00	arenas gruesa y mediana,piedra, arcilla
18,00	20,00	arena,grava fina,piedra,arcilla,trazas ce.volc.
20,00	22,00	arena gruesa y fina,roca,piedra,poca arcila
22,00	24,00	piedra,cantos pequeños,arena,poca arcilla
24,00	26,00	canto pequeño,piedra,arena,trazas ce.volc.
26,00	28,00	cantos pequeños,piedra,arena,ceniza volc
28,00	30,00	arena gruesa,piedra
30,00	32,00	arena,canto rodado pequeño, piedra
32,00	34,00	arena arcillosa,grava fina
34,00	36,00	arena arcillosa,grava fina
36,00	38,00	arcilla arenosa,trazas de piedra
38,00	40,00	arena, piedra,arcilla
40,00	42,00	arena gruesa,grava fina, trazas de arcilla
42,00	44,00	arena arcillosa
44,00	46,00	arena arcillosa
46,00	48,00	piedra,poca arena
48,00	49,00	piedra,poca arena
49,00	50,00	arena gruesa,piedra,grava
50,00	52,00	arena gruesa,grava fina
52,00	54,00	arena gruesa,grava fina
54,00	56,00	arena gruesa,grava fina,piedra
56,00	58,00	piedra,arena gruesa,grava
58,00	60,00	arena fina
60,00	62,00	roca
62,00	64,00	roca
64,00	65,90	roca



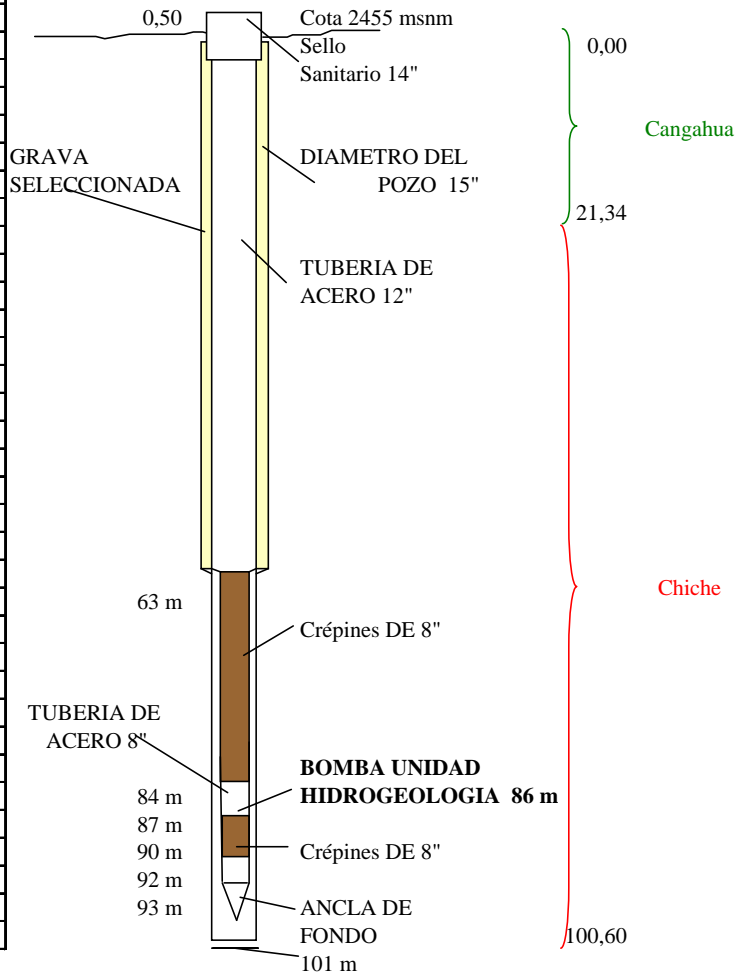
Diseño pozo Armenia No. 2 (C168)

Profundidad	Descripción Litológica	
m	Diseño Pozo	
0,00	2,00	arcilla, ceniza volcánica
2,00	4,00	arcilla arenosa
4,00	6,00	arcilla arenosa, roca
6,00	8,00	arena arcillosa, piedra
8,00	10,00	arena arcillosa, ceniza volcánica, piedra
10,00	12,00	arena arcillosa, grava y piedra
12,00	14,00	arena arcillosa, grava y piedra
14,00	16,00	arena, poca arcilla, piedra
16,00	18,00	arena, grava, piedra, arcilla
18,00	20,00	arena, grava, piedra, arcilla
20,00	22,00	arena, grava, piedra, arcilla
22,00	24,00	arena gruesa, grava fina, piedra, arcilla
24,00	26,00	arena gruesa-media, grava fina, piedra, arcilla
26,00	28,00	arena gruesa, grava fina, piedra
28,00	30,00	arena media-gruesa, grava fina, piedra, arcilla
30,00	32,00	arena media-fina, grava fina, piedra, arcilla
32,00	34,00	arena media-fina, grava fina, piedra, arcilla
34,00	36,00	arena media-fina, grava fina, piedra, arcilla
36,00	38,00	arena media-fina, grava fina, piedra, arcilla
38,00	40,00	arena fina, gravilla, piedra, arcilla
40,00	42,00	arena fina, arcilla, gravilla
42,00	44,00	arena fina-media, piedra, arcilla
44,00	46,00	arena media-gruesa, piedra, arcilla
46,00	48,00	arena media-gruesa, piedra, arcilla
48,00	50,00	arena mediana y gruesa, grava fina, piedra
50,00	52,00	arena mediana y gruesa, grava fina, piedra
52,00	54,00	arena mediana y gruesa, grava fina, piedra
54,00	56,00	arena gruesa y mediana, grava muy fina
56,00	58,00	arena gruesa y mediana, grava muy fina
58,00	60,00	arenas, grava, roca
60,00	62,00	roca, poca arena



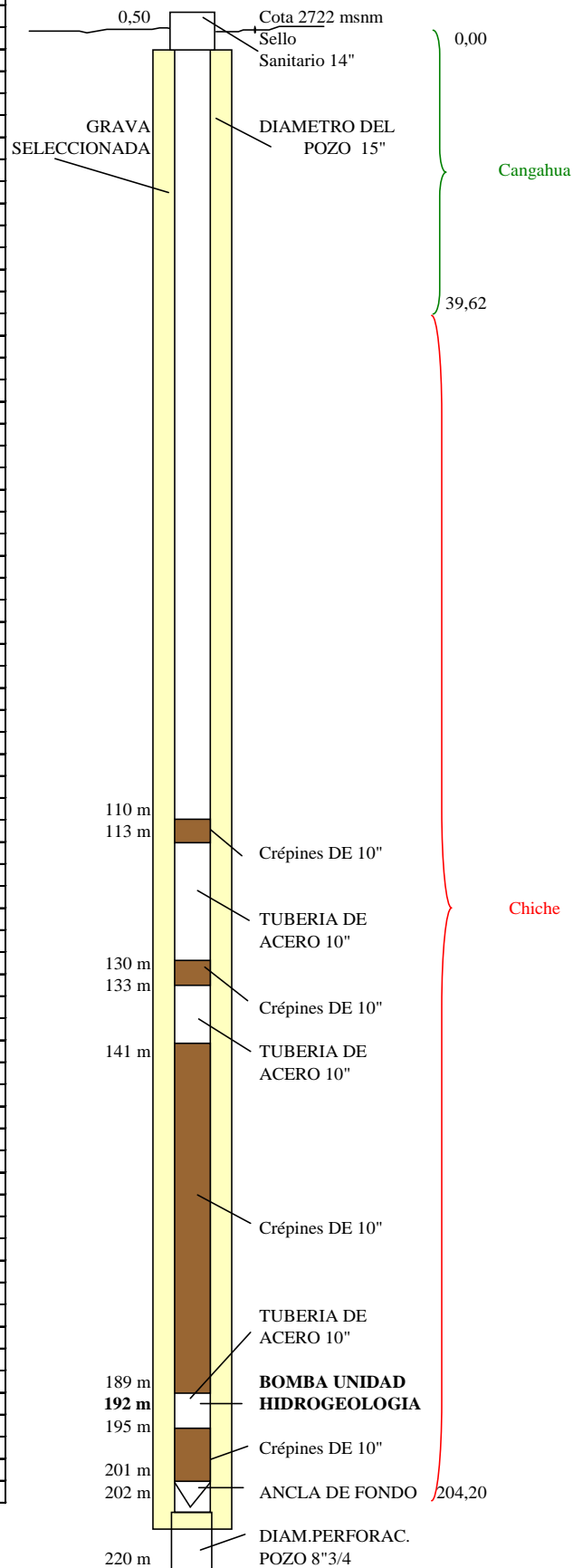
Diseño pozo Armenia No. 4 (C167)

Profundidad		Descripción Litológica
m		
-	3,05	tobas
3,05	6,10	tobas
6,10	9,14	tobas
9,14	12,19	tobas
12,19	15,24	arena con tobas
15,24	18,29	tobas con pómez
18,29	21,34	tobas con pómez
21,34	24,38	gravas
24,38	27,43	gravas
27,43	30,48	grava con tobas
30,48	33,53	tobas
33,53	36,58	tobas y gravas
36,58	39,62	tobas y gravas
39,62	42,67	gravas
42,67	45,72	gravas
45,72	48,77	gravas
48,77	51,82	tobas
51,82	54,86	tobas
54,86	57,91	tobas
57,91	60,96	tobas
60,96	64,01	arenas
64,01	67,06	lahares
67,06	70,10	lahares
70,10	73,15	lahares
73,15	76,20	lahares
76,20	79,25	lahares
79,25	82,30	lahares
82,30	85,34	lahares
85,34	88,39	lahares
88,39	91,44	lahares
91,44	94,49	arena media a gruesa
94,49	97,54	arena media a gruesa
97,54	100,60	arena media a gruesa



Diseño pozo Pintag 1 (C162)

Profundidad	Descripción Litológica	
m	Diseño Pozo	
-	3,05	tobas
3,05	6,10	tobas
6,10	9,14	tobas
9,14	12,19	tobas
12,19	15,24	tobas
15,24	18,29	tobas
18,29	21,34	tobas con pómez
21,34	24,38	tobas con pómez
24,38	27,43	tobas con pómez
27,43	30,48	tobas con pómez
30,48	33,53	tobas con pómez
33,53	36,58	tobas con pómez
36,58	39,62	tobas con pómez
39,62	42,67	arena gruesa
42,67	45,72	arena gruesa
45,72	48,77	arena gruesa
48,77	51,82	arena gruesa
51,82	54,86	arena fina
54,86	57,91	arena fina
57,91	60,96	arena fina
60,96	64,01	arena gruesa
64,01	67,06	arena gruesa
67,06	70,10	arena gruesa
70,10	73,15	arena gruesa
73,15	76,20	arena con tobas
76,20	79,25	arena gruesa con pómez
79,25	82,30	arena gruesa con pómez
82,30	85,34	arena gruesa con pómez
85,34	88,39	arena gruesa con pómez
88,39	91,44	arena con tobas
91,44	94,49	arena con tobas
94,49	97,54	lahares
97,54	100,58	lahares
100,58	103,63	lahares
103,63	106,68	lahares
106,68	109,73	lahares
109,73	112,78	lahares
112,78	115,82	lahares
115,82	118,87	tobas con arena
118,87	121,92	lahares
121,92	124,97	lahares
124,97	128,02	lahares
128,02	131,06	lahares
131,06	134,11	lahares
134,11	137,16	tobas con arena
137,16	140,21	lahares
140,21	143,26	lahares
143,26	146,30	lahares
146,30	149,35	tobas con arena
149,35	152,40	lahares
152,40	155,45	lahares
155,45	158,50	lahares
158,50	161,54	lahares
161,54	164,59	lahares
164,59	167,64	lahares
167,64	170,69	lahares
170,69	173,74	lahares
173,74	176,78	lahares
176,78	179,83	lahares
179,83	182,88	arena con tobas
182,88	185,93	lahares, gravilla, arenas pómez
185,93	188,98	lahares, gravilla, arenas pómez
188,98	192,02	lahares, gravilla, arenas pómez
192,02	195,07	lahares, gravilla, arenas pómez
195,07	198,12	lahares, gravilla, arenas pómez
198,12	201,17	lahares, gravilla, arenas pómez
201,17	204,20	lahares, gravilla, arenas pómez

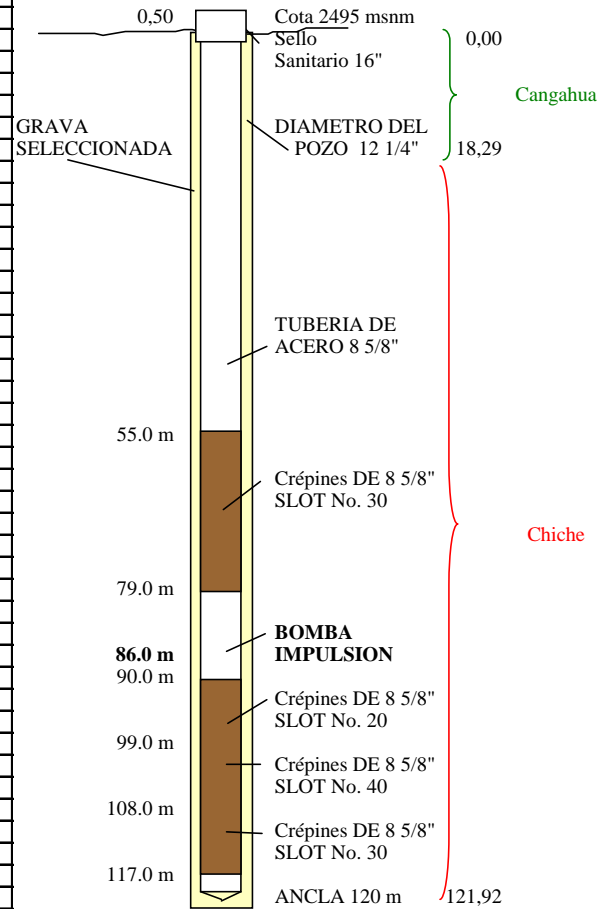


Diseño pozo Pintag 2 (C163)

Profundidad		Descripción Litológica		0.50 m	2767 msnm	0,00
m			Diseño Pozo			
0,00	3,05	suelo vegetal				
3,05	6,10	arena y toba arcillosa				
6,10	9,14	arena diferente granulometría, color negro				
9,14	12,19	arena diferente granulometría, color negro				
12,19	15,24	arena de diferente granulometría				
15,24	18,29	arena de diferente granulometría				
18,29	21,34	arena de diferente granulometría				
21,34	24,38	arena de diferente granulometría				
24,38	27,43	arena de diferente granulometría				
27,43	30,48	arena de diferente granulometría				
30,48	33,53	arena de diferente granulometría				
33,53	36,58	arena de diferente granulometría				
36,58	39,62	arcilla plástica				
39,62	42,67	arcilla plástica				
42,67	45,72	arcilla plástica				
45,72	48,77	arena de diferente granulometría, limpia				
48,77	51,82	arena de diferente granulometría, limpia				
51,82	54,86	arena de diferente granulometría, limpia				
54,86	57,91	arena de diferente granulometría, limpia				
57,91	60,96	arena de diferente granulometría, limpia				
60,96	64,01	arcilla plástica color negro				
64,01	67,06	arcilla plástica color negro				
67,06	70,10	arcilla plástica color negro				
70,10	73,15	arena fina con matriz arcillosa				
73,15	76,20	arcilla plástica color negro				
76,20	79,25	bloques duros, con arena de diferente grano, angulosos	79 m			
79,25	82,30	bloques duros, con arena de diferente grano, angulosos				
82,30	85,34	bloques duros, con arena de diferente grano, angulosos				
85,34	88,39	arena de diferente granulometría, guijarros cementadas	88 m			
88,39	91,44	bloques duros con arena				
91,44	94,49	arena de diferente granulometría, angulosos cementadas	93 m			
94,49	97,54	arena de diferente granulometría, angulosos cementadas				
97,54	100,58	bloques duros angulosos				
100,58	103,63	bloques duros angulosos				
103,63	106,68	bloques duros angulosos				
106,68	109,73	bloques duros angulosos	108 m			
109,73	112,78	bloques duros angulosos				
112,78	115,82	bloques duros angulosos				
115,82	118,87	arena de diferente granulometría, angulosos cementadas				
118,87	121,92	arena de diferente granulometría, angulosos cementadas				
121,92	124,97	arena de diferente granulometría, angulosos cementadas				
124,97	128,02	bloques duros angulosos				
128,02	131,06	bloques duros angulosos				
131,06	134,11	bloques duros angulosos	136 m			
134,11	137,16	arena de diferente granulometría, angulosos cementadas				
137,16	140,21	bloques duros angulosos				
140,21	143,26	bloques duros angulosos				
143,26	146,30	arena de diferente granulometría, cementadas				
146,30	149,35	bloques duros angulosos				
149,35	152,40	bloques duros angulosos				
152,40	155,45	bloques duros angulosos				
155,45	158,50	bloques duros angulosos				
158,50	161,54	bloques duros angulosos	160 m			
161,54	164,59	bloques duros angulosos				
164,59	167,64	bloques duros angulosos				
167,64	170,69	arena de diferente granulometría, cementadas				
170,69	173,74	arena de diferente granulometría, cementadas	174 m			
173,74	176,78	arena de diferente granulometría, cementadas				
176,78	179,83	bloques duros angulosos, diferentes diámetros	180 m			
179,83	182,88	arena de diferente granulometría, cementadas				
182,88	185,93	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
185,93	188,98	arena de diferente granulometría, sin cemento				
188,98	192,02	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
192,02	195,07	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
195,07	198,12	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
198,12	201,17	bloques duros angulosos, diferentes diámetros	200 m			
201,17	204,22	bloques duros angulosos, diferentes diámetros	203 m			
204,22	207,26	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
207,26	210,31	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
210,31	213,36	bloques duros angulosos, diferentes diámetros	212 m			
213,36	216,41	arena de diferente granulometría, cementadas				
216,41	219,46	arena de diferente granulometría, cementadas				
219,46	222,50	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
222,50	225,55	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
225,55	228,60	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
228,60	231,65	bloques duros angulosos, diferentes diámetros	230 m			
231,65	234,70	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
234,70	237,74	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
237,74	240,79	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
240,79	243,84	arena diferente granulometría, limpia				
243,84	246,89	bloques duros angulosos, diferentes diámetros	247 m			
246,89	249,94	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
249,94	252,98	arena diferente granulometría, limpia				
252,98	256,03	bloques duros angulosos, diferentes diámetros	256 m			
256,03	259,08	bloques duros angulosos, diferentes diámetros	257 m			
259,08	262,13	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
262,13	265,18	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
265,18	268,22	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
268,22	271,27	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
271,27	274,32	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
274,32	277,37	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				
277,37	280,00	bloques duros angulosos, diferentes diámetros				

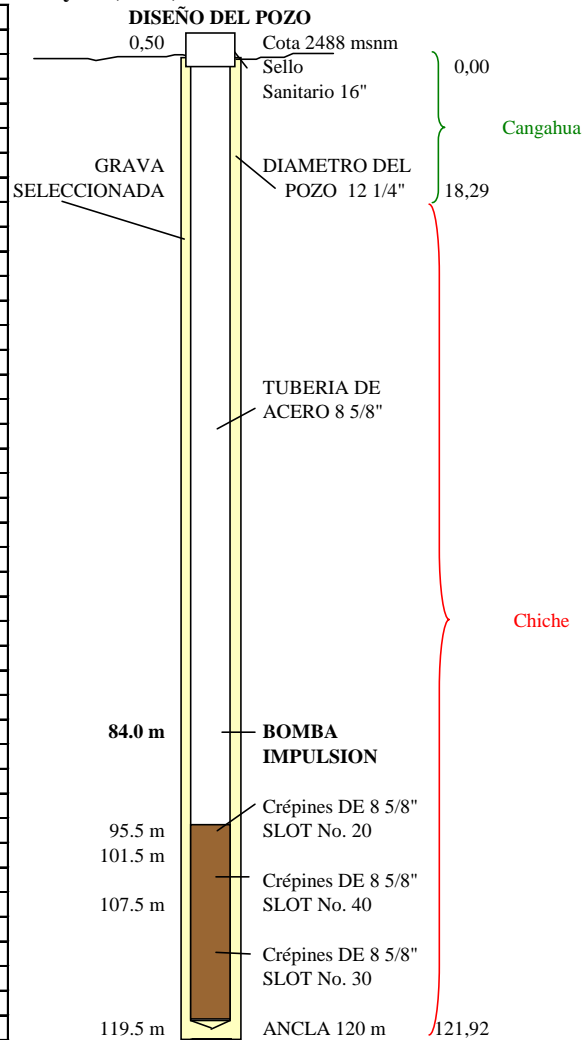
Diseño pozo La Moya 1 (C159)

Profundidad	Descripción Litológica	
m	Diseño Pozo	
-	3,05	suelo arcilloso
3,05	6,10	arena fina con pomez
6,10	9,14	arena fina con pomez
9,14	12,19	pomez
12,19	15,24	pomez con cantos rodados
15,24	18,29	pomez con cantos rodados
18,29	21,34	cantos rodados andesíticos
21,34	24,38	cantos rodados andesíticos con pomez
24,38	27,43	cantos rodados andesíticos
27,43	30,48	cantos rodados andesíticos
30,48	33,53	cantos rodados andesíticos
33,53	36,58	arena fina con cantos rodados y pomez
36,58	39,62	gravilla con matriz tobacea y algo de arcilla
39,62	42,67	gravilla con matriz arcillosa
42,67	45,72	arcilla verde oliva con gravilla
45,72	48,77	gravilla con arcilla verde oliva
48,77	51,82	conglomerado
51,82	54,86	conglomerado
54,86	57,91	conglomerado
57,91	60,96	conglomerado
60,96	64,01	conglomerado
64,01	67,06	conglomerado
67,06	70,10	conglomerado
70,10	73,15	conglomerado
73,15	76,20	conglomerado
76,20	79,25	conglomerado
79,25	82,30	conglomerado
82,30	85,34	conglomerado
85,34	88,39	lava con arena media silicia
88,39	91,44	arena de grano medio a fino
91,44	94,49	arena de grano medio a fino
94,49	97,54	arena de grano medio a fino
97,54	100,58	arena de grano medio a fino
100,58	103,63	arena de grano medio a fino
103,63	106,68	arena silicia media a fina con c. rodados
106,68	109,73	cantos rodados con arena media a fina
109,73	112,78	arena silicia media a fina con c. rodados
112,78	115,82	cantos rodados andesíticos con arena m-f
115,82	118,87	cantos rodados andesíticos
118,87	121,92	cantos rodados andesíticos con arena m-f



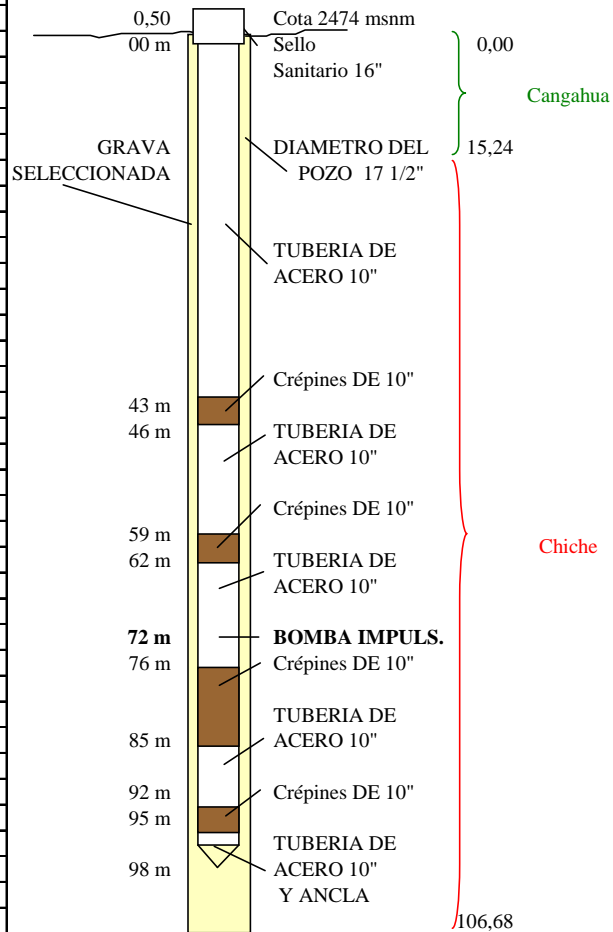
Diseño pozo La Moya 2 (C160)

Profundidad	Descripción Litológica	
m	Diseño Pozo	
-	3,05	suelo arcilloso
3,05	6,10	arena fina con piedra pomez
6,10	9,14	arena fina con piedra pomez
9,14	12,19	piedra pomez
12,19	15,24	piedra pomez con cantos rodados
15,24	18,29	piedra pomez con cantos rodados
18,29	21,34	cantos rodados andesíticos
21,34	24,38	cantos rodados andesíticos con piedra pomez
24,38	27,43	cantos rodados andesíticos
27,43	30,48	cantos rodados andesíticos
30,48	33,53	cantos rodados andesíticos
33,53	36,58	arena fina con cantos rodados y pomez
36,58	39,62	gravilla con matriz tobacea y algo de arcilla
39,62	42,67	gravilla con matriz arcillosa
42,67	45,72	arcilla verde oliva con gravilla
45,72	48,77	gravilla con arcilla verde oliva
48,77	51,82	lava andesítica
51,82	54,86	lava andesítica
54,86	57,91	lava andesítica
57,91	60,96	lava andesítica
60,96	64,01	lava andesítica
64,01	67,06	lava andesítica
67,06	70,10	lava andesítica
70,10	73,15	lava andesítica
73,15	76,20	lava andesítica
76,20	79,25	lava andesítica
79,25	82,30	lava andesítica
82,30	85,34	lava andesítica
85,34	88,39	lava con arena media silicia
88,39	91,44	arena de grano medio a fino composic. Silicia
91,44	94,49	arena de grano medio a fino composic. Silicia
94,49	97,54	arena de grano medio a fino composic. Silicia
97,54	100,58	arena de grano medio a fino composic. Silicia
100,58	103,63	arena de grano medio a fino composic. Silicia
103,63	106,68	arena silicia media a fina con c. rodados
106,68	109,73	cantos rodados con arena media a fina silicia
109,73	112,78	arena silicia media a fina con c. rodados
112,78	115,82	cantos rodados andesíticos con arena m-f
115,82	118,87	cantos rodados andesíticos
118,87	121,92	cantos rodados andesíticos con arena m-f



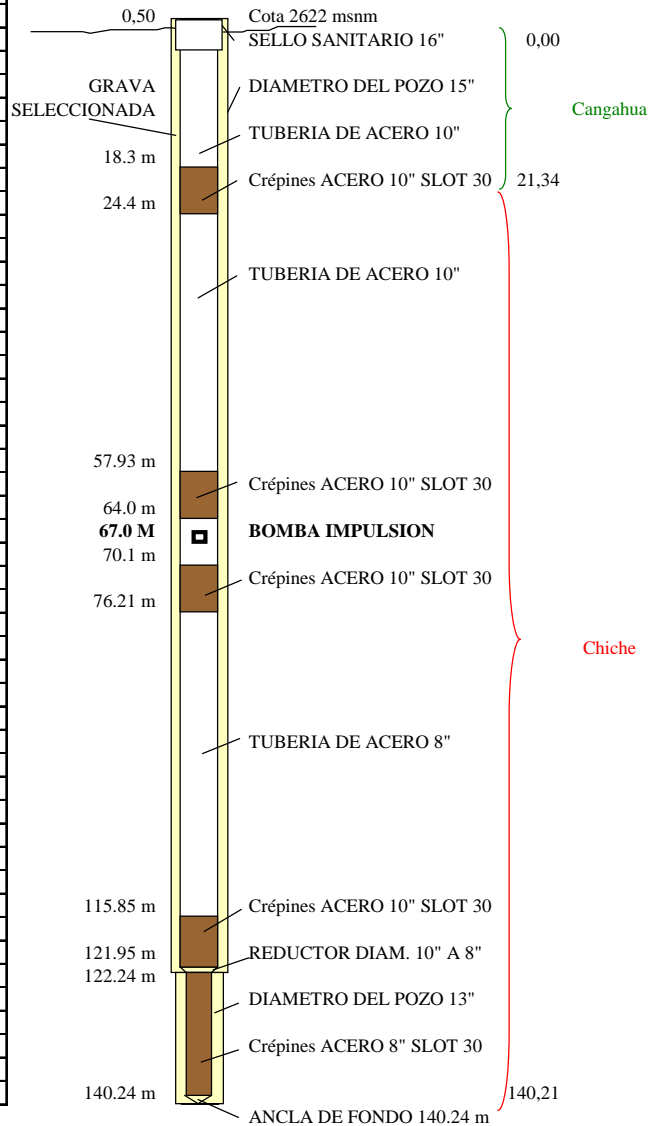
Diseño pozo El Buen Pastor - La Moya 3 (C161)

Profundidad		Descripción Litológica
m		Diseño Pozo
-	3,05	arcilla negra consolidada
3,05	6,10	arcilla negra consolidada
6,10	9,14	arena café media
9,14	12,19	arena con piedra
12,19	15,24	arena gris fina
15,24	18,29	arena gris gruesa con pomez
18,29	21,34	arena pomezsemi consolidada
21,34	24,38	arena gruesaploma semi consolidada
24,38	27,43	arena volcánica negra semi consolidada
27,43	30,48	arena mediana fina semi suelta
30,48	33,53	arena gris con piedra suelta
33,53	36,58	arena gris con piedra suelta
36,58	39,62	arena gris fina con piedra suelta
39,62	42,67	arena gris fina con piedra suelta
42,67	45,72	arena volcánica dura
45,72	48,77	arena volcánica dura
48,77	51,82	roca volcánica
51,82	54,86	lava volcánica
54,86	57,91	lava volcánica
57,91	60,96	lava volcánica
60,96	64,01	arena mediana y fina semi consolidada
64,01	67,06	arena mediana y fina semi consolidada
67,06	70,10	roca volcánica
70,10	73,15	roca plancha dura
73,15	76,20	arena gris mediana
76,20	79,25	arena gris mediana y fina
79,25	82,30	arena gris mediana y fina
82,30	85,34	arena gris mediana y fina
85,34	88,39	arena gris mediana
88,39	91,44	arena volcánica
91,44	94,49	arena volcánica
94,49	97,54	roca volcánica dura
97,54	100,58	arena volcánica suelta
100,58	103,63	lava volcánica dura
103,63	106,68	roca volcánica dura



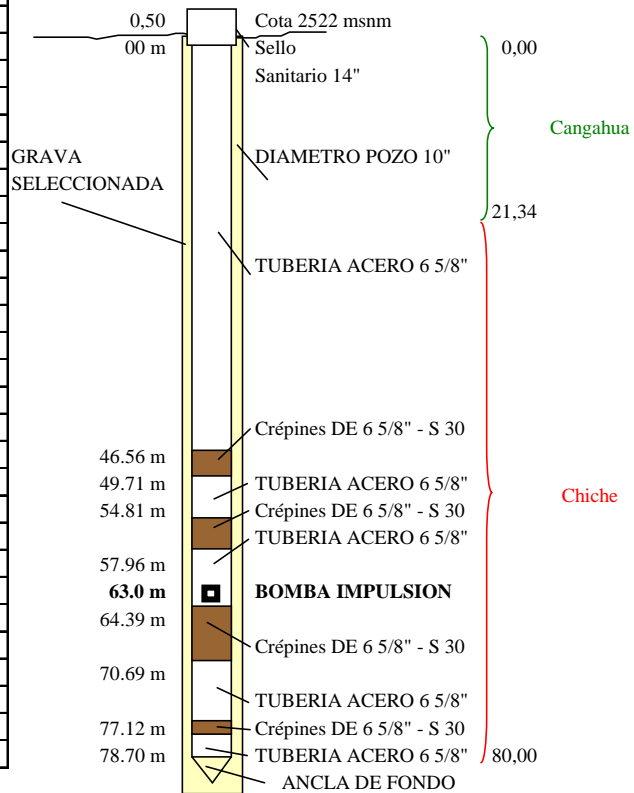
Diseño pozo San Juan de Conocoto (C166)

Profundidad	Descripción Litológica	
m	Diseño Pozo	
-	3,0	cenizas alteradas con suelo
3,0	6,1	cenizas-suelos con arena fina color café
6,1	9,1	arena de grano fino a medio
9,1	12,2	arena de grano fino a medio
12,2	15,2	arena de grano fino a medio
15,2	18,3	arena de grano fino a grueso
18,3	21,3	arena de grano fino a grueso
21,3	24,4	arena de grano medio a grueso con grava
24,4	27,4	tobas con grava
27,4	30,5	tobas con grava
30,5	33,5	tobas con grava
33,5	36,6	tobas con grava
36,6	39,6	tobas con arcilla y algo de grava
39,6	42,7	tobas con arcilla y algo de grava
42,7	45,7	tobas con arcilla y algo de grava
45,7	48,8	tobas con arcilla y algo de grava
48,8	51,8	tobas con arcilla y algo de grava
51,8	54,9	tobas con arcilla y algo de grava
54,9	57,9	tobas con arcilla y algo de grava
57,9	61,0	tobas con arena de grano fino a medio
61,0	64,0	arenas de grano fino a medio
64,0	67,1	arenas luego tobas con grava
67,1	70,1	tobas con arena y grava
70,1	73,2	arenas de grano fino a grueso con grava
73,2	76,2	arenas de grano fino a grueso con grava
76,2	79,2	cenizas alteradas en suelo con grava
79,2	82,3	cenizas alteradas en suelo con grava
82,3	85,3	tobas con intercalación de gravas
85,3	88,4	tobas con intercalación de gravas
88,4	91,4	arcilla verde amarilla con limo y arena
91,4	94,5	arcilla verde amarilla con limo y arena
94,5	97,5	arcilla verde amarilla con limo y arena
97,5	100,6	arcilla verde amarilla con limo y arena
100,6	103,6	arcilla verde amarilla con limo arena y tobas
103,6	106,7	tobas con gravas
106,7	109,7	arena de grano fino a grueso con grava
109,7	112,8	arena de grano fino a grueso con grava
112,8	115,8	bloque andesítico fracturado
115,8	118,9	bloque andesítico fracturado
118,9	121,9	bloque andesítico consolidado
121,9	125,0	bloque andesítico fracturado
125,0	128,0	bloque andesítico fracturado
128,0	131,1	bloque andesítico fracturado
131,1	134,1	bloque andesítico fracturado
134,1	137,2	bloque andesítico fracturado
137,2	140,2	bloque andesítico fracturado



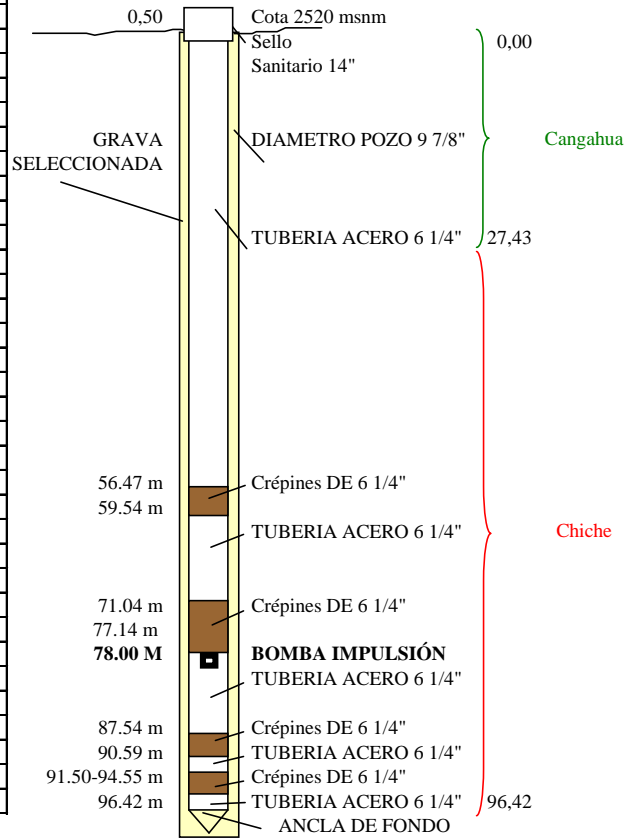
Diseño Pozo Ushimana 1 (C169)

Profundidad		Descripción Litológica
m		Diseño Pozo
-	3,05	Limo café
3,05	6,10	Limo con piroclastos (10%)
6,10	9,14	Limo con piroclastos (10%)
9,14	12,19	Limo con piroclastos (15%)
12,19	15,24	Limo con piroclastos (15%)
15,24	18,29	Limo con piroclastos (15%)
18,29	21,34	Limo con piroclastos (15%)
21,34	24,38	Grava (60%) y limo arenoso(40%)
24,38	27,43	Limo oscuro con grava (30%)
27,43	30,48	Pómez, arena gruesa y mediana, limo(15%)
30,48	33,53	Pómez, arena gruesa y mediana, limo(15%)
33,53	36,58	Arena gruesa y mediana, pómez y grava
36,58	39,62	Arena gruesa y mediana, pómez y grava
39,62	42,67	Arena gruesa y mediana, pómez y grava
42,67	45,72	Arena gruesa y mediana, pómez y grava
45,72	48,77	Arena gruesa y mediana, pómez y grava
48,77	51,82	Arena gruesa y mediana, pómez y grava
51,82	54,86	Arena gruesa y mediana, pómez y grava
54,86	57,91	Arena gruesa y mediana, pómez y grava
57,91	60,96	Arena gruesa y mediana, pómez y grava
60,96	64,01	Arena mediana, grava y pómez
64,01	67,06	Arena mediana, grava y pómez
67,06	70,10	Arena mediana, grava y pómez
70,10	73,15	Limo con arena mediana y grava
73,15	76,20	Arena mediana y fina, pómez y limo (5%)
76,20	79,00	Arena mediana y fina, pómez y limo (5%)
79,00	80,00	Limo, muy poca arena



Diseño pozo Ushimana 2 (C170)

Profundidad		Descripción Litológica
metros		
-	3,05	Limo,ceniza volcánica y arena
3,05	6,10	Limo y ceniza volcánica
6,10	9,14	Limo,ceniza volcánica,arena y grava
9,14	12,19	Limo,ceniza volcánica,arena y grava
12,19	15,24	Limo y ceniza volcánica
15,24	18,29	Limo y ceniza volcánica
18,29	21,34	Limo y ceniza volcánica
21,34	24,38	Limo y ceniza volcánica
24,38	27,43	Limo y ceniza volcánica
27,43	30,48	Ceniza volcánica.limo,arena y pómez
30,48	33,53	Ceniza volcánica.limo,arena y pómez
33,53	36,58	Ceniza volcánica.limo,arena y pómez
36,58	39,62	Arena,limo y pómez
39,62	42,67	Arena,limo y pómez
42,67	45,72	Arena,limo y pómez
45,72	48,77	Arena,limo y pómez
48,77	51,82	Arena gruesa,ceniza volcánica y pómez
51,82	54,86	Arena gruesa,ceniza volcánica y pómez
54,86	57,91	Arena gruesa,ceniza volcánica y pómez
57,91	60,96	Arena gruesa,ceniza volcánica y pómez
60,96	64,01	Arena gruesa,ceniza volcánica y pómez
64,01	67,06	Arena gruesa,ceniza volcánica y pómez
67,06	70,10	Arena gruesa,ceniza volcánica y pómez
70,10	73,15	Arena gruesa,ceniza volcánica y pómez
73,15	76,20	Arena gruesa,ceniza volcánica y pómez
76,20	79,25	Arena gruesa,ceniza volcánica y pómez
79,25	82,30	Arena gruesa,ceniza volcánica y pómez
82,30	85,34	Arena gruesa,ceniza volcánica y pómez
85,34	88,39	Canto rodado (andesita) y arena con pómez
88,39	91,44	Canto rodado (andesita) y arena con pómez
91,44	94,49	Canto rodado (andesita) y arena con pómez
94,49	96,42	Canto rodado (andesita) y arena con pómez



ANNEXE 3A

Tableau 2. Données piézométriques des forages sur la Vallée de Tumbaco. Les cellules soulignées en jaune sont des données manquantes ou éliminées à cause de probable mauvaise mesures avec la sonde piézométrique.

Station	San Patricio	El Carrizal	Cementerio	La Esperanza MICEI	Patagua	Planta de Tratamiento	Primavera 1 (Forage)	Primavera 1 (Puits)	Rumihuayco 1	Rumihuayco 2	Santa Rosa	Santa Rosa-Pz	Las Acacias
Code	C106	C103	C102	C104	C105	I103	M303	M303_1	M305	I104	C107	C107_1	C101
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Piézomètre	Forage	Forage	Forage	Piézomètre	Forage
Long WGS84	9976898	9976935	9976757	9978851	9977585	9975093	9976511	9976511	9975146	9975146	9977951	9977951	9977674
Lat WGS84	785388	791390	789389	791416	789464	788605	786428	786428	789745	789745	790706	790706	791464
Côte	2409	2419	2380	2418	2360	2407	2360	2360	2429	2429	2392	2392	2427,05
14-janv.-91		63,25											
15-janv.-91		63,25											
21-janv.-91		63,25											
23-janv.-91		63,30											
26-mars-91		67,00											
20-août-91													90,50
21-août-91													90,22
22-août-91													90,24
25-sept.-99									33,44				
26-nov.-98						14,85							
27-nov.-98						14,83							
13-avr.-99							26,10						
14-avr.-99							27,10						
16-avr.-99							26,34						

Annexe 3A

Station	San Patricio	El Carrizal	Cementerio	La Esperanza MICEI	Patagua	Planta de Tratamiento	Primavera 1 (Forage)	Primavera 1 (Puits)	Rumihuayco 1	Rumihuayco 2	Santa Rosa	Santa Rosa-Pz	Las Acacias
Code	C106	C103	C102	C104	C105	I103	M303	M303_1	M305	I104	C107	C107_1	C101
2-août-07				103,20									
3-août-07				103,20									
1-juil.-08								32,55				49,10	
8-sept.-09	53,85			103,10	19,94	16,43		30,30				48,93	
29-oct.-09	53,75		32,46	103,06	19,83	16,41		30,27					
16-nov.-09	53,82		32,44	103,02	19,92	16,36		30,34			50,74	48,47	
10-janv.-10	53,73		32,41	103,00	19,79	16,38		30,38			50,65	48,16	
10-févr.-10	53,80		32,41	103,04	19,81	16,33		30,22			50,56	48,02	
10-mars-10													
8-avr.-10				103,5	19,71		29,34						
20-avr.-10	53,75	64,84			19,64	16,28	29,30	30,21	35,63	35,85	50,46	47,88	
13-juil.-10	53,7	64,68	32,19	102,79	19,59	16,19	29,42	30,26	35,63	35,89	50,35	47,81	
20-juil.-10	53,55	64,53	32,10	102,53	19,56	16,13			35,54	35,77	50,23		
6-août-10	53,77	64,67	32,31	102,82	19,66	16,2			35,89	35,65	50,35	47,8	
27-août-10	53,81	64,50	32,12	102,58	19,55	16,12	29,65		35,54	35,81	50,20		
10-sept.-10	53,66	64,46	32,04	102,35	19,74	16,13		30,46	35,56	35,8	50,15	47,59	
22-oct.-10	53,7	64,4	31,98	102,72	19,72	16,11		30,44	35,54	35,79	49,57	47,41	
4-nov.-10	53,66	64,35	31,95	102,63	19,69	16,07		30,46	35,54	35,8	50,13	47,23	
3-déc.-10	53,7	64,44	31,98	103,33	19,5	16,08		30,43	35,55	35,61	50,18	47,36	
18-janv.-11	53,66	64,39	31,97	103,23	19,46	16,08	29,56		35,66	35,65	50,17	47,33	
16-févr.-11	53,5	64,27	31,89	103,3	19,4	16,02	29,35	30,33	35,57	35,55	50,07	47,25	
18-mars-11	53,55	64,38	31,95	103,09	19,44	16,02	29,34	30,25	35,66	35,64	50,22	47,43	
21-avr.-11	53,41	64,35	31,94	103,04	19,45	16,01	29,32	30,26	35,67	35,66	50,25	47,5	
13-mai-11	53,38	64,34	31,96	103,07	19,45	16,00	29,43	30,37	35,71	35,67	50,28	47,56	

Annexe 3A

Station	San Patricio	El Carrizal	Cementerio	La Esperanza MICEI	Patagua	Planta de Tratamiento	Primavera 1 (Forage)	Primavera 1 (Puits)	Rumihuayco 1	Rumihuayco 2	Santa Rosa	Santa Rosa-Pz	Las Acacias
Code	C106	C103	C102	C104	C105	I103	M303	M303_1	M305	I104	C107	C107_1	C101
23-juin-11	53,27	64,42	31,84	102,73	19,43	15,89	29,47	30,41	35,58	35,54	50,14	47,49	
10-août-11	53,60	64,49	31,95	103,29	19,52	15,93	29,65	30,58	35,82	35,65	50,36	47,73	
18-oct.-11		63,71	31,85	103,24	19,74	15,83	29,55	30,45	35,51	35,78	50,35	47,82	
15-nov.-11	53,60	63,87	31,88	103,26	19,75	15,79	29,86	30,58	35,48	35,74	50,44	47,89	
20-déc.-11	52,97	63,71	31,82	103,25	19,60	15,76	29,69	30,54	35,40	35,63	50,42	48,10	
25-janv.-12		63,80		103,37		15,75	29,69	30,53	35,42	35,77	50,60	48,90	
15-févr.-12	53,50	63,84	31,89	103,38	19,22	15,78		30,65	35,47	35,80	50,55	48,13	
22-mars-12	53,20	63,86	31,88	103,35		15,75	29,46	30,34	35,50	35,73	50,61	48,24	
13-avr.-12	52,97	63,90	31,91	103,33	19,86	15,75	29,49	30,35	35,50	35,89	50,63	48,28	
11-mai-12	53,03	63,93	31,94	103,35	19,90	15,73	29,55	30,43	35,46	35,99	50,67	48,35	
15-juin-12	53,31	64,04	32,01	103,36	19,96	15,76	29,59		35,52	35,82	50,75	48,44	
13-juil.-12	53,32	64,05	32,04	103,49	19,99	15,68	29,63	30,48	35,43	35,68	50,78	48,48	
15-août-12	53,56	64,11	32,13	103,52	20,04	15,69	29,72	30,55	35,45	35,73	50,84	48,55	
14-sept.-12	53,65	64,13	32,15	103,39	20,13	15,68	29,70		35,43	35,82	50,85	48,51	
24-oct.-12	53,47	64,12	32,12	103,49		15,67	29,45	30,38	35,48	36,12	50,78	48,44	
Moyenne	53,54	64,20	32,05	103,12	19,67	15,93	29,18	30,48	35,49	35,75	50,42	48,01	90,32
Max	53,85	67,00	32,46	103,52	20,13	16,43	29,86	32,55	35,89	36,12	50,85	49,10	90,50
Min	52,97	63,25	31,82	102,35	19,06	14,83	26,10	30,21	33,44	35,54	49,57	47,23	90,22
ET	0,25	0,65	0,19	0,30	0,24	0,35	1,00	0,42	0,40	0,13	0,28	0,52	0,16
% données manq	13%	24%	16%	6%	6%	6%	30%	29%	0%	0%	13%	16%	-

Annexe 3A

Tableau 3. Données piézométriques des forages sur la Vallée de Los Chillos et sur le volcan Ilaló (soulignées en vert)

Nombre	La Cocha 1/ Alangasí 1	La Cocha 3/ Alangasí 3	La Merced	Pozo 5 Naval	El Tingo Nuevo	Ilaló	Los Arupos	San Germán	Lasallinos
ID	C152	C154	I106	I105	I102	I201	C156	C164	C158
Tipo	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Source	Forage	Piézomètre	Forage
Long WGS84	9965096	9965618	9967694	9967816	9968282	9968923	9967416	9966254	9965778
Lat WGS84	789851	789870	790006	789911	785052	791558	782189	780499	779260
COTA	2600	2590	2578	2534	2470	2560	2456	2522	2595
20-juil.-98	15,90								
3-févr.-11			1,50				3,38	4,61	4,60
16-mars-11			2,66				0,14	4,35	3,65
20-avr.-11			2,30	1,96			0,14	3,87	3,46
18-mai-11		20,42	1,82	1,52			0,10	4,07	2,51
8-juil.-11			2,40	2,33		0,37	0,11	4,71	3,03
22-août-11			3,19	3,16		0,34	0,11	5,60	2,22
26-oct.-11	45,34		1,55	1,35			0,11	5,18	6,43
18-nov.-11			2,41	2,30			0,11	5,23	5,85
22-déc.-11			1,65	1,33			0,10	5,35	5,62
27-janv.-12			1,67	1,50			2,97	4,70	4,67
24-févr.-12			2,99	3,03			0,10	4,72	4,71
29-mars-12			2,01	2,85				4,58	4,41
25-avr.-12			2,17	1,97		0,12	0,18	4,41	4,19
22-mai-12	23,77		2,52	2,29		0,33	0,36	4,43	3,95
22-juin-12			2,65	2,68	0,64	0,36	0,12	4,73	4,28
30-juil.-12			3,14	3,00	0,64	0,35	0,71	4,96	4,55
24-août-12			3,20	3,02	0,60	0,37	1,30	5,23	4,40

Annexe 3A

Nombre	La Cocha 1/ Alangasí 1	La Cocha 3/ Alangasí 3	La Merced	Pozo 5 Naval	El Tingo Nuevo	Ilaló	Los Arupos	San Germán	Lasallinos
ID	C152	C154	I106	I105	I102	I201	C156	C164	C158
26-sept.-12			3,01	2,78	0,62	0,35	0,12	5,42	4,40
26-oct.-12			2,39	2,29	0,63	0,37	0,46	5,53	4,31
Moyenne	28,34	20,42	2,38	2,31	0,62	0,33	0,59	4,83	4,28
Max	45,34	20,42	3,20	3,16	0,64	0,37	3,38	5,60	6,43
Min	15,90	20,42	1,50	1,33	0,60	0,12	0,10	3,87	2,22
ET	15,24		0,57	0,63	0,02	0,08	0,99	0,49	1,04
% données manq	-	-	0%	12%	0%	0%	6%	0%	6%

ANNEXE 3B

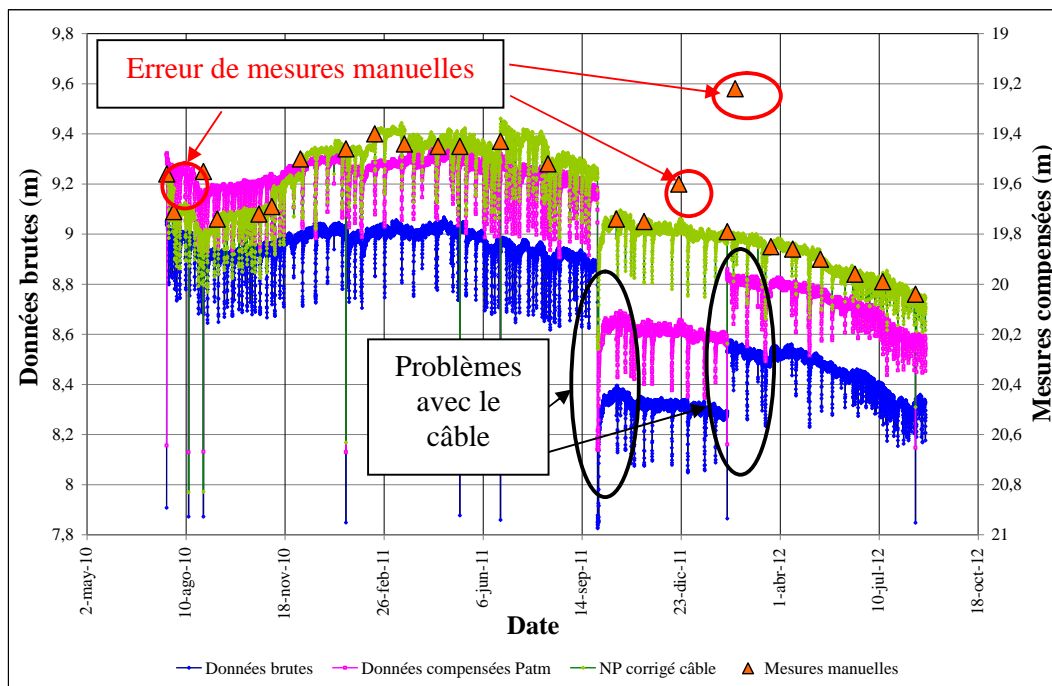


Figure 7. Mesures automatiques de la sonde Diver dans le forage « Patagua » du 21 juillet 2010 au 25 août 2012 (bleu : données brutes ; rose : données compensées transformées en m ; orange : données corrigées en fonction de l'erreur sur la longueur du câble ; vert : mesures manuelles).

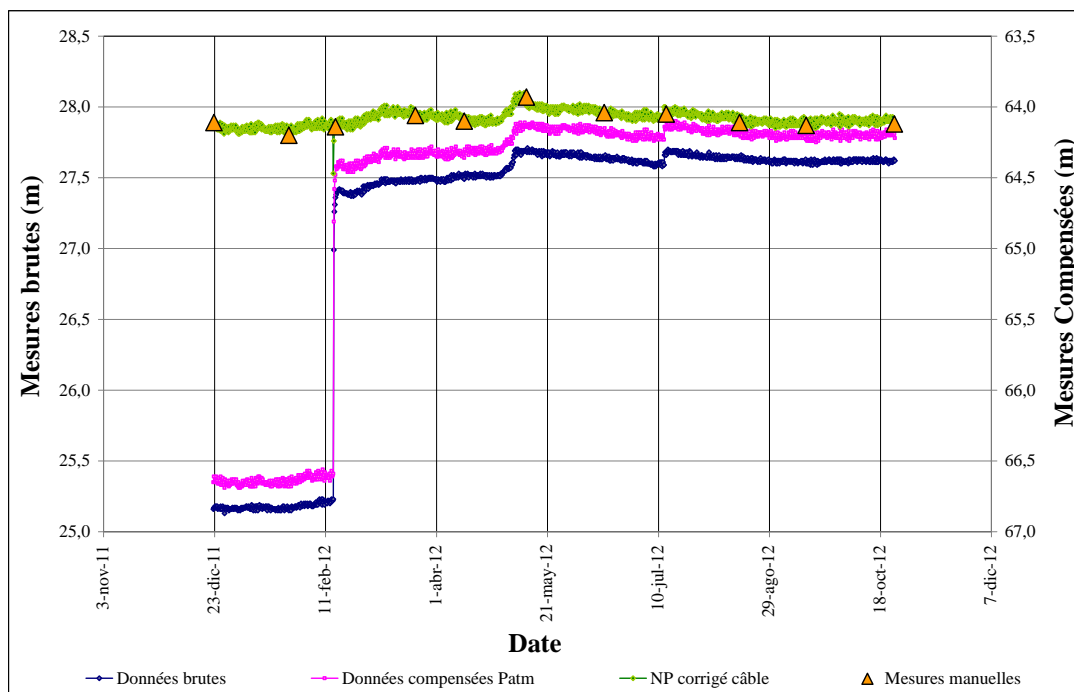


Figure 8. Mesures automatiques de la sonde Diver dans le forage « El Carrizal » du 22 décembre 2011 au 24 octobre 2012 (bleu : données brutes ; rose : données compensées transformées en m ; vert : données corrigées sur la longueur du câble et orange : mesures manuelles).

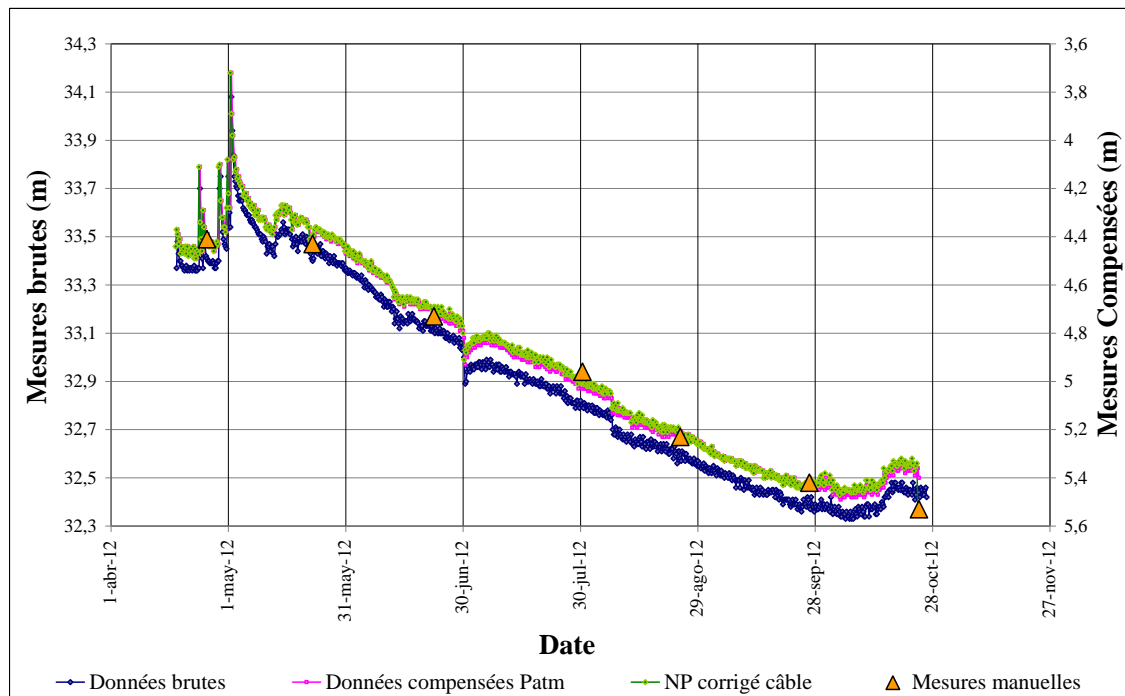


Figure 9. Mesures automatiques de la sonde Diver dans le forage « San Germán » du 4 avril 2012 au 26 octobre 2012 (bleu : données brutes ; rose : données compensées transformées en m ; vert : données corrigées sur la longueur du câble ; orange mesures manuelles).

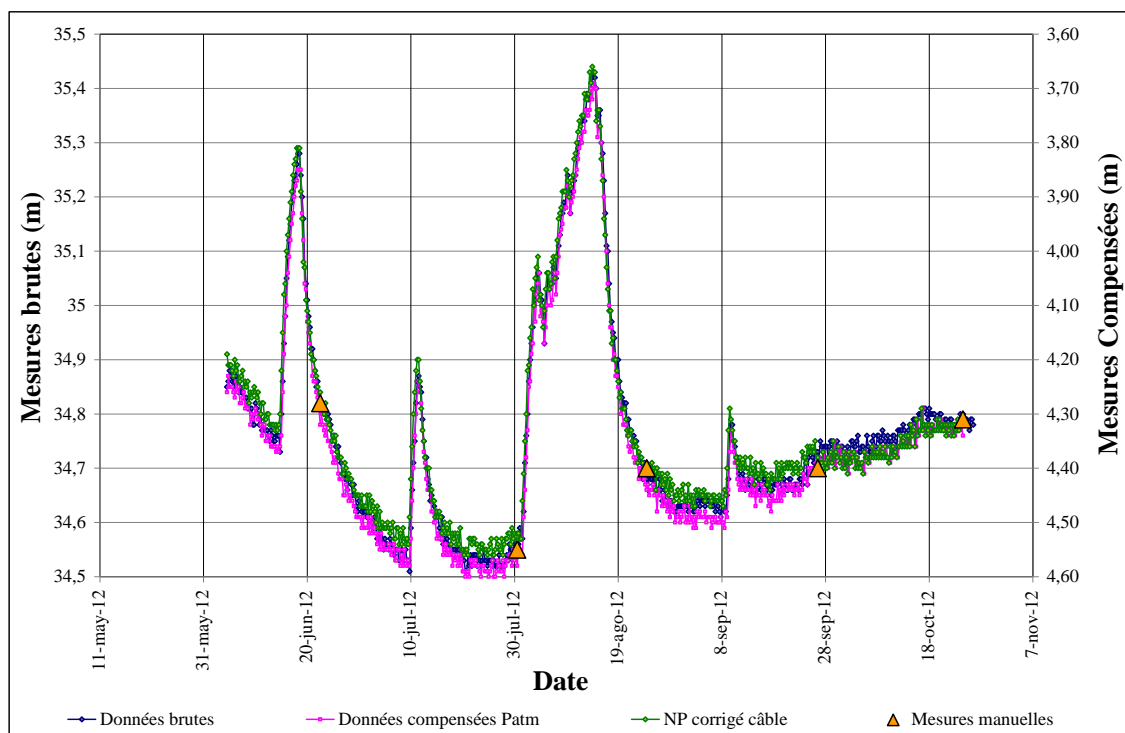


Figure 10. Mesures automatiques de la sonde Diver dans le forage « Lasallinos » du 4 juin 2012 au 26 octobre 2012 (bleu : données brutes ; rose : données compensées transformées en m ; vert : données corrigées sur la longueur du câble ; orange : mesures manuelles).

ANNEXE 3C

WELL ID: Santa Rosa

Local ID: Santa Rosa

Date: 29/08/2008

Time: 00:00

INPUT

Construction:	
Casing dia. (d_c)	0,2 Meter
Annulus dia. (d_w)	0,35 Meter
Screen Length (L)	66,5 Meter
Depths to:	
water level (DTW)	52,3 Meter
Top of Aquifer	52 Meter
Base of Aquifer	120 Meter
Annular Fill:	
across screen --	Medium Sand
above screen --	Bentonite
Aquifer Material -- Medium Sand	
FLOW RATE	9,71 liters/s

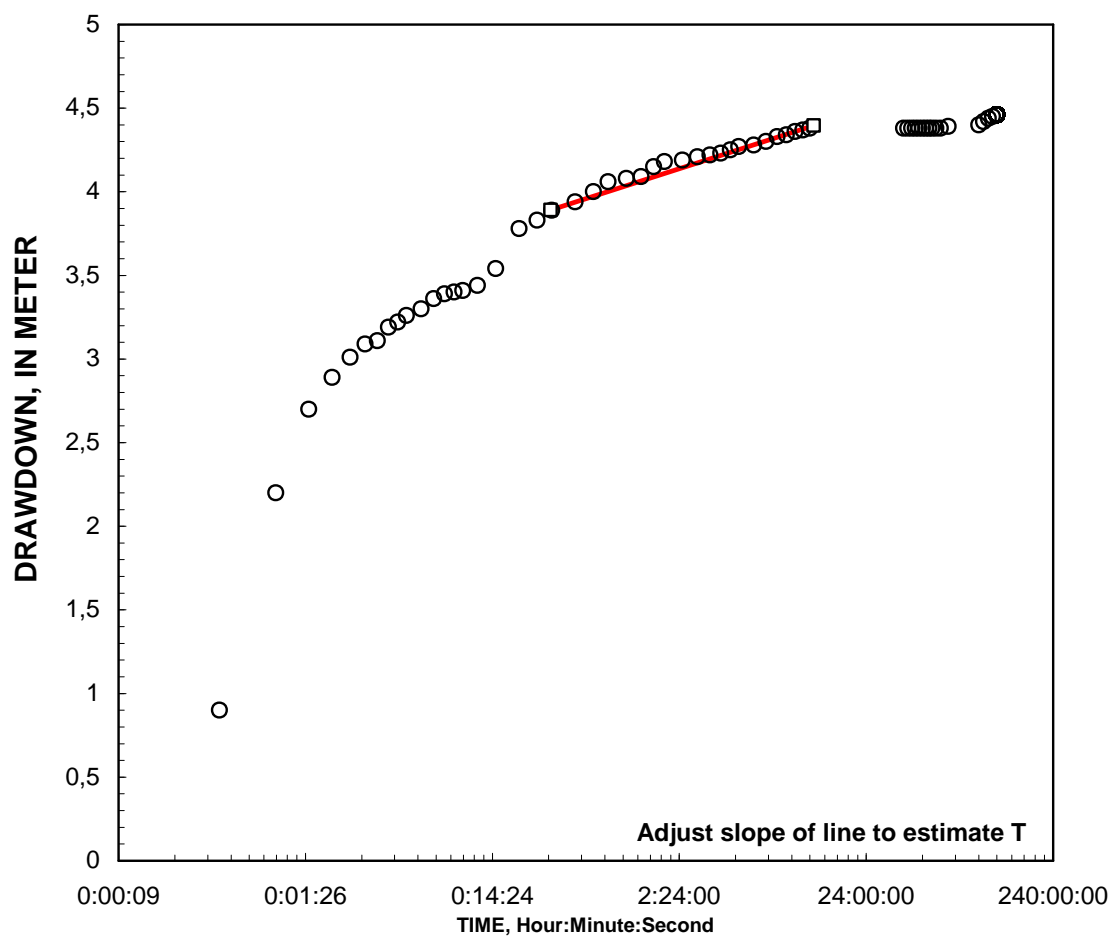
COMPUTED

Aquifer thickness = 68 Meter

Slope = 0,1095375 Meter/log10

Input is consistent.

K =	6,3 Meter/Day
T =	430 Meter ² /Day



REMARKS:

Cooper-Jacob analysis of single-well aquifer test

WELL ID: Pintag 2

Local ID: Pintag 2

Date: 31/01/2007

Time: 00:00

INPUT

Construction:	
Casing dia. (d_c)	0,25 Meter
Annulus dia. (d_w)	0,45 Meter
Screen Length (L)	84 Meter
Depths to:	
water level (DTW)	56,56 Meter
Top of Aquifer	46 Meter
Base of Aquifer	280 Meter
Annular Fill:	
across screen --	Medium Sand
above screen --	Bentonite
Aquifer Material -- Fine-Grained Sandstone	
FLOW RATE	10,7 liters/s

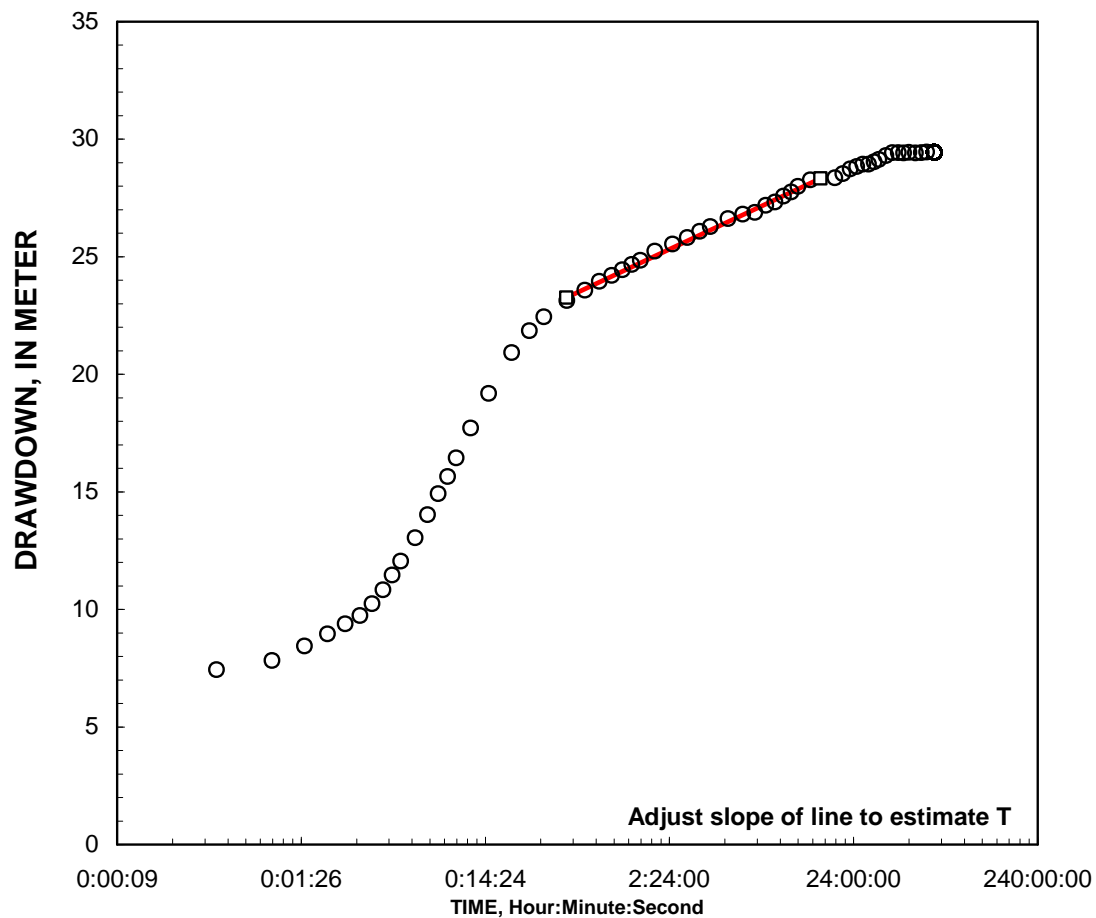
COMPUTED

Aquifer thickness = 223 Meter

Slope = 1,1198087 Meter/log10

Input is consistent.

K = 0,207 Meter/Day

T = 46,2 Meter²/Day

REMARKS:

Cooper-Jacob analysis of single-well aquifer test

WELL ID: La Primavera

Local ID: La Primavera

Date: 14/07/2010

Time: 00:00

INPUT

Construction:	
Casing dia. (d_c)	0,2 Meter
Annulus dia. (d_w)	0,35 Meter
Screen Length (L)	87 Meter
Depths to:	
water level (DTW)	29,4 Meter
Top of Aquifer	36,58 Meter
Base of Aquifer	179,83 Meter
Annular Fill:	
across screen --	Medium Sand
above screen --	Bentonite
Aquifer Material -- Medium-Grained Sand	
FLOW RATE	15 liters/s

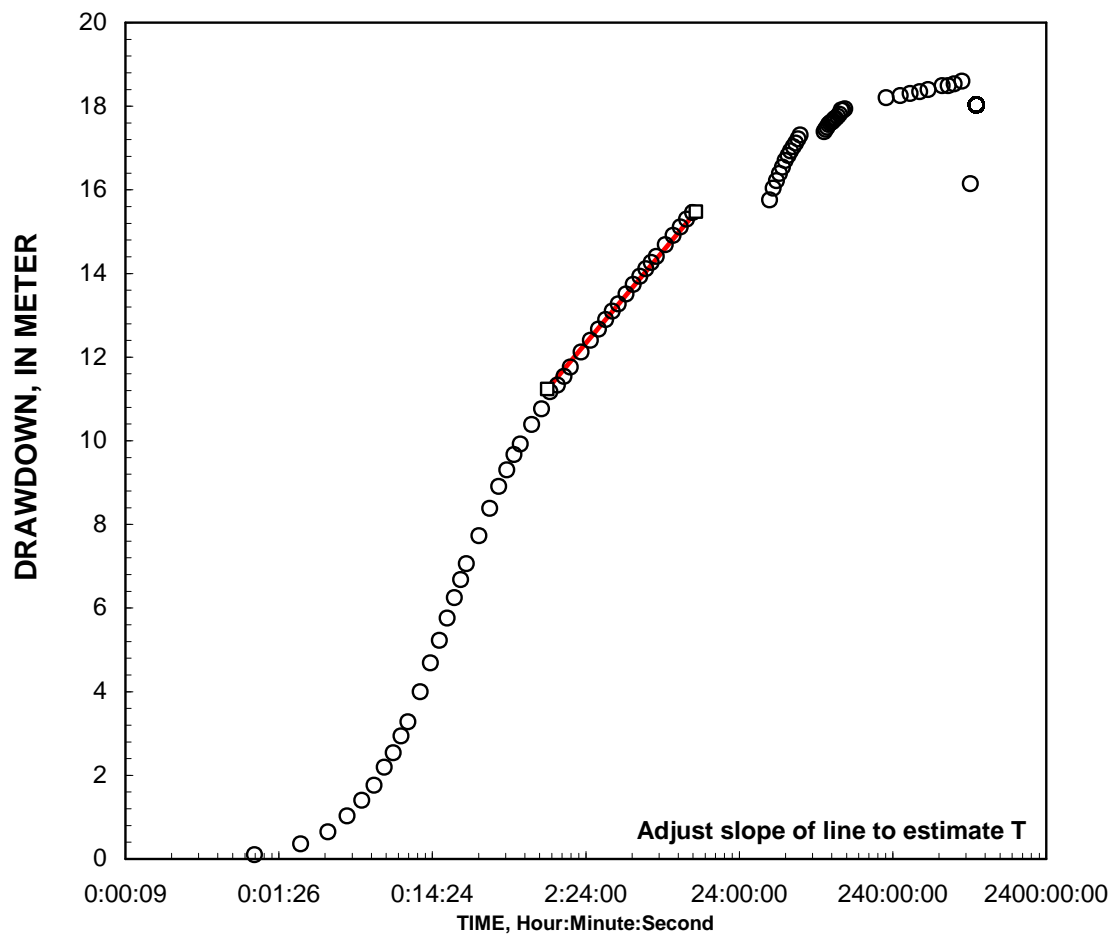
COMPUTED

Aquifer thickness = 140 Meter

Slope = 1,336455 Meter/log10

Input is consistent.

K = 0,38 Meter/Day

T = 54 Meter²/Day

REMARKS:

Cooper-Jacob analysis of single-well aquifer test

WELL ID: El Nacional

Local ID: El Nacional

Date: 07/11/2005

Time: 00:00

INPUT

Construction:	
Casing dia. (d_c)	0,2 Meter
Annulus dia. (d_w)	0,43 Meter
Screen Length (L)	60 Meter
Depths to:	
water level (DTW)	0 Meter
Top of Aquifer	3 Meter
Base of Aquifer	186 Meter
Annular Fill:	
across screen --	Medium Sand
above screen --	Bentonite
Aquifer Material -- Medium-Grained Sand	
FLOW RATE	16,6 liters/s

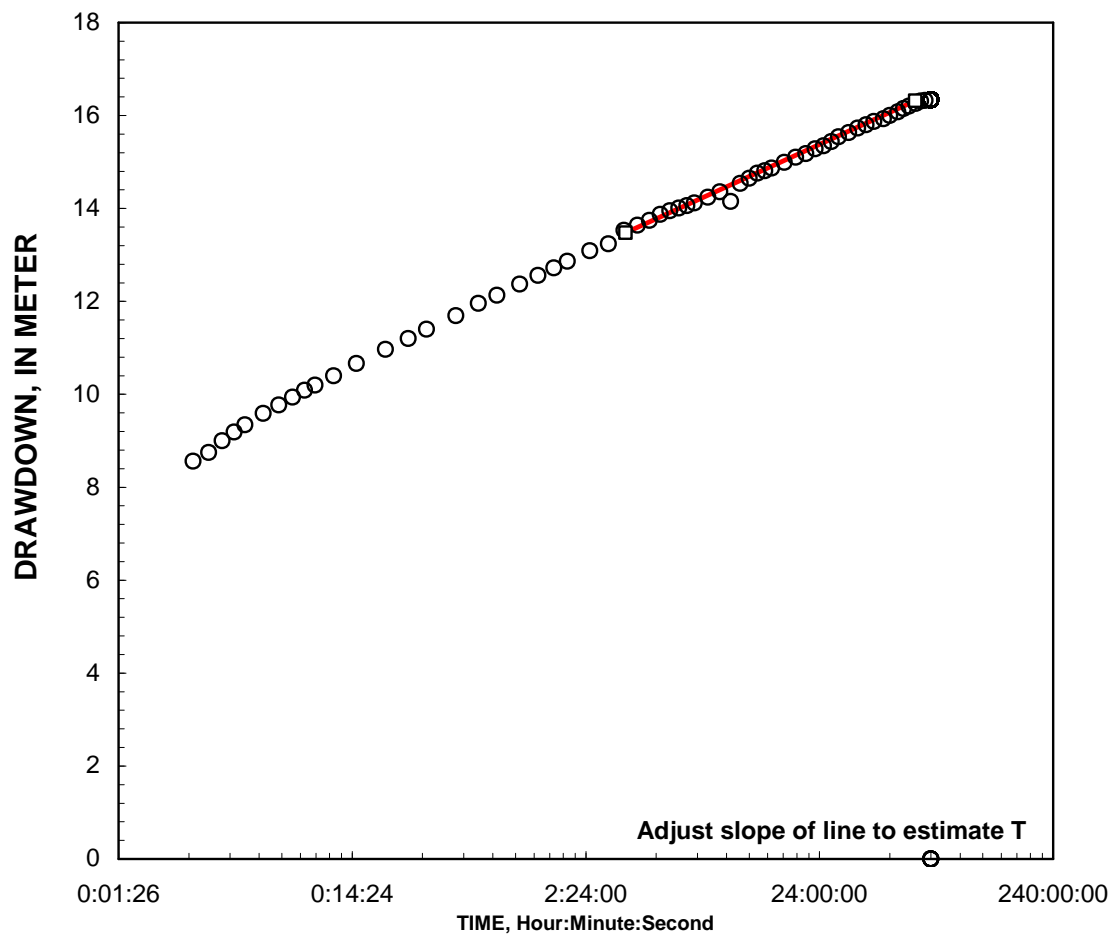
COMPUTED

Aquifer thickness = 180 Meter

Slope = 0,6980903 Meter/log10

Input is consistent.

K = 0,63 Meter/Day

T = 110 Meter²/Day

REMARKS:

Cooper-Jacob analysis of single-well aquifer test

WELL ID: Las Acacias

Local ID: HML-Augmentation

Date: 19/04/2000

Time: 00:00

INPUT

Construction:	
Casing dia. (d_c)	0,2 Meter
Annulus dia. (d_w)	0,35 Meter
Screen Length (L)	60 Meter
Depths to:	
water level (DTW)	90,22 Meter
Top of Aquifer	42,67 Meter
Base of Aquifer	227 Meter
Annular Fill:	
across screen --	Medium Sand
above screen --	Bentonite
Aquifer Material -- Medium-Grained Sand	
FLOW RATE	8,58 liters/s

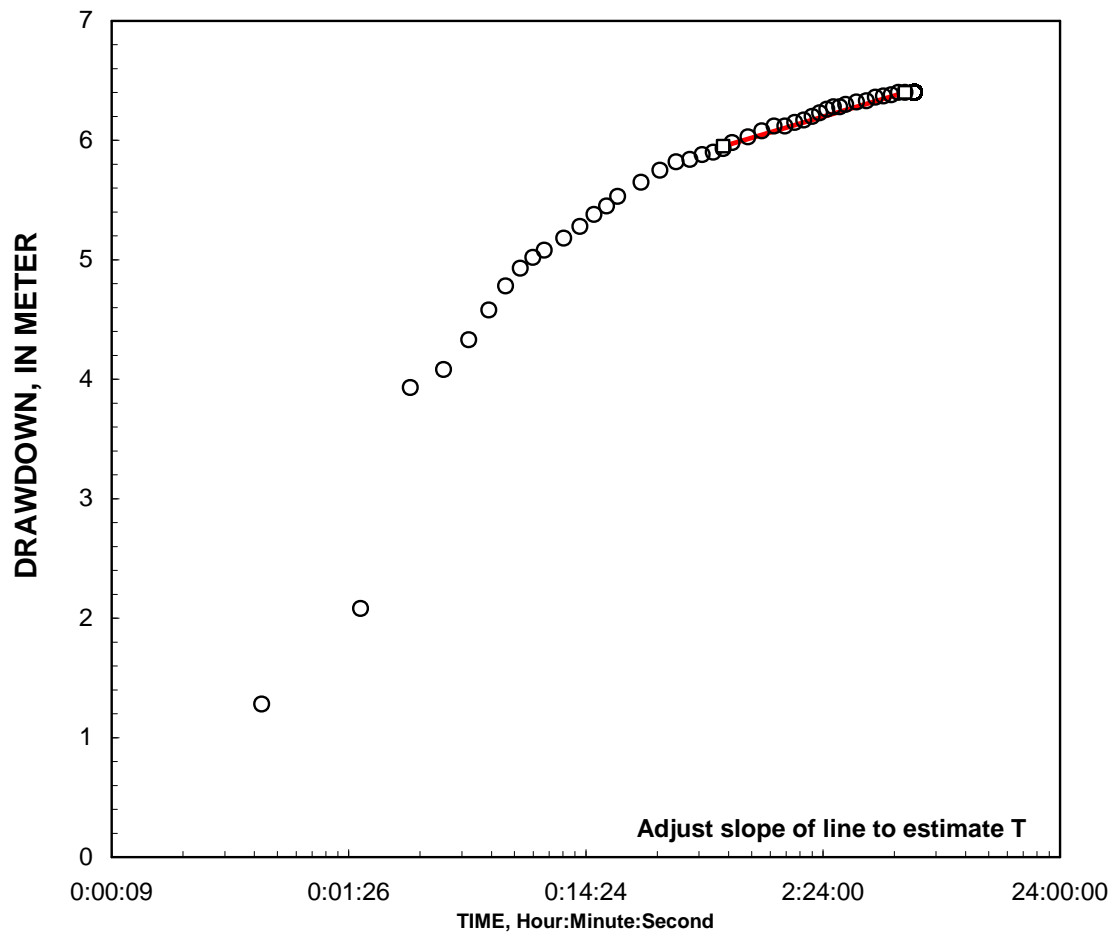
COMPUTED

Aquifer thickness = 140 Meter

Slope = 0,1788266 Meter/log10

Input is consistent.

K =	1,7 Meter/Day
T =	230 Meter ² /Day



REMARKS:

Cooper-Jacob analysis of single-well aquifer test

WELL ID: El Carrizal

Local ID: HML-Augmentation

Date: 19/04/2000

Time: 00:00

INPUT

Construction:	
Casing dia. (d_c)	0,2 Meter
Annulus dia. (d_w)	0,35 Meter
Screen Length (L)	25 Meter
Depths to:	
water level (DTW)	67 Meter
Top of Aquifer	45,72 Meter
Base of Aquifer	174 Meter
Annular Fill:	
across screen --	Medium Sand
above screen --	Bentonite
Aquifer Material -- Medium-Grained Sand	
FLOW RATE	8,09 liters/s

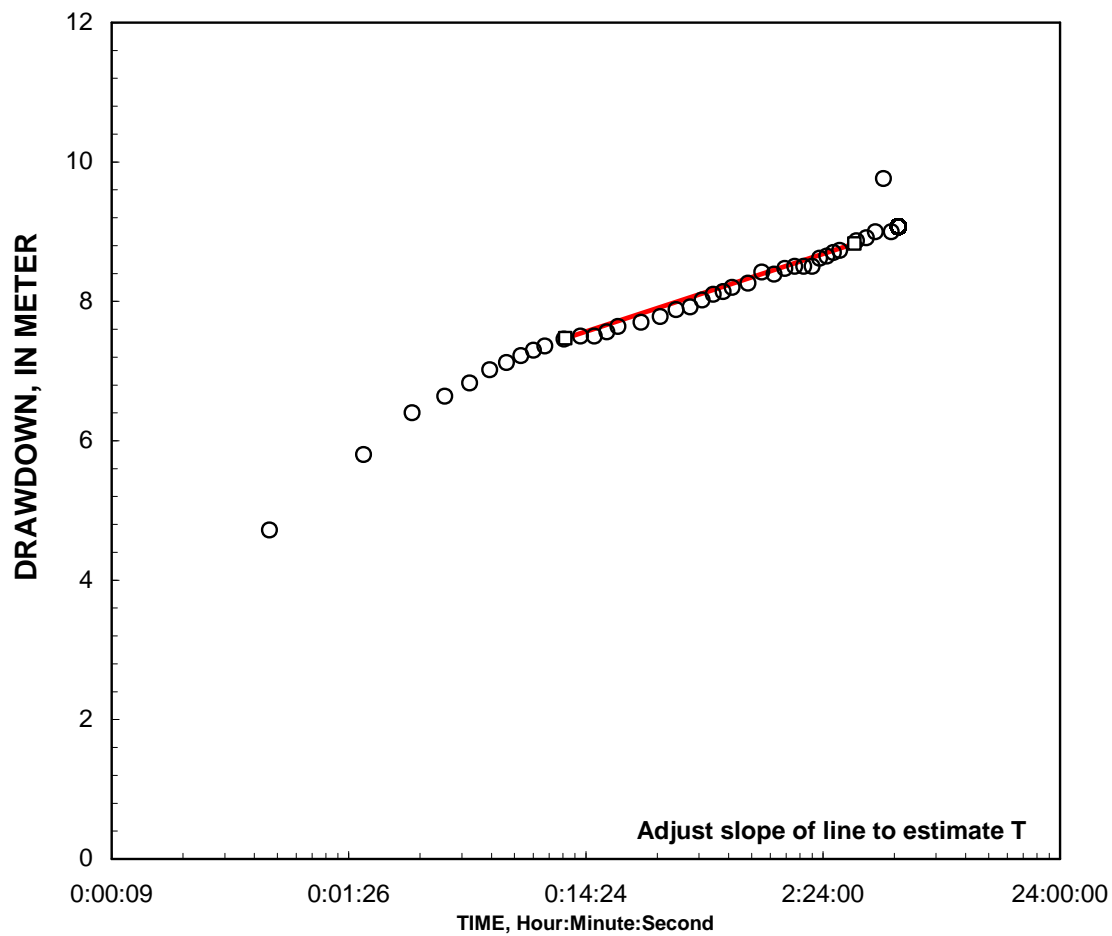
COMPUTED

Aquifer thickness = 110 Meter

Slope = 0,3400558 Meter/log10

Input is consistent.

K = 1,1 Meter/Day

T = 110 Meter²/Day

REMARKS:

Cooper-Jacob analysis of single-well aquifer test

WELL ID: Armenia 1

Local ID: Armenia 1

Date: 29/08/2008

Time: 00:00

INPUT

Construction:	
Casing dia. (d_c)	0,2 Meter
Annulus dia. (d_w)	0,35 Meter
Screen Length (L)	27,55 Meter
Depths to:	
water level (DTW)	0 Meter
Top of Aquifer	16 Meter
Base of Aquifer	66 Meter
Annular Fill:	
across screen --	Medium Sand
above screen --	Bentonite
Aquifer Material --	Medium Sand
FLOW RATE	21,17 liters/s

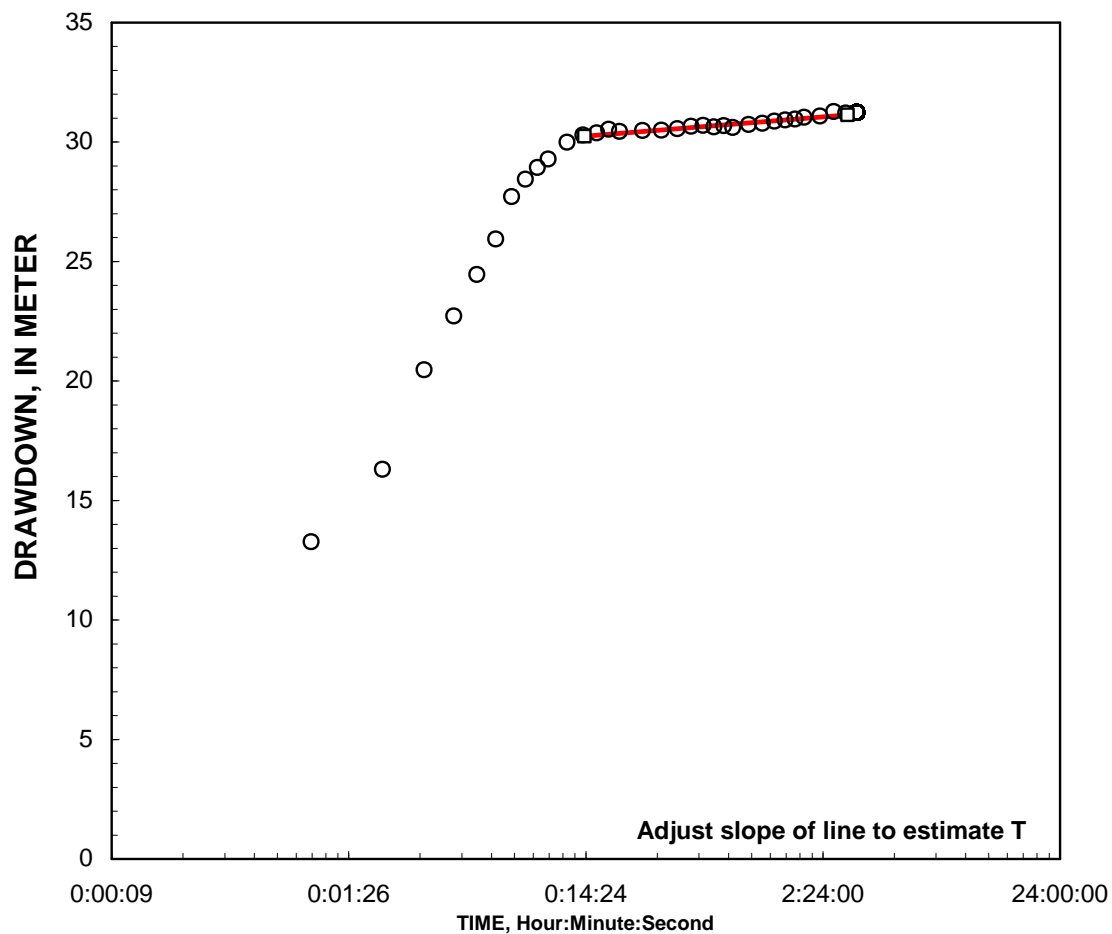
COMPUTED

Aquifer thickness = 50 Meter

Slope = 0,2471351 Meter/log10

Input is consistent.

K = 8,3 Meter/Day

T = 410 Meter²/Day

REMARKS:

Cooper-Jacob analysis of single-well aquifer test

WELL ID: Moya 1

Local ID: Moya 1

Date: 14/05/1981

Time: 00:00

INPUT

Construction:	
Casing dia. (d_c)	0,2 Meter
Annulus dia. (d_w)	0,35 Meter
Screen Length (L)	51 Meter
Depths to:	
water level (DTW)	7,9 Meter
Top of Aquifer	18,29 Meter
Base of Aquifer	121,92 Meter
Annular Fill:	
across screen --	Medium Sand
above screen --	Bentonite
Aquifer Material -- Medium-Grained Sand	
FLOW RATE	11,2 liters/s

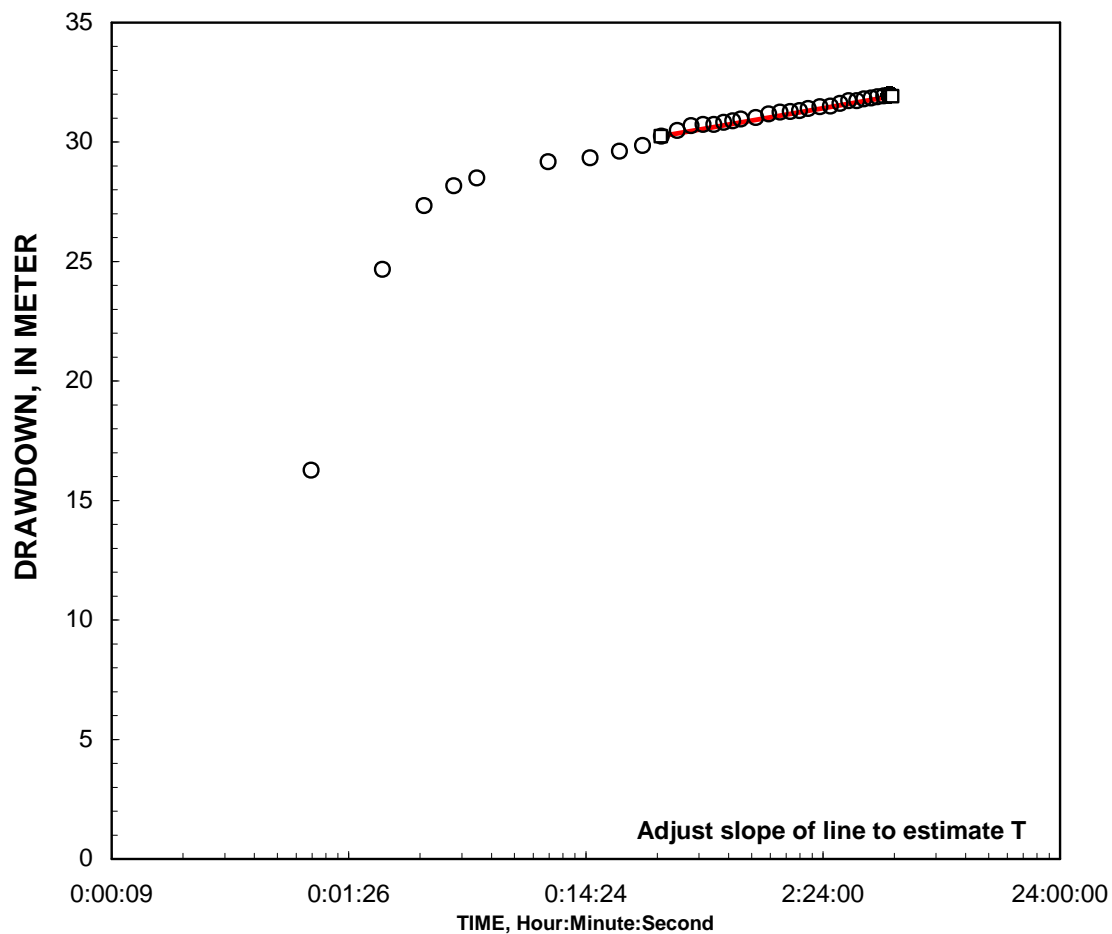
COMPUTED

Aquifer thickness = 100 Meter

Slope = 0,5246557 Meter/log10

Input is consistent.

K = 1 Meter/Day

T = 100 Meter²/Day

REMARKS:

Cooper-Jacob analysis of single-well aquifer test

WELL ID: Moya 3

Local ID: Moya 3

Date: 24/11/1980

Time: 00:00

INPUT

Construction:	
Casing dia. (d_c)	0,2 Meter
Annulus dia. (d_w)	0,35 Meter
Screen Length (L)	18 Meter
Depths to:	
water level (DTW)	4,7 Meter
Top of Aquifer	15,24 Meter
Base of Aquifer	106,68 Meter
Annular Fill:	
across screen --	Medium Sand
above screen --	Bentonite
Aquifer Material -- Medium-Grained Sand	
FLOW RATE	14 liters/s

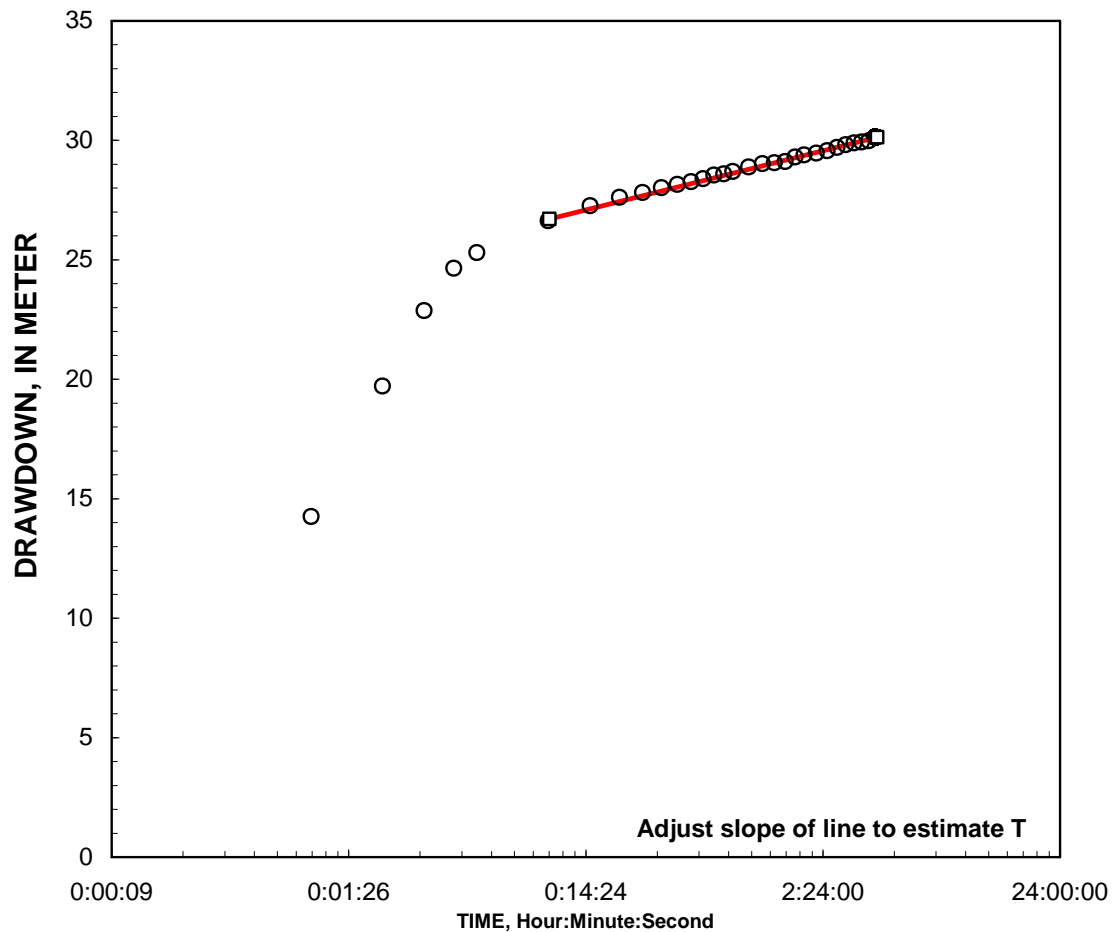
COMPUTED

Aquifer thickness = 91 Meter

Slope = 0,7542808 Meter/log10

Input is consistent.

K = 0,98 Meter/Day

T = 90 Meter²/Day

REMARKS:

Cooper-Jacob analysis of single-well aquifer test

WELL ID: Pintag 1

Local ID: Pintag 1

Date: 14/12/2005

Time: 00:00

INPUT

Construction:	
Casing dia. (d_c)	0,2 Meter
Annulus dia. (d_w)	0,35 Meter
Screen Length (L)	61 Meter
Depths to:	
water level (DTW)	61,3 Meter
Top of Aquifer	39,62 Meter
Base of Aquifer	225,88 Meter
Annular Fill:	
across screen --	Medium Sand
above screen --	Bentonite
Aquifer Material -- Medium-Grained Sand	
FLOW RATE	13,3 liters/s

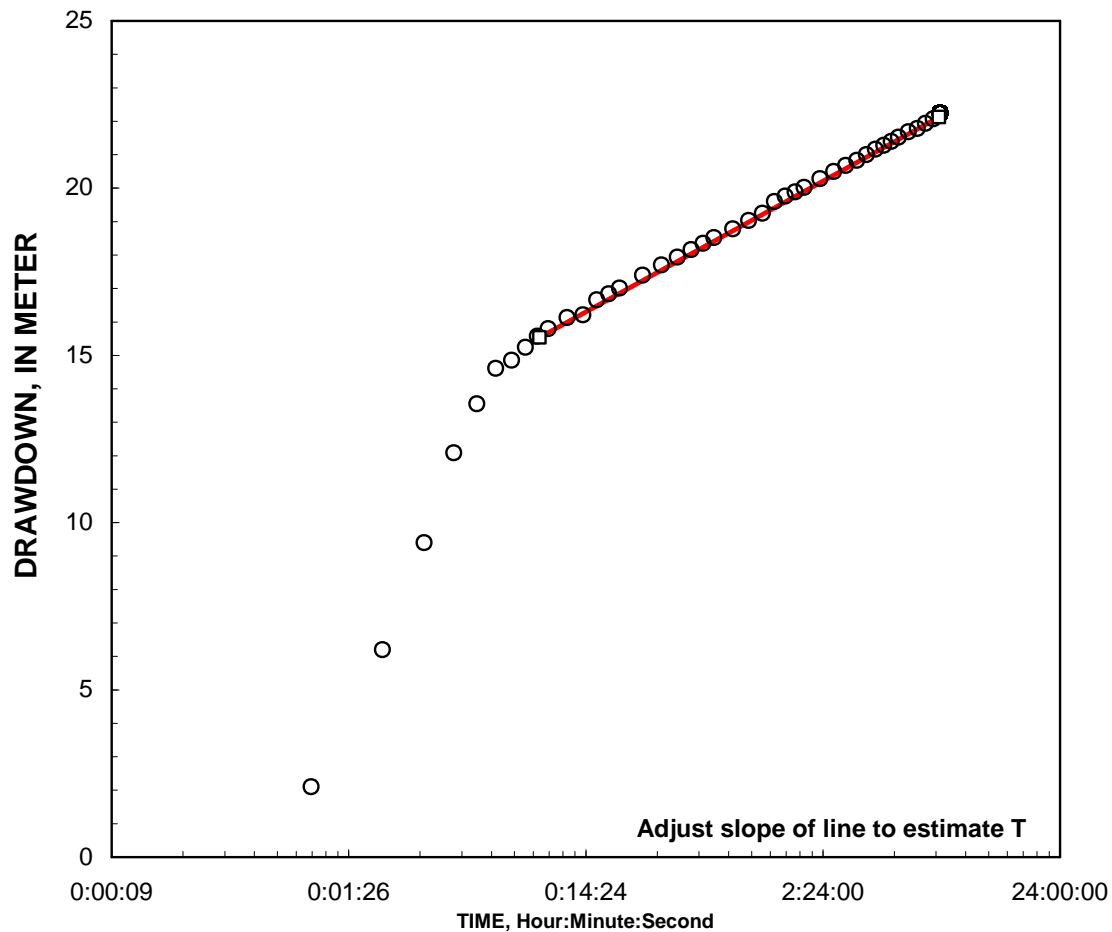
COMPUTED

Aquifer thickness = 160 Meter

Slope = 1,1909644 Meter/log10

Input is consistent.

K =	0,33 Meter/Day
T =	54 Meter ² /Day



REMARKS:

Cooper-Jacob analysis of single-well aquifer test

WELL ID: San Juan de Conocoto

Local ID: San Juan de Conocoto

Date: 20/07/1989

Time: 00:00

INPUT

Construction:	
Casing dia. (d_c)	0,2 Meter
Annulus dia. (d_w)	0,35 Meter
Screen Length (L)	42,43 Meter
Depths to:	
water level (DTW)	14,5 Meter
Top of Aquifer	21,3 Meter
Base of Aquifer	140,2 Meter
Annular Fill:	
across screen --	Medium Sand
above screen --	Bentonite
Aquifer Material -- Medium-Grained Sand	
FLOW RATE	18,67 liters/s

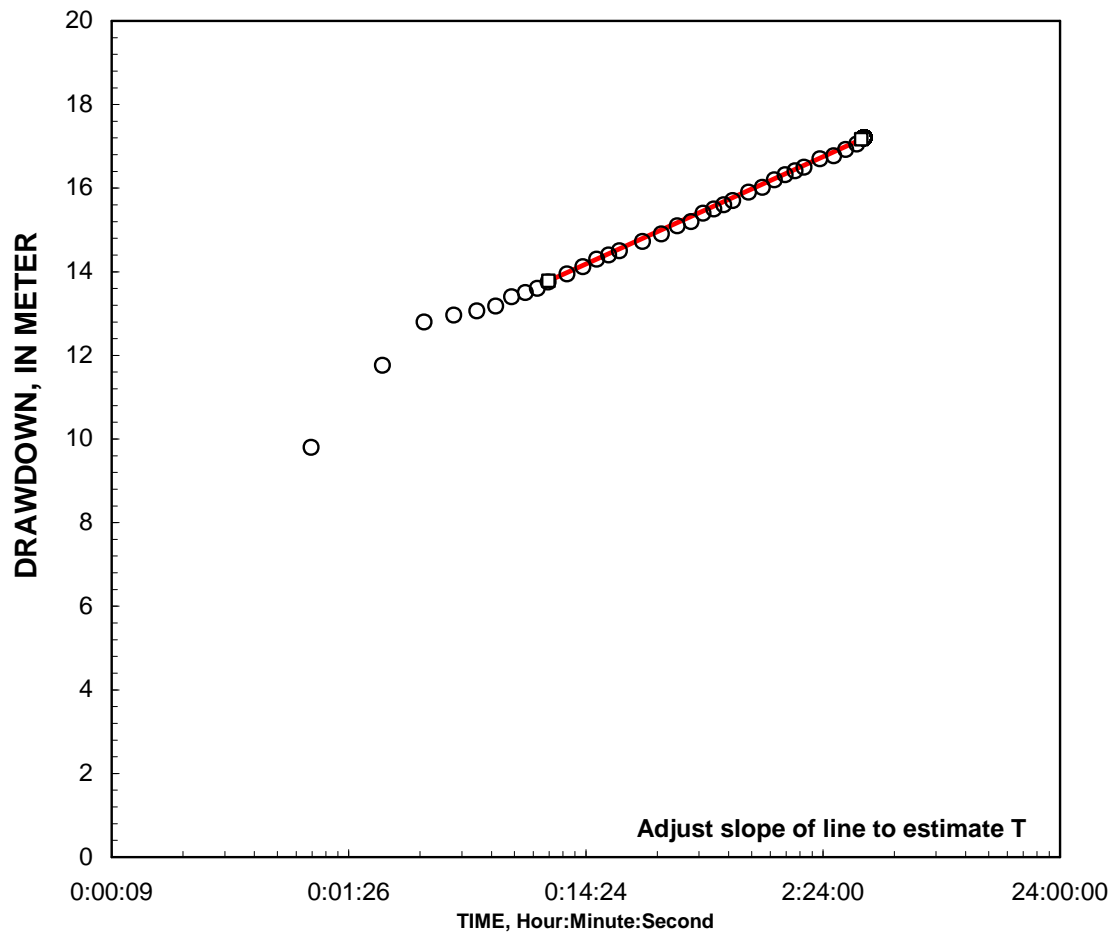
COMPUTED

Aquifer thickness = 120 Meter

Slope = 0,7833753 Meter/log10

Input is consistent.

K = 0,97 Meter/Day

T = 120 Meter²/Day

REMARKS:

Cooper-Jacob analysis of single-well aquifer test

WELL ID: Armenia 2

Local ID: Armenia 2

Date: 23/11/1982

Time: 00:00

INPUT

Construction:	
Casing dia. (d_c)	0,2 Meter
Annulus dia. (d_w)	0,35 Meter
Screen Length (L)	25,88 Meter
Depths to:	
water level (DTW)	0 Meter
Top of Aquifer	16 Meter
Base of Aquifer	62 Meter
Annular Fill:	
across screen --	Medium Sand
above screen --	Bentonite
Aquifer Material -- Medium-Grained Sand	
FLOW RATE	19,42 liters/s

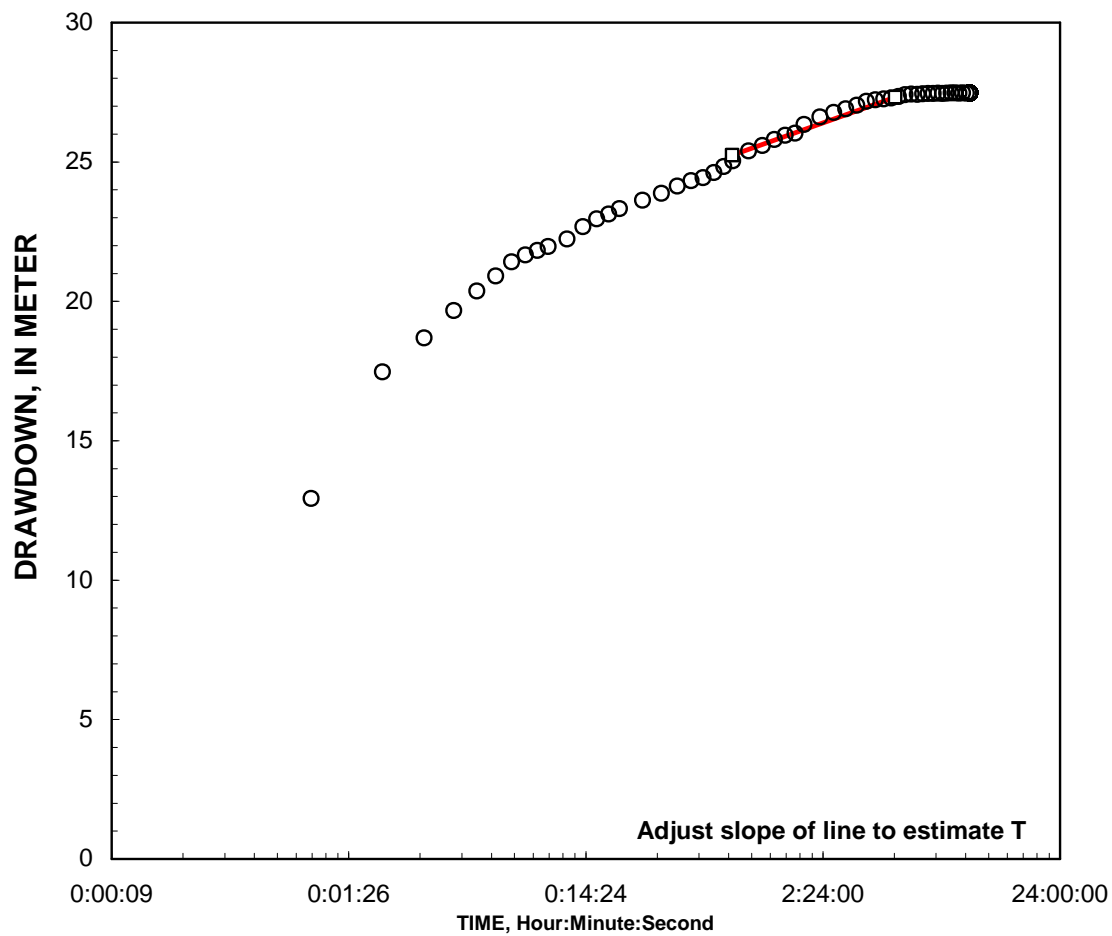
COMPUTED

Aquifer thickness = 46 Meter

Slope = 0,9272664 Meter/log10

Input is consistent.

K =	2,2 Meter/Day
T =	100 Meter ² /Day



REMARKS:

Cooper-Jacob analysis of single-well aquifer test

WELL ID: Ushimana 2

Local ID: Ushimana 2

Date: 05/09/1983

Time: 00:00

INPUT

Construction:	
Casing dia. (d_c)	0,2 Meter
Annulus dia. (d_w)	0,35 Meter
Screen Length (L)	15,27 Meter
Depths to:	
water level (DTW)	16,8 Meter
Top of Aquifer	27,43 Meter
Base of Aquifer	96,42 Meter
Annular Fill:	
across screen --	Medium Sand
above screen --	Bentonite
Aquifer Material -- Medium-Grained Sand	
FLOW RATE	4,51 liters/s

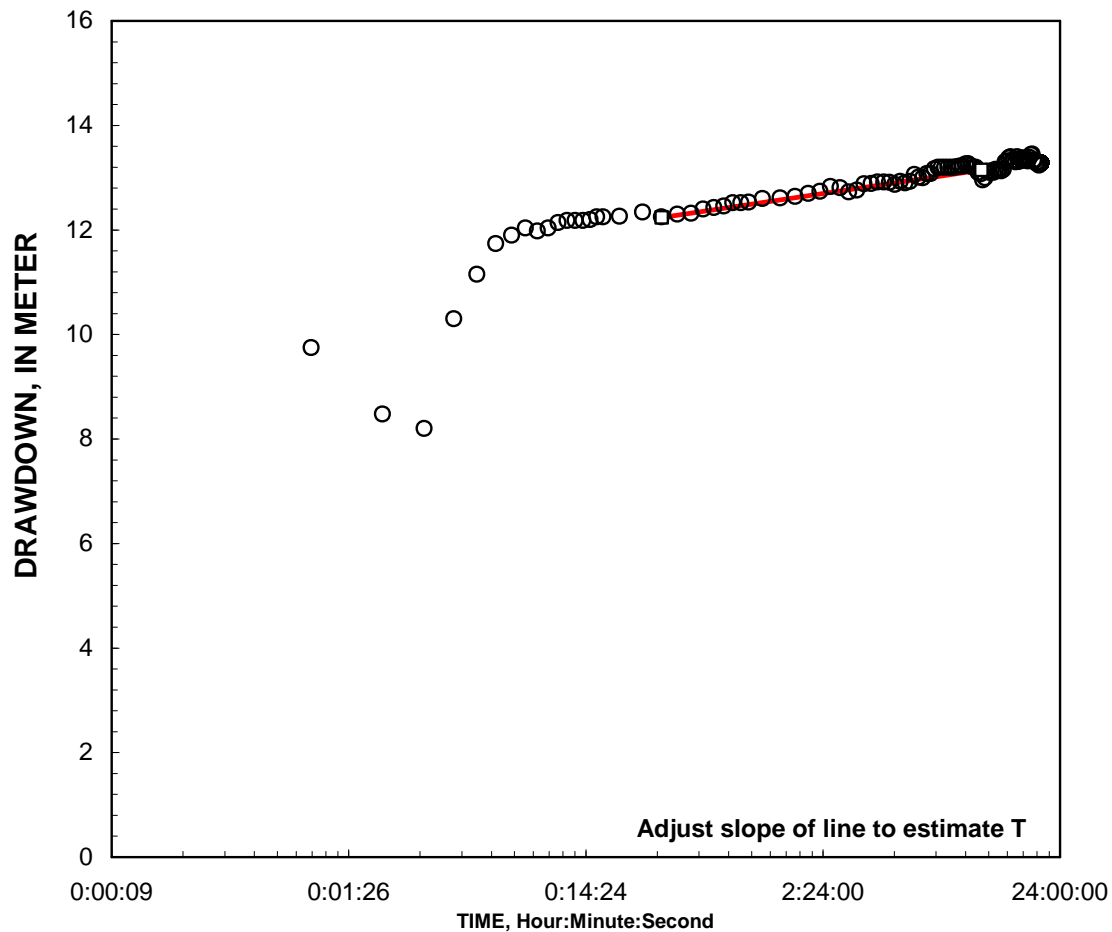
COMPUTED

Aquifer thickness = 69 Meter

Slope = 0,2056101 Meter/log10

Input is consistent.

K =	1,5 Meter/Day
T =	110 Meter ² /Day



REMARKS:

Cooper-Jacob analysis of single-well aquifer test

WELL ID: Planta de Tratamiento

Local ID: Planta de Tratamiento

Date: 27/11/1998

Time: 00:00

INPUT

Construction:	
Casing dia. (d_c)	0,2 Meter
Annulus dia. (d_w)	0,35 Meter
Screen Length (L)	45 Meter
Depths to:	
water level (DTW)	14,83 Meter
Top of Aquifer	146,3 Meter
Base of Aquifer	197 Meter
Annular Fill:	
across screen --	Medium Sand
above screen --	Bentonite
Aquifer Material -- Permeable Basalt	
FLOW RATE	19,05 liters/s

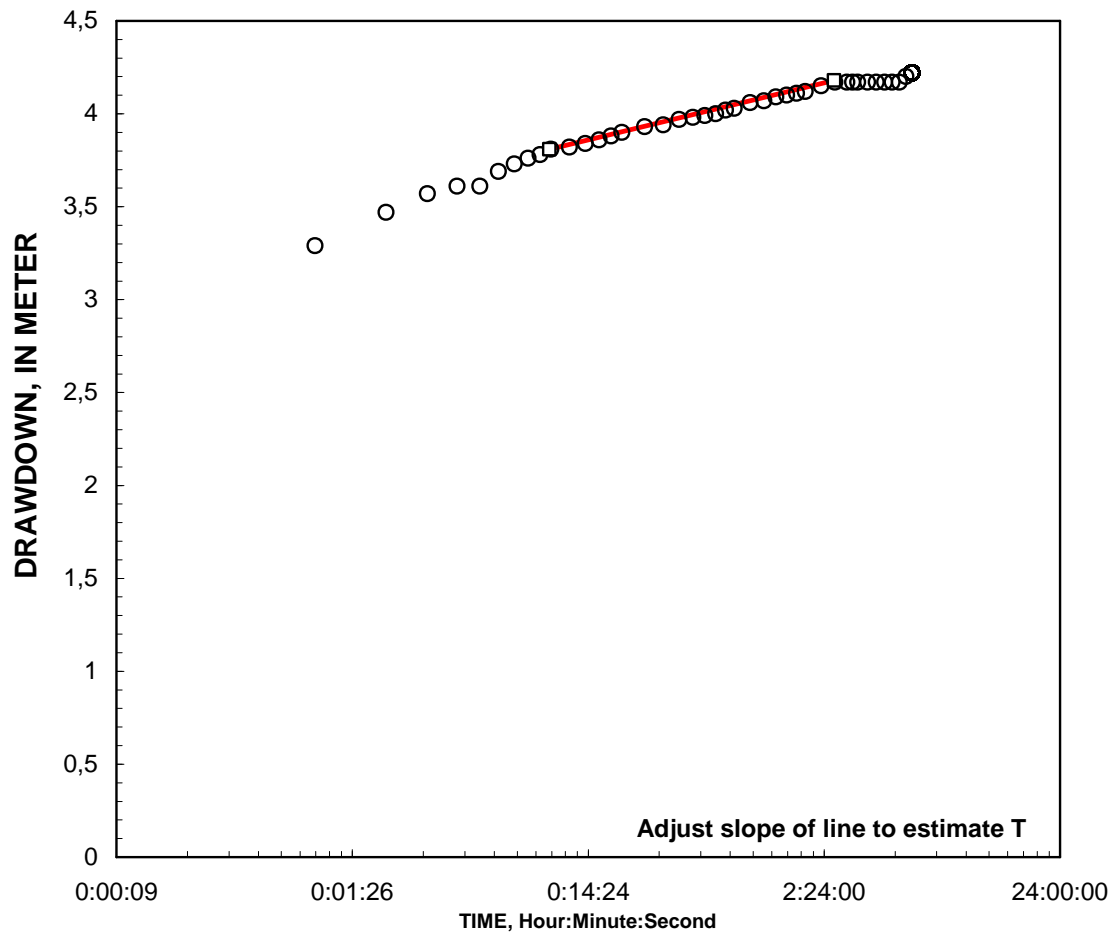
COMPUTED

Aquifer thickness = 51 Meter

Slope = 0,0931824 Meter/log10

Input is consistent.

K =	19 Meter/Day
T =	990 Meter ² /Day



REMARKS:

Cooper-Jacob analysis of single-well aquifer test

WELL ID: Rumihuayco 2

Local ID: Rumihuayco 2

Date: 25/09/1995

Time: 00:00

INPUT

Construction:	
Casing dia. (d_c)	0,2 Meter
Annulus dia. (d_w)	0,35 Meter
Screen Length (L)	76 Meter
Depths to:	
water level (DTW)	33,44 Meter
Top of Aquifer	33,53 Meter
Base of Aquifer	166,93 Meter
Annular Fill:	
across screen --	Medium Sand
above screen --	Bentonite
Aquifer Material -- Gravel	
FLOW RATE	18 liters/s

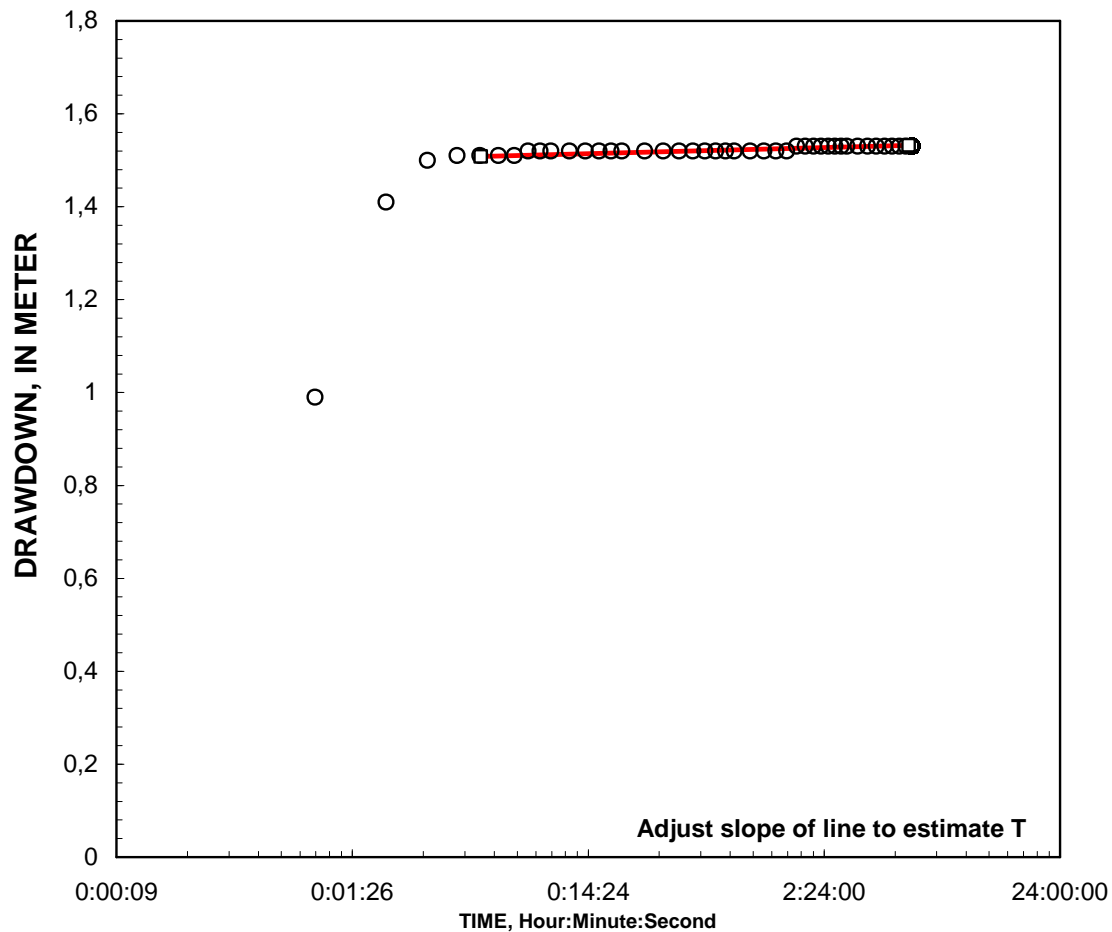
COMPUTED

Aquifer thickness = 130 Meter

Slope = 0,0040304 Meter/log10

Input is consistent.

K = 160 Meter/Day

T = 22000 Meter²/Day

REMARKS:

Cooper-Jacob analysis of single-well aquifer test

ANNEXE 3D

Tableau 4. Données de débits des sources mesurées par méthode capacitive. Les débits sont exprimés en l/s. Les données en jaune ont été calculées à partir des mesures de volume et de temps très peu probables ou elles sont des valeurs manquantes.

ID	C201A	C201B	C202	I201_1	I201_2	I203	I206	C206	I204
Sources	Las Chirimoyas 1A	Las Chirimoyas 1B	Las Chirimoyas 2	Cununyacu Int. 1	Cununyacu Int. 2	Cununyacu Ext.	Rumiloma 1	San Pedro	El Tingo Carrizal
25-févr.-11	5,65	7,62	3,93	5,99	1,69				
4-mars-11								0,30	1,22
6-avr.-11				8,14		19,44	4,57	0,25	2,20
20-mai-11	5,78	8,07	3,87	6,09	0,63		4,15	0,22	2,13
13-juil.-11	5,61	8,91	3,90	8,45	1,81		4,85	0,20	1,34
2-sept.-11	5,16	7,16	3,71	5,37			7,62	0,15	1,48
31-oct.-11	3,00	4,50	3,00	3,00			3,00	0,13	1,95
23-déc.-11	3,00	3,00	3,60	4,50				0,08	1,29
31-janv.-12	4,50	4,50	4,50				9,00	0,07	1,50
30-mars-12	6,59	6,76	4,64	7,41			6,35	0,04	1,33
1-juin-12	6,49	6,61	3,48	4,17			5,89		0,98
7-sept.-12	4,81	8,70	3,31	5,43		0,35	5,09		1,11
Moyenne	5,06	6,58	3,79	5,86	1,38	9,90	5,61	0,16	1,50
Max	6,59	8,91	4,64	8,45	1,81	19,44	9,00	0,30	2,20
Min	3,00	3,00	3,00	3,00	0,63	0,35	3,00	0,04	0,98
ET	1,27	1,97	0,50	1,76	0,65	13,50	1,84	0,09	0,41
% vides	17%	17%	17%	17%	75%	83%	25%	25%	8%

ANNEXE 3E

Tableau 5. Données de conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de forages et piézomètres sur l'aquifère Chiche nord et Ilaló nord (cellules en vert). Les cellules en jaunes correspondent aux données manquantes.

ID	C106	C103	C102	C104	C105	M303	M303_1	M305	I104	C107_1	M302
Nom	San Patricio	El Carrizal	Cementerio	La Esperanza MICEI	Patagua	Primavera 1	Primavera 1-Pz	Rumihuayco 1	Rumihuayco 2	Santa Rosa-Pz	El Nacional
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Piézomètre	Forage	Forage	Piézomètre	Forage
16-févr.-11	536	717	615	576	779	438	745	446	1000	803	1272
18-mars-11	559	730	633	602	766	436	589	491	1034	824	1279
21-avr.-11	586	715	645	569	738	434	585	482	841	834	1283
13-mai-11	541	785	630	569	734	500	594	370	480	807	1278
23-juin-11	475	721	636	584	718	437	579	444	824	794	1275
10-août-11	507	711	640	556	726	447	601	427	897	803	1274
18-oct.-11	517	791	630	522	677	435		381	1091		
15-nov.-11	542	720	630	480	627	430		396	889		1281
20-déc.-11	481	646	560	522	585	388		336	549		1252
25-janv.-12	480	649	552	453	652	607		258	334	728	1337
15-févr.-12											
23-mars-12	472	615	562		673	387		306	1447	713	1353
13-avr.-12											
11-mai-12	554	718	625		765	422	593	355	1013	794	1271
15-juin-12	540	713	594		770	410	546	927	970	815	1224
13-juil.-12	502	694	533	554	710	395	537	451	870	735	1179
15-août-12	462	674	559		773	399	527	395	908	764	1154
14-sept.-12	439	668	546	624	692	388		329	897	706	1117
Moyenne	512	704	599	551	712	435	590	425	878	778	1255

Annexe 3E

ID	C106	C103	C102	C104	C105	M303	M303_1	M305	I104	C107_1	M302
Nom	San Patricio	El Carrizal	Cementerio	La Esperanza MICEI	Patagua	Primavera 1	Primavera 1-Pz	Rumihuayco 1	Rumihuayco 2	Santa Rosa-Pz	El Nacional
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Piézomètre	Forage	Forage	Piézomètre	Forage
Max	586	791	645	624	779	607	745	927	1447	834	1353
Min	439	615	533	453	585	387	527	258	334	706	1117
ET	41	47	40	49	57	54	61	149	259	44	63
% vides	0%	0%	0%	25%	0%	0%	38%	0%	0%	19%	6%

Tableau 6. Données de conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de forages et piézomètres sur l'aquifère Chiche sud et Ilaló sud (cellules en vert) Les cellules en jaunes correspondent aux données manquantes.

ID	C153	C152	C154	I106	I105	I102	I201	M301	C156	C151	C158
Nom	La Cocha 2 Alangasí 2	La Cocha 1 Alangasí 1	La Cocha 3 Alangasí 3	La Merced	Pozo 5 Naval	El Tingo Nuevo	Ilaló	VCH 1	Los Arupos	Acosta Soberón	Lasallinos
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Source	Forage	Forage	Forage	Forage
3-févr.-11	383	427		1090	1133	3140		1354	389	383	
16-mars-11	406	462	469	1092	1126	3120		1351	389	381	
20-avr.-11	384	398	389	1101	1137	3140		1347	397	379	
18-mai-11	416	397	407	1097	1136	3160		1347	384	383	
8-juil.-11	466	400	424	1098	1123	3180	1700	1341	382	381	
22-août-11	464	396	418	1085	1117	3150	1663	1133	384	387	
26-oct.-11		451	443	1095	1171	3150	1691	1322	383	383	
18-nov.-11	417	395	415	1085	1119	3150	1642	1312	385	376	
22-déc.-11	407	370	358	1124	1160	3520	1741	1220	338	333	
27-janv.-12	448			1119	1144	3173	1707	1339		406	347
24-févr.-12	427			1072	1128	3019	1573	1319			
29-mars-12	434			1116	1169	3198	1726	1339		381	339

Annexe 3E

ID	C153	C152	C154	I106	I105	I102	I201	M301	C156	C151	C158
Nom	La Cocha 2 Alangasí 2	La Cocha 1 Alangasí 1	La Cocha 3 Alangasí 3	La Merced	Pozo 5 Naval	El Tingo Nuevo	Ilaló	VCH 1	Los Arupos	Acosta Soberón	Lasallinos
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Source	Forage	Forage	Forage	Forage
25-avr.-12	434		430	1085	1121	3090	1634	1327	380	383	332
22-mai-12	424	401	474	1088	1114	2984	1632	1282	372	372	315
22-juin-12		424		1018	1062	3140	1644	1245	355	436	330
30-juil.-12	408	397	398		1082	3140	1626	1253	334	358	309
24-août-12	392	352	343	982	1019	3030	1544	1151	323	331	310
26-sept.-12	360	362	311	1026	1099	3050	1559	1163	340	331	293
23-oct.-12			311	973	1002	3060	1549	1087		326	
Moyenne	417	402	399	1075	1114	3136	1642	1275	369	373	322
Max	466	462	474	1124	1171	3520	1741	1354	397	436	347
Min	360	352	311	973	1002	2984	1544	1087	323	326	293
ET	29	31	52	45	45	110	64	85	24	28	18
% vides	16%	26%	26%	5%	0%	0%	21%	0%	21%	5%	58%

Tableau 7. Données de conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de sources sur l'aquifère Chiche et Ilaló (cellules en vert). Les cellules en jaunes correspondent aux données manquantes.

ID	C201A	C201B	C202	I201_1	I201_2	I203	I206	I208	I204	C206
Source	Las Chirimoyas 1A	Las Chirimoyas 1B	Las Chirimoyas 2	Cununyacu Int. 1	Cununyacu Int. 2	Cununyacu Ext.	Rumiloma 1	Rumiloma 3	El Tingo Carrizal	San Pedro
25-févr.-11	595	595	620	1056	1063	991	1033			
4-mars-11								1098	1971	722
6-avr.-11				1061		995	954	1115	1963	725
20-mai-11	595	595	617	1075		997	993	1114	1969	731
13-juil.-11	600	600	621	1060	1073		1002	1085	1986	724

Annexe 3E

ID	C201A	C201B	C202	I201_1	I201_2	I203	I206	I208	I204	C206
Source	Las Chirimoyas 1A	Las Chirimoyas 1B	Las Chirimoyas 2	Cununyacu Int. 1	Cununyacu Int. 2	Cununyacu Ext.	Rumiloma 1	Rumiloma 3	El Tingo Carrizal	San Pedro
2-sept.-11	599	599	681	1058			984	1009	1978	705
31-oct.-11	614	614	603				1022	996		714
23-déc.-11	549	549	563	1026				972	2080	649
31-janv.-12	551	551	567				1060	942	2450	640
30-mars-12	592	592		1143			1022	1048	2440	675
1-juin-12	550	550	566	1088			1074	1035	2490	620
7-sept.-12	542	542	564	932		882	909	1002	1855	667
Moyenne	579	579	600	1055	1068	966	1005	1038	2118	688
Max	614	614	681	1143	1073	997	1074	1115	2490	731
Min	542	542	563	932	1063	882	909	942	1855	620
ET	27	27	40	56	7	56	49	59	242	40
% vides	17%	17%	25%	25%	83%	67%	17%	8%	17%	8%

Tableau 8. Données de pH de forages et piézomètres sur l'aquifère Chiche nord et Ilaló nord (cellules en vert). Les cellules en jaunes correspondent aux données manquantes.

ID	C106	C103	C102	C104	C105	M303	M303_1	M305	I104	C107_1	M302
Nom	San Patricio	El Carrizal	Cementerio	La Esperanza MICEI	Patagua	Primavera 1	Primavera 1-Pz	Rumihuayco 1	Rumihuayco 2	Santa Rosa-Pz	El Nacional
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Piézomètre	Forage	Forage	Piézomètre	Forage
16-févr.-11	7,45	7,92	7,65	8,27	7,37	8,66	7,57	7,65	7,16	7,80	7,31
18-mars-11	7,48	7,98	7,74	8,25	7,42	8,68	7,56	7,71	7,29	7,77	7,30
21-avr.-11	7,50	7,99	7,79	8,29	7,49	8,72	7,59	7,66	7,56	7,89	7,35

Annexe 3E

ID	C106	C103	C102	C104	C105	M303	M303_1	M305	I104	C107_1	M302
Nom	San Patricio	El Carrizal	Cementerio	La Esperanza MICEI	Patagua	Primavera 1	Primavera 1-Pz	Rumihuayco 1	Rumihuayco 2	Santa Rosa-Pz	El Nacional
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Piézomètre	Forage	Forage	Piézomètre	Forage
13-mai-11	7,54	8,04	7,82	8,36	7,48	8,76	7,63	7,57	7,70	7,78	7,37
23-juin-11	7,25	8,04	7,78	8,35	7,49	8,77	7,65	7,84	7,27	7,75	7,36
10-août-11	7,62	8,04	7,90	8,43	7,58	8,85	7,70	8,02	7,32	8,01	7,51
18-oct.-11	7,64	8,06	7,76	8,51	7,56	8,82		8,07	7,25		
15-nov.-11	7,47	8,29	7,71	8,41	7,45	8,74		7,79	7,15		7,43
20-déc.-11	7,56	8,05	7,74	8,09	7,49	8,83		8,04	7,53		7,39
25-janv.-12	7,45	7,94	7,80	8,55	7,47	8,76		8,17	8,18	7,70	7,35
15-févr.-12	7,05	8,19	7,50		7,82	8,78		8,70	8,30	7,71	7,23
13-avr.-12	7,25	7,70	7,51		6,95	9,04		7,90	7,28	7,47	7,37
11-mai-12									8,10		
15-juin-12	7,64	8,00	7,70		7,58	8,87	7,80	7,46	7,37	7,71	7,51
13-juil.-12	7,24	7,77	7,19	8,09	7,19	8,59	7,95	7,70	6,84	7,14	7,10
15-août-12	7,44	8,02	7,72	8,39	7,51	8,89	7,75	7,94	7,05	7,74	7,38
14-sept.-12	7,55	7,74	7,83	8,26	7,70	8,69		7,73	6,99	7,79	7,52
Moyenne	7,45	7,99	7,70	8,33	7,47	8,78	7,69	7,87	7,43	7,71	7,37
Max	7,64	8,29	7,90	8,55	7,82	9,04	7,95	8,70	8,30	8,01	7,52
Min	7,05	7,70	7,19	8,09	6,95	8,59	7,56	7,46	6,84	7,14	7,10
ET	0,17	0,15	0,17	0,14	0,20	0,11	0,13	0,30	0,42	0,21	0,11
% vides	0%	0%	0%	19%	0%	0%	44%	0%	0%	19%	6%

Annexe 3E

Tableau 9. Données de pH de forages et piézomètres sur l'aquifère Chiche sud et Ilaló sud (cellules en vert). Les cellules en jaunes correspondent aux données manquantes.

ID	C153	C152	C154	I106	I105	I102	I201	M301	C156	C151	C158
Nombre	La Cocha 2 Alangasí 2	La Cocha 1 Alangasí 1	La Cocha 3 Alangasí 3	La Merced	Forage 5 Naval	El Tingo Nuevo	Ilaló	VCH 1	Los Arupos	Acosta Soberón	Lasallinos
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Source	Forage	Forage	Forage	Forage
3-févr.-11	7,45	7,35		6,62	6,64	7,01		7,52	7,85	7,67	
16-mars-11	7,40	7,39	7,33	6,67	6,69	7,00		7,57	7,82	7,69	
20-avr.-11	7,67	7,41	7,54	6,73	6,72	7,06		7,60	7,84	7,70	
18-mai-11	7,42	7,54	6,80	6,76	6,75	7,05		7,59	7,84	7,73	
8-juil.-11	7,21	7,49	7,59	6,78	6,72	7,12	6,89	7,67	7,87	7,77	
22-août-11	7,48	7,67	7,56	6,93	6,82	7,14	6,95	7,73	7,99	7,84	
26-oct.-11		7,71	7,71	6,94	6,81	7,18	6,96	7,74	7,99	7,70	
18-nov.-11	7,48	7,42	7,54	6,69	6,62	7,10	6,79	7,65	7,86	7,56	
22-déc.-11	7,57	7,53	7,69	6,76	6,75	7,13	6,92	7,71	8,01	7,85	
27-janv.-12	7,44			6,69	6,70	7,06	6,92	7,57		7,71	7,88
24-févr.-12	7,56	7,53	7,62	7,31	7,07	7,43	7,37	7,49			
25-avr.-12	6,98		7,03	6,23	6,65	7,24	6,83	7,84	8,35	7,25	7,31
22-mai-12	7,34	7,04	7,42	6,62	6,81	6,98	6,90	7,52	7,79	7,62	8,02
22-juin-12		7,44	7,44	6,84	6,64	7,12	6,85	7,48	7,70	7,58	7,78
30-juil.-12	7,25	7,28	7,32		6,67	7,09	6,86	7,45	7,81	7,70	7,91
24-août-12	7,26	7,20	7,41	6,73	6,72	7,12	6,87	7,64	8,13	7,66	8,33
26-sept.-12	7,55	7,44	7,69	7,00	6,99	7,30	7,10	7,84	7,98	7,92	8,16
26-oct.-12			7,18	6,93	6,88	7,31	6,95	7,93	8,11	8,23	
Moyenne	7,40	7,43	7,43	6,78	6,76	7,14	6,94	7,64	7,93	7,72	7,91
Max	7,67	7,71	7,71	7,31	7,07	7,43	7,37	7,93	8,35	8,23	8,33

Annexe 3E

ID	C153	C152	C154	I106	I105	I102	I201	M301	C156	C151	C158
Nombre	La Cocha 2 Alangasí 2	La Cocha 1 Alangasí 1	La Cocha 3 Alangasí 3	La Merced	Forage 5 Naval	El Tingo Nuevo	Ilaló	VCH 1	Los Arupos	Acosta Soberón	Lasallinos
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Source	Forage	Forage	Forage	Forage
Min	6,98	7,04	6,80	6,23	6,62	6,98	6,79	7,45	7,70	7,25	7,31
ET	0,17	0,17	0,25	0,22	0,12	0,12	0,14	0,14	0,16	0,20	0,32
% vides	17%	17%	11%	6%	0%	0%	22%	0%	11%	6%	61%

Tableau 10. Données de pH de sources sur l'aquifère Chiche et Ilaló (cellules en vert). Les cellules en jaunes correspondent aux données manquantes.

ID	C201A	C201B	C202	I201_1	I201_2	I203	I206	I208	I204	C206
Source	Las Chirimoyas 1A	Las Chirimoyas 1B	Las Chirimoyas 2	Cununyacu Int. 1	Cununyacu Int. 2	Cununyacu Ext.	Rumiloma 1	Rumiloma 3	El Tingo Carrizal	San Pedro
25-févr.-11	7,96	7,96	8,00	7,36	7,33	7,41	7,88			
4-mars-11								7,70	7,36	7,55
6-avr.-11				7,40		7,37	7,94	7,69	7,32	7,67
20-mai-11	7,98	7,98	8,02	7,48		7,59	7,98	7,75	7,35	7,83
13-juil.-11	8,02	8,02	8,03	7,45	7,41		8,02	7,78	7,41	8,04
2-sept.-11	8,12	8,12	8,06	7,60			8,16	8,02	7,54	8,28
31-oct.-11	8,06	8,06	8,13	7,59			8,08	8,13	7,51	8,20
23-déc.-11	8,04	8,04	8,08	7,43				7,98	7,38	8,32
31-janv.-12	8,40	8,40	8,45				8,99	8,32	7,78	8,52
30-mars-12	7,62	7,62		7,33			7,75	7,81	7,25	6,75
1-juin-12	7,96	7,96	8,11	7,53			8,08	7,38	7,09	8,29
7-sept.-12	8,20	8,20	8,00	7,66		7,68	8,12	8,08	7,75	8,38
Moyenne	8,04	8,04	8,10	7,48	7,37	7,51	8,10	7,88	7,43	7,98

Annexe 3E

ID	C201A	C201B	C202	I201_1	I201_2	I203	I206	I208	I204	C206
Source	Las Chirimoyas 1A	Las Chirimoyas 1B	Las Chirimoyas 2	Cununyacu Int. 1	Cununyacu Int. 2	Cununyacu Ext.	Rumiloma 1	Rumiloma 3	El Tingo Carrizal	San Pedro
Max	8,40	8,40	8,45	7,66	7,41	7,68	8,99	8,32	7,78	8,52
Min	7,62	7,62	8,00	7,33	7,33	7,37	7,75	7,38	7,09	6,75
ET	0,20	0,20	0,14	0,11	0,05	0,15	0,34	0,26	0,20	0,51
% vides	17%	17%	25%	17%	83%	67%	17%	8%	8%	8%

Tableau 11. Données d'Eh (mV) de forages et piézomètres sur l'aquifère Chiche nord et Ilaló nord (cellules en vert). Les cellules en jaunes correspondent aux données manquantes.

ID	C106	C103	C102	C104	C105	M303	M303_1	M305	I104	C107_1	M302
Nom	San Patricio	El Carrizal	Cementerio	La Esperanza MICEI	Patagua	Primavera 1	Primavera 1-Pz	Rumihuayco 1	Rumihuayco 2	Santa Rosa-Pz	El Nacional
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Piézomètre	Forage	Forage	Piézomètre	Forage
16-févr.-11	175,3	148,2	163,8	128,3	180,6	105,7	168,6	162,8	192,6	154,2	183,5
18-mars-11	173,3	145,1	158,5	128,9	177,3	104,3	168,9	160,5	184,7	158,5	183,7
21-avr.-11	172,9	144,3	156,8	128,1	174,7	102,5	165,5	163,2	169,2	150,4	181,0
13-mai-11	170,8	142,6	154,2	123,5	173,7	99,9	164,5	168,8	160,1	155,8	179,6
23-juin-11	183,9	141,6	156,6	127,8	173,3	98,7	163,8	153,3	185,9	157,9	178,4
10-août-11	166,5	140,2	151,1	121,0	168,3	94,5	161,4	143,0	183,1	144,1	171,1
18-oct.-11	164,6	140,0	156,6	112,8	168,8	94,7		139,7	186,9		
15-nov.-11	161,4	115,8	145,9	105,8	160,8	87,2		141,8	177,2		163,2
20-déc.-11	151,9	124,6	140,0	122,3	155,5	80,6		124,9	154,0		161,0
25-janv.-12	160,5	130,8	139,8	100,6	159,5	86,4		121,8	118,5	147,4	165,9
15-févr.-12		132,0			156,8	91,7		101,4	124,5	167,7	188,6

Annexe 3E

ID	C106	C103	C102	C104	C105	M303	M303_1	M305	I104	C107_1	M302
Nom	San Patricio	El Carrizal	Cementerio	La Esperanza MICEI	Patagua	Primavera 1	Primavera 1-Pz	Rumihuayco 1	Rumihuayco 2	Santa Rosa-Pz	El Nacional
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Piézomètre	Forage	Forage	Piézomètre	Forage
13-avr.-12	182,7	157,8	148,2		185,5	76,0		139,5	177,2	166,4	166,3
11-mai-12									123,1		
15-juin-12	162,8	143,1	159,4		163,4	91,4	153,7	173,5	177,3	156,7	169,1
13-juil.-12	166,0	134,8	170,1	118,3	166,4	90,6	143,7	138,9	186,3	162,5	173,2
15-août-12	166,6	135,2	150,3	118,6	162,8	88,7	145,8	140,3	185,9	150,4	168,9
14-sept.-12	161,5	141,4	151,4	139,9	156,5			152,7	188,1	151,7	171,7
Moyenne	168,0	138,6	153,5	121,2	167,7	92,9	159,5	145,4	169,1	155,7	173,7
Max	183,9	157,8	170,1	139,9	185,5	105,7	168,9	173,5	192,6	167,7	188,6
Min	151,9	115,8	139,8	100,6	155,5	76,0	143,7	101,4	118,5	144,1	161,0
ET	8,6	9,8	8,2	10,4	9,1	8,5	9,5	18,9	24,6	7,0	8,3
% vides	6%	0%	6%	19%	0%	6%	44%	0%	0%	19%	6%

Tableau 12. Données d'Eh (mV) de forages et piézomètres sur l'aquifère Chiche sud et Ilaló sud (cellules en vert). Les cellules en jaunes correspondent aux données manquantes.

ID	C153	C152	C154	I106	I105	I102	I201	M301	C156	C151	C158
Nom	La Cocha 2 Alangasí 2	La Cocha 1 Alangasí 1	La Cocha 3 Alangasí 3	La Merced	Pozo 5 Naval	El Tingo Nuevo	Ilaló	VCH 1	Los Arupos	Acosta Soberón	Lasallinos
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Source	Forage	Forage	Forage	Forage
3-févr.-11	176,8	182,1		224,6	222,7	201,5		170,4	153,5	163,4	
16-mars-11	178,6	178,8	182,5	221,6	220,2	201,9		168,2	153,8	163,1	
20-avr.-11	163,9	178,2	170,4	217,3	218,5	196,7		166,6	153,5	163,6	
18-mai-11	177,6	169,5	187,5	216,4	216,6	198,5		165,0	153,1	162,7	

Annexe 3E

ID	C153	C152	C154	I106	I105	I102	I201	M301	C156	C151	C158
Nom	La Cocha 2 Alangasí 2	La Cocha 1 Alangasí 1	La Cocha 3 Alangasí 3	La Merced	Pozo 5 Naval	El Tingo Nuevo	Ilaló	VCH 1	Los Arupos	Acosta Soberón	Lasallinos
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Source	Forage	Forage	Forage	Forage
8-juil.-11	190,0	172,9	167,6	214,7	217,9	195,1	208,1	163,6	151,5	157,2	
22-août-11	173,2	167,1	163,0	213,0	212,8	193,3	204,6	159,3	145,3	153,1	
26-oct.-11		159,9	164,7	207,2	212,7	190,6	204,6	158,6	145,8	152,4	
18-nov.-11	159,5	162,8	156,6	203,2	208,1	179,8	197,9	150,2	138,4	153,4	
22-déc.-11	152,9	153,9	145,8	196,7	197,4	174,9	187,2	143,8	127,6	136,6	
27-janv.-12	161,1			204,4	203,2	181,8	190,5	153,5		145,7	135,1
24-févr.-12	187,5	187,7	178,1	190,8	193,7	167,3	170,4	171,0			
25-avr.-12	178,4		179,3	219,1	199,9	182,1	189,4	130,1	103,5	166,7	144,2
22-mai-12	149,0	170,5	139,5	187,8	200,2	173,7	184,8	136,6	118,3	128,0	104,8
22-juin-12		171,8	164,0	198,2	208,0	183,1	198,3	163,4	151,0	156,7	147,2
30-juil.-12	171,8	164,8	168,0		203,4	181,0	195,4	153,0	152,0	147,0	124,4
24-août-12	172,8	178,0	167,7	202,7	204,0	181,8	196,1	155,2	131,0	154,1	116,9
26-sept.-12	167,2	171,3	161,0	200,2	200,4	181,8	192,5	148,0	143,0	146,9	132,6
26-oct.-12				204,9	207,5	183,8	204,8	149,7	143,6	134,4	
Moyenne	170,7	171,3	166,4	207,2	208,2	186,0	194,6	155,9	141,6	152,1	129,3
Max	190,0	187,7	187,5	224,6	222,7	201,9	208,1	171,0	153,8	166,7	147,2
Min	149,0	153,9	139,5	187,8	193,7	167,3	170,4	130,1	103,5	128,0	104,8
ET	11,8	8,9	12,9	10,8	8,6	10,0	10,0	11,5	14,6	11,1	15,1
% vides	17%	17%	17%	6%	0%	0%	22%	0%	11%	6%	61%

Annexe 3E

Tableau 13. Données d'Eh (mV) de sources sur l'aquifère Chiche et Ilaló (cellules en vert). Les cellules en jaunes correspondent aux données manquantes.

ID	C201A	C201B	C202	I201_1	I201_2	I203	I206	I208	I204	C206
Source	Las Chirimoyas 1A	Las Chirimoyas 1B	Las Chirimoyas 2	Cununyacu Int. 1	Cununyacu Int. 2	Cununyacu Ext.	Rumiloma 1	Rumiloma 3	El Tingo Carrizal	San Pedro
25-févr.-11	145,9	145,9	144,3	180,2	181,6	176,8	149,9			
4-mars-11										
6-avr.-11				177,9		179,8	146,0	160,3	183,3	162,2
20-mai-11	145,3	145,3	142,0	173,6		167,5	143,6	157,5	179,9	153,5
13-juil.-11	142,6	142,6	142,0	175,5	177,9		141,2	156,2	176,9	141,1
2-sept.-11	137,5	137,5	141,0	167,3			133,7	140,8	171	131,8
31-oct.-11	139,5	139,5	137,6	166,5			138,7	139,7	170,4	131,8
23-déc.-11	125,5	125,5	123,1	158,9						
31-janv.-12	118,2	118,2	117,0				114,7	123,9	152	111,8
30-mars-12	143,3	143,3		157,8			131,2	128,1	161,7	131,4
1-juin-12	120,8	120,8	116,2	166,5			117,1	125,1	159,9	104,7
7-sept.-12	130,1	130,1	140,9	160,2		164,3	133,4	128,8	159,8	124,8
Moyenne	134,9	134,9	133,8	168,4	179,8	172,1	135,0	140,0	168,3	132,6
Max	145,9	145,9	144,3	180,2	181,6	179,8	149,9	160,3	183,3	162,2
Min	118,2	118,2	116,2	157,8	177,9	164,3	114,7	123,9	152,0	104,7
ET	10,4	10,4	11,6	8,1	2,6	7,4	11,6	14,7	10,6	18,2
% vides	17%	17%	25%	17%	83%	67%	17%	25%	25%	25%

Annexe 3E

Tableau 14. Données de température de l'eau (°C) de forages et piézomètres sur l'aquifère Chiche nord et Ilaló nord (cellules en vert). Les cellules en jaunes correspondent aux données manquantes.

ID	C106	C103	C102	C104	C105	M303	M303_1	M305	I104	C107_1	M302
Nom	San Patricio	El Carrizal	Cementerio	La Esperanza MICEI	Patagua	Primavera 1	Primavera 1-Pz	Rumihuayco 1	Rumihuayco 2	Santa Rosa-Pz	El Nacional
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Piézomètre	Forage	Forage	Piézomètre	Forage
16-févr.-11	19,0	19,7	20,9	20,1	20,2	21,4	22,9	21,2	23,0	21,5	27,2
18-mars-11	19,5	18,8	20,4	20,7	20,3	21,9	23,3	20,4	21,9	22,3	27,8
21-avr.-11	19,0	18,9	20,1	20,6	20,0	21,3	22,6	20,1	20,6	21,3	27,3
13-mai-11	18,4	18,8	19,3	19,4	19,3	21,3	22,2	20,0	20,5	20,5	26,9
23-juin-11	19,5	19,0	20,1	20,8	19,8	21,9	21,9	20,0	20,4	21,2	27,2
10-août-11	18,2	19,1	19,9	20,7	19,5	21,2	21,6	19,5	20,6	20,7	25,4
18-oct.-11	19,8	19,6	21,7	21,0	20,0	22,5		19,0	23,0		
15-nov.-11	18,9	19,8	20,4	20,2	21,3	21,3		20,0	20,9		25,3
20-déc.-11	19,8	20,7	21,2	20,6	20,7	21,5		19,8	19,4		27,7
25-janv.-12	19,6	20,7	19,1	19,4	20,2	21,4		18,4	19,0	21,9	26,4
15-févr.-12	19,1	19,1	21,8		19,3	22,4		19,5	18,7	21,5	27,1
22-mars-12	18,8	19,4	20,4		19,3	21,5		19,6	19,5	20,8	27,2
13-avr.-12	18,6	19,4	19,8		19,4	21,9		20,6	20,7	20,9	27,4
11-mai-12	18,8	19,5	20,3		20,0	22,2	22,6	20,3	21,7	21,0	27,7
15-juin-12	19,6	20,1	20,4		20,8	22,3	22,3	23,6	22,3	21,9	26,7
13-juil.-12	19,6	19,3	20,5	20,9	20,0	22,6	22,7	20,3	22,6	21,8	27,4
15-août-12	18,9	20,1	20,7	23,9	19,9	22,4	22,4	20,5	22,2	21,9	27,1
14-sept.-12	19,2	19,2	19,7	21,0	20,2	22,3		20,7	22,2	21,0	26,0
Moyenne	19,1	19,5	20,4	20,7	20,0	21,9	22,5	20,2	21,1	21,3	26,9
Max	19,8	20,7	21,8	23,9	21,3	22,6	23,3	23,6	23,0	22,3	27,8
Min	18,2	18,8	19,1	19,4	19,3	21,2	21,6	18,4	18,7	20,5	25,3

Annexe 3E

ID	C106	C103	C102	C104	C105	M303	M303_1	M305	I104	C107_1	M302
Nom	San Patricio	El Carrizal	Cementerio	La Esperanza MICEI	Patagua	Primavera 1	Primavera 1-Pz	Rumihuayco 1	Rumihuayco 2	Santa Rosa-Pz	El Nacional
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Piézomètre	Forage	Forage	Piézomètre	Forage
ET	0,5	0,6	0,7	1,1	0,6	0,5	0,5	1,1	1,4	0,5	0,7
% vides	0%	0%	0%	28%	0%	0%	44%	0%	0%	17%	6%

Tableau 15. Données de température de l'eau (°C) de forages et piézomètres sur l'aquifère Chiche sud et Ilaló sud (cellules en vert). Les cellules en jaunes correspondent aux données manquantes.

ID	C153	C152	C154	I106	I105	I102	I201	M301	C156	C151	C158
Nom	La Cocha 2 Alangasí 2	La Cocha 1 Alangasí 1	La Cocha 3 Alangasí 3	La Merced	Pozo 5 Naval	El Tingo Nuevo	Ilaló	VCH 1	Los Arupos	Acosta Soberón	Lasallinos
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Source	Forage	Forage	Forage	Forage
3-févr.-11	18,9	18,1		32,7	32,0	40,2		23,9	19,4	19,0	
16-mars-11	19,6	18,6	19,0	32,2	32,0	42,3		23,2	18,9	19,1	
20-avr.-11	19,1	18,6	19,4	31,3	32,3	42,0		23,1	18,3	18,1	
18-mai-11	19,6	19,6	18,4	31,7	32,4	42,2		20,1	18,1	18,6	
8-juil.-11	19,7	19,9	20,1	31,4	32,0	42,2	33,4	23,3	18,1	18,2	
22-août-11	18,4	18,6	19,2	31,6	30,8	42,0	32,8	23,0	18,0	18,3	
26-oct.-11		19,9	20,3	31,0	31,3	41,2	33,7	20,8	18,2	18,5	
18-nov.-11	20,4	19,3	19,8	32,4	32,6		34,5	18,7	18,1	18,7	
22-déc.-11	20,5	21,0	21,0	31,4	32,9	40,0	33,9	22,5	18,1	19,3	
27-janv.-12	19,1			30,5	31,2	41,0	32,3	20,4		17,6	18,2
24-févr.-12	20,6	20,2	20,6	33,1	32,2	43,3	33,5	22,7			
29-mars-12	19,7	18,7	19,0	30,8	30,4		32,4	21,8		19,4	
25-avr.-12	19,4		19,0	32,7	32,6	40,9	35,8	21,1	22,8	18,6	18,7

Annexe 3E

ID	C153	C152	C154	I106	I105	I102	I201	M301	C156	C151	C158
Nom	La Cocha 2 Alangasí 2	La Cocha 1 Alangasí 1	La Cocha 3 Alangasí 3	La Merced	Pozo 5 Naval	El Tingo Nuevo	Ilaló	VCH 1	Los Arupos	Acosta Soberón	Lasallinos
Type	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Source	Forage	Forage	Forage	Forage
22-mai-12	20,8	20,5	20,7	32,1	32,2	41,7	34,8	24,8	20,8	19,3	20,6
22-juin-12		19,5	20,4	31,3	31,2	41,7	33,5	21,5	18,2	19,4	19,4
30-juil.-12	20,7	21,0	21,5		32,7	41,9	32,7	24,2	20,4	19,7	19,8
24-août-12	20,4	19,2	20,5	33,0	32,7	41,4	33,9	24,0	20,2	18,7	19,3
26-sept.-12	20,3	19,7	20,1	31,8	32,2	41,4	34,9	21,4	18,6	19,1	19,1
26-oct.-12			19,2	32,8	33,1	41,8	34,8	22,4	20,3	19,0	
<i>Moyenne</i>	<i>19,8</i>	<i>19,5</i>	<i>19,9</i>	<i>31,9</i>	<i>32,0</i>	<i>41,6</i>	<i>33,8</i>	<i>22,3</i>	<i>19,2</i>	<i>18,8</i>	<i>19,3</i>
<i>Max</i>	<i>20,8</i>	<i>21,0</i>	<i>21,5</i>	<i>33,1</i>	<i>33,1</i>	<i>43,3</i>	<i>35,8</i>	<i>24,8</i>	<i>22,8</i>	<i>19,7</i>	<i>20,6</i>
<i>Min</i>	<i>18,4</i>	<i>18,1</i>	<i>18,4</i>	<i>30,5</i>	<i>30,4</i>	<i>40,0</i>	<i>32,3</i>	<i>18,7</i>	<i>18,0</i>	<i>17,6</i>	<i>18,2</i>
<i>ET</i>	<i>0,7</i>	<i>0,9</i>	<i>0,9</i>	<i>0,8</i>	<i>0,7</i>	<i>0,8</i>	<i>1,0</i>	<i>1,6</i>	<i>1,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,8</i>
<i>% vides</i>	<i>16%</i>	<i>16%</i>	<i>11%</i>	<i>5%</i>	<i>0%</i>	<i>11%</i>	<i>21%</i>	<i>0%</i>	<i>16%</i>	<i>5%</i>	<i>63%</i>

Tableau 16. Données de température de l'eau (°C) de sources sur l'aquifère Chiche et Ilaló (cellules en vert). Les cellules en jaunes correspondent aux données manquantes.

ID	C201A	C201B	C202	I201_1	I201_2	I203	I206	I208	I204	C206
Source	Las Chirimoyas 1A	Las Chirimoyas 1B	Las Chirimoyas 2	Cununyacu Int. 1	Cununyacu Int. 2	Cununyacu Ext.	Rumiloma 1	Rumiloma 3	El Tingo Carrizal	San Pedro
25-févr.-11	20,4	20,4	20,1	26,5	26,4	25,8	29,1			
4-mars-11								29,1	35,7	21,2
6-avr.-11				26,3		25,8	28,1	27,9	35,5	19,3
20-mai-11	20,9	20,9	20,9	25,4		24,6	28,8	29,1	35,1	22,3
13-juil.-11	20,7	20,7	20,2	26,4	26,0		28,5	28,0	36,1	20,8

Annexe 3E

ID	C201A	C201B	C202	I201_1	I201_2	I203	I206	I208	I204	C206
Source	Las Chirimoyas 1A	Las Chirimoyas 1B	Las Chirimoyas 2	Cununyacu Int. 1	Cununyacu Int. 2	Cununyacu Ext.	Rumiloma 1	Rumiloma 3	El Tingo Carrizal	San Pedro
2-sept.-11	20,3	20,3	20,5	25,0			26,4	26,4	33,5	20,9
31-oct.-11	21,7	21,7	22,6	26,3			29,3	26,2	35,5	20,7
23-déc.-11	22,8	22,8	20,5	27,3				26,2	35,9	16,6
31-janv.-12	20,5	20,5	20,1				28,8	21,0	35,8	18,5
30-mars-12	22,1	22,1		26,8			26,4	28,8	35,4	20
1-juin-12	21,2	21,2	20,2	26,5			27,9	26,4	36,5	17,6
7-sept.-12	21,8	21,8	20,5	27,3		26,9	28,6	27,7	36,2	19,6
Moyenne	21,2	21,2	20,6	26,4	26,2	25,8	28,2	27,0	35,6	19,8
Max	22,8	22,8	22,6	27,3	26,4	26,9	29,3	29,1	36,5	22,3
Min	20,3	20,3	20,1	25,0	26,0	24,6	26,4	21,0	33,5	16,6
ET	0,8	0,8	0,8	0,7	0,3	0,9	1,0	2,3	0,8	1,7
% vides	17%	17%	25%	17%	83%	67%	17%	8%	8%	8%

ANNEXE 3F

MÉTHODES UTILISÉES ECHANTILLONNAGE CHIMIQUE

Sur le terrain, les mesures de CE et TDS, pH, température ambiante, température de l'eau et potentiel redox se sont faites à l'aide d'un conductimètre et un pH-mètre de terrain WTW, puis par un conductimètre Delta Ohm et un pH-mètre Orion. Ces appareils ont des erreurs de mesures pour la conductivité de $\pm 0,5\%$, pour le pH le WTW de $\pm 0,01$ et l'Orion de $\pm 0,02$, pour le potentiel redox le WTW de $\pm 0,3$ mV (entre 15°C et 35°C), et de ± 1 mV avec de température supérieure à 35°C, et l'Orion de $\pm 0,02$ mV, et la température le WTW de $\pm 0,1$ °C et l'Orion de ± 1 °C.

Au laboratoire, en Equateur, les échantillons sont filtrés avec un filtre 0.45 μm . L'alcalinité et l'analyse de chlorures sont obtenus par titrage. Les sulfates, nitrates et la silice aqueuse sont mesurés par spectrophotométrie (erreur du 0,1 mg/l). Les phosphates et le fluor ont été déterminés par colorimétrie (erreur du 0,02 mg/l). Les cations Ca^{2+} et Mg^{2+} ont été obtenus par titrage complexométrique (erreur du 0,015 mg/l), et les cations Na^+ et K^+ par absorption atomique avec flamme (erreur de 0,03 mg/l). Le carbone organique total (TOC) a été mesurés à partir d'un échantillon non-filtré, en utilisant la méthode de combustion catalytique à 680°C et la détection se fait avec de l'infrarouge non-dispersif avec une erreur de 0,004 mg/l. L'oxygène dissous est obtenu à partir de la méthode de Winkler (0,5%). Les éléments traces comme : Al, Cd, Co, Cu, Cr total, Fe total, Li, Mn, Ni, Zn sont mesurés en utilisant un spectrophotomètre d'absorption atomique avec flamme (erreur du 0,03 mg/l) et l'As, Sb et Pb sont obtenue avec spectrophotométrie d'absorption atomique par génération d'hydrures (erreur du 0,03 mg/l).

Pour les analyses faites en France, un protocole de terrain a été bien défini pour les prélèvements. Flacons et réactifs ont été rapportés de France.

Mesure oxygène dissous : selon la quantité d'oxygène dissous dans l'eau on utilise deux gammes de mesures par colorimétrie avec des ampoules contenant du indigo carmine pour la gamme du 1-12 mg/l ou du rhodazine D pour la gamme du 0-1 mg/l. L'erreur de cette méthode est estimée à 0,02 mg/l.

On a rempli le flacon testeur avec l'eau à analyser jusqu'à la graduation la plus haute (25 ml); après, on a introduit une ampoule à l'intérieur du flacon. L'eau monte alors à l'intérieur de l'ampoule et une coloration apparaît qui on a comparé avec la gamme étalon afin de déterminer la concentration en oxygène dissous.

Filtration :

La filtration a été faite sur filtre 0,22 microns à l'aide d'une seringue pour remplir les différents flacons :

- flacon plastique de 60 ml, rempli à moitié pour les éléments traces,
- tube 10 ml pour l'arsenic,
- tube 10 ml pour Fe(II),
- tube 10 ml pour Fe total,

- tube 10 ml pour les anions majeurs,
- tube 10 ml pour les cations majeurs.

Dans tous les tubes, à l'exception de celui des anions majeurs, il y a eu des réactifs permettant de préserver l'échantillon. Pour le Fe(II) et le Fe total, le réactif est très visqueux et pour éviter des fuites en plus de la fermeture du bouchon on a utilisé du parafilm bien serré autour du tube. Pour Fe(II), il a fallu aussi protéger l'échantillon d'une oxydation photochimique pour cela on a utilisé le papier d'aluminium pour l'envelopper.

Pour le carbone organique total :

Un flacon en verre ambré de 60 ml, préalablement décontaminé, a été rempli à raz bord avec de l'eau non filtrée suivi d'un ajout de 3 gouttes d'acide orthophosphorique (environ 60 µl).

Les échantillons ont été placés au frais, à 4°C au retour du terrain pour les conserver, jusqu'à l'analyse.

Les échantillons de Fe(II) et Fe total arrivés au laboratoire d'Hydrosciences, ont été pesés (tube + bouchon, sans le parafilm) avant d'effectuer les analyses afin de déterminer le volume exact d'eau, la quantité de réactif ajouté n'étant pas négligeable et pouvant induire une erreur sur les concentrations mesurées

En laboratoire, les ions majeurs ont été mesurés par chromatographie ionique. Le Fe total et le Fe (II) ont été déterminés par colorimétrie (erreur 0,02 mg/l). Le TOC a été analysé par un analyseur de carbone par la méthode de combustion catalytique à 680°C et la détection se fait avec de l'infrarouge non-dispersif (erreur de 0,004 mg/l). L'As et la spéciation d'As ont été obtenus avec LC-ICP-MS (erreur de 0,002 mg/l) et les éléments traces par ICP-MS (erreur de 0,002 mg/l).

MÉTHODES UTILISÉES MESURES ISOTOPES STABLES DE L'EAU

Au laboratoire les analyses des isotopes stables se font de la manière suivante :

Pour le deutérium trois mesures sont réalisées sur chaque flacon, il est donc possible de faire une estimation statistique de la qualité des résultats. La limite fixée pour refaire les échantillons a été établie à $\pm 0,8\%$, la valeur de l'erreur de mesures de l'appareil pour le deutérium.

Deux types de corrections sont appliqués aux résultats bruts, afin de minimiser les effets mémoires potentiels, et la dérive des mesures résultant de l'appauvrissement du gaz référence au cours d'un plateau d'analyses. Finalement, les données brutes sont calibrées pour obtenir les valeurs par rapport à V-SMOW.

On note aussi un problème de dérive dû à la baisse du gaz de référence au fur et à mesure du passage du plateau d'échantillon. Cette erreur peut être mise en évidence en reliant les valeurs des standards mesurés à leur position sur le plateau pour chaque série. On corrige les valeurs brutes des échantillons en fonction de leur position sur le plateau.

Enfin, avec les résultats des standards et leurs valeurs connues par rapport au V-SMOW on obtient une droite de calibration et donc une équation permettant de calculer les valeurs réelles des échantillons par rapport au V-SMOW.

Pour l'oxygène 18, de petites corrections de la dérive ont été faites en suivant le même processus qu'écrit précédemment pour le deutérium, en utilisant les standards. La calibration a été faite d'une manière similaire.

Les résultats d'oxygène 18 ne donnent qu'une mesure par flacon, même si elle est comparée 10 fois avec un standard. Une analyse statistique sur 2 échantillons identiques n'est donc pas systématiquement faite pour toutes les mesures. Des vérifications de reproductibilité ont été réalisées sur quelques échantillons.

ANNEXE 3G

Tableau 17. Traitement de données de chimie. Les ions majeurs sont exprimés en méq/l, la conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$, le bilan et la comparaison entre la conductivité mesurée et la conductivité de Logan (%cond – CoLg) en pourcentage. Les données en bleu correspondent aux analyses faites en Hydrosociences en France, le reste sont les analyses chimiques fournies par l'EPMAFS de Quito. Les données en rouge sur la colonne « %cond – CoLg » correspondent aux analyses qui ont des erreurs sur la mesure de conductivité sur le terrain ou la température est une donnée manquante.

ID	Date	Nom	Conductivité	N-NO3	Cl	HCO3	SO4	Mg	Ca	K	Na	Sum Anion	Sum Cation	Bilan	B	Cond Logan	%cond - CoLg
C101	25/09/2007	Acacias	633	0,03	0,53	4,87	0,45	1,96	1,21	0,15	2,07	5,88	5,39	9	5,6	515	23
C101	07/05/2010	Acacias	771	0,05	0,56	7,09	0,37	5,58	1,15	0,18	2,03	8,08	8,93	10	8,5	768	0
C101	13/05/2010	Acacias	629	0,25	0,37	6,15	0,49	1,62	1,08	0,25	4,43	7,26	7,38	2	7,3	664	5
C101	03/03/2011	Acacias	640	0,14	0,21	5,83	0,29	1,33	1,20	0,13	3,45	6,48	6,10	6	6,3	573	12
C152	17/10/2007	Alangasí N° 1	407	0,04	0,26	4,44	0,01	2,34	1,25	0,08	1,15	4,76	4,81	1	4,8	439	7
C152	22/03/2011	Alangasí N° 1	441	0,01	0,05	4,41	0,12	2,22	1,35	0,07	0,89	4,60	4,53	1	4,6	419	5
C153	29/10/2008	Alangasí N° 2	426	0,00	0,24	4,62	0,06	2,02	1,18	0,09	2,04	4,93	5,33	8	5,1	470	9
C153	14/09/2010	Alangasí N° 2	401	0,00	0,03	4,47	0,06	2,38	1,07	0,02	1,36	4,57	4,83	5	4,7	431	7
C153	22/03/2011	Alangasí N° 2	378	0,00	0,03	4,07	0,02	2,31	0,99	0,00	0,86	4,12	4,16	1	4,1	381	1
C153		Alangasí N° 2	416	0,00	0,12	4,54	0,02	2,15	1,43	0,11	1,36	4,68	5,05	7	4,9	446	7
C154	15/03/2011	Alangasí N° 3	358	0,00	0,03	4,32	0,07	2,21	1,16	0,02	1,21	4,41	4,59	4	4,5	413	13
C155	26/08/2006	Armenia 1	401	0,03	0,16	4,29	0,19	2,49	1,25	0,05	1,14	4,66	4,92	5	4,8	440	9
C155	23/10/2008	Armenia 1	407	0,03	0,15	4,49	0,02	2,31	1,18	0,08	1,38	4,69	4,96	5	4,8	443	8
C155	29/04/2009	Armenia 1	365	0,00	0,38	3,52	0,54	1,89	1,20	0,08	0,94	4,45	4,11	8	4,3	394	7
C155	01/03/2011	Armenia 1	350	0,00	0,02	4,30	0,06	2,07	1,13	0,00	1,36	4,38	4,55	4	4,5	410	15
C155	12/09/2011	Armenia 1	368	0,00	0,07	4,39	0,20	2,09	1,13	0,05	1,50	4,66	4,77	2	4,7	432	15
C167	01/03/2011	Armenia 4	337	0,00	0,02	4,02	0,07	2,21	0,99	0,01	0,95	4,11	4,15	1	4,1	380	11
C167	12/09/2011	Armenia 4	350	0,00	0,07	4,10	0,20	2,05	0,87	0,03	1,31	4,38	4,26	3	4,3	397	12
C207	27/10/2008	Cañon Chiche	612	0,02	0,47	5,97	0,54	2,24	1,19	0,23	3,87	6,99	7,53	7	7,3	658	7
C103	23/09/2003	Carrizal	581	0,02	0,70	5,52	0,46	2,05	1,30	0,13	3,53	6,70	7,01	4	6,9	623	7

Annexe 3G

ID	Date	Nom	Conductivité	N-NO3	Cl	HCO3	SO4	Mg	Ca	K	Na	Sum Anion	Sum Cation	Bilan	B	Cond Logan	%cond - CoLg
C103	25/09/2007	Carrizal	565	0,04	0,45	6,19	0,26	2,89	1,08	0,18	2,39	6,93	6,54	6	6,7	613	8
C201	01/10/2003	Chirimoyas 1	607	0,05	0,33	5,24	0,50	1,15	0,88	0,16	4,01	6,12	6,20	1	6,2	561	8
C201	02/12/2003	Chirimoyas 1	579	0,29	0,35	6,00	0,36	1,19	0,77	0,15	4,88	7,00	6,98	0	7,0	635	9
C201	21/07/2004	Chirimoyas 1	590	0,03	0,45	5,46	0,76	1,32	0,91	0,31	4,02	6,70	6,55	2	6,6	602	2
C201	01/09/2006	Chirimoyas 1	601	0,17	0,46	5,47	0,79	1,68	0,89	0,19	4,42	6,89	7,18	4	7,0	639	6
C201	20/04/2009	Chirimoyas 1	539	0,04	0,44	5,59	0,46	1,48	0,70	0,21	3,73	6,52	6,12	7	6,3	576	6
C201	19/04/2010	Chirimoyas 1	596	0,16	0,34	5,66	0,43	1,25	0,85	0,19	4,30	6,60	6,59	0	6,6	600	1
C201	05/05/2010	Chirimoyas 1	638	0,00	0,21	5,45	0,30	1,31	0,82	0,23	3,99	5,95	6,34	6	6,1	560	14
C201	23/03/2011	Chirimoyas 1	603	0,11	0,22	5,39	0,30	1,47	0,89	0,08	3,19	6,01	5,63	7	5,8	531	14
C201	15/09/2011	Chirimoyas 1	582	0,23	0,35	5,73	0,56	1,30	0,88	0,17	4,68	6,88	7,03	2	7,0	631	8
C202	02/12/2003	Chirimoyas 2	609	0,21	0,35	6,28	0,22	1,28	0,78	0,15	4,68	7,06	6,90	2	7,0	634	4
C202	01/04/2004	Chirimoyas 2	616	0,05	0,54	5,52	0,33	1,26	0,94	0,22	3,58	6,44	6,00	7	6,2	567	9
C202	21/07/2004	Chirimoyas 2	616	0,05	0,48	5,66	0,86	1,28	0,86	0,34	4,48	7,04	6,97	1	7,0	636	3
C202	01/09/2006	Chirimoyas 2	624	0,23	0,43	5,55	0,63	1,39	0,77	0,20	4,54	6,83	6,90	1	6,9	624	0
C202	25/09/2007	Chirimoyas 2	631	0,05	0,60	5,25	0,81	1,56	0,97	0,22	4,07	6,71	6,82	2	6,8	615	3
C202	27/10/2008	Chirimoyas 2	589	0,04	0,43	5,53	0,48	1,64	0,92	0,22	4,25	6,49	7,02	8	6,8	614	4
C202	28/10/2008	Chirimoyas 2	674	0,05	0,44	5,73	0,54	1,56	1,03	0,20	3,53	6,77	6,31	7	6,5	595	13
C202	15/09/2011	Chirimoyas 2	565	0,19	0,33	5,57	0,53	1,45	0,87	0,19	3,76	6,62	6,26	6	6,4	586	4
C203	15/09/2010	Chirimoyas 3	571	0,11	0,18	5,20	0,32	1,52	0,72	0,18	3,90	5,80	6,33	8	6,1	553	3
C209	31/03/2011	Chunchi 1	751	0,01	0,95	6,95	0,13	3,24	0,63	0,26	4,52	8,04	8,65	7	8,3	754	0
C209	25/08/2011	Chunchi 1	782	0,06	1,43	7,00	0,31	3,09	0,78	0,25	4,67	8,80	8,80	0	8,8	794	2
C210	23/09/2010	Chunchi 2	789	0,01	0,97	7,12	0,14	2,76	0,95	0,26	4,83	8,24	8,81	6	8,5	770	2
I202	26/08/2010	Cununyacu	1026	0,02	1,05	9,44	0,32	5,19	1,10	0,31	4,26	10,83	10,85	0	10,8	976	5
I202	03/03/2011	Cununyacu	1077	0,02	1,07	9,45	0,33	4,80	1,44	0,24	4,74	10,87	11,23	3	11,0	994	8
I202	23/08/2011	Cununyacu	1047	0,07	1,63	9,59	0,58	5,29	1,49	0,32	5,07	11,88	12,17	2	12,0	1082	3
I202	28/10/2008	Cununyacu 1	1050	0,01	1,78	9,65	0,52	5,17	1,38	0,22	4,71	11,96	11,49	4	11,7	1055	0
I203	21/04/2010	Cununyacu 2	997	0,03	1,56	9,09	0,53	4,38	1,30	0,31	5,27	11,21	11,26	1	11,2	1011	1

Annexe 3G

ID	Date	Nom	Conductivité	N-NO3	Cl	HCO3	SO4	Mg	Ca	K	Na	Sum Anion	Sum Cation	Bilan	B	Cond Logan	%cond - CoLg
C109	21/06/2010	Diego Andrade	675	0,28	0,56	6,23	0,50	3,43	1,91	0,28	2,42	7,57	8,04	6	7,8	707	5
C204	26/10/2012	EEQ	426	0,24	0,34	4,78	0,28	1,60	1,35	0,19	2,09	5,64	5,23	8	5,4	497	14
M302	19/04/2010	El Nacional	1270	0,02	2,60	12,07	0,48	4,89	1,41	0,37	7,31	15,18	13,97	9	14,6	1312	3
M302	21/04/2010	El Nacional	1259	0,00	1,70	11,31	0,30	6,08	1,50	0,34	6,48	13,32	14,40	8	13,9	1247	1
M302	26/08/2010	El Nacional	1272	0,00	1,66	11,37	0,29	5,63	1,50	0,56	5,40	13,32	13,09	2	13,2	1189	7
M302	03/03/2011	El Nacional	1285	0,02	1,64	11,13	0,29	5,74	1,16	0,25	6,27	13,09	13,42	3	13,3	1193	8
M302	23/08/2011	El Nacional	1255	0,00	2,47	11,13	0,52	5,96	1,56	0,31	6,43	14,12	14,27	1	14,2	1278	2
I101	24/09/2003	El Tingo		0,02	13,53	19,40	0,89	2,00	8,30	0,44	23,49	33,83	34,23	1	34,0	3063	20
I101	02/12/2003	El Tingo	3110	0,00	11,12	29,99	0,00	11,88	1,50	0,77	27,82	41,11	41,96	2	41,5	3738	17
I101	21/07/2004	El Tingo	3180	0,00	9,09	27,88	1,69	5,48	8,57	1,17	21,03	38,67	36,24	7	37,5	3371	6
I101	09/05/2006	El Tingo		0,18	5,81	29,18	0,67	17,09	0,89	0,62	20,83	35,84	39,43	9	37,6	3387	45
I101	03/05/2010	El Tingo	2970	0,00	5,61	27,33	0,54	5,47	8,16	0,65	21,37	33,49	35,65	6	34,6	3111	5
I101	24/08/2011	El Tingo	3110	0,00	8,74	27,10	0,92	12,93	1,37	0,71	19,75	36,77	34,76	6	35,8	3219	3
I204	16/11/2006	El Tingo Carrizal		0,05	5,15	27,62	0,32	7,25	2,74	0,48	22,96	33,14	33,43	1	33,3	2995	21
I102	21/04/2010	El Tingo Nuevo	3180	0,00	9,14	27,35	0,87	12,02	0,91	0,73	24,49	37,36	38,16	2	37,8	3399	6
I102	04/05/2010	El Tingo Nuevo	2970	0,00	5,61	27,33	0,54	5,47	8,16	0,65	21,37	33,49	35,65	6	34,6	3111	5
C157	05/11/2008	La Armada	355	0,00	0,17	4,08	0,02	1,68	0,76	0,11	1,70	4,27	4,25	0	4,3	392	9
C157	30/04/2009	La Armada	347	0,00	0,16	4,10	0,02	1,73	0,65	0,08	1,84	4,28	4,29	0	4,3	394	12
C157	17/08/2011	La Armada	370	0,00	0,10	4,07	0,12	1,56	1,00	0,03	1,80	4,28	4,39	2	4,3	399	7
C104	28/09/2011	La Esperanza - MICEI	582	0,13	0,23	5,50	0,48	1,77	1,20	0,29	2,96	6,35	6,22	2	6,3	573	2
I106	30/10/2007	La Merced		0,01	1,87	10,13	0,38	6,06	2,01	0,37	3,86	12,39	12,30	1	12,3	1111	87
I106	26/10/2009	La Merced	1246	0,00	2,12	10,22	0,41	3,33	3,52	0,36	5,65	12,75	12,87	1	12,8	1153	8
I106	14/09/2010	La Merced	1103	0,00	1,23	9,98	0,26	5,32	2,00	0,23	4,41	11,46	11,95	4	11,7	1054	5
I106	01/03/2011	La Merced		0,00	1,19	9,72	0,24	6,12	0,59	0,20	4,60	11,15	11,50	3	11,3	1020	27
I106	24/08/2011	La Merced	1085	0,05	1,83	9,83	0,48	4,69	2,30	0,33	4,86	12,19	12,18	0	12,2	1097	1
M303	03/03/2011	La Primavera 1	693	0,00	0,45	6,46	0,33	3,45	0,82	0,12	2,93	7,25	7,32	1	7,3	661	5

Annexe 3G

ID	Date	Nom	Conductivité	N-NO3	Cl	HCO3	SO4	Mg	Ca	K	Na	Sum Anion	Sum Cation	Bilan	B	Cond Logan	%cond - CoLg
M303	24/08/2011	La Primavera 1	677	0,05	0,69	6,43	0,50	3,25	1,25	0,19	2,99	7,67	7,68	0	7,7	695	3
M304	23/09/2003	La Primavera 2	429	0,00	0,11	4,80	0,50	2,03	0,96	0,11	2,33	5,40	5,44	1	5,4	496	13
C159	08/04/2006	Moya 1		0,02	0,53	4,16	0,30	2,88	0,93	0,12	1,51	5,01	5,44	8	5,2	478	32
C159	26/08/2006	Moya 1	388	0,00	0,25	3,95	0,28	2,73	0,97	0,09	0,88	4,49	4,68	4	4,6	421	8
C159	17/10/2007	Moya 1	401	0,00	0,32	4,59	0,30	2,27	1,54	0,08	0,95	5,21	4,85	8	5,0	461	13
C159	23/10/2008	Moya 1	441	0,00	0,34	4,33	0,38	2,75	1,25	0,17	1,21	5,05	5,38	6	5,2	477	8
C159	13/09/2010	Moya 1	328	0,00	0,02	3,60	0,12	2,08	0,80	0,01	1,21	3,73	4,11	9	3,9	361	9
C159	01/03/2011	Moya 1	294	0,00	0,02	3,45	0,11	2,26	0,80	0,00	0,64	3,58	3,70	3	3,6	336	13
C159		Moya 1	412	0,00	0,31	4,05	0,31	2,69	0,94	0,00	1,10	4,67	4,73	1	4,7	432	5
C160	26/08/2006	Moya 2	377	0,00	0,26	3,76	0,39	2,77	1,09	0,08	0,95	4,41	4,89	10	4,6	427	12
C160	04/05/2009	Moya 2	372	0,00	0,25	4,08	0,38	2,47	1,00	0,06	1,12	4,70	4,64	1	4,7	429	13
C160	01/03/2011	Moya 2	348	0,00	0,09	3,89	0,21	2,39	0,98	0,00	0,68	4,19	4,05	3	4,1	379	8
C160		Moya 2	400	0,00	0,22	3,89	0,08	1,69	1,73	0,06	1,11	4,19	4,59	9	4,4	404	1
C161	26/08/2006	Moya 3	347	0,00	0,22	3,71	0,02	2,08	0,52	0,08	1,27	3,95	3,95	0	3,9	364	5
C161	04/05/2009	Moya 3	334	0,00	0,11	3,92	0,02	1,98	0,45	0,06	1,48	4,05	3,97	2	4,0	369	10
C161	13/09/2010	Moya 3	387	0,00	0,10	3,86	0,22	2,75	0,87	0,02	0,96	4,18	4,59	9	4,4	403	4
C161	12/09/2011	Moya 3	319	0,05	0,03	3,74	0,25	1,86	0,51	0,05	1,60	4,06	4,03	1	4,0	373	14
C161		Moya 3	362	0,00	0,11	3,72	0,02	1,83	0,49	0,08	1,55	3,85	3,95	3	3,9	360	1
C105	02/10/2007	Patagua	663	0,03	0,71	7,55	0,50	3,23	1,08	0,26	3,88	8,79	8,44	4	8,6	778	15
C105	27/10/2008	Patagua	702	0,03	0,77	6,75	0,33	3,09	1,19	0,25	4,11	7,88	8,64	9	8,3	747	6
C105	28/04/2009	Patagua	587	0,03	0,56	5,93	0,46	2,47	0,95	0,27	2,95	6,98	6,65	5	6,8	619	5
C105	30/09/2011	Patagua	568	0,16	0,40	5,51	0,46	2,41	1,09	0,26	3,05	6,53	6,81	4	6,7	607	6
C163	05/09/2011	Pintag 2		0,07	0,02	2,09	0,22	1,01	0,78	0,10	0,75	2,39	2,65	10	2,5	236	19
I104	27/10/2008	Rumihuayco 2	959	0,00	1,31	9,38	0,23	5,42	1,44	0,23	5,01	10,92	12,10	10	11,5	1036	7
I206	30/04/2009	Rumiloma 1	1010	0,01	1,57	9,97	0,19	4,28	0,55	0,35	6,02	11,73	11,20	5	11,5	1032	2
I206	06/04/2010	Rumiloma 1		0,00	1,08	10,38	0,12	4,44	0,75	0,37	6,95	11,58	12,52	7	12,0	1084	16
I206	17/08/2010	Rumiloma 1	1038	0,01	1,15	9,65	0,12	3,48	1,54	0,71	5,40	10,94	11,12	2	11,0	993	5

Annexe 3G

ID	Date	Nom	Conductivité	N-NO3	Cl	HCO3	SO4	Mg	Ca	K	Na	Sum Anion	Sum Cation	Bilan	B	Cond Logan	%cond - CoLg
I206	24/08/2011	Rumiloma 1	1016	0,06	1,61	9,43	0,28	4,27	0,69	0,33	6,00	11,38	11,28	1	11,3	1020	0
I207	28/10/2008	Rumiloma 2	1058	0,00	1,57	10,42	0,25	4,44	0,75	0,28	5,69	12,24	11,15	10	11,7	1053	1
I207	19/04/2010	Rumiloma 2	1016	0,03	1,59	9,77	0,24	3,66	0,60	0,38	6,68	11,63	11,32	3	11,5	1033	2
I207	17/08/2010	Rumiloma 2	1099	0,00	1,08	10,80	0,12	4,20	0,97	0,93	6,06	12,01	12,16	1	12,1	1088	1
I207	24/08/2011	Rumiloma 2	1071	0,05	1,45	10,24	0,28	4,45	0,74	0,33	6,41	12,02	11,93	1	12,0	1078	1
C166	12/09/2011	San Juan de Conocoto	282	0,07	0,06	3,20	0,23	1,63	0,95	0,18	0,76	3,56	3,53	1	3,5	328	14
C206	12/04/2011	San Pedro	748	0,09	0,44	6,79	0,33	3,39	1,96	1,68	0,37	7,65	7,40	3	7,5	682	10
C165	17/10/2007	Selva Alegre	370	0,18	0,56	3,39	0,05	1,57	1,44	0,13	1,14	4,19	4,28	2	4,2	390	5
C165	30/04/2009	Selva Alegre	346	0,01	0,45	3,49	0,02	1,98	1,00	0,11	1,04	3,97	4,13	4	4,1	373	7
C165	06/04/2010	Selva Alegre	351	0,05	0,26	3,51	0,09	1,77	1,17	0,12	1,20	3,91	4,26	8	4,1	376	7
C165	17/08/2010	Selva Alegre	368	0,03	0,26	4,83	0,07	1,68	1,23	0,21	2,24	5,19	5,37	3	5,3	483	24
C165	22/02/2011	Selva Alegre	377	0,09	0,23	3,60	0,10	1,76	1,11	0,05	1,13	4,02	4,04	1	4,0	371	2
C165	17/08/2011	Selva Alegre	374	0,09	0,42	3,50	0,21	1,97	1,14	0,10	1,28	4,23	4,48	6	4,4	401	7
M301	17/10/2007	VCH 1	1370	0,03	3,42	12,56	0,02	3,53	3,41	0,18	9,49	16,03	16,60	3	16,3	1468	7
M301	23/10/2008	VCH 1		0,00	1,42	13,13	0,06	4,63	1,31	0,19	7,17	14,62	13,30	10	14,0	1256	16
M301	04/05/2010	VCH 1	1385	0,00	1,84	12,27	0,00	4,59	1,30	0,30	8,39	14,12	14,58	3	14,3	1291	7
M301	14/09/2010	VCH 1	1339	0,00	1,83	12,37	0,00	5,42	1,03	0,42	7,65	14,21	14,52	2	14,4	1293	4
M301	22/03/2011	VCH 1	1325	0,00	1,81	12,19	0,00	4,91	1,24	0,13	8,12	14,00	14,38	3	14,2	1277	4
M301	25/08/2011	VCH 1	1310	0,05	2,51	12,21	0,12	4,17	2,09	0,18	8,32	14,90	14,75	1	14,8	1334	2

Annexe 3G

Tableau 18. Données des ions majeurs sur les forages et sources de la zone d'étude. Les ions majeurs, le COT, et le TDS sont exprimés en mg/l, la conductivité (Cond) en $\mu\text{S}/\text{cm}$, la température (°T) en °C. Les données en bleu correspondent aux analyses faites en Hydrosociences en France, le reste sont les analyses chimiques fournies par l'EPMAPS de Quito. Les cellules en jaunes sont des données manquantes ou des mauvaises mesures qui ont été enlevées. Les valeurs en rouge sont des valeurs qui ont été corrigées remplacées pour les valeurs moyennes mesurées dans le terrain pendant la période février 2011 – octobre 2012.

ID	Date	Nom	Cond	TDS	pH	T°	COT	N-NO3	Cl	HCO3	SO4	Mg	Ca	K	Na
C101	25/09/2007	Acacias	633	304	7,20		0,770	1,900	18,800	297,070	21,470	23,800	24,290	6,035	47,512
C101	07/05/2010	Acacias	771	558	6,88	22,6	1,055	3,338	19,991	432,700	17,643	67,740	22,930	7,010	46,590
C101	13/05/2010	Acacias	629		7,84	21,4	0,850	15,567	13,028	375,149	23,408	19,676	21,613	9,585	101,896
C101	03/03/2011	Acacias	640	456	7,87	21,0	1,377	8,832	7,548	355,700	14,010	16,100	23,900	5,024	79,300
C152	17/10/2007	Alangasí N° 1	407	241	7,73	19,4	0,580	2,552	9,374	270,983	0,590	28,426	24,987	3,031	26,389
C152	22/03/2011	Alangasí N° 1	441	301	7,12	18,9	0,811	0,551	1,939	269,100	5,818	27,000	27,000	2,611	20,570
C153	29/10/2008	Alangasí N° 2	426	228	7,38	19,7		0,280	8,500	281,920	3,000	24,590	23,570	3,549	46,865
C153	14/09/2010	Alangasí N° 2	401	296	7,68	17,3	1,144	0,050	1,230	272,900	2,993	28,870	21,490	0,847	31,185
C153	22/03/2011	Alangasí N° 2	378	233	7,77	20,3	0,623	0,000	1,071	248,200	1,147	28,100	19,700	0,000	19,750
C153		Alangasí N° 2	416	224	7,60	19,4	0,000	0,190	4,340	276,700	1,000	26,100	28,680	4,254	31,266
C154	15/03/2011	Alangasí N° 3	358	288	7,75	19,8	0,754	0,000	1,056	263,400	3,195	26,800	23,100	0,752	27,720
C155	26/08/2006	Armenia 1	401	226	7,90	19,7	11,380	1,880	5,540	261,460	9,050	30,200	25,060	1,910	26,120
C155	23/10/2008	Armenia 1	407	228	7,90	19,2		1,900	5,440	273,810	1,000	28,010	23,650	3,275	31,842
C155	29/04/2009	Armenia 1	365	176	8,26	20,5		0,001	13,550	215,000	26,000	23,000	24,000	3,110	21,660
C155	01/03/2011	Armenia 1	350	290	8,01	17,5	1,094	0,000	0,761	262,100	2,924	25,100	22,500	0,000	31,340
C155	12/09/2011	Armenia 1	368	197	7,74	19,0	0,709	0,000	2,337	268,000	9,478	25,440	22,640	1,771	34,418
C167	01/03/2011	Armenia 4	337	271	8,03	18,5	1,000	0,000	0,835	245,100	3,273	26,800	19,800	0,434	21,760
C167	12/09/2011	Armenia 4	350	187	7,66	19,2	0,679	0,000	2,456	250,300	9,767	24,870	17,450	1,310	30,073
C207	27/10/2008	Cañon Chiche	612	332	7,40	21,4	1,300	1,170	16,510	363,970	25,680	27,180	23,810	8,890	89,095
C103	23/09/2003	Carrizal	581	263	7,19	22,4		1,000	24,860	336,720	22,160	24,900	26,000	5,140	81,225
C103	25/09/2007	Carrizal	565	271	7,50	21,3	0,610	2,350	15,910	377,690	12,240	35,100	21,570	7,177	55,020
C201	01/10/2003	Chirimoyas 1	607		7,70	20,6		3,000	11,590	319,640	24,140	14,000	17,600	6,170	92,230

Annexe 3G

ID	Date	Nom	Cond	TDS	pH	T°	COT	N-NO3	Cl	HCO3	SO4	Mg	Ca	K	Na
C201	02/12/2003	Chirimoyas 1	579	289		20,7		18,000	12,600	365,800	17,380	14,400	15,360	5,695	112,250
C201	21/07/2004	Chirimoyas 1	590	328	7,80	20,9	1,120	2,000	15,900	333,060	36,320	16,000	18,140	11,908	92,400
C201	01/09/2006	Chirimoyas 1	601		7,59	20,6	8,700	10,580	16,320	333,610	37,790	20,450	17,890	7,330	101,600
C201	20/04/2009	Chirimoyas 1	539	282	7,95	19,8		2,412	15,480	341,000	22,000	18,000	14,000	8,230	85,680
C201	19/04/2010	Chirimoyas 1	596				0,577	10,122	12,030	345,230	20,857	15,135	16,962	7,432	98,978
C201	05/05/2010	Chirimoyas 1	638	359	7,75	20,4	0,809	0,000	7,346	332,300	14,180	15,900	16,310	8,940	91,780
C201	23/03/2011	Chirimoyas 1	603	411	8,00	20,5	1,030	6,696	7,655	328,600	14,221	17,900	17,800	3,035	73,420
C201	15/09/2011	Chirimoyas 1	582	305	7,71	21,1	0,961	14,516	12,443	349,400	27,040	15,770	17,640	6,564	107,567
C202	02/12/2003	Chirimoyas 2	609	309	7,78	20,1		13,000	12,600	382,920	10,390	15,600	15,680	5,942	107,600
C202	01/04/2004	Chirimoyas 2	616	328	7,26	20,8		3,000	19,300	336,720	15,860	15,300	18,730	8,730	82,380
C202	21/07/2004	Chirimoyas 2	616	344	8,10	20,8	1,020	3,000	16,900	345,260	41,180	15,600	17,150	13,328	103,150
C202	01/09/2006	Chirimoyas 2	624		8,02	20,3	7,050	14,080	15,120	338,520	30,060	16,860	15,480	7,890	104,350
C202	25/09/2007	Chirimoyas 2	631	303	7,90	20,5	0,780	3,030	21,210	320,340	39,010	18,900	19,400	8,749	93,597
C202	27/10/2008	Chirimoyas 2	589	317	7,90	21,2		2,670	15,300	337,490	23,000	19,940	18,360	8,471	97,643
C202	28/10/2008	Chirimoyas 2	674	355	8,07	20,3		3,270	15,780	349,420	26,000	18,920	20,520	7,608	81,138
C202	15/09/2011	Chirimoyas 2	565	294	7,59	22,1	0,616	11,781	11,686	339,600	25,483	17,580	17,380	7,234	86,558
C203	15/09/2010	Chirimoyas 3	571	419	8,68	20,3	2,871	6,928	6,281	316,900	15,292	18,480	14,380	7,078	89,804
C209	31/03/2011	Chunchi 1	751	528	8,23	20,5	0,615	0,643	33,635	424,200	6,236	39,400	12,500	10,290	103,900
C209	25/08/2011	Chunchi 1	782	392	7,97	23,3	0,857	3,832	50,705	427,200	14,748	37,590	15,690	9,806	107,345
C210	23/09/2010	Chunchi 2	789	577	8,30	22,8	1,371	0,633	34,568	434,300	6,664	33,500	19,070	10,279	111,200
I202	26/08/2010	Cununyacu	1026	738	7,58	25,5	0,802	1,103	37,211	576,100	15,551	63,010	21,900	11,975	97,919
I202	03/03/2011	Cununyacu	1077	765	7,38	23,0	0,832	1,102	38,073	576,300	15,722	58,300	28,800	9,510	109,100
I202	23/08/2011	Cununyacu	1047	523	7,36	26,4	1,940	4,210	58,018	585,100	27,940	64,300	29,700	12,665	116,529
I202	28/10/2008	Cununyacu 1	1050	568	7,34	26,5		0,410	63,140	588,640	25,120	62,860	27,580	8,736	108,361
I203	21/04/2010	Cununyacu 2	997			25,8	0,429	1,618	55,283	554,669	25,429	53,235	25,937	12,159	121,316
C109	21/06/2010	Diego Andrade	675		7,33	22,8	0,427	17,407	19,964	379,752	24,191	41,707	38,196	10,744	55,715
C204	26/10/2012	EEQ	426	212	8,12	19,2		14,591	12,106	291,726	13,460	19,417	27,067	7,227	48,159

Annexe 3G

ID	Date	Nom	Cond	TDS	pH	T°	COT	N-NO3	Cl	HCO3	SO4	Mg	Ca	K	Na
M302	19/04/2010	El Nacional	1270			27,0	0,288	1,239	92,286	736,490	23,180	59,357	28,119	14,336	168,212
M302	21/04/2010	El Nacional	1259	733	7,34	27,4	3,119	0,080	60,519	690,000	14,484	73,850	30,080	13,280	148,990
M302	26/08/2010	El Nacional	1272	909	7,35	28,7	0,780	0,000	58,885	693,500	14,152	68,380	30,060	21,676	124,288
M302	03/03/2011	El Nacional	1285	908	7,27	27,3	1,029	1,449	58,170	679,200	13,916	69,800	23,200	9,925	144,100
M302	23/08/2011	El Nacional	1255	628	7,52	28,3	0,375	0,000	87,787	678,800	25,116	72,450	31,240	12,071	147,976
I101	24/09/2003	El Tingo		1102	7,52	35,7		1,000	480,240	1183,400	42,540	24,300	166,060	17,310	540,210
I101	02/12/2003	El Tingo	3110	1528	6,82			0,000	394,600	1829,540	0,000	144,300	30,000	29,900	639,875
I101	21/07/2004	El Tingo	3180	1801	7,10	40,7	0,980	0,000	322,800	1700,680	81,320	66,600	171,380	45,450	483,600
I101	09/05/2006	El Tingo		1097	7,23	32,4	9,060	10,940	206,250	1780,010	32,240	207,680	17,800	24,113	479,060
I101	03/05/2010	El Tingo	2970	2130	6,98	41,9	0,842	0,000	199,308	1667,200	26,152	66,520	163,150	25,430	491,440
I101	24/08/2011	El Tingo	3110	1560	7,13	41,9	1,027	0,000	310,397	1653,000	44,361	157,060	27,480	27,711	454,257
I204	16/11/2006	El Tingo Carrizal		1235	7,06	36,9	3,270	3,090	182,720	1684,780	15,570	88,100	54,710	18,835	528,000
I102	21/04/2010	El Tingo Nuevo	3180			41,0	1,067		324,598	1668,609	41,536	146,032	18,287	28,594	563,325
I102	04/05/2010	El Tingo Nuevo	2970		6,98	41,9		0,003	199,308	1667,200	26,152	66,520	163,150	25,430	491,440
C157	05/11/2008	La Armada	355	176	7,99	20,9		0,020	6,070	248,770	1,000	20,430	15,230	4,197	39,081
C157	30/04/2009	La Armada	347	169	7,76	21,0		0,001	5,810	250,000	1,000	21,000	13,000	2,990	42,220
C157	17/08/2011	La Armada	370	185	7,75	21,1	0,898	0,000	3,374	248,400	5,597	18,950	19,940	1,054	41,509
C104	28/09/2011	La Esperanza - MICEI	582	308	8,50	23,3	1,020	8,320	8,164	335,700	23,196	21,560	23,910	11,417	68,091
I106	30/10/2007	La Merced		489	6,80	32,4	0,870	0,734	66,337	618,200	18,010	73,607	40,294	14,492	88,676
I106	26/10/2009	La Merced	1246	734	6,77	33,5	0,468	0,001	75,419	623,488	19,600	40,487	70,455	14,220	130,050
I106	14/09/2010	La Merced	1103	793	7,00	33,0	1,009	0,000	43,507	608,700	12,311	64,590	40,080	8,851	101,337
I106	01/03/2011	La Merced		788	6,93	33,3	0,775	0,080	42,149	592,900	11,758	74,400	11,700	7,631	105,800
I106	24/08/2011	La Merced	1085	540	6,78	31,6	0,421	2,877	64,853	599,900	23,148	57,000	45,970	12,851	111,810
M303	03/03/2011	La Primavera 1	693	494	7,64	23,1	0,930	0,173	16,086	394,300	15,622	41,900	16,400	4,681	67,370
M303	24/08/2011	La Primavera 1	677	338	8,78	22,5	0,467	2,891	24,440	392,000	24,235	39,460	24,910	7,505	68,869
M304	23/09/2003	La Primavera 2	429		7,73	20,1		0,000	3,740	292,800	23,880	24,700	19,200	4,403	53,695
C159	08/04/2006	Moya 1		165	7,33	20,2	10,020	1,060	18,960	253,960	14,160	34,938	18,547	4,813	34,803

Annexe 3G

ID	Date	Nom	Cond	TDS	pH	T°	COT	N-NO3	Cl	HCO3	SO4	Mg	Ca	K	Na
C159	26/08/2006	Moya 1	388	218	7,68	19,1	8,750	0,010	8,920	241,060	13,660	33,200	19,480	3,410	20,330
C159	17/10/2007	Moya 1	401	233	8,10	19,4	1,450	0,029	11,537	279,756	14,480	27,640	30,807	3,262	21,845
C159	23/10/2008	Moya 1	441	253	7,18	19,2		0,220	11,900	264,270	18,000	33,380	25,090	6,815	27,786
C159	13/09/2010	Moya 1	328	241	7,96	18,9	3,063	0,000	0,691	219,600	5,520	25,230	16,080	0,490	27,882
C159	01/03/2011	Moya 1	294	238	7,97	17,2	0,758	0,112	0,633	210,500	5,194	27,500	15,900	0,000	14,710
C159		Moya 1	412	217	7,38	19,0		0,010	10,850	247,310	14,960	32,700	18,860		25,300
C160	26/08/2006	Moya 2	377	215	7,76	18,7	8,110	0,010	9,160	229,160	18,870	33,700	21,880	3,020	21,760
C160	04/05/2009	Moya 2	372	181	7,71	18,4		0,001	8,710	249,000	18,000	30,000	20,000	2,320	25,660
C160	01/03/2011	Moya 2	348	282	7,91	18,3	0,859	0,000	3,165	237,300	10,065	29,000	19,600	0,000	15,700
C160		Moya 2	400	216	7,73	18,6		0,010	7,710	237,340	4,030	20,500	34,610	2,392	25,634
C161	26/08/2006	Moya 3	347	196	7,60	18,7	6,830	0,010	7,710	226,160	1,000	25,300	10,400	3,080	29,170
C161	04/05/2009	Moya 3	334	196	8,04	18,5		0,001	3,870	239,000	1,000	24,000	9,000	2,280	34,090
C161	13/09/2010	Moya 3	387	285	8,01	18,6	1,364	0,000	3,429	235,700	10,452	33,400	17,370	0,593	22,117
C161	12/09/2011	Moya 3	319	170	7,55	19,3	0,877	2,863	0,942	228,400	11,851	22,650	10,260	2,047	36,699
C161		Moya 3	362	162	7,75	18,7		0,010	3,860	226,760	1,000	22,200	9,780	3,200	35,671
C105	02/10/2007	Patagua	663	320	7,57	22,7	0,420	1,700	25,070	460,850	24,000	39,270	21,570	9,980	89,161
C105	27/10/2008	Patagua	702	379	7,27	24,3		1,770	27,440	411,670	16,000	37,540	23,890	9,628	94,520
C105	28/04/2009	Patagua	587	283	7,85	22,0		1,966	19,840	362,000	22,000	30,000	19,000	10,690	67,910
C105	30/09/2011	Patagua	568	418	8,22	22,0	1,820	9,924	14,313	336,200	21,952	29,270	21,790	10,140	70,202
C163	05/09/2011	Pintag 2		109	6,92	13,7	1,043	4,274	0,661	127,200	10,563	12,310	15,690	4,092	17,286
I104	27/10/2008	Rumihuayco 2	959	519	6,81	21,8		0,190	46,380	572,420	11,000	65,890	28,860	8,908	115,184
I206	30/04/2009	Rumiloma 1	1010	485	7,85	27,6		0,319	55,650	608,000	9,000	52,000	11,000	13,590	138,460
I206	06/04/2010	Rumiloma 1		694	7,99	27,3	3,872	0,119	38,318	632,900	5,858	53,910	15,010	14,610	159,950
I206	17/08/2010	Rumiloma 1	1038	740	7,82	29,6	0,643	0,573	40,947	588,900	5,999	42,270	30,700	27,677	124,155
I206	24/08/2011	Rumiloma 1	1016	508	7,88	28,4	0,444	3,469	57,298	575,500	13,201	51,830	13,780	12,845	137,980
I207	28/10/2008	Rumiloma 2	1058	572	7,69	29,2		0,040	55,850	635,390	12,000	53,960	14,990	10,727	130,795
I207	19/04/2010	Rumiloma 2	1016				0,648	2,028	56,269	596,096	11,417	44,504	12,041	14,693	153,657

Annexe 3G

ID	Date	Nom	Cond	TDS	pH	T°	COT	N-NO3	Cl	HCO3	SO4	Mg	Ca	K	Na
I207	17/08/2010	Rumiloma 2	1099	786	7,89	28,3	0,845	0,049	38,478	658,900	5,735	51,090	19,470	36,146	139,366
I207	24/08/2011	Rumiloma 2	1071	536	7,84	25,6	0,628	3,337	51,601	624,500	13,230	54,020	14,720	13,033	147,442
C166	12/09/2011	San Juan de Conocoto	282	154	6,93	18,1	0,407	4,464	2,031	195,200	11,212	19,860	19,000	7,005	17,556
C206	12/04/2011	San Pedro	748	541	7,56	20,3	2,146	5,526	15,480	414,400	15,752	41,200	39,100	65,590	8,500
C165	17/10/2007	Selva Alegre	370	214	7,25	17,5	0,590	11,225	19,949	207,053	2,340	19,070	28,712	5,187	26,315
C165	30/04/2009	Selva Alegre	346	169	6,92	17,0		0,765	15,970	213,000	1,000	24,000	20,000	4,160	24,020
C165	06/04/2010	Selva Alegre	351	240	7,14	17,8	2,448	2,969	9,205	214,200	4,222	21,550	23,410	4,660	27,560
C165	17/08/2010	Selva Alegre	368	268	6,99	17,1	0,739	2,151	9,194	294,400	3,251	20,420	24,680	8,260	51,522
C165	22/02/2011	Selva Alegre	377	269	7,02	17,0	1,544	5,744	8,049	219,700	4,621	21,400	22,100	1,808	25,910
C165	17/08/2011	Selva Alegre	374	187	7,07	17,2	0,471	5,637	14,941	213,800	10,098	23,910	22,770	3,817	29,427
M301	17/10/2007	VCH 1	1370	791	7,61	23,9	2,510	1,820	121,377	766,204	0,830	42,865	68,133	7,136	218,197
M301	23/10/2008	VCH 1		792	7,51	24,7		0,060	50,510	800,920	3,000	56,210	26,210	7,493	165,000
M301	04/05/2010	VCH 1	1385	808	7,91	23,8	0,745	0,297	65,309	748,400	0,162	55,720	26,070	11,730	193,020
M301	14/09/2010	VCH 1	1339	981	7,90	22,7	3,050	0,000	65,033	754,800	0,140	65,870	20,600	16,305	175,944
M301	22/03/2011	VCH 1	1325	904	7,64	23,4	2,569	0,000	64,286	743,600	0,000	59,600	24,700	4,893	186,700
M301	25/08/2011	VCH 1	1310	655	7,41	22,0	1,030	2,825	89,238	745,100	5,834	50,620	41,720	7,082	191,249

Annexe 3G

Tableau 19. Données des éléments traces sur les forages et sources de la zone d'étude, exprimés en mg/l. Les données en bleu correspondent aux analyses faites en Hydrosociences en France, le reste sont les analyses chimiques fournies par l'EPMAPS de Quito. A. = analyse, Q = Quito, M = Montpellier.

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
C101	Q	Chiche nord	Acacias	1-août-91										1,800	0,100						
C101	Q	Chiche nord	Acacias	15-sept.-06	4,26									1,420	0,315					0,05	0,009
C101	Q	Chiche nord	Acacias	1-juil.-07		0,070		0,009		0,002		0,016	0,006	1,250	0,015	0,037		0,010	0,005		0,002
C101	Q	Chiche nord	Acacias	25-sept.-07	2,57	0,140		0,008			0,009			0,750	0,117	0,036	0,064			23,51	0,129
C101	Q	Chiche nord	Acacias	27-oct.-08	5,35	0,080		0,009						1,750	0,322	0,030	0,069			56,93	0,145
C101	Q	Chiche nord	Acacias	28-avr.-09											0,017	0,038	0,013				
C101	Q	Chiche nord	Acacias	10-nov.-09	5,60	0,140								0,250	0,129	0,029	0,036			21,40	
C101	Q	Chiche nord	Acacias	1-févr.-10	5,69			0,008						2,250	1,211	0,017	0,137			23,90	
C101	Q	Chiche nord	Acacias	7-mai-10				0,004							0,013	0,017					
C101	M	Chiche nord	Acacias	13-mai-10	3,50	0,011		0,014	0,034			0,001	0,001	2,495	0,458	0,017	0,033		0,001		0,004
C101	Q	Chiche nord	Acacias	26-août-10	5,85			0,009						1,496	2,159	0,018	0,095			19,40	
C101	Q	Chiche nord	Acacias	3-mars-11	4,78	0,110		0,008						1,479	0,622	0,022	0,029			40,40	
C101	Q	Chiche nord	Acacias	15-sept.-11	7,55	0,150								0,514	0,173	0,018	0,013			19,61	

Annexe 3G

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
C207	Q	Chiche nord	Cañon Chiche	16-oct.-07	0,50			0,086		0,002	0,015	0,009	0,006	0,250	0,293	0,541	0,166			77,62	0,018
C207	Q	Chiche nord	Cañon Chiche	27-oct.-08	2,01	0,090		0,006						1,500	0,077	0,023	0,024			53,00	0,620
C103	Q	Chiche nord	Carrizal	1-mars-91										1,700	0,900						
C103	Q	Chiche nord	Carrizal	1-déc.-97											0,250						
C103	Q	Chiche nord	Carrizal	1-mars-99										0,300	0,240						
C103	Q	Chiche nord	Carrizal	23-sept.-03	4,25	0,030		0,013							0,699		0,119				0,033
C103	Q	Chiche nord	Carrizal	1-sept.-06	6,49	0,030		0,017		0,002		0,036	0,006	0,500	0,232					0,23	0,005
C103	Q	Chiche nord	Carrizal	1-juil.-07		0,440		0,016		0,002	0,015	0,004	0,006	1,250	0,015	0,048		0,010	0,005		0,002
C103	Q	Chiche nord	Carrizal	25-sept.-07	2,48									0,750	0,215	0,042	0,066			23,82	
C103	M	Chiche nord	Carrizal	15-sept.-11				0,011	0,026	0,000	0,000	0,001					0,002	0,000			0,209
C102	Q	Chiche nord	Cementerio	1-janv.-74										0,900	0,100						
C208	Q	Chiche nord	Chiche Ferrocarril	12-avr.-11	3,17			0,007						1,565		0,000	0,000			41,30	
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	23-sept.-03	3,04			0,012							0,009						0,034
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	2-déc.-03	5,50	0,080		0,007							0,044		0,005			58,16	0,010

Annexe 3G

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	15-avr.-04	4,32			0,011							0,023		0,002			29,53	
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	21-juil.-04	5,29	0,050		0,022						0,620	0,036		0,017			55,56	
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	12-avr.-06	4,95			0,014						16,050	0,015	0,031				42,64	0,002
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	25-sept.-07	2,08	0,120		0,013			0,009			1,000	0,015	0,024	0,015			16,85	0,107
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	13-mars-09				0,012							0,115						
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	20-avr.-09	6,13	0,040		0,010		0,002			0,007	2,750	0,015	0,042	0,013			10,00	
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	12-mai-09				0,009							0,015						
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	6-juil.-09				0,008							0,015						
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	29-oct.-09	6,04	0,090		0,009						1,370	0,015	0,028	0,013			57,00	
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	27-janv.-10	5,45			0,009						1,750	0,015	0,017	0,022			26,00	
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	4-févr.-10				0,010							0,073		0,013				
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	9-mars-10																	
C201	M	Chiche nord	Chirimoyas 1	19-avr.-10	4,50	0,005		0,013				0,001	0,001	2,175		0,028	0,000				0,001
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	5-mai-10	5,07			0,011							0,015	0,025		0,018			

Annexe 3G

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	21-juil.-10				0,011							0,015						
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	15-sept.-10	5,50			0,011						1,543		0,026	0,000			36,80	
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	23-mars-11	5,51			0,011						1,575		0,029	0,000			46,10	
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	13-sept.-11				0,011						2,756	0,044					93,01	
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	15-sept.-11	5,79	0,100		0,008						2,843		0,000	0,000			48,11	
C201	Q	Chiche nord	Chirimoyas 1	23-nov.-11											0,150						
C202	Q	Chiche nord	Chirimoyas 2	2-déc.-03	5,89			0,007							0,016		0,008			58,93	0,012
C202	Q	Chiche nord	Chirimoyas 2	15-avr.-04	5,40			0,009							0,031		0,002			33,13	
C202	Q	Chiche nord	Chirimoyas 2	21-juil.-04	6,24			0,013						1,820	0,016		0,007			50,49	0,003
C202	Q	Chiche nord	Chirimoyas 2	12-avr.-06	4,95			0,012						1,140	0,015	0,020				34,56	
C202	Q	Chiche nord	Chirimoyas 2	25-sept.-07	2,18	0,150		0,010			0,011	0,010		1,500	0,018	0,019	0,020			22,75	0,113
C202	Q	Chiche nord	Chirimoyas 2	27-oct.-08	6,47	0,170		0,012						2,000	0,066	0,019	0,029			51,75	0,092
C202	Q	Chiche nord	Chirimoyas 2	28-oct.-08	5,69			0,010						2,000	0,074	0,017	0,029			28,06	0,033
C202	Q	Chiche nord	Chirimoyas 2	20-avr.-09	6,10			0,009		0,002				2,250	0,015	0,040	0,013			18,00	

Annexe 3G

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
C202	Q	Chiche nord	Chirimoyas 2	29-oct.-09	5,46	0,080		0,010						1,370	0,015	0,023	0,013	0,014		68,20	
C202	Q	Chiche nord	Chirimoyas 2	27-janv.-10	5,80			0,011						2,250	0,015	0,017	0,039			25,10	
C202	Q	Chiche nord	Chirimoyas 2	5-mai-10	5,41			0,009							0,015	0,019		0,015			
C202	Q	Chiche nord	Chirimoyas 2	15-sept.-10	5,94			0,009						1,570	0,015	0,020	0,013			27,10	
C202	Q	Chiche nord	Chirimoyas 2	23-mars-11	6,12			0,009						1,592		0,022	0,000			44,20	
C202	Q	Chiche nord	Chirimoyas 2	15-sept.-11	6,24	0,060		0,008						2,776	0,019	0,022	0,015			49,97	
C203	Q	Chiche nord	Chirimoyas 3	20-avr.-09		0,130		0,014					0,008		0,048	0,069					
C203	Q	Chiche nord	Chirimoyas 3	29-oct.-09	6,04	0,080		0,014						1,370	0,015	0,028	0,013			57,00	
C203	Q	Chiche nord	Chirimoyas 3	27-janv.-10	6,00			0,013						2,000	0,015	0,017	0,025			24,30	
C203	Q	Chiche nord	Chirimoyas 3	5-mai-10	5,87			0,013							0,020	0,027		0,017			
C203	Q	Chiche nord	Chirimoyas 3	15-sept.-10	6,43			0,010						1,656		0,023	0,000			44,20	
C203	Q	Chiche nord	Chirimoyas 3	23-mars-11	4,91			0,010						1,657	0,015	0,026	0,013			44,00	
C203	Q	Chiche nord	Chirimoyas 3	15-sept.-11	6,14			0,008						2,955	0,015	0,020	0,013			49,51	
C109	M	Chiche nord	Diego Andrade	21-juin-10		0,009		0,048	0,114			0,001	0,001	1,907	0,046	0,046	0,000		0,001		0,005

Annexe 3G

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
C205	M	Chiche nord	John Daane	28-mai-10	4,24	0,008		0,014	0,206			0,001	0,001	1,907	0,012	0,005	0,001	0,000	0,001		0,006
C204	M	Chiche nord	EEQ	26-oct.-12		0,001	0,000	0,004	0,068	0,000	0,000	0,005		1,163		0,004	0,000	0,001		28,79	0,001
C104	Q	Chiche nord	La Esperanza - MICEI	1-août-07				0,007						0,500	2,542						
C104	M	Chiche nord	La Esperanza - MICEI	16-sept.-11		0,113	0,000	0,008	0,040	0,000	0,000						0,064	0,000	0,001		0,395
C104	Q	Chiche nord	La Esperanza - MICEI	28-sept.-11	4,40	0,390		0,003						1,945	1,282	0,018	0,095			42,20	0,461
C105	Q	Chiche nord	Patagua	1-déc.-97																	
C105	Q	Chiche nord	Patagua	1-juin-98										0,900	0,100						
C105	Q	Chiche nord	Patagua	1-mars-99										1,200	0,190						
C105	Q	Chiche nord	Patagua	1-sept.-06	4,16	0,003		0,040		0,002		0,003	0,006	0,920	0,022					0,63	0,003
C105	Q	Chiche nord	Patagua	1-mars-07				0,047				0,003		0,250	0,015						
C105	Q	Chiche nord	Patagua	1-juil.-07		0,100		0,047		0,002	0,015		0,006	1,500	0,015	0,063		0,010	0,005		0,003
C105	Q	Chiche nord	Patagua	2-oct.-07	2,13	0,030		0,023		0,010	0,005	0,003	0,006	0,750	0,160	0,064	0,013	0,055		75,41	0,079
C105	Q	Chiche nord	Patagua	27-oct.-08	4,74	0,030		0,023		0,010				0,750	0,114	0,062	0,036	0,060		56,33	0,079
C105	Q	Chiche nord	Patagua	28-avr.-09	6,81			0,042		0,002				1,250	0,242	0,058	0,058			42,00	

Annexe 3G

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
C105	Q	Chiche nord	Patagua	1-févr.-10	4,65			0,060						1,000	0,066	0,041	0,029			27,40	
C105	M	Chiche nord	Patagua	14-sept.-11		0,044		0,071	0,090		0,000						0,181	0,001			0,017
C105	Q	Chiche nord	Patagua	30-sept.-11		0,080		0,033						1,323	0,061	0,000	0,000			43,50	
C106	Q	Chiche nord	San Patricio	1-déc.-97											1,000						
C106	Q	Chiche nord	San Patricio	1-mars-99										0,900	0,040						
C206	Q	Chiche nord	San Pedro	22-avr.-10	4,96			0,002						0,377		0,000	0,000			74,00	
C206	Q	Chiche nord	San Pedro	12-avr.-11	3,30	0,110		0,003						1,071	0,042	0,019	0,163			43,50	
C107	Q	Chiche nord	Santa Rosa	1-sept.-08				0,021							0,099						
I202	Q	Ilaló	Cununyacu 1	3-juil.-07				0,071							0,015		0,013				
I202	Q	Ilaló	Cununyacu 1	4-juil.-07				0,086							0,015						
I202	Q	Ilaló	Cununyacu 1	28-oct.-08	4,13			0,073						0,000	0,070	0,111	0,031			32,79	0,066
I202	Q	Ilaló	Cununyacu 1	26-janv.-10	3,30			0,091						0,130	0,016	0,115	0,030	0,010		21,90	
I202	Q	Ilaló	Cununyacu 1	21-avr.-10	4,17			0,089							0,015	0,115					
I202	Q	Ilaló	Cununyacu 1	26-août-10	4,74			0,088						0,250		0,119	0,000			36,30	
I202	Q	Ilaló	Cununyacu 1	3-mars-11	2,88			0,095						0,258		0,129	0,000			48,50	
I202	Q	Ilaló	Cununyacu 1	23-août-11	0,00			0,037						0,835		0,124	0,000			75,40	
I203	Q	Ilaló	Cununyacu 2	1-juil.-07				0,071							0,015		0,013				
I203	M	Ilaló	Cununyacu 2	21-avr.-10	4,50	0,005		0,067								0,103	0,000				0,007
I101	Q	Ilaló	El Tingo	1-déc.-97		0,011								0,100	0,190						
I101	Q	Ilaló	El Tingo	1-mars-99										0,050	0,300						

Annexe 3G

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
I101	Q	Ilaló	El Tingo	24-sept.-03	1,51			0,043							0,180		0,012				0,036
I101	Q	Ilaló	El Tingo	2-déc.-03	0,00			0,109							0,432		0,021			86,70	0,019
I101	Q	Ilaló	El Tingo	16-avr.-04	0,00			0,099							0,032		0,023			60,30	
I101	Q	Ilaló	El Tingo	21-juil.-04	0,00			0,117						0,000	0,191		0,053		0,040	75,52	
I101	Q	Ilaló	El Tingo	10-avr.-06	2,18	0,080		0,092		0,003	0,015			0,930	0,124	0,610	0,040			56,54	0,088
I101	Q	Ilaló	El Tingo	9-mai-06	0,59			0,091			0,015			0,100	0,035	0,439	0,055			70,30	0,008
I101	Q	Ilaló	El Tingo	31-août-06	1,24	0,050				0,007				0,500	0,042	0,488	0,145			0,41	0,010
I101	Q	Ilaló	El Tingo	16-nov.-06	0,01			0,370			0,010			0,500	0,170	0,067	2,940			2,97	0,045
I101	Q	Ilaló	El Tingo	16-nov.-06	0,01			0,107			0,014			0,500	0,217	0,454	0,269			2,16	0,009
I101	Q	Ilaló	El Tingo	28-mars-07				0,687			0,040			0,250	0,276		0,033		0,040	12,69	
I101	Q	Ilaló	El Tingo	16-oct.-07	1,49	0,040					0,018	0,007		0,250	0,020	0,032	0,194			17,97	0,017
I101	Q	Ilaló	El Tingo	23-oct.-08	0,83	0,210		0,382						0,500	0,673	0,518	0,127			99,86	0,092
I101	Q	Ilaló	El Tingo	29-avr.-09	0,15					0,004			0,009	0,000	0,184	0,663	0,015	0,010		30,00	
I101	Q	Ilaló	El Tingo	26-oct.-09	0,33			0,435		0,003				0,120	0,345	0,648	0,013	0,022		81,40	
I101	Q	Ilaló	El Tingo	3-mai-10	0,00			0,443						0,264	0,363	0,644	0,031	0,034		108,80	
I101	Q	Ilaló	El Tingo	14-sept.-10	1,28			0,317						0,270	0,189	0,637	0,031	0,022		72,30	
I101	Q	Ilaló	El Tingo	22-mars-11	0,00			0,571						0,278	0,364	0,635	0,000			55,20	
I101	Q	Ilaló	El Tingo	24-août-11	0,00			0,095						0,847	0,559	0,642	0,026			76,20	
I204	Q	Ilaló	El Tingo Carrizal	9-mai-06	0,99			0,311			0,016			0,100	0,333	0,471	0,045			77,92	0,015
I102	Q	Ilaló	El Tingo Nuevo	16-oct.-07	1,49	0,040		0,006			0,018	0,007		0,250	0,020	0,032	0,194			17,97	0,017
I102	Q	Ilaló	El Tingo Nuevo	29-avr.-09	0,15			0,108		0,004			0,009	0,000	0,025	0,663	0,015	0,012		30,00	
I102	Q	Ilaló	El Tingo Nuevo	26-janv.-10	0,82			0,302		0,008				0,250	0,249	0,611	0,069	0,027		28,70	
I102	M	Ilaló	El Tingo Nuevo	21-avr.-10	0,80	0,008		0,086						0,406	0,123	0,637	0,026				0,048
I205	M	Ilaló	El Tingo Piscina	21-avr.-10	3,50	0,006		0,054						0,501	0,058	0,367	0,020				0,006
I106	Q	Ilaló	La Merced	28-mars-07		0,000		0,805						0,250	1,920		0,084			9,82	
I106	Q	Ilaló	La Merced	30-oct.-07	0,99			0,102			0,016			0,250	0,921	0,160	0,229	0,010		40,08	0,004

Annexe 3G

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
I106	Q	Ilaló	La Merced	29-oct.-08	0,00	0,070		0,499						0,250	0,840	0,149	0,079			30,88	0,066
I106	Q	Ilaló	La Merced	4-mai-09	1,80			0,664					0,007	0,250	0,228	0,207	0,061			29,00	
I106	Q	Ilaló	La Merced	26-oct.-09	1,31			0,466						0,620	0,910	0,180	0,092	0,014		84,90	
I106	Q	Ilaló	La Merced	27-janv.-10	0,67			0,440						0,250	0,954	0,166	0,120			28,10	
I106	Q	Ilaló	La Merced	4-mai-10	0,00			0,412						0,252	0,946	0,182	0,080	0,023		111,20	
I106	Q	Ilaló	La Merced	14-sept.-10	1,20			0,650						0,245	1,036	0,180	0,175			72,70	
I106	Q	Ilaló	La Merced	1-mars-11	0,00			0,716						0,235	1,020	0,189	0,092			50,90	
I106	Q	Ilaló	La Merced	24-août-11	0,00			0,639						0,810	1,013	0,182	0,085			81,60	
I103	Q	Ilaló	Planta de Tratamiento	1-sept.-98										0,200	0,200						
I103	Q	Ilaló	Planta de Tratamiento	1-sept.-06	2,57	0,003		0,105		0,002		0,010	0,006	0,500	0,017					0,69	0,016
I103	Q	Ilaló	Planta de Tratamiento	1-mars-07				0,105				0,003		0,250	0,015						
I103	Q	Ilaló	Planta de Tratamiento	1-juil.-07		0,100		0,099		0,002	0,021	0,004	0,006	0,250	0,136	0,135		0,010	0,009		0,004
I104	Q	Ilaló	Rumihuayco 2	27-oct.-08	1,63	0,080		0,083						0,250	0,068	0,109	0,031			68,61	0,098
M305	Q	Ilaló	Rumihuayco 1	1-sept.-95										0,300	0,100						
I206	Q	Ilaló	Rumiloma 1	16-oct.-07	0,79			0,008			0,020	0,006		0,250	0,015	0,077	0,335			25,65	0,006
I206	Q	Ilaló	Rumiloma 1	28-oct.-08	2,83			0,008						0,000	0,029	0,085	0,051			33,85	
I206	Q	Ilaló	Rumiloma 1	30-avr.-09	4,24			0,007					0,009	0,500	0,015	0,119	0,013			20,00	
I206	Q	Ilaló	Rumiloma 1	26-janv.-10	2,28			0,011						0,130	0,015	0,089	0,030			29,60	
I206	Q	Ilaló	Rumiloma 1	6-avr.-10	4,14			0,008							0,028	0,100		0,013			
I206	Q	Ilaló	Rumiloma 1	17-août-10	2,96			0,008						0,211		0,086	0,038			33,70	
I206	Q	Ilaló	Rumiloma 1	22-févr.-11	2,84			0,007						0,212	0,015	0,094	0,037			47,60	
I206	Q	Ilaló	Rumiloma 1	20-avr.-11	3,16			0,008							0,268		0,072				
I206	Q	Ilaló	Rumiloma 1	24-août-11	2,18			0,007						0,749	0,016	0,088	0,046			61,40	
I207	Q	Ilaló	Rumiloma 2	16-oct.-07	1,61			0,008			0,017	0,007		1,000	0,015	0,091	0,214	0,010		23,39	0,017

Annexe 3G

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
I207	Q	Ilaló	Rumiloma 2	28-oct.-08	0,69	0,230		0,008						0,250	0,207	0,008	0,053			28,04	
I207	Q	Ilaló	Rumiloma 2	26-janv.-10	3,62			0,008						0,250	0,193	0,086	0,075			26,00	
I207	Q	Ilaló	Rumiloma 2	6-avr.-10	2,79			0,008							0,015	0,087		0,011			
I207	M	Ilaló	Rumiloma 2	19-avr.-10	3,50	0,005		0,007						0,549	0,023	0,082	0,037				0,002
I207	Q	Ilaló	Rumiloma 2	17-août-10	3,92			0,007						0,216	0,032	0,086	0,027			45,40	
I207	Q	Ilaló	Rumiloma 2	22-févr.-11	4,29	0,600		0,007						0,239	0,409	0,104	0,019			46,00	
I207	Q	Ilaló	Rumiloma 2	20-avr.-11	3,40			0,008							0,025		0,058				
I207	Q	Ilaló	Rumiloma 2	24-août-11	2,93			0,004						0,784	0,030	0,101	0,000			61,70	
I208	Q	Ilaló	Rumiloma 3	16-oct.-07	0,69	0,150		0,002			0,014	0,008		1,000	0,061	0,028	0,195			29,27	0,008
C152	Q	Chiche sud	Alangasí No. 1	17-oct.-07	1,93						0,016	0,006		0,250	0,972	0,030	0,489			46,17	0,003
C152	Q	Chiche sud	Alangasí No. 1	4-mai-10	3,25									0,260	2,498	0,028	0,243	0,017		62,80	
C152	Q	Chiche sud	Alangasí No. 1	14-sept.-10	1,72									0,337	1,724	0,020	0,379			56,50	0,070
C152	Q	Chiche sud	Alangasí No. 1	22-mars-11	0,00	0,090								0,362	1,926	0,020	0,178			64,60	0,044
C152	Q	Chiche sud	Alangasí No. 1	25-août-11	3,01	0,040								0,809	0,896	0,032	0,277			55,20	
C152	Q	Chiche sud	Alangasí No. 1		2,89	0,120	0,004		0,111		0,007				0,810	0,032	0,272	0,012			0,007
C153	Q	Chiche sud	Alangasí No. 2	29-oct.-08	2,24	0,070								0,500	0,506	0,019	0,013			26,53	0,063
C153	Q	Chiche sud	Alangasí No. 2	4-mai-09	1,29									0,500	0,508	0,050	0,141			15,00	
C153	Q	Chiche sud	Alangasí No. 2	3-mai-10	1,79									0,299	0,188	0,031	0,192	0,012		56,00	

Annexe 3G

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
C153	Q	Chiche sud	Alangasí No. 2	14-sept.-10	2,30									0,281	0,200	0,028	0,242			50,80	
C153	Q	Chiche sud	Alangasí No. 2	22-mars-11	0,00									0,280	0,366	0,038	0,138			46,40	
C153	Q	Chiche sud	Alangasí No. 2	25-août-11	0,00									0,929	0,228	0,027	0,128			53,40	
C153	Q	Chiche sud	Alangasí No. 2		3,45	0,140	0,030		0,152		0,050				0,488	0,028	0,177	0,011			0,005
C154	Q	Chiche sud	Alangasí No. 3	15-mars-11	2,72									0,259	0,597	0,033	0,232			40,80	
C155	Q	Chiche sud	Armenia 1	8-avr.-06	4,46	0,120					0,007	0,007		0,230	0,394	0,019	0,113			45,15	0,176
C155	Q	Chiche sud	Armenia 1	26-août-06	3,32	0,080				0,006		0,005		0,500	0,135	0,016	1,935			48,09	0,009
C155	Q	Chiche sud	Armenia 1	23-oct.-08	0,49	0,070								0,250	0,416	0,017	0,145			56,75	0,056
C155	Q	Chiche sud	Armenia 1	29-avr.-09	1,36									0,250	0,215	0,041	0,870			19,00	
C155	Q	Chiche sud	Armenia 1	13-sept.-10	2,30									0,259	0,207	0,000	0,202			49,50	
C155	Q	Chiche sud	Armenia 1	1-mars-11	1,05									0,244	0,209	0,000	0,110			44,30	
C155	Q	Chiche sud	Armenia 1	12-sept.-11	1,10									0,821	0,194	0,000	0,097			50,20	
C155	Q	Chiche sud	Armenia 1		1,93	0,080	0,003				0,017				0,121	0,015	0,088				0,010
C167	Q	Chiche sud	Armenia 4	9-juin-09											0,186		0,064				

Annexe 3G

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
C167	Q	Chiche sud	Armenia 4	3-mai-10	5,39								0,006	0,317	0,300	0,018	0,088	0,014		58,20	
C167	Q	Chiche sud	Armenia 4	13-sept.-10	3,33									0,327	0,316	0,018	0,187			59,40	
C167	Q	Chiche sud	Armenia 4	1-mars-11	1,63									0,326	0,265	0,019	0,095			44,20	
C167	Q	Chiche sud	Armenia 4	12-sept.-11	0,93									0,929	0,317	0,019	0,089			53,09	
C157	Q	Chiche sud	La Armada	5-nov.-08	2,58			0,002						0,500	0,193	0,022	0,102			34,11	
C157	Q	Chiche sud	La Armada	30-avr.-09	1,06			0,002					0,007	0,500	0,157	0,055	0,073			15,00	
C157	Q	Chiche sud	La Armada	21-oct.-09	1,63			0,002						0,500	0,218	0,024	0,119			37,40	
C157	Q	Chiche sud	La Armada	6-avr.-10	0,98			0,002						0,353	0,181	0,028	0,117			17,70	
C157	Q	Chiche sud	La Armada	17-août-10	2,07			0,002						0,337	0,309	0,074	0,122			32,50	
C157	Q	Chiche sud	La Armada	22-févr.-11	2,09									0,324	0,183	0,095	0,131			42,10	
C157	Q	Chiche sud	La Armada	17-août-11	0,00									0,964		0,025	0,133			19,00	
C159	Q	Chiche sud	Moya 1	8-avr.-06	2,77	0,240						0,063		0,890	1,853	0,016	0,141			47,66	0,120
C159	Q	Chiche sud	Moya 1	26-août-06	4,26	0,070		0,002		0,005		0,003		0,500	0,102	0,016	0,865			52,30	0,007
C159	Q	Chiche sud	Moya 1	17-oct.-07	1,14						0,020	0,011		0,250	0,069	0,018	0,227			18,96	0,006

Annexe 3G

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
C159	Q	Chiche sud	Moya 1	23-oct.-08	2,65	0,540						0,024		0,250	2,111	0,017	0,512			58,60	0,098
C159	Q	Chiche sud	Moya 1	13-sept.-10	2,36									0,328	0,641	0,000	0,260			52,60	
C159	Q	Chiche sud	Moya 1	1-mars-11	3,96	0,080								0,321	0,738	0,000	0,183			44,40	
C159	Q	Chiche sud	Moya 1		1,98	0,070	0,004	0,002	0,100		0,019				0,056	0,018	0,156				0,009
C160	Q	Chiche sud	Moya 2	8-avr.-06	2,08	0,280					0,007	0,006		0,940	0,696	0,016	0,140			50,04	0,107
C160	Q	Chiche sud	Moya 2	26-août-06	2,08	0,080		0,002		0,007		0,003		0,500	0,330	0,015	0,163			51,87	0,006
C160	Q	Chiche sud	Moya 2	4-mai-09	0,92									0,500	0,425	0,044	0,081			32,00	
C160	Q	Chiche sud	Moya 2	27-oct.-09	0,52									0,620	0,593	0,017	0,140			56,00	
C160	Q	Chiche sud	Moya 2	13-sept.-10	2,12							0,097		0,357	1,303	0,021	0,310			53,40	
C160	Q	Chiche sud	Moya 2	1-mars-11	2,11									0,336	0,468	0,000	0,122			46,90	
C160	Q	Chiche sud	Moya 2		1,14	0,070	0,004	0,002			0,017				0,294	0,016	0,127				0,011
C161	Q	Chiche sud	Moya 3	8-avr.-06	4,65	0,100					0,007			0,930	0,525	0,019	0,129			48,80	0,090
C161	Q	Chiche sud	Moya 3	26-août-06	2,77	0,180				0,005				0,500	0,530	0,019	0,197			51,60	0,008
C161	Q	Chiche sud	Moya 3	23-oct.-08	1,06	0,120								0,500	0,912	0,017	0,215			55,60	0,086

Annexe 3G

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
C161	Q	Chiche sud	Moya 3	4-mai-09	5,29								0,009		0,391	0,045	0,193				
C161	Q	Chiche sud	Moya 3	27-oct.-09	0,92									0,500	0,840	0,018	0,215			55,60	
C161	Q	Chiche sud	Moya 3	4-mai-10	1,25			0,002						0,331	0,544	0,000	0,110	0,014		58,60	
C161	Q	Chiche sud	Moya 3	13-sept.-10	2,80	0,130								0,340	0,950	0,000	0,268			54,10	
C161	Q	Chiche sud	Moya 3	1-mars-11	1,41									0,332	0,252	0,021	0,164			44,40	
C161	Q	Chiche sud	Moya 3	12-sept.-11	1,26									0,942	1,114	0,022	0,146			52,21	
C161	Q	Chiche sud	Moya 3		0,94	0,140	0,002		0,157		0,020	0,024		0,250	0,890	0,017	0,092	0,016		18,00	0,128
C163	Q	Chiche sud	Pintag 2	25-nov.-09				0,002							0,223		0,104				
C163	Q	Chiche sud	Pintag 2	25-nov.-09											0,134		0,063				
C163	Q	Chiche sud	Pintag 2	25-nov.-09											0,107		0,051				
C163	Q	Chiche sud	Pintag 2	25-nov.-09											0,081		0,037				
C163	Q	Chiche sud	Pintag 2	19-janv.-10				0,004							0,521		0,228				
C163	Q	Chiche sud	Pintag 2	4-févr.-10				0,006							0,285		0,228				
C163	Q	Chiche sud	Pintag 2	5-mai-10	3,18			0,003						0,316	0,433	0,021	0,000	0,016		60,20	

Annexe 3G

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
C163	Q	Chiche sud	Pintag 2	31-août-10	2,04	0,100		0,004						0,323	0,938	0,019	0,208			46,40	0,031
C163	Q	Chiche sud	Pintag 2	5-sept.-11	6,50									0,661		0,000	0,000			46,60	
C166	Q	Chiche sud	San Juan de Conocoto	29-avr.-09						0,002			0,006		0,333	0,018	0,013				
C166	Q	Chiche sud	San Juan de Conocoto	3-mai-10	5,12									0,472	0,405	0,000	0,029	0,013		84,60	
C166	Q	Chiche sud	San Juan de Conocoto	13-sept.-10	5,70									0,484	5,491	0,000	0,073			74,40	
C166	Q	Chiche sud	San Juan de Conocoto	12-sept.-11	3,67									1,163	2,170	0,000	0,028			67,63	
C165	Q	Chiche sud	Selva Alegre	10-avr.-06	4,95			0,005						0,450	0,167	0,038	0,032			54,54	0,001
C165	Q	Chiche sud	Selva Alegre	17-oct.-07	2,82			0,003			0,022	0,009		0,250	0,021	0,035	0,155			47,43	0,001
C165	Q	Chiche sud	Selva Alegre	29-oct.-08	5,16	0,100		0,003						0,250	0,152	0,031	0,063			28,40	0,076
C165	Q	Chiche sud	Selva Alegre	30-avr.-09	6,06			0,003						0,250	0,022	0,061	0,013			19,00	
C165	Q	Chiche sud	Selva Alegre	21-oct.-09	5,36			0,003						0,250	0,049	0,034	0,013			18,30	
C165	Q	Chiche sud	Selva Alegre	6-avr.-10	5,75			0,004						0,168	0,045	0,037	0,000			16,70	
C165	Q	Chiche sud	Selva Alegre	17-août-10	5,42			0,003						0,159	0,031	0,032	0,000			40,70	
C165	Q	Chiche sud	Selva Alegre	22-févr.-11	5,90			0,003						0,154	0,028	0,030	0,000			47,10	

Annexe 3G

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
C165	Q	Chiche sud	Selva Alegre	17-août-11	4,34			0,003						0,707	0,032	0,034	0,000			19,20	
C209	Q	Chiche sud	Chunchi 1	31-mars-11	2,04			0,012						0,217		0,070	0,000			40,50	
C209	Q	Chiche sud	Chunchi 1	25-août-11	4,15			0,012						0,784		0,064	0,000			62,60	
C210	Q	Chiche sud	Chunchi 2	11-mai-10	5,78			0,012						0,230		0,060	0,000			66,80	
C210	Q	Chiche sud	Chunchi 2	23-sept.-10	6,37			0,013						0,227		0,058	0,000			32,40	
M302	Q	Mélange	El Nacional	1-nov.-05											0,595		0,131				
M302	Q	Mélange	El Nacional	1-janv.-06				0,322							1,881		0,141				
M302	Q	Mélange	El Nacional	25-sept.-07	1,88	0,140		0,011			0,014			0,250	2,129	0,126	0,144			30,89	0,117
M302	Q	Mélange	El Nacional	27-oct.-08	0,00	0,120		0,025						0,250	2,661	0,117	0,178			58,33	0,055
M302	Q	Mélange	El Nacional	28-avr.-09	1,82			0,055		0,002				0,250	1,467	0,143	0,090	0,010		40,00	
M302	Q	Mélange	El Nacional	10-nov.-09	0,53			0,180						0,130	3,381	0,139	0,182			36,90	
M302	Q	Mélange	El Nacional	26-janv.-10	0,53			0,182						0,250	3,698	0,131	0,203	0,014		34,40	
M302	M	Mélange	El Nacional	19-avr.-10	0,20	0,004		0,047							1,893	0,130	0,117				0,001
M302	Q	Mélange	El Nacional	21-avr.-10	1,15			0,251							2,777	0,130		0,014			
M302	Q	Mélange	El Nacional	26-août-10	2,37			0,085						0,265	0,145	0,139	0,115			26,70	
M302	Q	Mélange	El Nacional	3-mars-11	0,00			0,252						0,270	0,032	0,149	0,131			53,60	
M302	Q	Mélange	El Nacional	23-août-11	0,00									0,858	3,001	0,140	0,161			71,40	
M303	Q	Mélange	La Primavera 1	1-mars-99										0,400	0,090						
M303	Q	Mélange	La Primavera 1	1-juil.-07		0,130		0,120		0,002	0,017	0,004	0,006	0,500	1,940	0,057		0,010	0,005		0,012
M303	Q	Mélange	La Primavera 1	1-févr.-10	1,32			0,104						0,880	0,508	0,059	0,056			25,70	
M303	Q	Mélange	La Primavera 1	7-mai-10				0,096						0,460	0,404	0,017	0,054			75,20	
M303	M	Mélange	La Primavera 1	13-mai-10	0,12	0,008		0,044	0,043			0,001		0,727	0,023	0,057	0,050				0,015
M303	Q	Mélange	La Primavera 1	26-août-10	1,48			0,060						0,444	1,000	0,064	0,051			45,70	

Annexe 3G

Code	A.	Aquifère	Nom	Date	OD	Al	Sb	As	Ba	Cd	Co	Cu	Cr	F	Fe	Li	Mn	Ni	Pb	Si	Zn
M303	Q	Mélange	La Primavera 1	3-mars-11	0,00			0,045						0,484	0,129	0,083	0,062			52,70	
M303	Q	Mélange	La Primavera 1	24-août-11	0,00			0,045						1,108	1,810	0,078	0,077			65,20	
M304	Q	Mélange	La Primavera 2	1-avr.-99										0,750	0,150						
M304	Q	Mélange	La Primavera 2	23-sept.-03	1,30			0,008							0,729						0,036
M304	Q	Mélange	La Primavera 2	1-juil.-07		0,100		0,023		0,002	0,018	0,005	0,006	1,000	0,162	0,030		0,010	0,005		0,002
M301	Q	Mélange	VCH1	20-avr.-06	1,68	0,120		0,002			0,010	0,006		5,350	0,562	0,161	0,164			56,34	0,080
M301	Q	Mélange	VCH1	31-août-06	1,44	0,030				0,006				0,500	0,573	0,183	0,336			0,20	0,007
M301	Q	Mélange	VCH1	17-oct.-07	0,84			0,003			0,015	0,007		0,250	0,548	0,162	0,302			46,77	
M301	Q	Mélange	VCH1	23-oct.-08	0,36	0,100		0,002						0,500	0,697	0,168	0,234			62,97	0,072
M301	Q	Mélange	VCH1	29-avr.-09	0,75					0,003				0,750	0,465	0,208	0,138			17,00	
M301	Q	Mélange	VCH1	4-mai-10	1,60			0,003						0,425	0,607	0,186	0,176	0,020		63,20	
M301	Q	Mélange	VCH1	14-sept.-10	1,75			0,002						0,414	0,641	0,182	0,198			54,50	
M301	Q	Mélange	VCH1	22-mars-11	0,00			0,002						0,411	0,639	0,192	0,191			63,60	
M301	Q	Mélange	VCH1	25-août-11	0,00			0,002						1,053	0,618	0,184	0,186			62,60	

Annexe 3G

Tableau 20. Données des analyses faites par ICP-MS en Hydrosociences, pour les éléments traces sur les forages et sources sur la Vallée de Tumbaco. <LD = dessous de la limite de détection, <LQ = dessous de la limite de quantification. Les éléments en bleu correspondent aux isotopes moins abondants.

	19-avr.-10	13-mai-10	13-mai-10	28-mai-10	21-juin-10	14-sept.-11	15-sept.-11	16-sept.-11	26-oct.-12
ID	C201	M303	C101	C205	C109	C105	C103	C104	C204
ppb	Las Chirimoyas 1	La Primavera 1	Las Acacias	John Daane	Diego Andrade	Patagua	El Carrizal	MICEI	EEQ
7Li	28,00	57,19	16,64	5,13	45,63				3,83
11B	129,60	450,20	55,47	122,30	478,90	374,10	52,01	93,60	36,24
27Al	5,14	7,79	10,53	7,85	9,47	43,72	<LD	113,30	1,38
29Si									28790,00
40Ca						22690,00	13950,00	25990,00	
47Ti	9,94								5,20
51V	87,23	1,55	78,05	118,40	42,69				51,18
52Cr	1,01	<LD	1,12	0,68	0,80				1,42
53Cr	1,00	<LD	1,28	0,74	0,90				
55Mn	<LQ	49,82	33,10	0,98	0,38	180,80	2,04	63,91	0,13
56Fe	0,90	442,30	11,84	2,20	1,84	147,90	24,86	937,70	<LQ
59Co	<LQ	<LD	<LD	<LD	<LD	0,15	0,04	0,14	0,02
60Ni	<LQ	<LD	<LD	0,43	<LD	0,90	0,19	0,46	0,74
63Cu	0,52					0,60	0,66	1,28	4,56
65Cu	0,53	1,03	0,82	1,30	0,99				4,55
66Zn	0,72	14,86	3,94	6,10	4,91	17,20	208,90	395,30	0,95
75As	13,11	43,89	13,50	14,47	48,40	70,55	10,81	8,29	3,58
85Rb	<LQ	10,62	10,03	9,42	8,06	12,97	9,35	9,48	8,19
86Sr	147,60	97,42	179,40	413,60	187,60	164,70	103,00	207,90	270,00
88Sr									249,80
95Mo	6,06	2,79	4,92	1,63	2,97				8,25
98Mo		2,85	4,95	1,64	2,99				
107Ag	0,00								<LQ

Annexe 3G

	19-avr.-10	13-mai-10	13-mai-10	28-mai-10	21-juin-10	14-sept.-11	15-sept.-11	16-sept.-11	26-oct.-12
ID	C201	M303	C101	C205	C109	C105	C103	C104	C204
ppb	Las Chirimoyas 1	La Primavera 1	Las Acacias	John Daane	Diego Andrade	Patagua	El Carrizal	MICEI	EEQ
111Cd	<LQ	<LD	<LD	<LD	<LD	<LQ	0,02	0,02	0,02
121Sb	<LQ	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LQ	0,13	0,05
123Sb	<LQ								0,05
133Cs	<LQ								0,03
136Ba		42,76	33,91	206,10	114,10	90,18	25,77	39,88	68,28
137Ba	<LQ								69,90
138Ba									65,88
140Ce	0,00	<LD	<LD	<LD	<LD				
203Tl	<LQ					0,02	0,00	0,01	<LQ
206Pb	<LQ	<LD	0,67	0,64	0,63	<LD	<LQ	0,57	<LQ
238U	<LQ	<LD	3,95	2,95	0,64	0,99	6,70	4,10	2,50

Tableau 21. Données des analyses faites par ICP-MS en Hydrosociences, pour les éléments traces sur les forages et sources sur le volcan Ilaló et le forage El Nacional. <LQ = dessous de la limite de quantification. Les éléments en bleu correspondent aux isotopes moins abondants.

	19-avr.-10	19-avr.-10	21-avr.-10	21-avr.-10	21-avr.-10
ID	I207	M302	I203	I102	I205
ppb	Rumiloma 2	El Nacional	Cununyacu 2	El Tingo Nuevo	El Tingo Piscina
7Li	82,10	129,90	102,90	637,10	366,60
11B	1412,00	1648,00	1337,00	7533,00	4872,00
27Al	5,41	4,42	5,11	7,50	5,83
47Ti	10,52	13,25	11,73	22,68	14,96
51V	5,93	<LQ	17,62	<LQ	20,88
55Mn	37,18	116,80	<LQ	25,89	19,70

Annexe 3G

	19-avr.-10	19-avr.-10	21-avr.-10	21-avr.-10	21-avr.-10
ID	I207	M302	I203	I102	I205
ppb	Rumiloma 2	El Nacional	Cununyacu 2	El Tingo Nuevo	El Tingo Piscina
56Fe	<LQ	1741,00	<LQ	92,55	9,96
66Zn	1,78	0,90	7,22	48,13	6,09
75As	7,38	47,42	66,95	86,37	53,66
86Sr	176,40	205,00	173,20	515,60	305,30
95Mo	12,46	6,41	5,06	10,42	8,47
107Ag	-0,01	-0,01	-0,03	-0,02	-0,01
140Ce	0,00	0,00	0,00	0,04	0,03

ANNEXE 3H

Tableau 22. Information sur les stations hydrométriques localisées sur le bassin versant du Guayllabamba

Code	Station	Type	Easting	Northing	Surface bassin Km ²	Périmètre Km	Altitude m	Données Manquantes %
H159	San Pedro en Machachi	Limnógrafo	773502	9947603	376	90	2825	6,9%
H158	Pita AJ Salto	Limnógrafo	786740	9936842	134	54	3672	37,5%
H152	La Chimba en Olmedo	Limnímetro	829273	10016694	82	45	3342	85,0%
H150	Intag DJ Pamplona	Limnógrafo	764507	10024583	1026	149	1110	20,6%
H149	Guayllabamba en Pte. Chacapata	Limnógrafo	762063	10020465	4692	442	910	46,0%
H148	Guayllabamba DJ Pisque	Limnógrafo	788858	10001722	3870	370	1727	84,0%
H146	Guayllabamba DJ Alambi	Limnógrafo	758117	10016483	6448	530	1055	17,3%
H145	Guayllabamba AJ Cubi	Limnógrafo	786320	10010296	4149	379	1708	11,1%
H144	Guachalá AJ Granobles	Limnógrafo	816337	10001445	312	95	2757	11,6%
H143	Granobles AJ Guachalá	Limnógrafo	815408	10002859	398	95	2729	10,9%
H136	Alambi en Churupamba	Limnógrafo	750097	10025995	450	120	750	39,5%

ANNEXE 4A

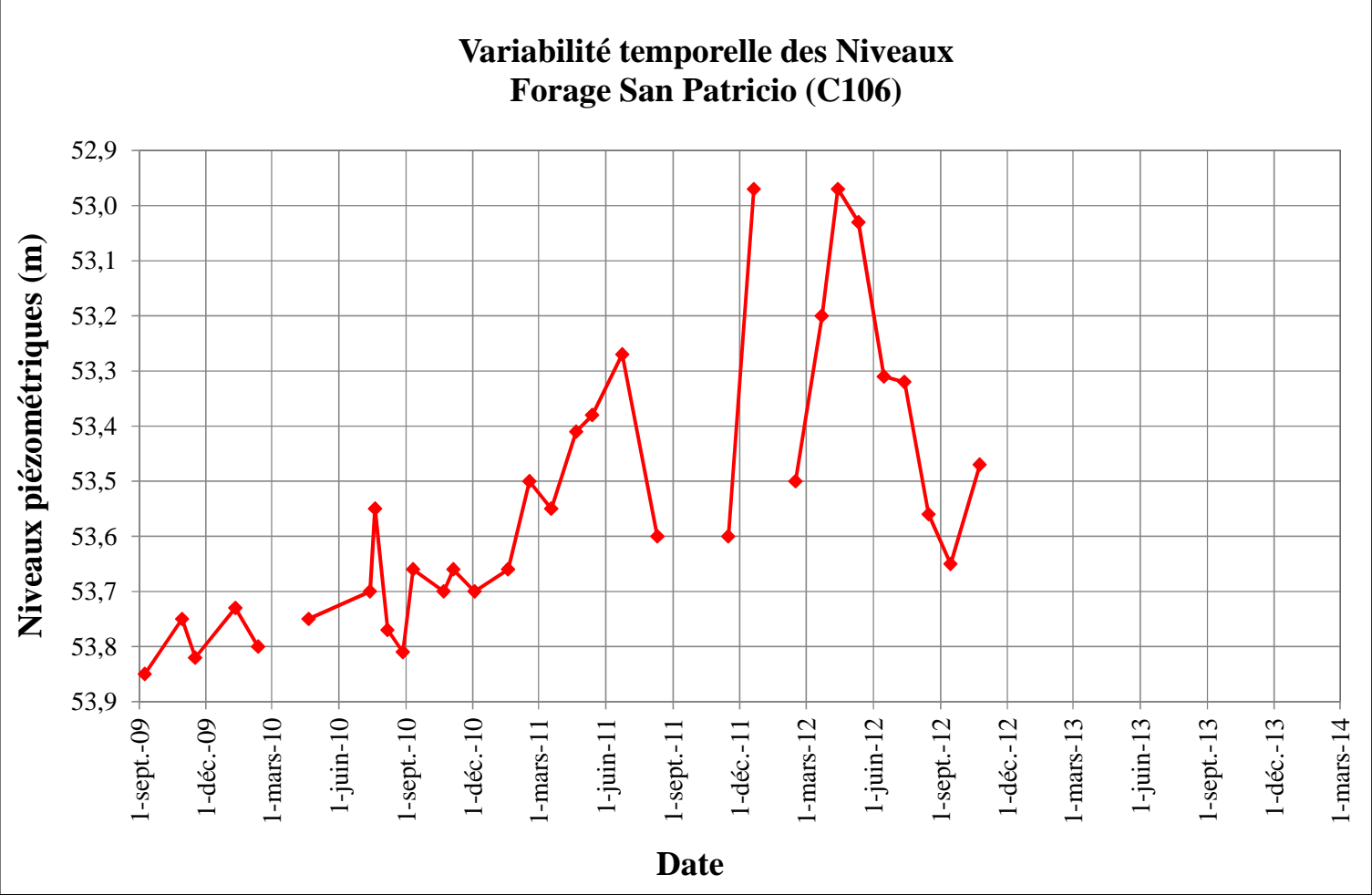


Figure 11. Variation de niveaux piézométriques dans le forage San Patricio de l'aquifère Chiche nord

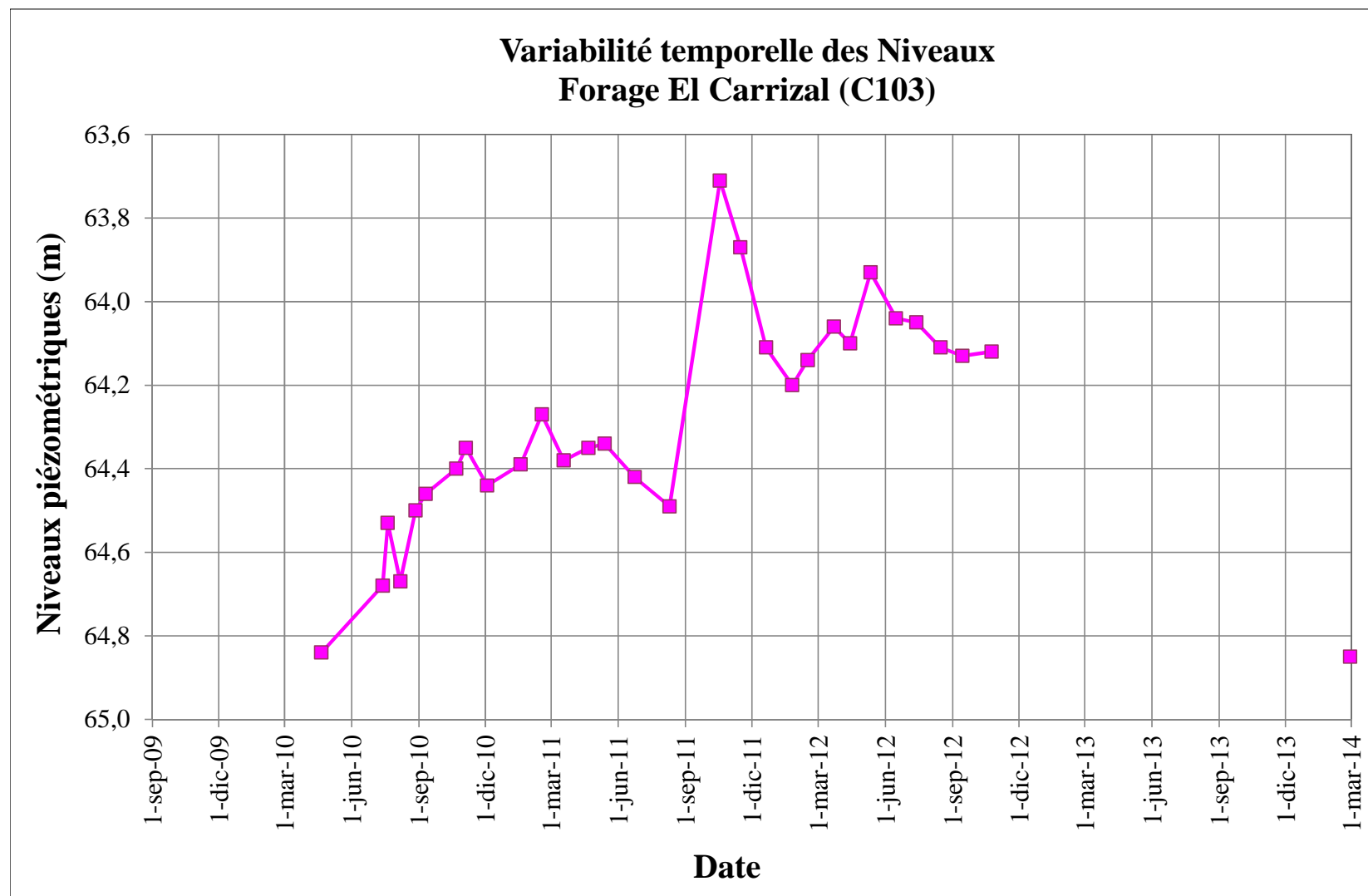


Figure 12. Variation de niveaux piézométriques dans le forage El Carrizal de l'aquifère Chiche nord.

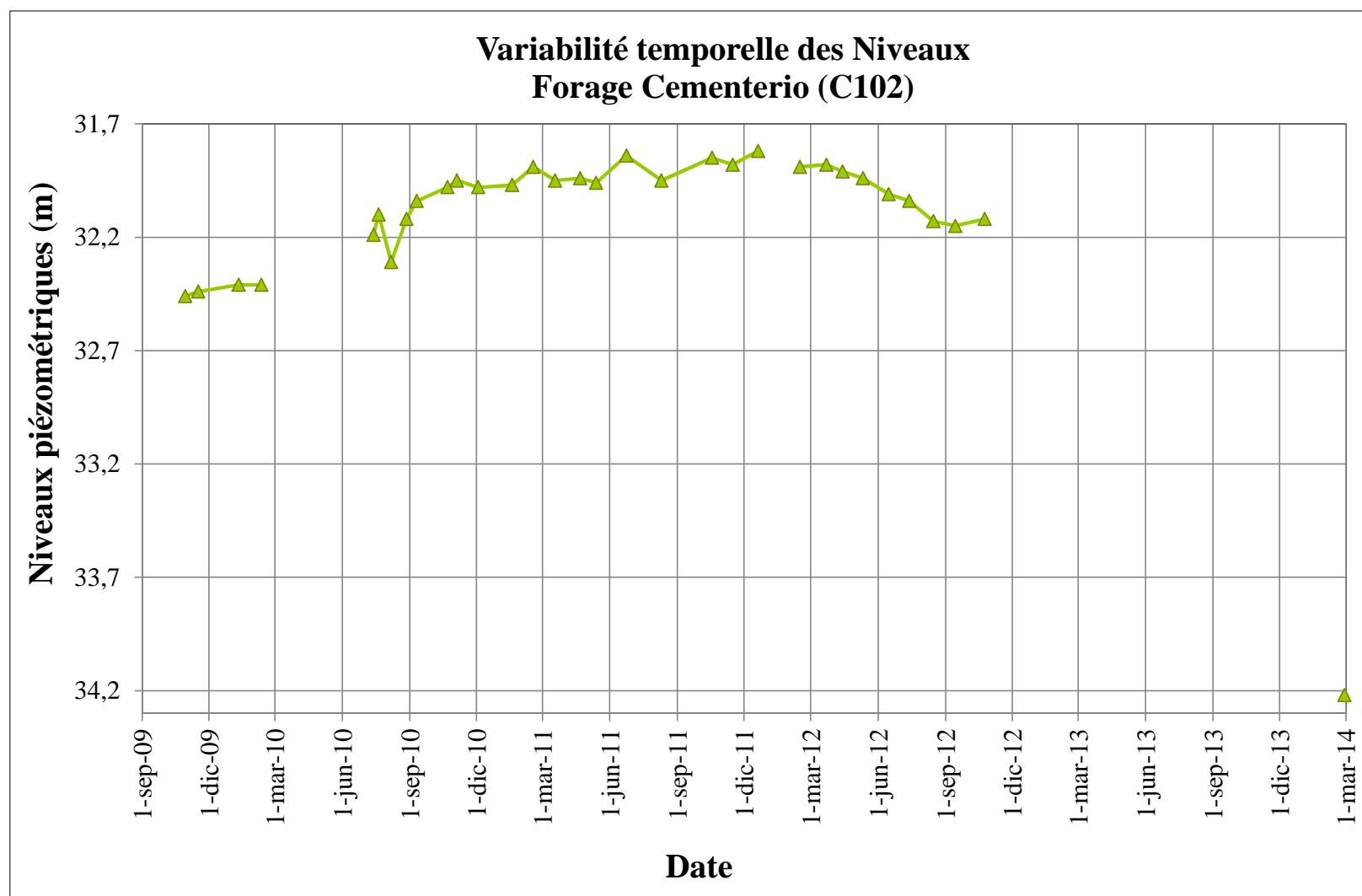


Figure 13. Variation de niveaux piézométriques dans le forage Cementerio de l'aquifère Chiche nord.

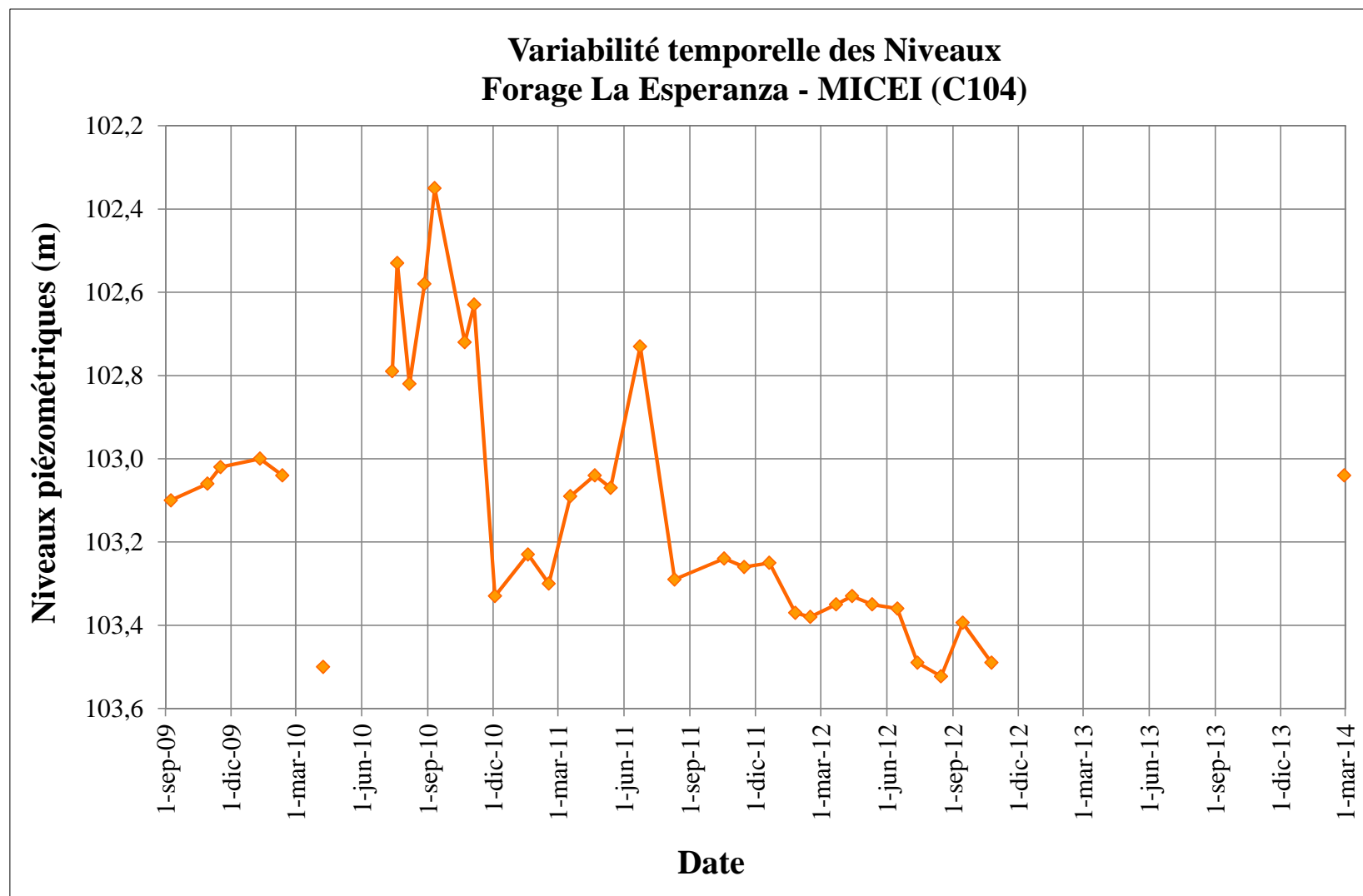


Figure 14. Variation de niveaux piézométriques dans le forage La Esperanza - MICEI de l'aquifère Chiche nord.

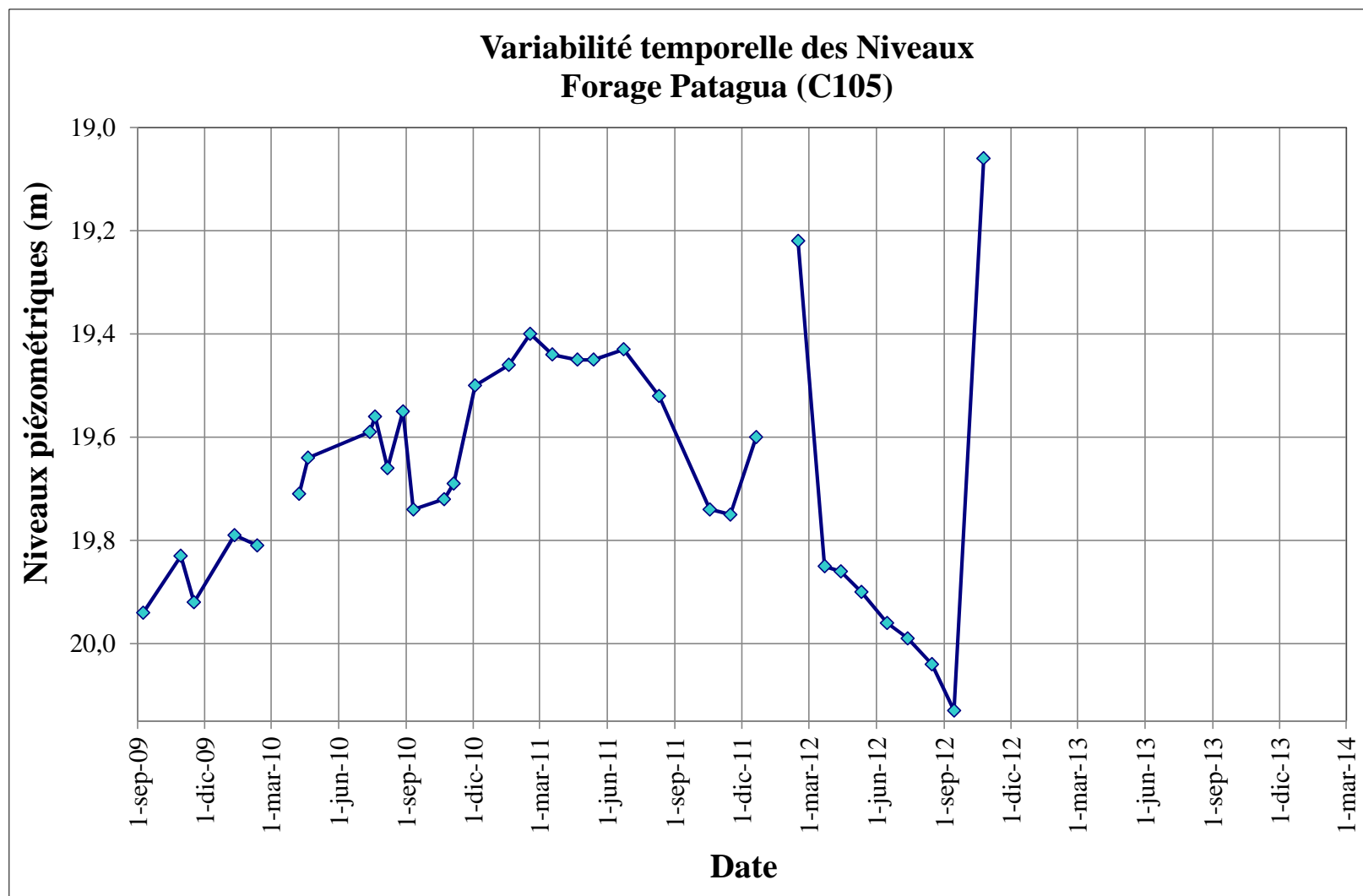


Figure 15. Variation de niveaux piézométriques dans le forage Patagua de l'aquifère Chiche nord.

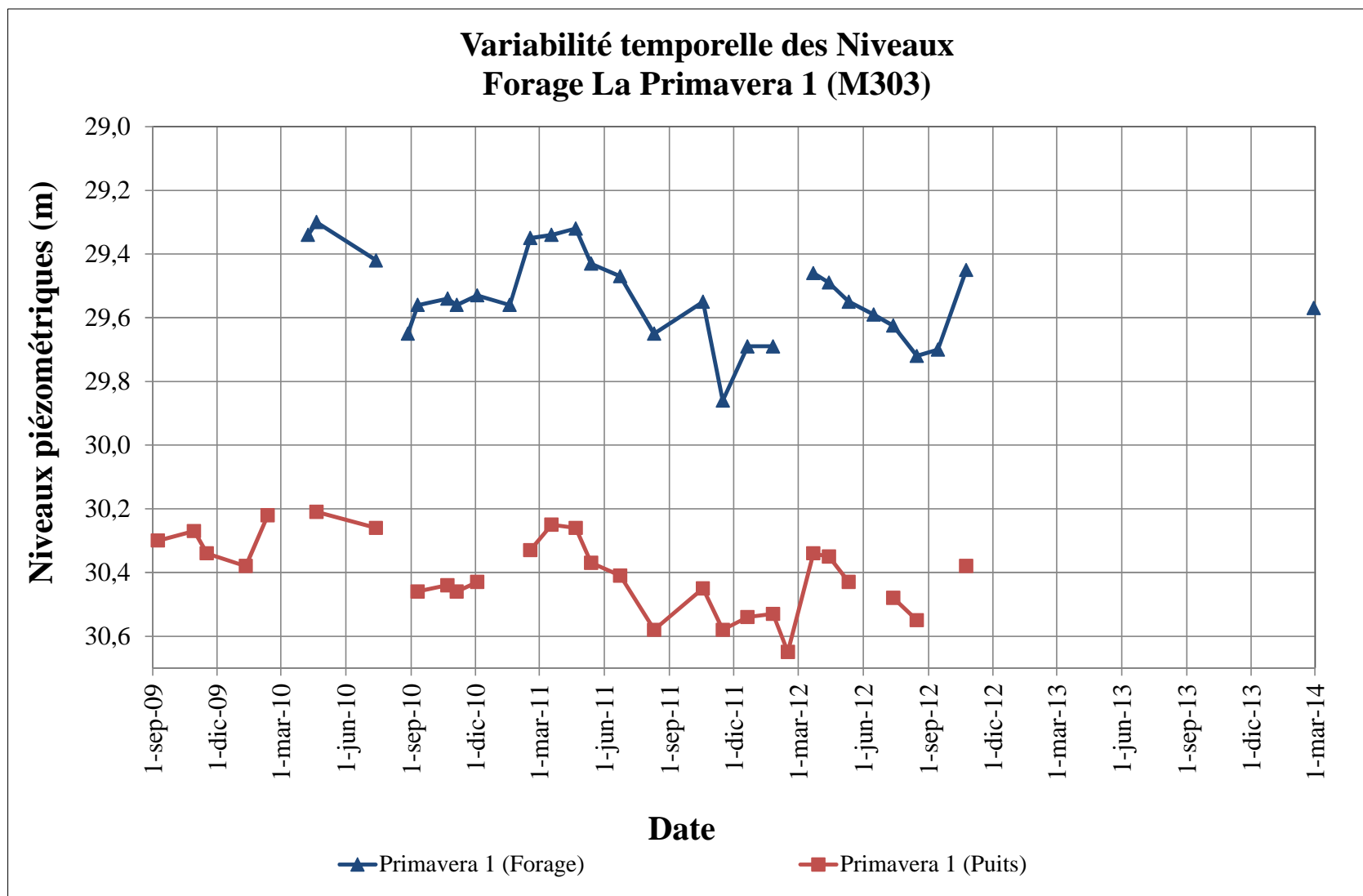


Figure 16. Variation de niveaux piézométriques dans le forage La Primavera 1 de l'aquifère Chiche nord.

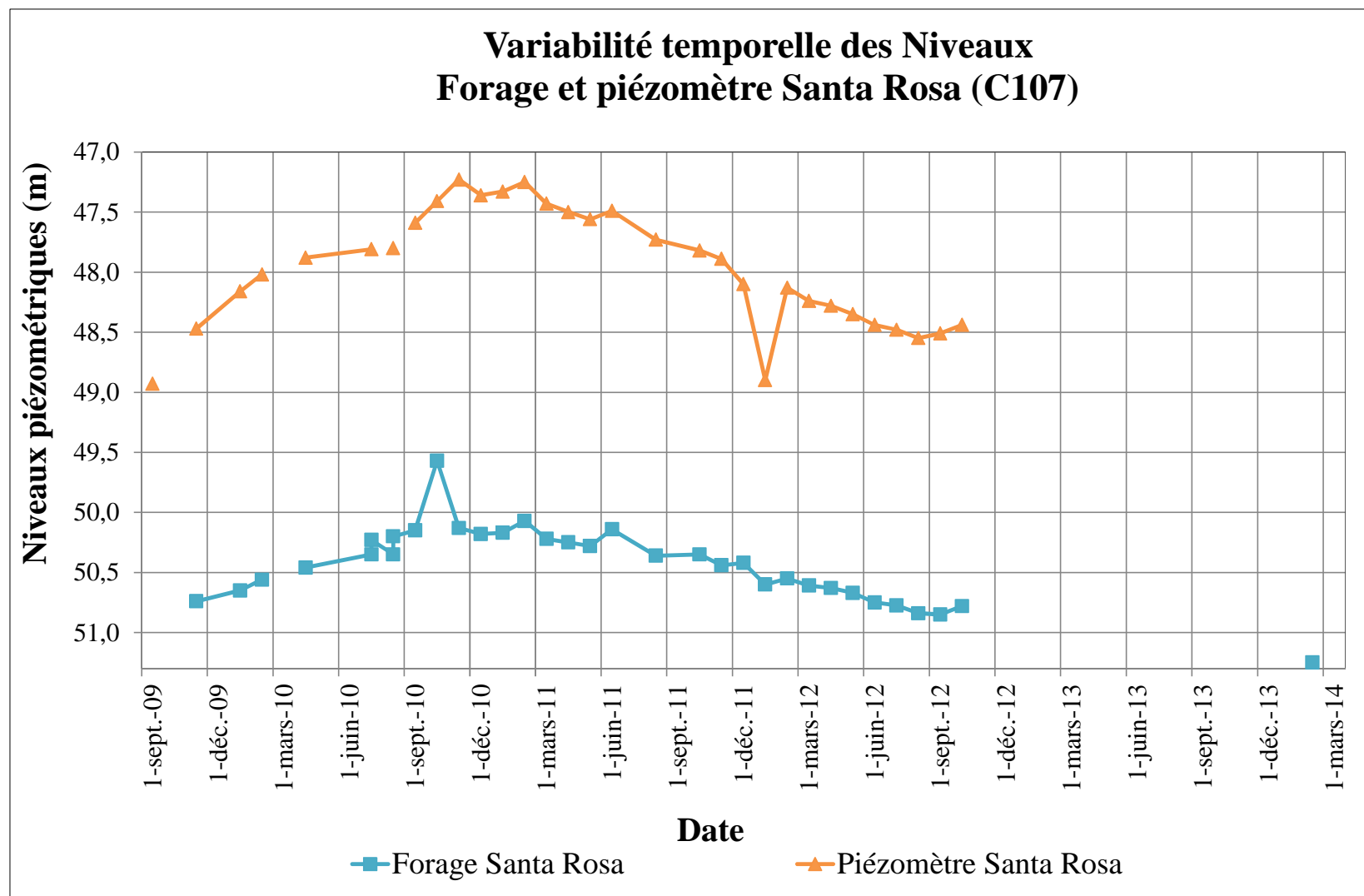


Figure 17. Variation de niveaux piézométriques dans le forage Santa Rosa de l'aquifère Chiche nord.

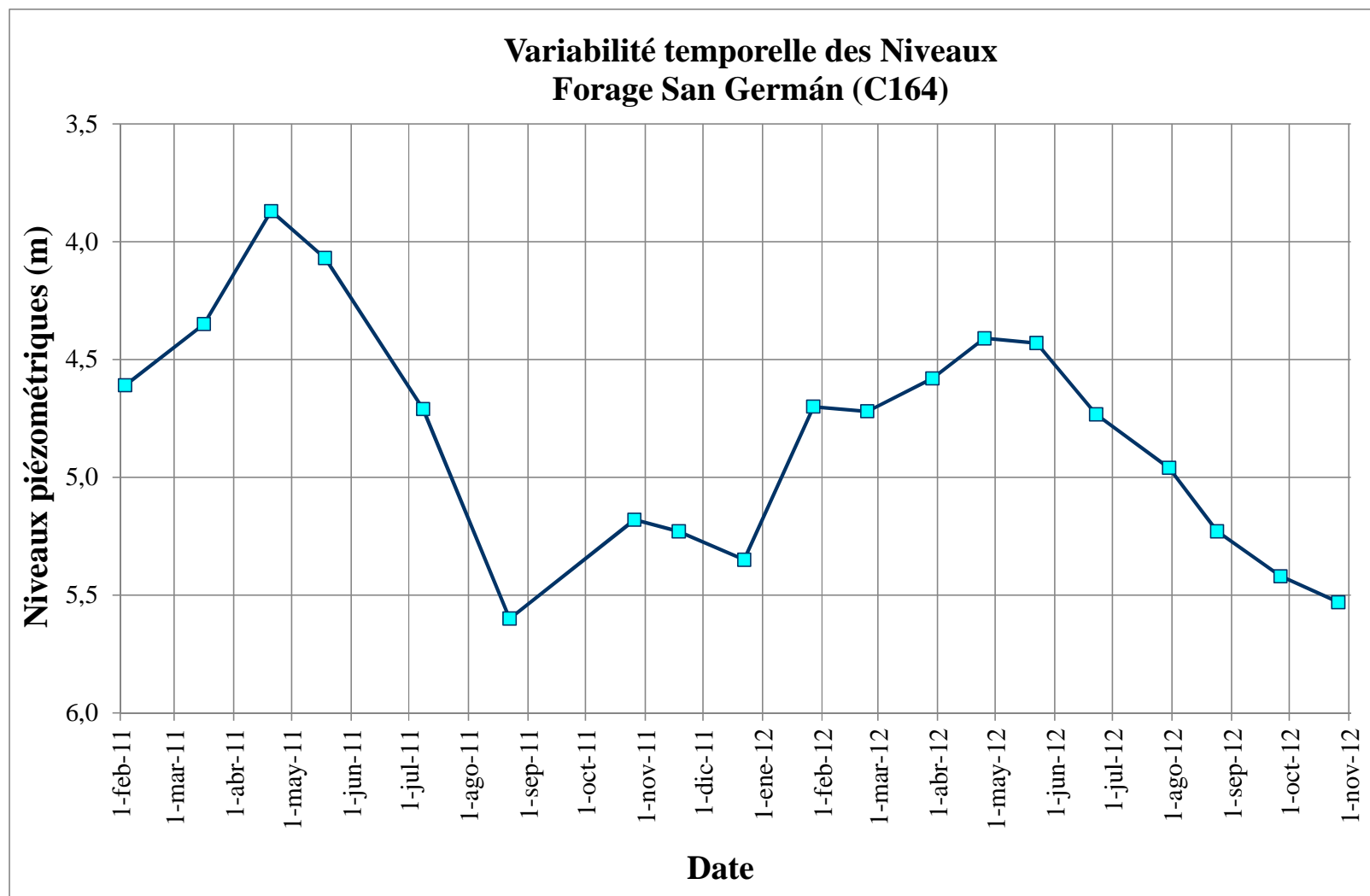


Figure 18. Variation de niveaux piézométriques dans le forage San Germán de l'aquifère Chiche sud.

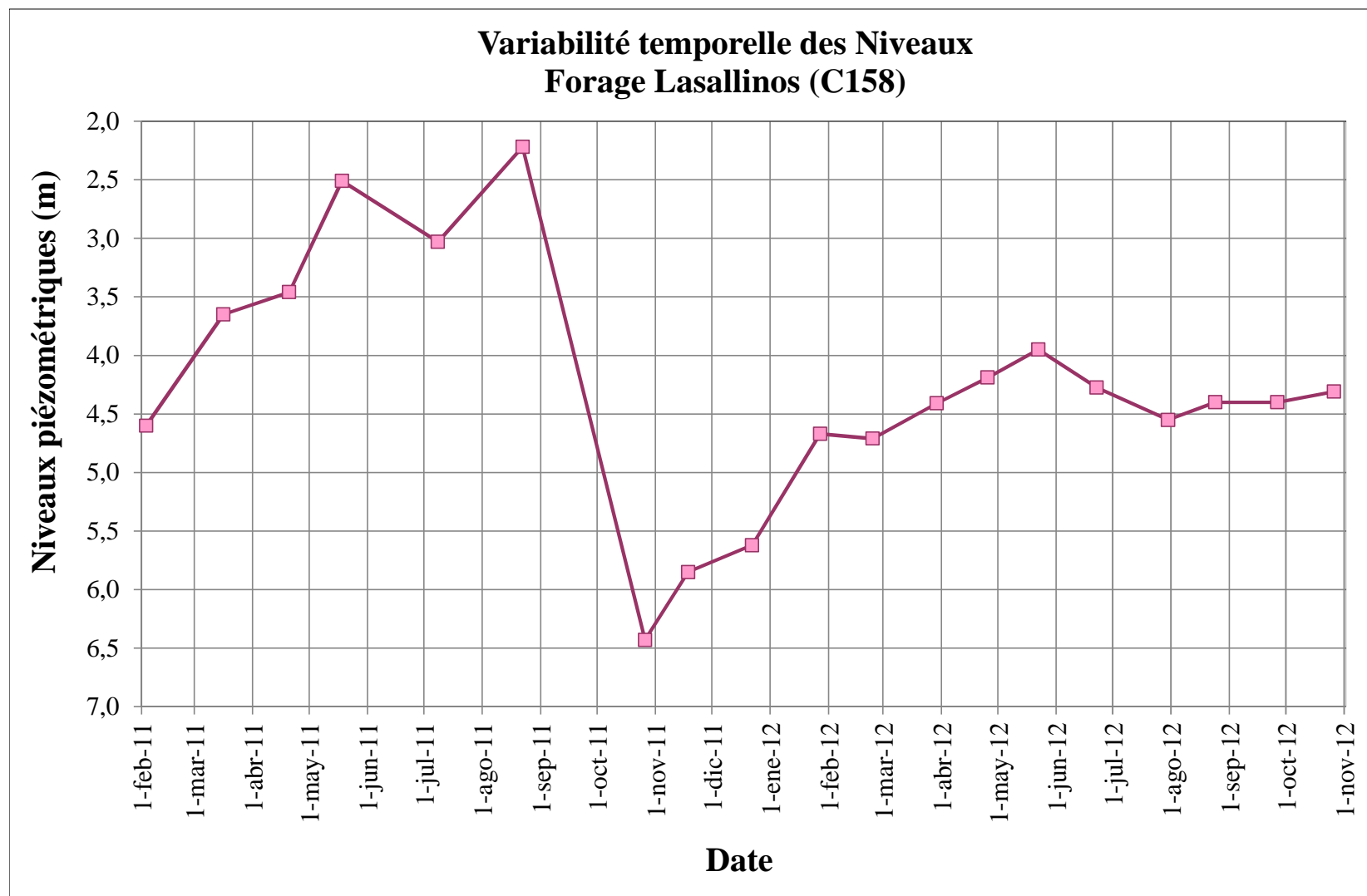


Figure 19. Variation de niveaux piézométriques dans le forage Lasallinos de l'aquifère Chiche sud.

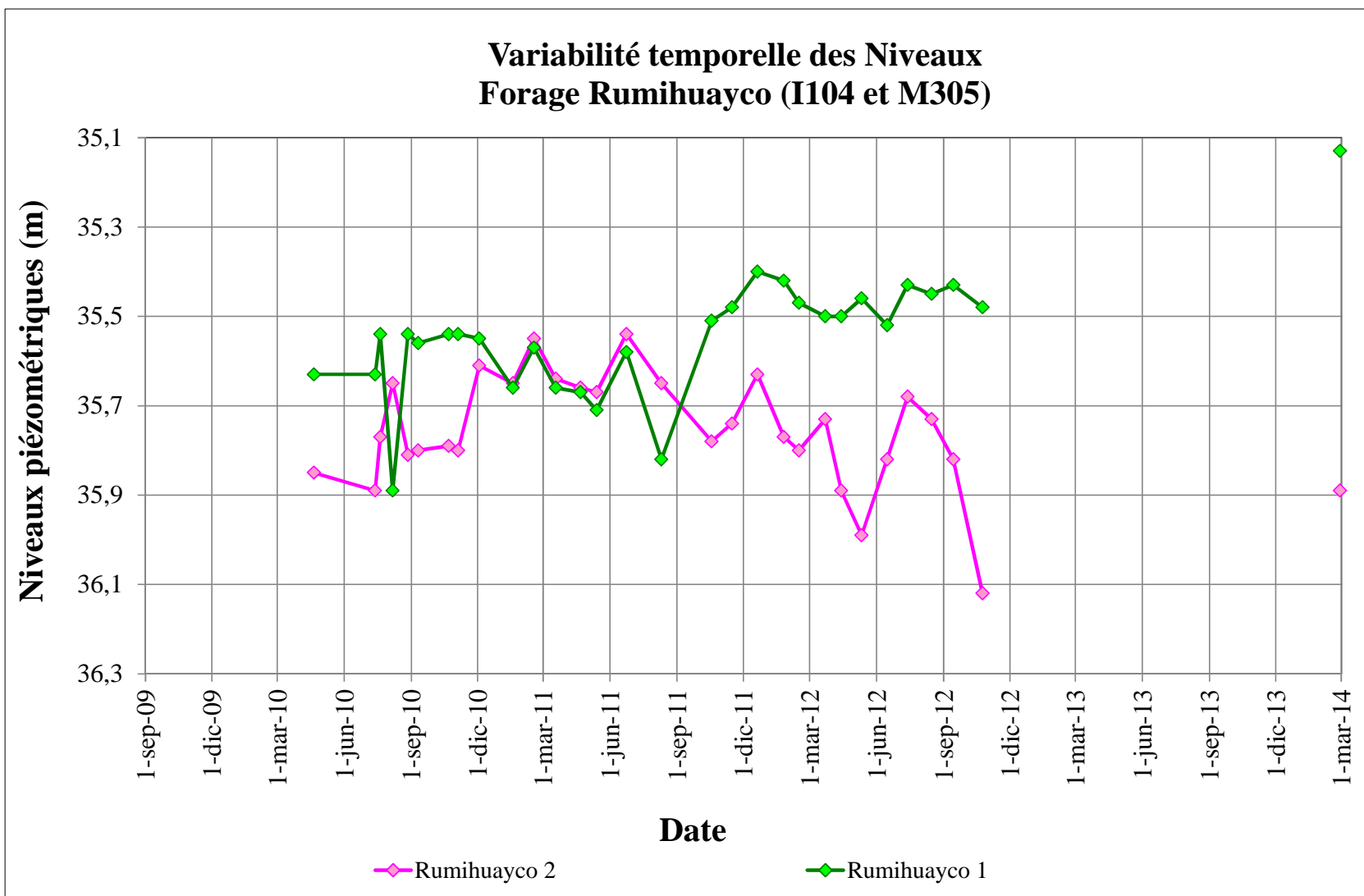


Figure 20. Variation de niveaux piézométriques dans les forages Rumihuayco de l'aquifère Ilaló.

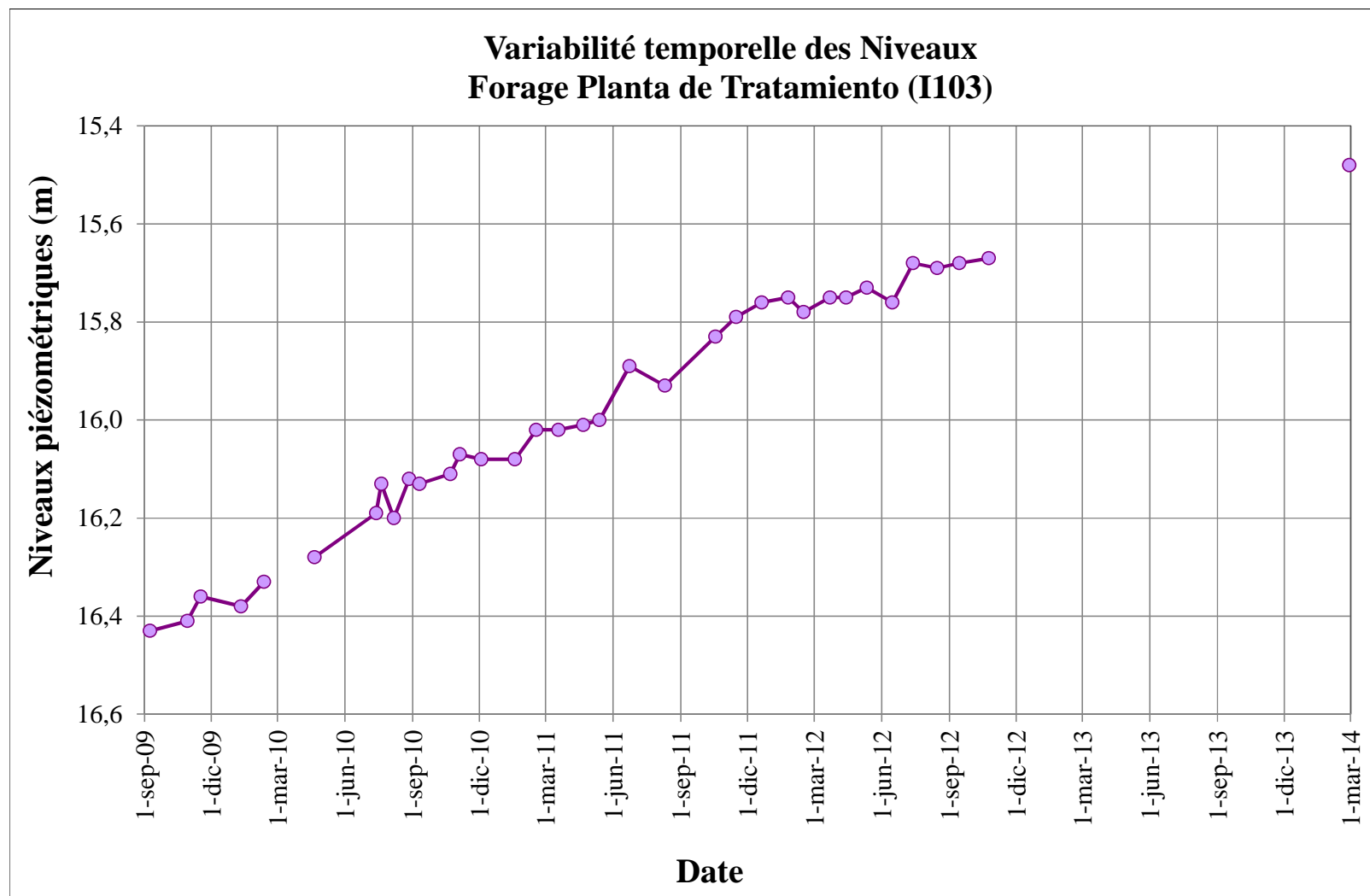


Figure 21. Variation de niveaux piézométriques dans le forage Planta de Tratamiento de l'aquifère Ilaló.

ANNEXE 4B

Analyses des données piézométriques des sondes automatiques

Forage La Primavera (M303)

Les mesures automatiques ont mis en évidence des variations faibles de niveau jusqu'à 0,18 m (en dehors de perturbations accidentelles, Figure 22). Il y a eu deux périodes des pertes de données : la première en mai 2010 dû à un emmêlement du câble nylon et la deuxième en juillet - août 2010 que la sonde a été arrêtée pour l'essai de pompage réalisé par l'EPMAPS dans le cadre de cette thèse. Les perturbations dites accidentelles ont été observées une première perturbation (en rouge sur la Figure 22) correspondre à l'essai de pompage de l'EPMAPS. D'autres mouvements pourraient être dus à un pompage occasionnel proche (Figure 23). Pour une date de pompage qui a plus des points enregistrés (3 mars 2011), nous avons essayé de calculer un rayon d'influence afin de trouver la distance au forage perturbateur. La sonde Diver a enregistré très peu de points pendant le pompage (3 points) mais la remontée, plus lente, peut être traitée plus finement.

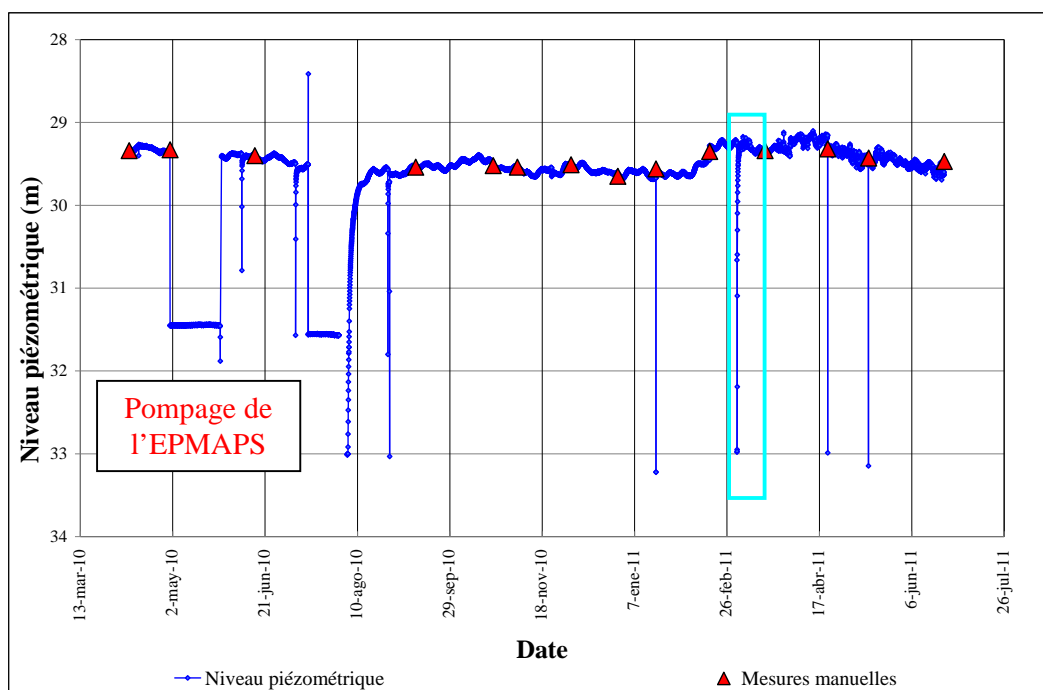


Figure 22. Mesure des niveaux par sonde Diver dans le forage "La Primavera 1 M303" (1 heure) entre le 8 avril 2010 et le 23 juin 2011. La courbe en bleu représente les données corrigées comparées aux données des mesures manuelles (triangles rouges).

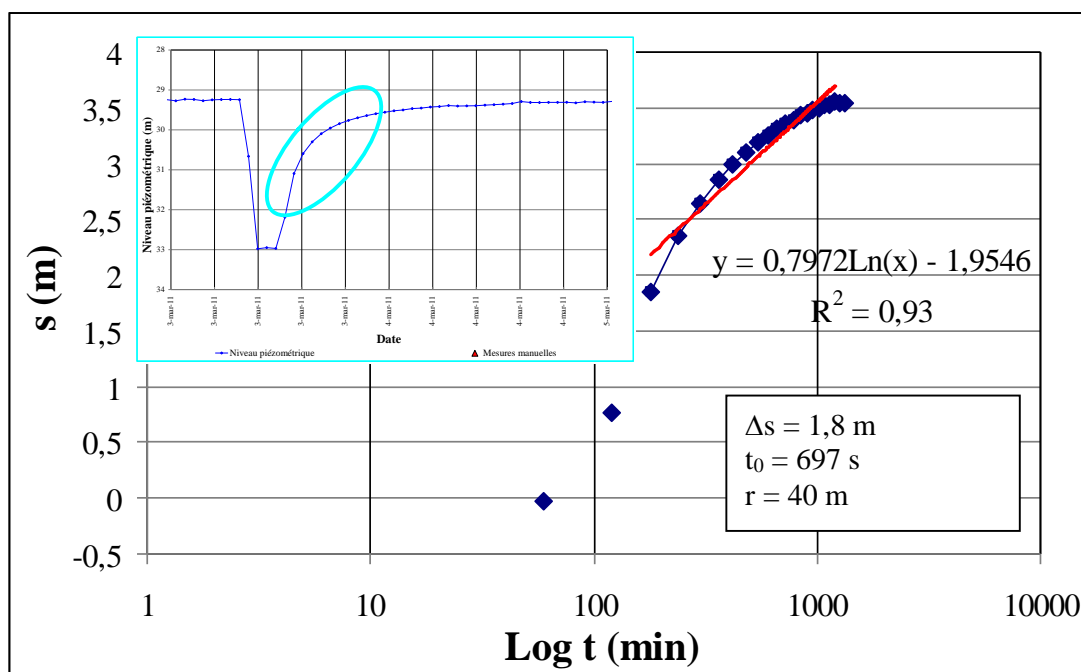


Figure 23. Zoom du pompage du 3 mars 2011 (bleu) au forage La Primavera.

Avec l'hypothèse arbitraire d'un pompage à débit constant, le coefficient d'emmagasinement et la transmissivité obtenus dans ce même forage La Primavera de 6×10^{-4} , et $6,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivement. En utilisant les données de la sonde Diver, la formule de Jacob a été appliquée (Figure 23). Le débit pompé a été ainsi calculé et égal à 6,5 L/s. La valeur de t_0 et Δs utilisées est donnée sur la figure 23. Le rayon d'influence obtenu à partir de ces données indique que le pompage se trouve à peu près à 40 m de distance du forage La Primavera. Celui-ci est localisé dans une urbanisation constituée de grandes maisons avec piscines, et il est fort probable que une ou plusieurs maisons utilisent l'aquifère pour un usage domestique.

Forage Patagua (C105)

Le forage Patagua (C105) n'est pas pompé, mais il est visiblement dans le cône de rabattement d'un forage exploité à proximité (Figure 24) pouvant induire une baisse allant jusqu'à 0,50 m (29 septembre 2011, rectangle jaune en Figure 24). La sonde Diver a enregistré les rabattements avec une bonne précision et permet de tenter des calculs de transmissivité et de distance au pompage. On a choisi 2 événements, le premier avec 17 points enregistrés et le deuxième avec 14 points : 18 décembre 2010 et 16 mars 2012. De la même façon qu'à La Primavera, l'hypothèse du pompage à débit constant a été respectée et attribué une valeur de 2 L/s. Pour le coefficient d'emmagasinement la valeur de 1×10^{-2} a été utilisée. A partir de ces données T , Δs et t_0 ont été calculé avec l'équation 1. Les résultats ont été très similaires à ces deux dates. A manière d'exemple sur la figure 25 est montré le graphique $s = f(\log t)$. La valeur de T est proche de ce que nous avons trouvé pour le reste de l'aquifère Chiche, de l'ordre de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Les valeurs de la distance au forage pompé est de 53 m. Proche du forage Patagua, à peu près à cette distance, il y a un lavage de voitures qui probablement exploite l'aquifère et qui perturbe le niveau du forage. Finalement, la sonde Diver a permis de constater que le niveau piézométrique de ce forage est très perturbé et il montre une tendance à baisser.

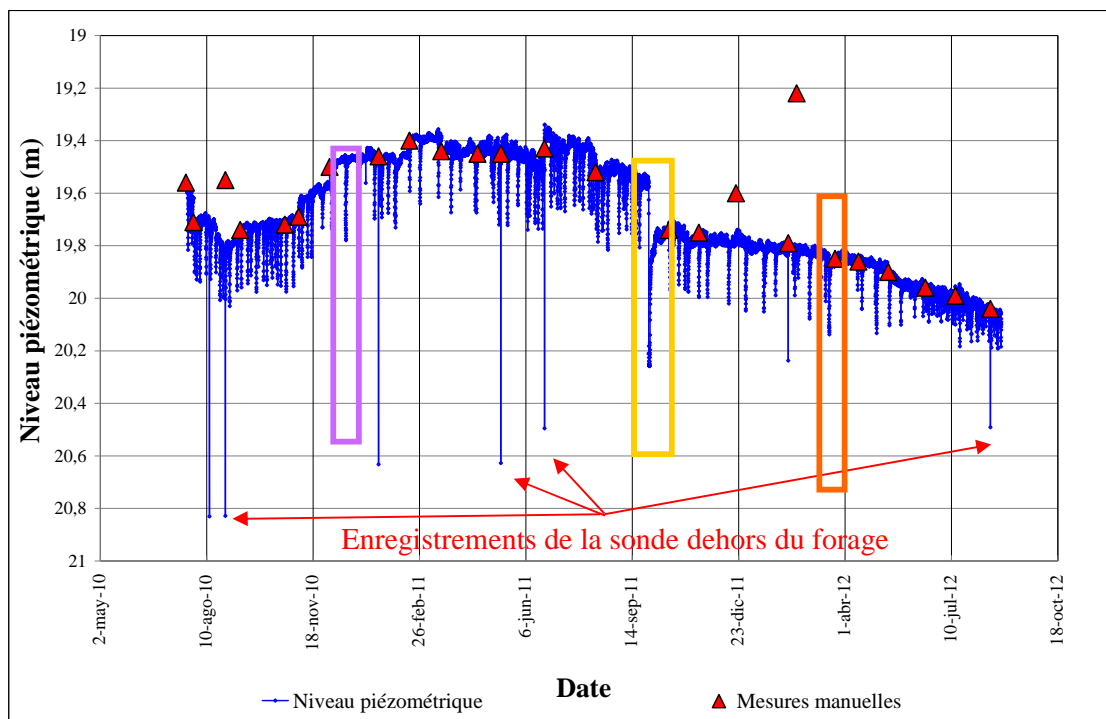


Figure 24. Mesure des niveaux par sonde Diver dans le forage "Patagua C105" du 21 juillet 2010 au 25 août 2012. La courbe en bleu représente les données corrigées par comparaison avec les mesures manuelles (triangles rouges).

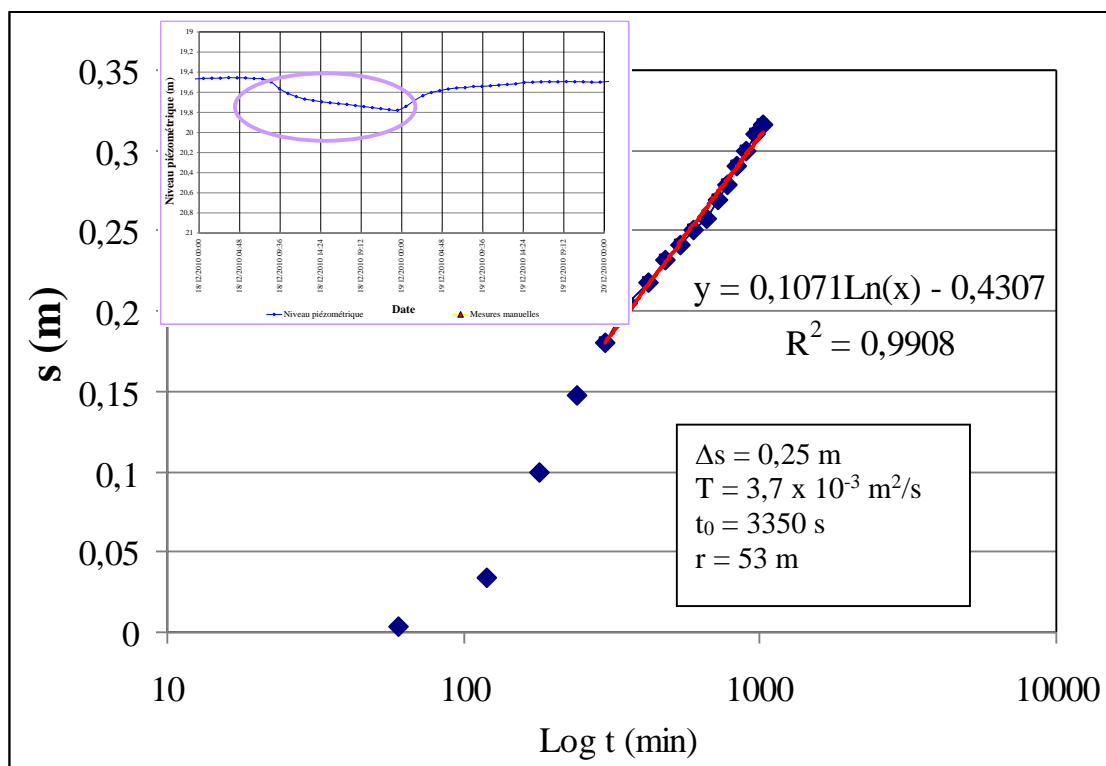


Figure 25. Zoom du pompage violet au forage Patagua (18 décembre 2010).

Forage La Esperanza – MICEI (C104)

La sonde installée dans le forage La Esperanza – MICEI (C104) a présenté des variations piézométriques qui ne sont pas cohérentes avec les mesures manuelles. Nous avons évoqué deux hypothèses probables dans le chapitre 3 pour expliquer le comportement de cette sonde Diver et rejeté la possibilité que toutes les mesures manuelles soient incorrectes.

La sonde présente des baisses de niveaux rapides et des remontées très lentes (Figure 26). La première hypothèse à considérer est d'un mauvais fonctionnement de la sonde qui a été rejetée puisque après le nettoyage du forage fait par l'EPMAPS en décembre 2010, les mesures manuelles coïncident avec le signal de la sonde automatique.

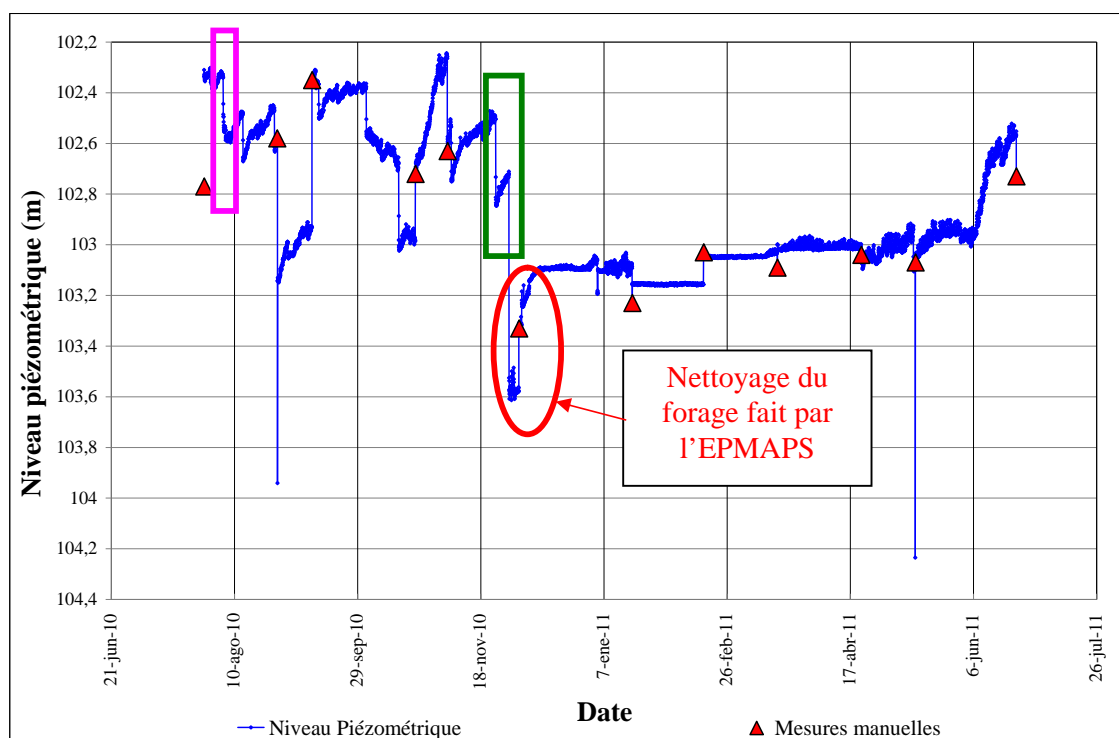


Figure 26. Mesure des niveaux par sonde Diver dans le forage "MICEI C104" du 28 juillet 2010 au 23 juin 2011. La courbe en bleu représente les données corrigées par comparaison avec les mesures manuelles (triangles rouges).

La deuxième hypothèse propose que les baisses de niveaux soient les résultats d'un pompage à proximité. Nous avons exploité deux de ces baisses avec l'équation 1 comme dans les autres forages, pour calculé une distance probable du lieu de pompage et T. Le débit constant utilisé est de 5 L/s. Le coefficient d'emménagement pour le calcul est de 1×10^{-2} . Deux dates ont été analysées : 5 août 2010 avec 11 points enregistrés par la sonde Diver (Figure 27) et le 24 novembre 2010 avec 12 points (Figure 28).

Les résultats montrent une cohérence entre les valeurs de transmissivité calculés autour de $3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Par contre les rayons d'influences sont un peu différents. MICEI est localisé dans une zone urbaine proche d'usines et d'industries, qui pourraient utiliser l'eau de l'aquifère sans avoir déclaré ses forages.

La chronique de cette sonde Diver permet de voir que ce forage est soumis à des perturbations très importantes pour des pompages à proximité.

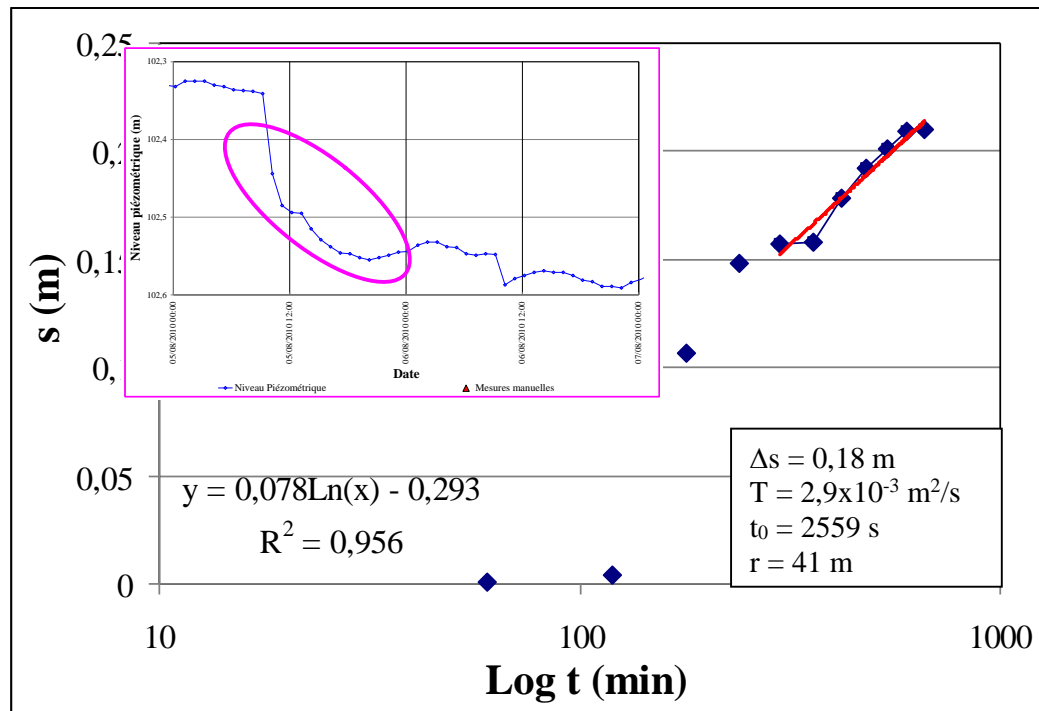


Figure 27. Zoom (rectangle rose) de la chute de niveau du 5 août 2010 traité comme la conséquence d'un pompage à proximité du forage MICEI.

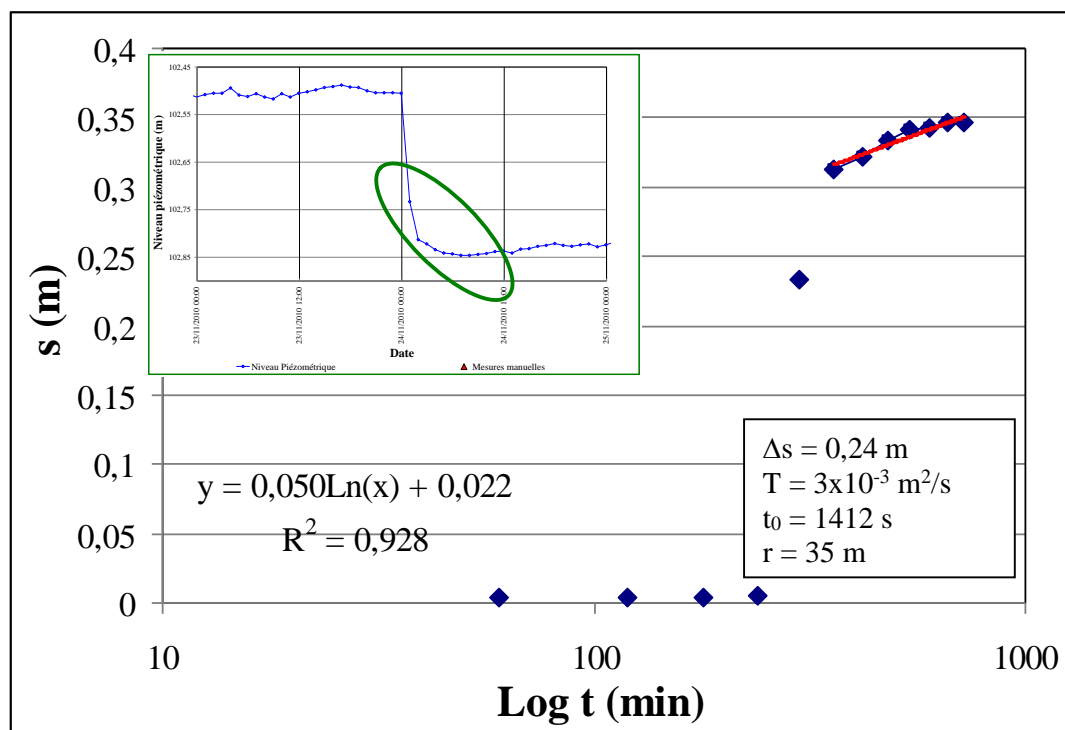


Figure 28. Zoom (rectangle vert) de la chute de niveau du 24 novembre 2010 traité comme la conséquence d'un pompage à proximité du forage MICEI.

Forage El Carrizal (C103)

Les mesures dans le forage El Carrizal (C103) présentent une variabilité faible, avec des remontées et des baisses de niveau dans la période de mesure de la sonde entre décembre 2011 et octobre 2012 de 0,09 m (Figure 29). Cependant ce forage a montré une hausse lente de niveau entre avril et mai 2012 qui atteint une amplitude totale de 0,20 m (Figure 29). La Figure 4.9 de la section 4.1.2.1.1 montre que la variation piézométrique de ce forage n'a pas une relation évidente avec la pluie. La hausse de niveau de 0,20 m a été traitée comme un essai de récupération après un pompage.

Pour faire ces calculs un coefficient d'emmagasinement constant et égal à 1×10^{-2} a été considéré. La transmissivité utilisée est celle obtenue par les essais de pompage de $1,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. La formule utilisée avec ces conditions de récupération de niveaux, est la Theis :

$$s' = \frac{2,30 \cdot Q}{4f \cdot T} \left(\log \frac{4 \cdot T \cdot (t + t')}{r^2 \cdot S} - \log \frac{4 \cdot T \cdot t'}{r^2 \cdot S'} \right) \Rightarrow s' = \frac{2,30 \cdot Q}{4f \cdot T} \left(\log \frac{(t + t')}{t} \right) \forall r = cte. \text{ et } S = S'$$

Où :

s' rabattement résiduel (m)

r distance du forage pompé au piézomètre (m)

T transmissivité (m^2/s)

S' coefficient d'emmagasinement pendant la remonté de niveau

S coefficient d'emmagasinement pendant le pompage

t' temps parcouru après l'arrêt de pompage (s)

t temps depuis que le pompage a commencé (s)

Q débit pompé = débit de recharge (m^3/s)

Ce calcul nous a permis de constater les effets suivants :

- i) Les points ainsi traités s'alignent sur une droite obéissant l'équation de Theis ce qui permet d'estimer un débit de pompage $Q = 50 \text{ L/s}$ (Figure 30). La formule de Theis n'admet pas la possibilité de calculer un rayon d'influence si r et S sont considérés constants, qui a été notre hypothèse de départ.
- ii) Pour calculer s' , il est nécessaire de connaître le niveau initial, avant le pompage, donné qu'on ne dispose pas directement. Pour ce forage on dispose de données anciennes de niveaux piézométriques qui ont été introduites dans la formule pour vérifier sa validité. En effet, le niveau ancien moins profond que les niveaux que nous avons enregistré entre 2009 et 2012 ont permis de trouver des résultats logiques par rapport à la théorie et l'équation de Theis. On peut supposer à partir de ces résultats que le forage El Carrizal est soumis à un pompage intensif qui n'est le permet pas de remonté à son niveau initial.

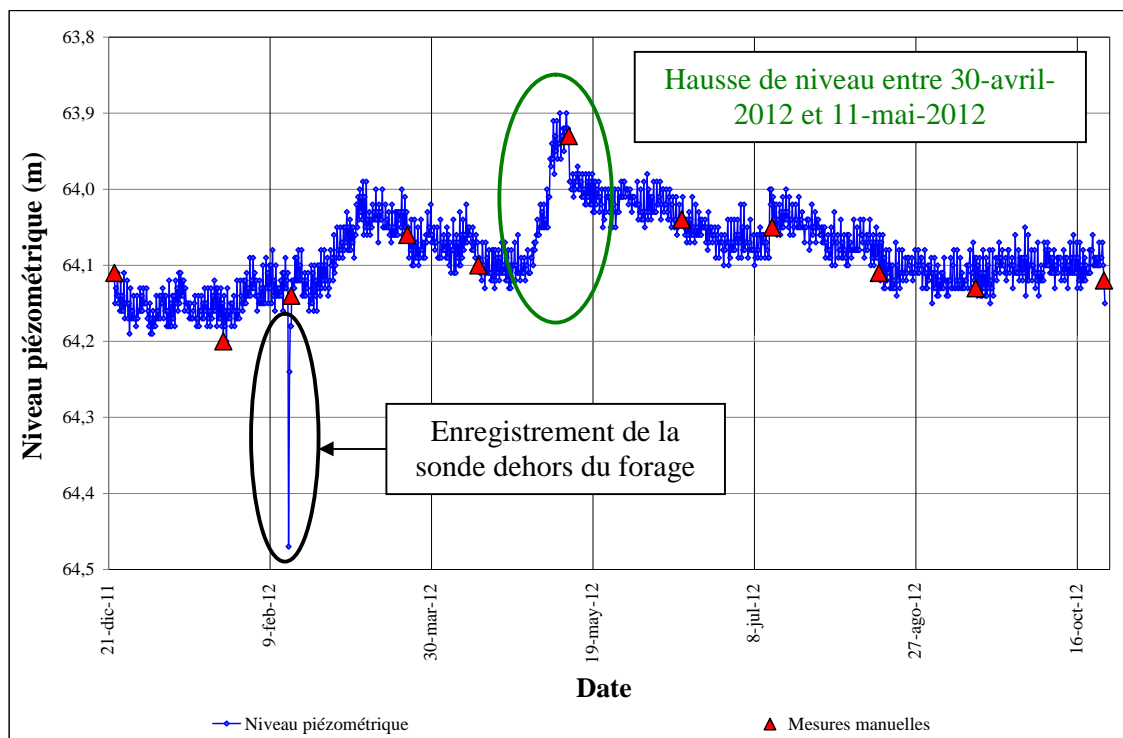


Figure 29. Mesure des niveaux par sonde Diver dans le forage "El Carrizal" du 22 décembre 2011 au 24 octobre 2012 (installation EPMAPS). Les courbes : bleue les données corrigées par comparaison avec les mesures manuelles (triangles rouges).

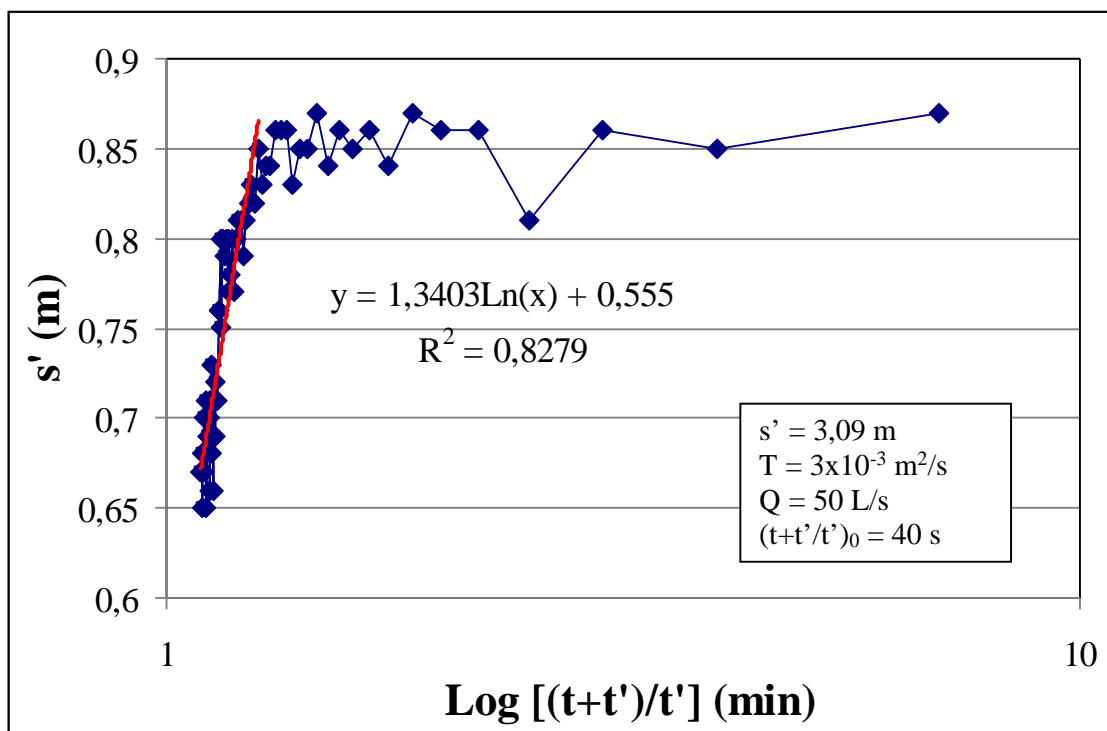


Figure 30. Essai de remontée de niveau au forage El Carrizal entre avril 2012 et mai 2012.

Forage San Germán (C164)

Le forage San Germán (C164), localisé au sud de la zone d'étude, sur les six mois où l'on dispose de données (avril à octobre 2012), montre une variabilité piézométrique qui a une tendance à la baisse. Pendant cette période de mesure il y a une différence de niveaux de 2 m (Figure 31). Celle-ci durant une dizaine de jours enregistre des variations très brusques mais qui ne sont pas répétées dans la suite de la chronique. Il est peu probable que cela soit la conséquence directe ou indirecte de l'apport de pluie (en ce secteur de la zone d'étude, l'aquifère est confiné et il est en pression, le niveau piézométrique est à 4 m de profondeur, et le toit de la Fm. Chiche est à 50 m) mais plutôt liées à une perturbation humaine. Pour prouver cette hypothèse, nous allons traiter ces données comme pour les autres forages, les deux perturbations du : 1 mai 2012 qui a 45 points enregistrés et celle du 30 juin 2012 qui le pompage a 3 points mais la récupération a été enregistré par 24 points.

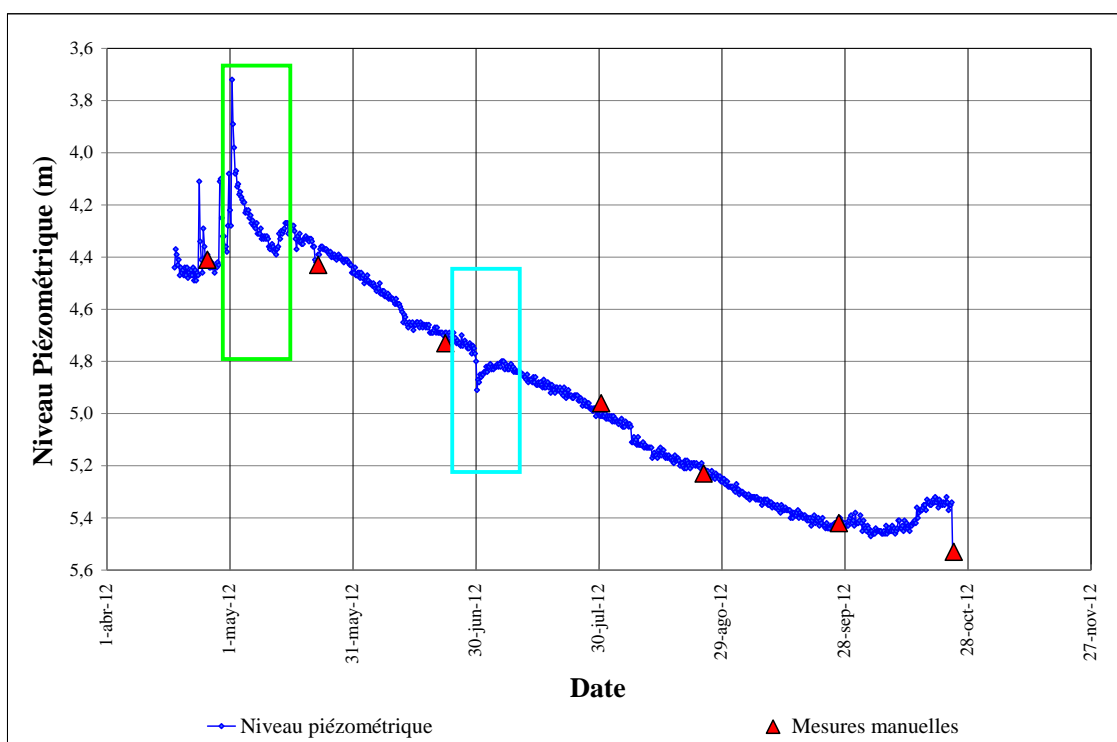


Figure 31. Mesure des niveaux par sonde Diver dans le forage "San Germán" du 17 avril 2012 au 26 octobre 2012 (installation EPMAPS). La courbe en bleu représente les données corrigées par comparaison avec les mesures manuelles (triangles rouges).

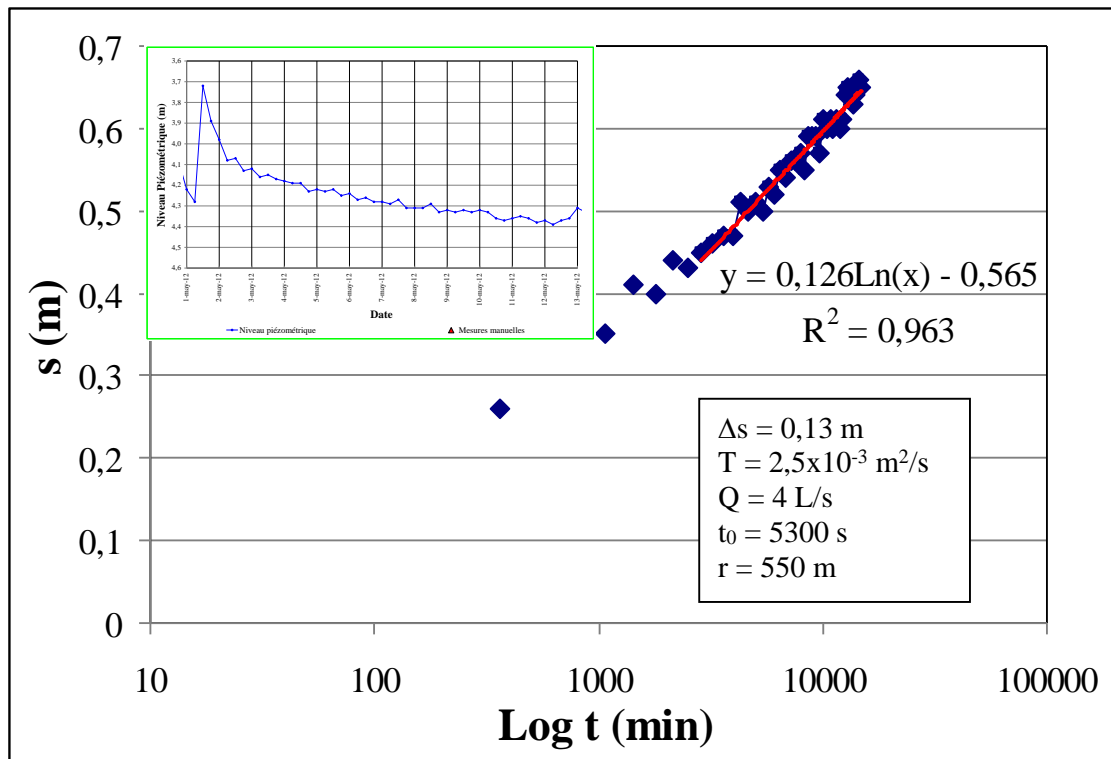


Figure 32. Pompage au forage San Germán du 1 mai 2012.

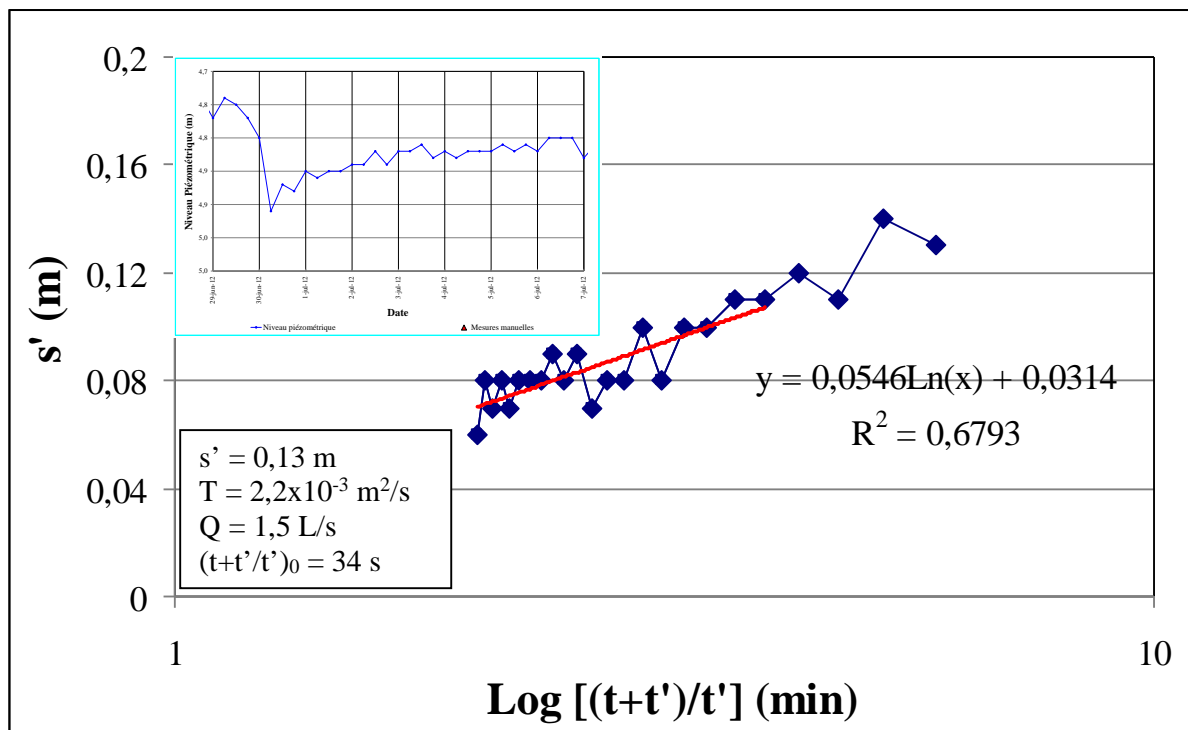


Figure 33. Remontée de niveau après le pompage du 30 juin 2012 au forage San Germán.

La perturbation du 1 mai 2012 correspond bien avec un pompage résolu par l'équation 1. Nous avons utilisé la valeur de S de 1×10^{-4} pour un aquifère confiné parce que de ce côté nos forages se trouvent en pression, le débit constant a été fixé à 4 L/s, et la transmissivité a été calculé donnant une valeur de $2,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Le rayon d'influence de ce pompage a pu être estimé à 550 m (figure 32).

Pour la perturbation du 30 juin 2012 considérée comme une remontée de niveau, le débit a été fixé à 1,5 L/s et le résultat de la T a été très similaire que celle obtenue avec la perturbation du 1 mai, de $2,2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (figure 33).

Ce forage est situé à la ville de Conocoto, centre urbain qui l'aquifère Chiche constitue une source très important d'approvisionnement en eau potable. La tendance à la baisse du niveau de ce forage serait la conséquence d'un pompage intensif dans la région.

Forage Lasallinos (C158)

Les données du forage Lasallinos (C158) ont montré des variations importantes de niveaux de près de 1 m, qui n'ont pas été observées avec la même intensité dans le forage San Germán, à 1,3 Km de distance (Figure 34). Ces hausses des niveaux ne correspondent pas à périodes de précipitation parce que ce forage est en pression dans un aquifère confiné (niveau du forage 3,80 m, toit de la Fm. Chiche à 50 m de profondeur). Ces données ont été utilisées pour calculer une transmissivité dans ce forage et un rayon d'influence de la perturbation enregistrée.

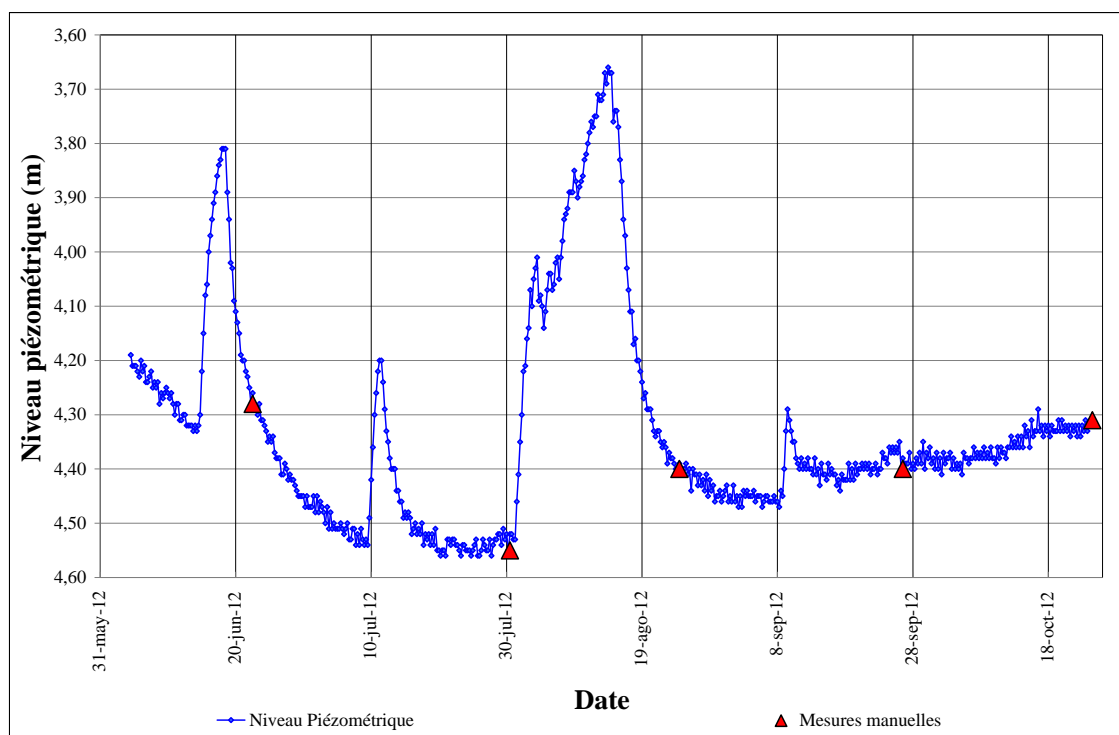


Figure 34. Mesure des niveaux par sonde Diver dans le forage "Lasallinos" du 4 juin 2012 au 26 octobre 2012 (installation EPMAPS). La courbe en bleu représente les données corrigées par comparairson avec les mesures manuelles (triangles rouges).

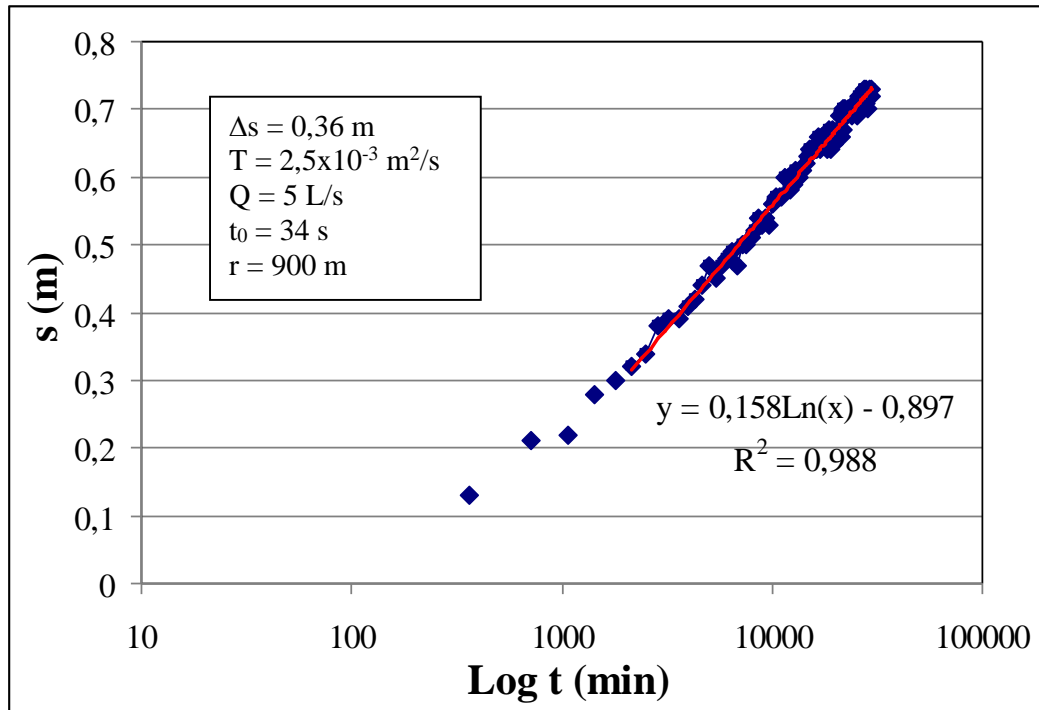


Figure 35. Pompage du 18 juin 2012 au forage Lasallinos.

A manière d'exemple la perturbation du juin 2012 (première perturbations observée sur la Figure 34) sera présentée, parce que toutes les analyses de ces perturbations ont arrivés à des résultats très similaires : une transmissivité calculé de $2,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, calculé avec un coefficient S de 1×10^{-4} , un débit de 5 L/s qui se trouve entre 500 et 900 m (Figure 35). Ce forage comme le précédent San Germán se trouve au milieu d'un centre urbanisé avec fortes possibilités d'être perturbés par de pompages. La sonde Diver a montré que ce forage subit en effet un pompage très intensif.

ANNEXE 5A

VARIATION DE CE DANS L'AQUIFÈRE CHICHE SUD

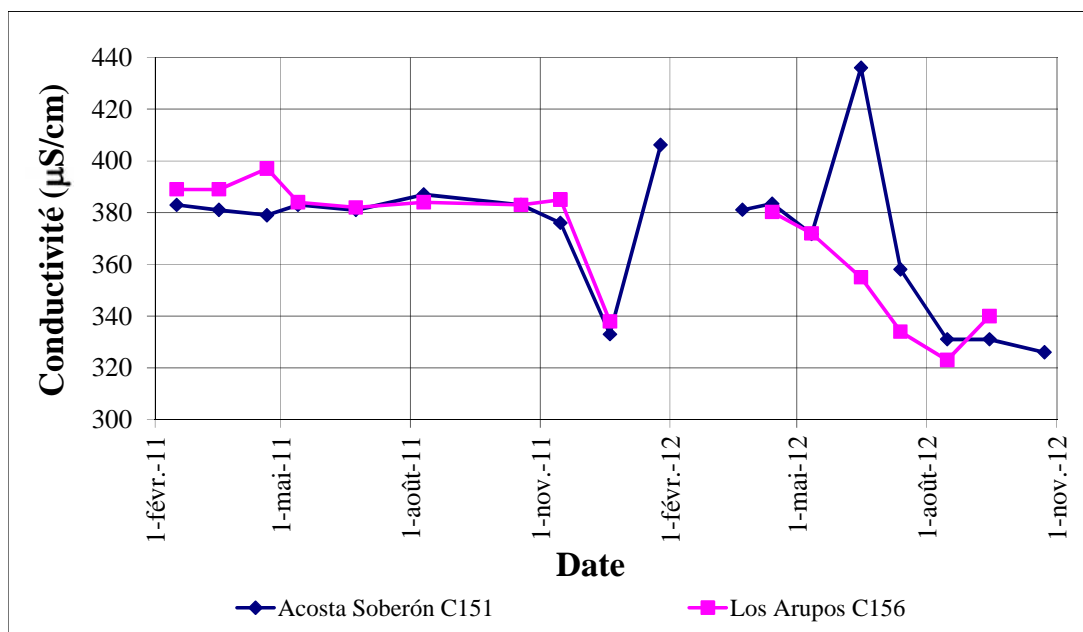


Figure 36. Forages synchrones en CE dans l'aquifère Chiche sud-ouest.

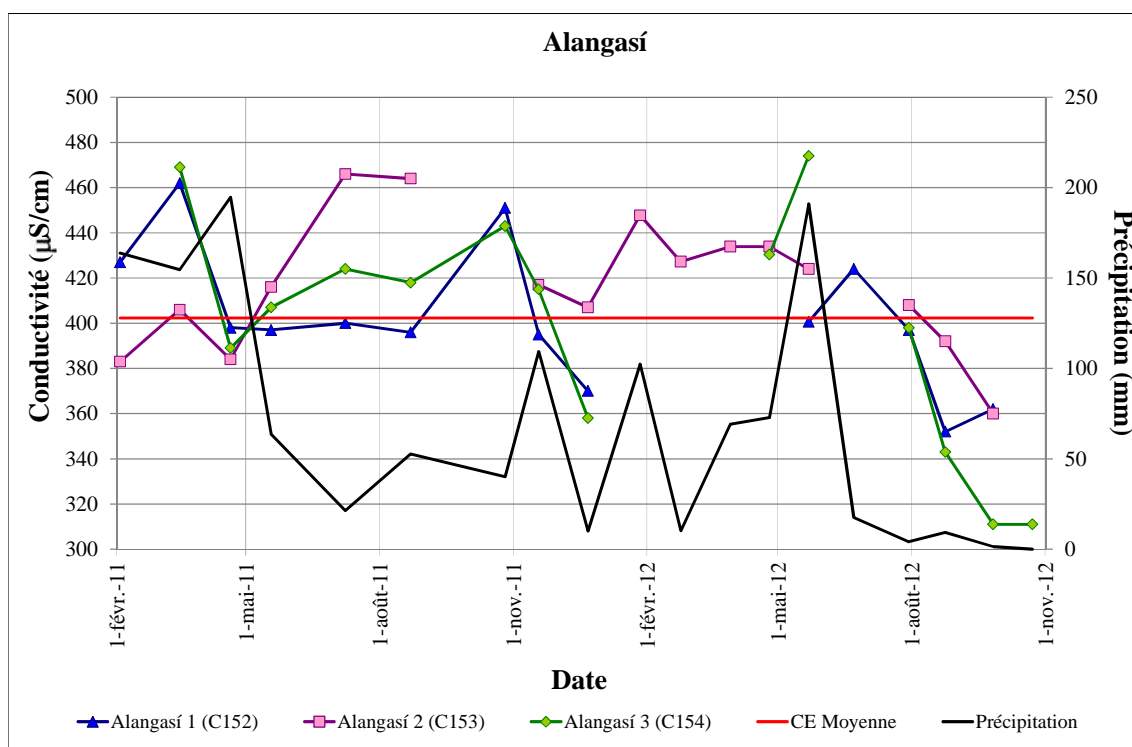


Figure 37. Variation temporelle de la conductivité dans les forages Alangasí dans l'aquifère Chiche sud-est (février 2011 - octobre 2012) comparé avec la précipitation (ligne noire).

VARIATION DE pH SUR L'AQUIFÈRE CHICHE NORD, CHICHE SUD ET ILALÓ

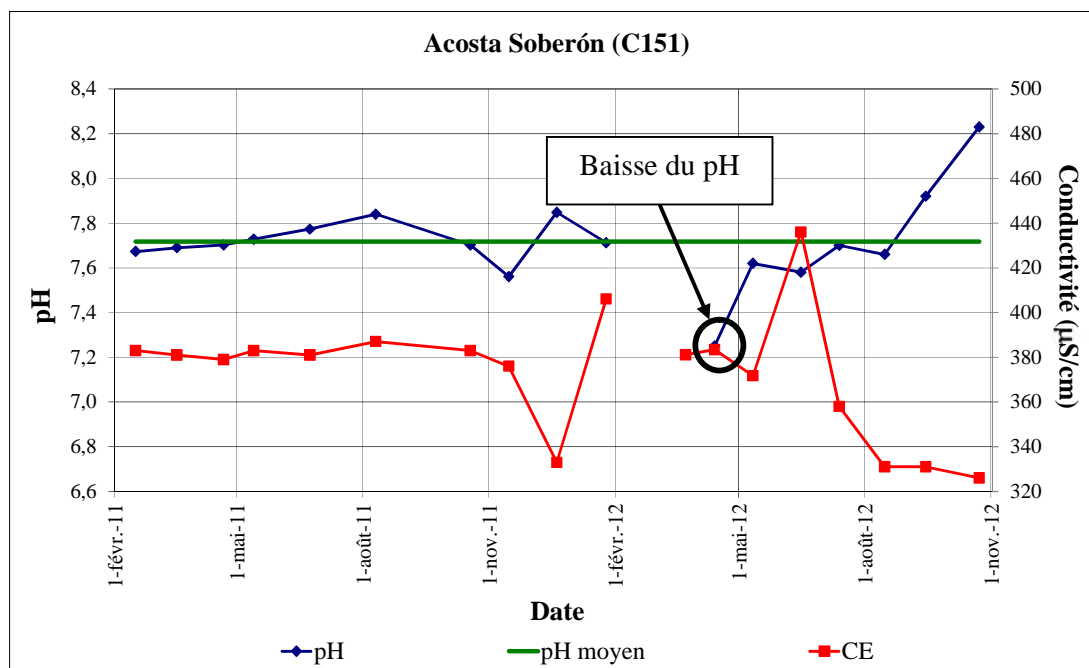


Figure 38. Variation temporelle du pH sur le forage Acosta Soberón dans l'aquifère Chiche nord entre février 2011 et octobre 2012 comparé avec la CE du même forage.

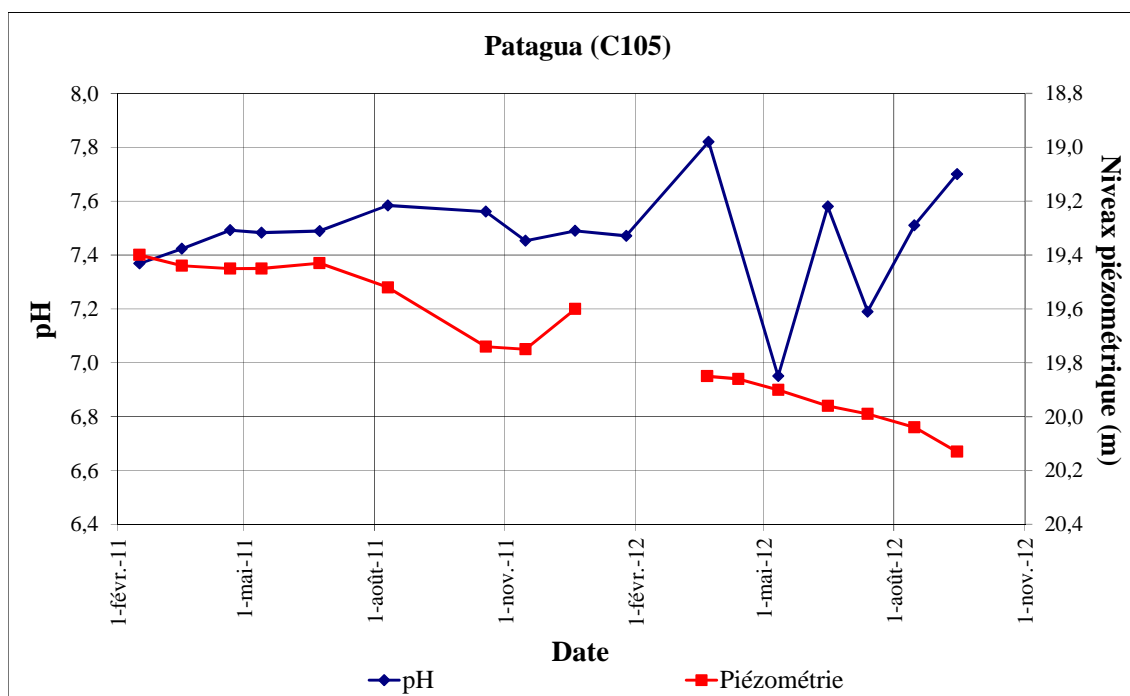


Figure 39. Variation du pH dans le forage Patagua de l'aquifère Chiche nord comparé avec les niveaux piézométriques.

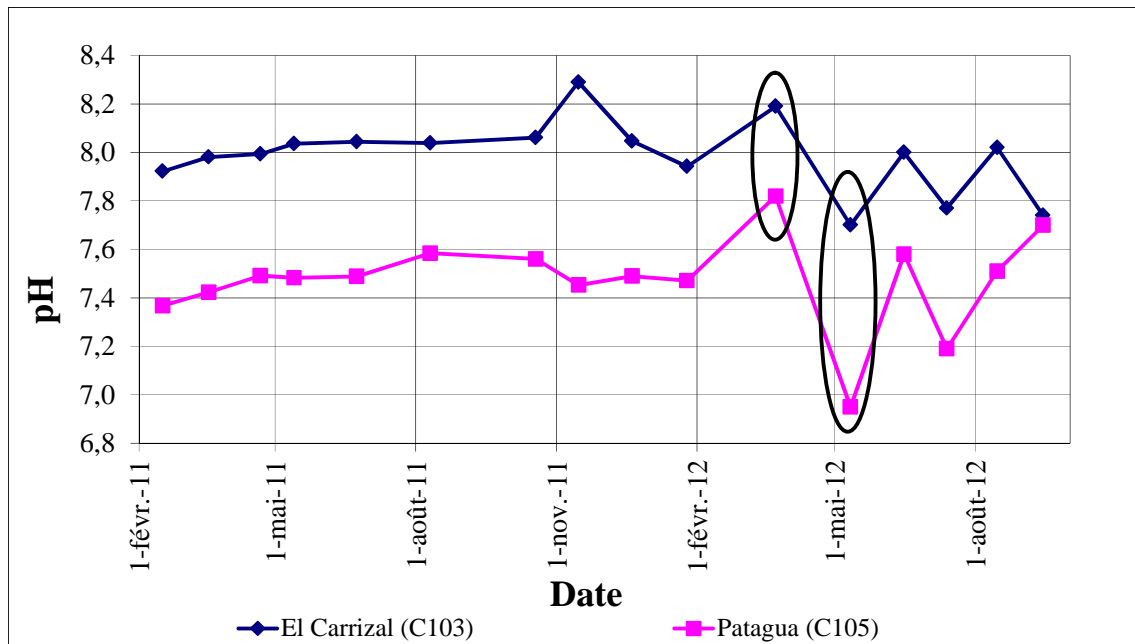


Figure 40. Variation de pH synchrone dans les forages de l'aquifère Chiche nord.

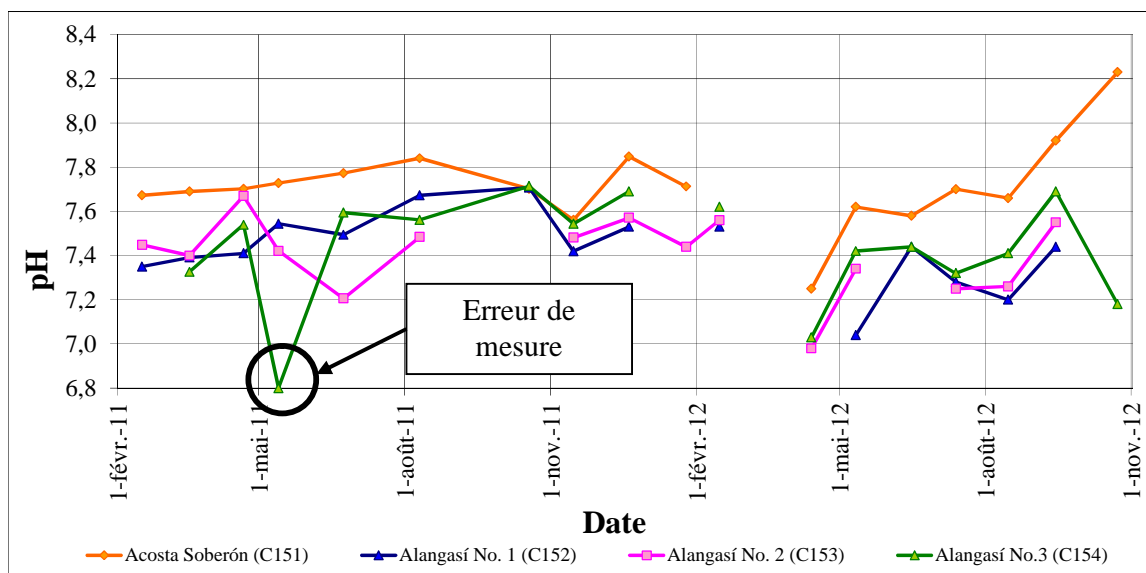


Figure 41. Variation de pH synchrone dans les forages de l'aquifère Chiche sud.

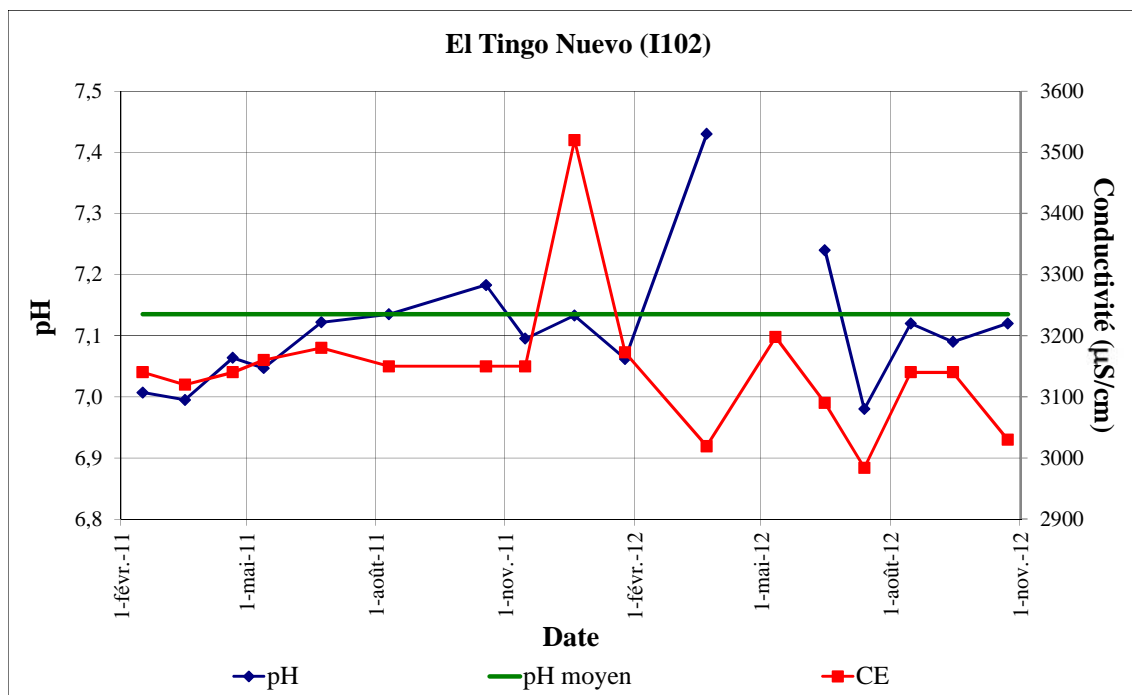


Figure 42. Variation de pH sur l'aquifère Ilaló dans le forage El Tingo Nuevo entre février 2011 et octobre 2012, comparé avec la CE.

VARIATION DE LA TEMPÉRATURE SUR L'AQUIFÈRE CHICHE NORD, CHICHE SUD ET ILALÓ

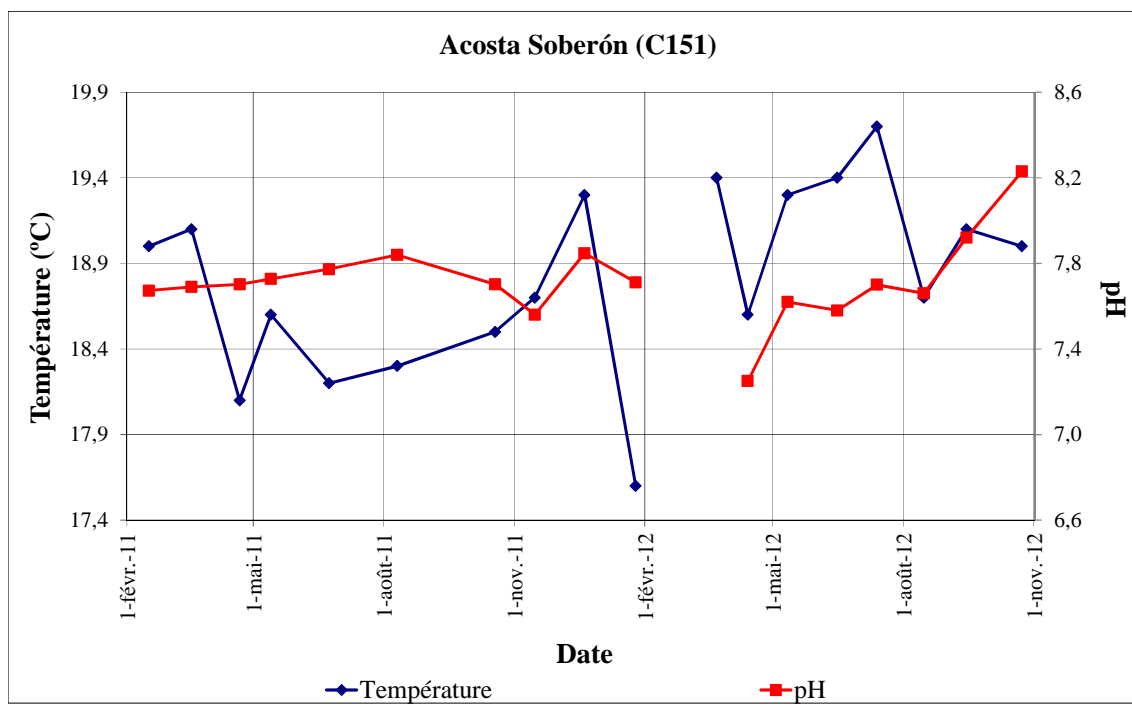


Figure 43. Variation de la température dans le forage Acosta Soberón de l'aquifère Chiche sud comparé avec le pH.

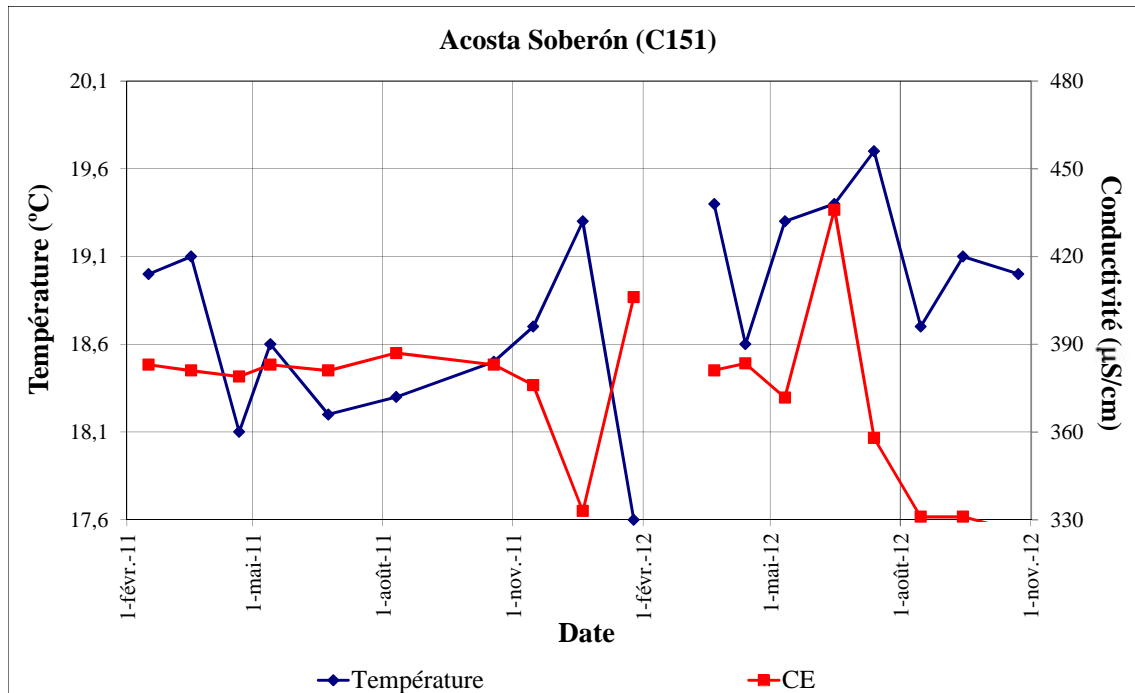


Figure 44. Variation de la température dans le forage Acosta Soberón de l'aquifère Chiche sud du février 2011 à octobre 2012, comparé avec la CE.

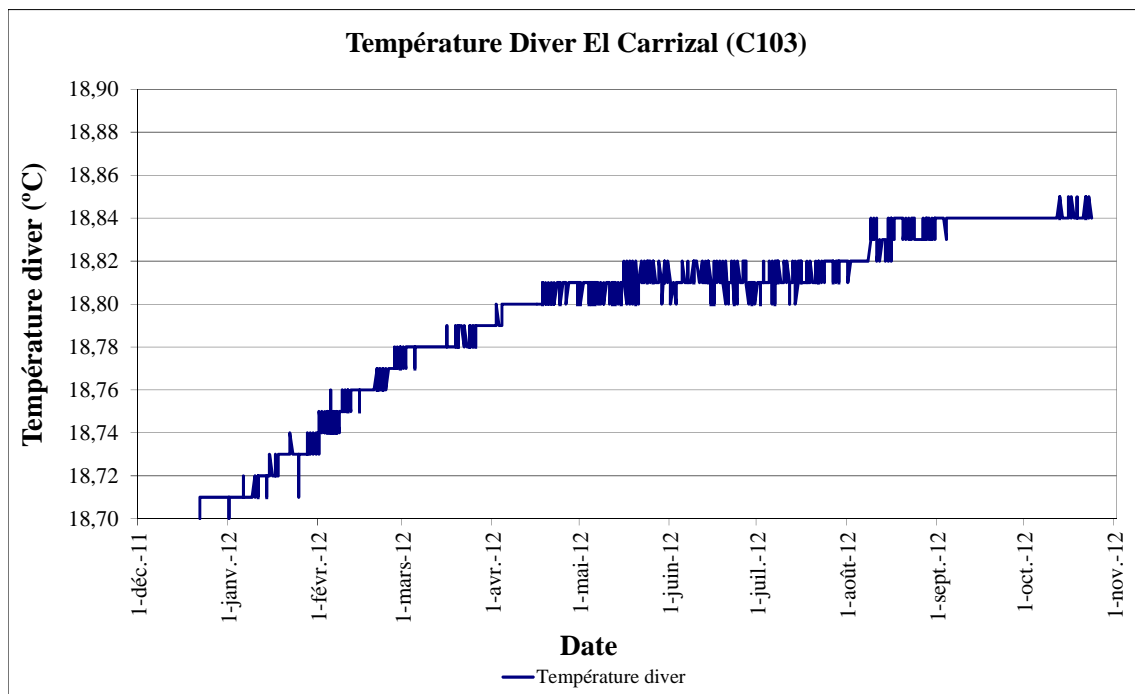


Figure 45. Variation de température enregistrée pour la sonde Diver dans le forage El Carrizal du décembre 2011 à octobre 2012.

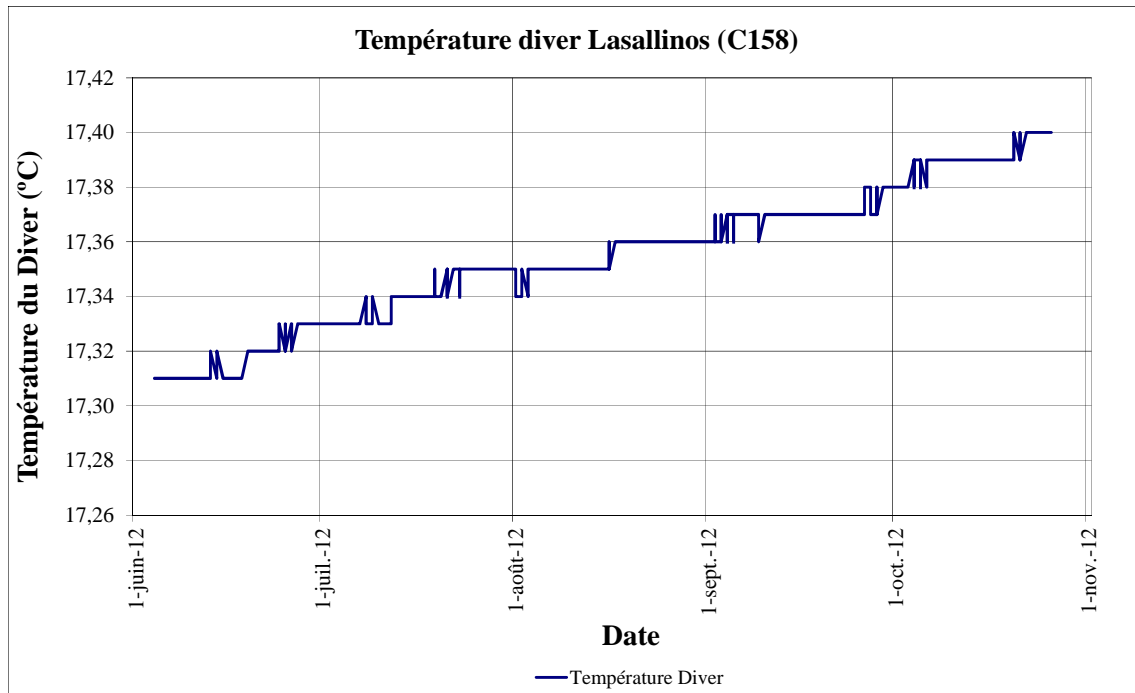


Figure 46. Variation de température enregistrée pour la sonde Diver dans le forage Lasallinos du juin 2012 à octobre 2012.

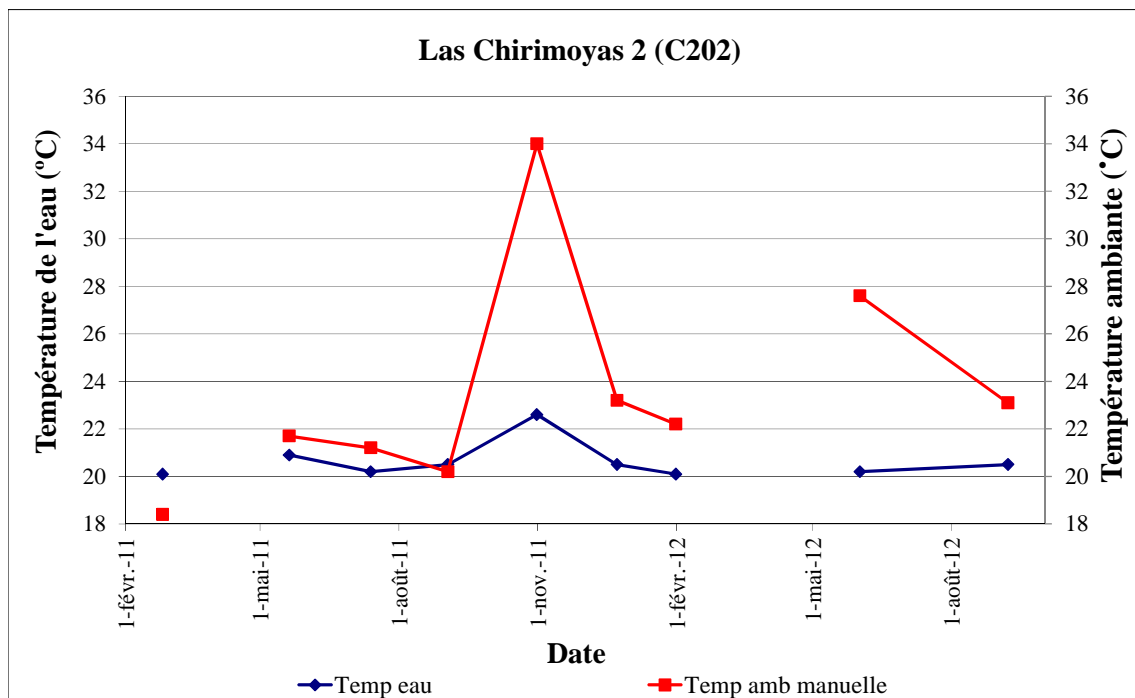


Figure 47. Température de l'eau dans la source Las Chirimoyas 2 comparée avec la température ambiante mesurée au même temps.

Calcul de temps nécessaire pour biaiser la température mesurées de l'eau de l'aquifère

Nous allons utiliser pour ce calcul comme une référence la loi de refroidissement de Newton. Quand on analyse le refroidissement d'un objet chaud, la perte de chaleur par convection dans la surface se manifeste par une diminution de son énergie interne, ce qui nous permet de dire:

$$H = h \cdot A \cdot (T - T_{amb}) = Ce \cdot \dots \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

Où

H est la chaleur transférée

h est le coefficient de transfert de chaleur superficiel, pour nos calculs égal à 4 W/m² K.

A surface de contact entre l'eau et l'air (m²).

T température de l'eau mesurée (°C)

T_{amb} température ambiante (°C)

Ce chaleur spécifique de l'eau à la température mesuré (J g⁻¹ °K⁻¹).

ρ masse volumique de l'eau (1 g/cm³).

V volume de l'objet (cm³)

t temps (s)

Pour intégrer cette équation entre le temps 0 et t, on va considérer que la température ambiante est constante puisque c'était une mesure ponctuelle pendant un temps relativement court, on arrive à l'équation suivante :

$$\frac{(T - T_{amb})}{(T_0 - T_{amb})} = e^{-\left(\frac{h \cdot A}{Ce \cdot \dots \cdot V}\right)t} \quad (2)$$

Pour remplacer les valeurs dans l'équation 2, nous allons utiliser les données de température du forage El Carrizal de février 2011 comme exemple, de cette façon : T = 19,7 °C, T₀ = 18,7 °C (température mesuré par la sonde Diver à la même date, à la même heure), T_{amb} = 23,15 °C (température donnée par le baro-Diver La Primavera à la même date et heure). Pour cette température de l'eau Ce = 4,181 J g⁻¹ °C⁻¹, la surface et le volume ont été calculé à partir du récipient que nous avons utilisé sur le terrain (Figure 48).

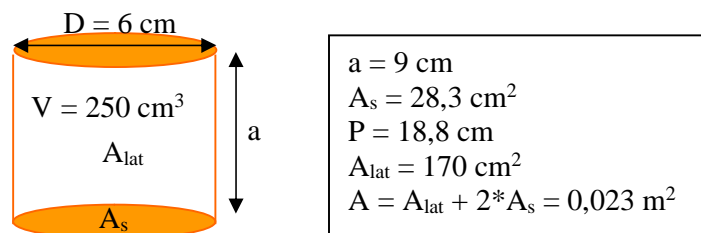


Figure 48. Récipient utilisé sur le terrain pour faire les mesures de l'eau

Le premier calcul donne comme résultats 2935 s 50 minutes que la température de l'eau monterait de 18,7 °C à 23,15 °C, mais, on a monté seulement jusqu'à 19,7 °C donc, un temps plus court, on va considérer comme hypothèse que pour cette petite transfert la relation est linéaire et le temps pour ce degré serait de 11 minutes, sans compter que normalement on

a mélangé de l'eau avec les sondes pour que cela s'uniformise et prendre les autres paramètres et de cette façon on a accéléré le processus de transfert d'énergie entre l'air et l'eau. Si les résultats de ces calculs sont exactes, nos données de température de l'eau où on a dû prélever de l'eau avec ce récipient sont totalement biaisées, parce qu'on avait un moyenne de 15 minutes des mesures par forage, et plusieurs fois, on a passé plus de 30 minutes en train de répété les mesures.

VARIATION DE L'Eh SUR L'AQUIFÈRE CHICHE SUD ET ILALÓ

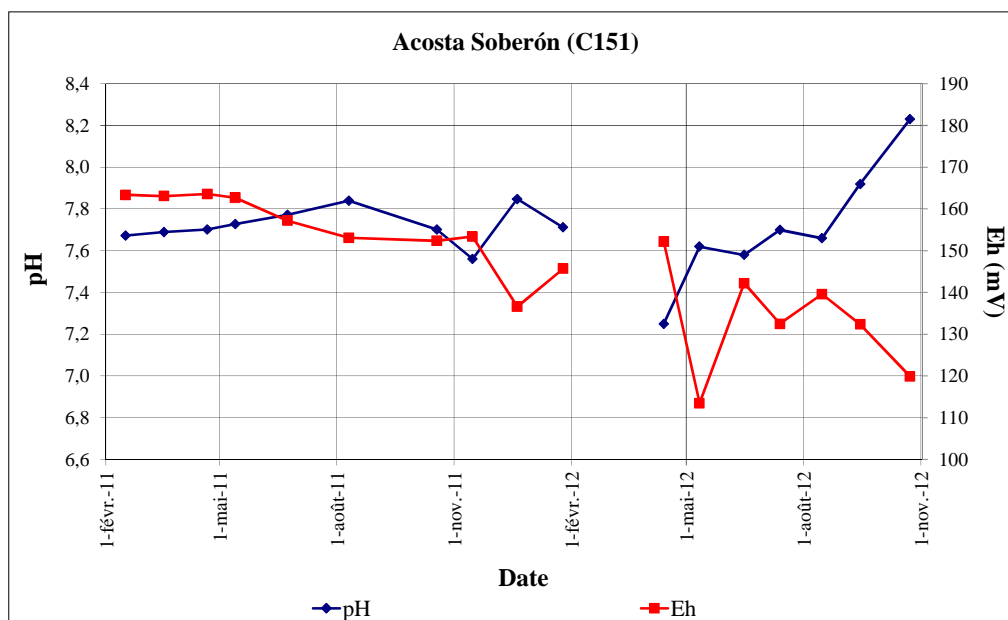


Figure 49. Variation de l'Eh dans le forage Acosta Soberón de l'aquifère Chiche sud du février 2011 à octobre 2012, comparé avec le pH.

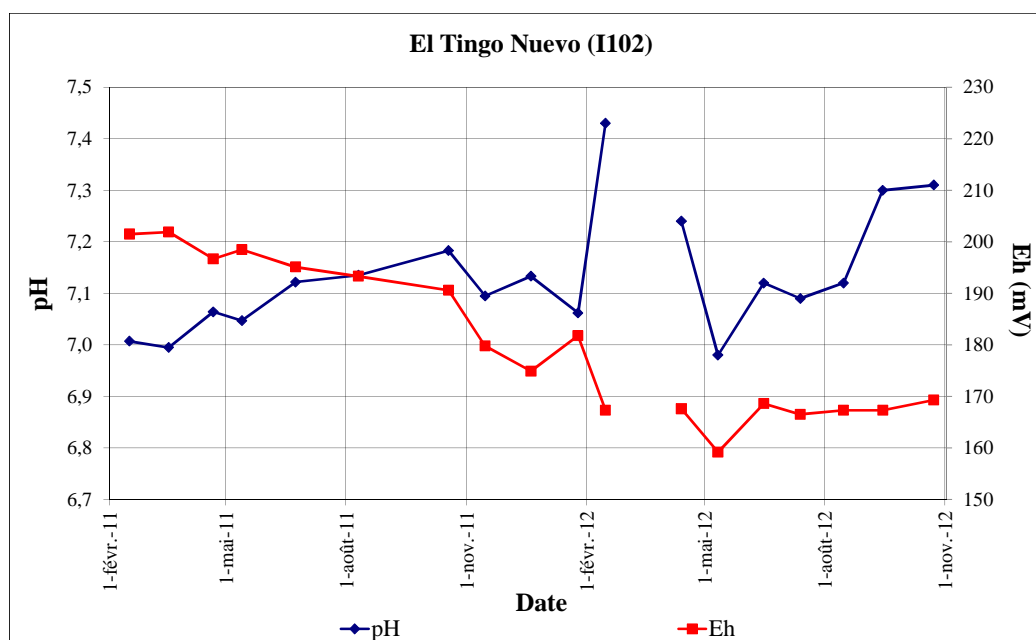
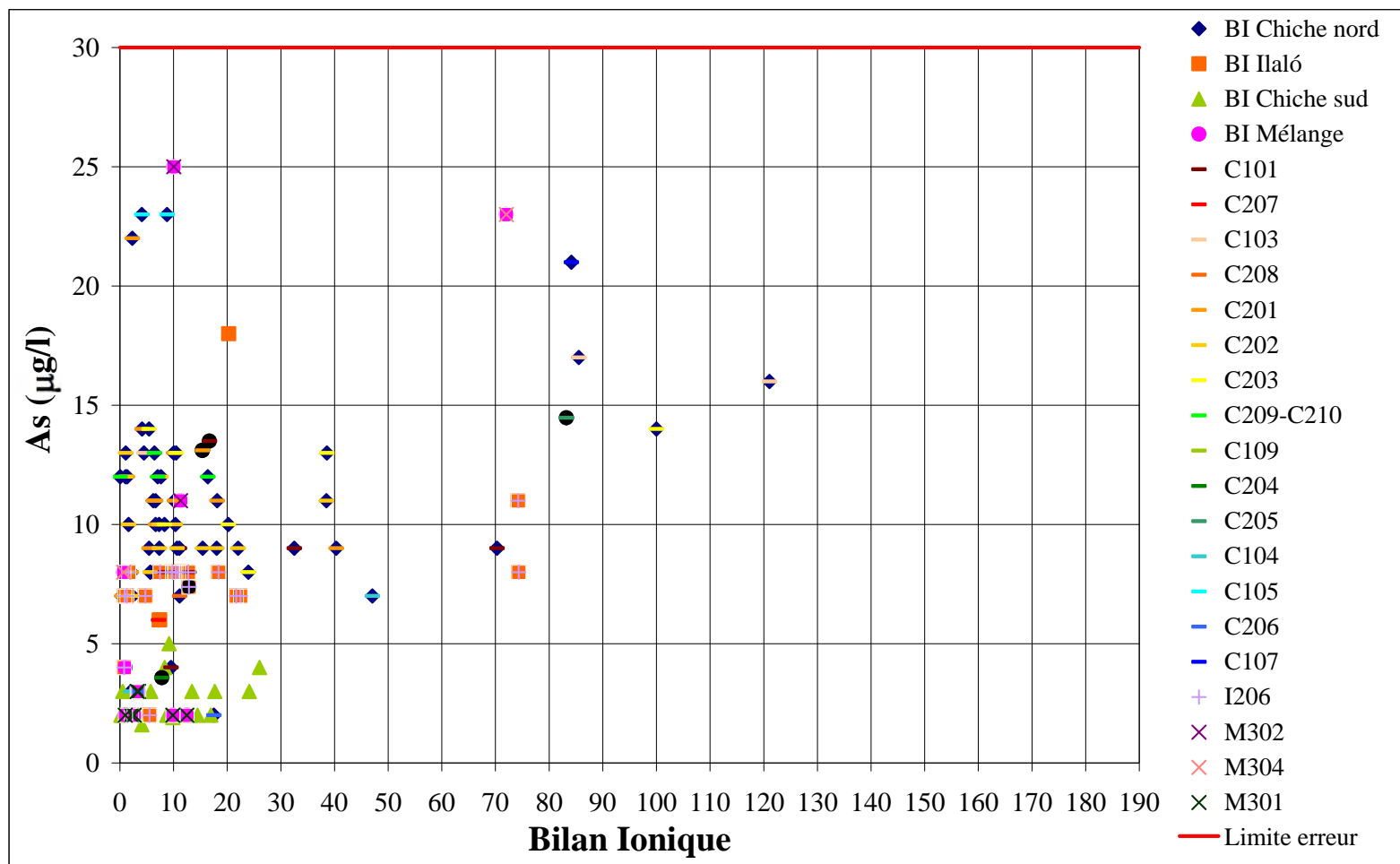


Figure 50. Variation de l'Eh dans le forage El Tingo Nuevo de l'aquifère Ilaló du février 2011 à octobre 2012, comparé avec le pH.

ANNEXE 5B



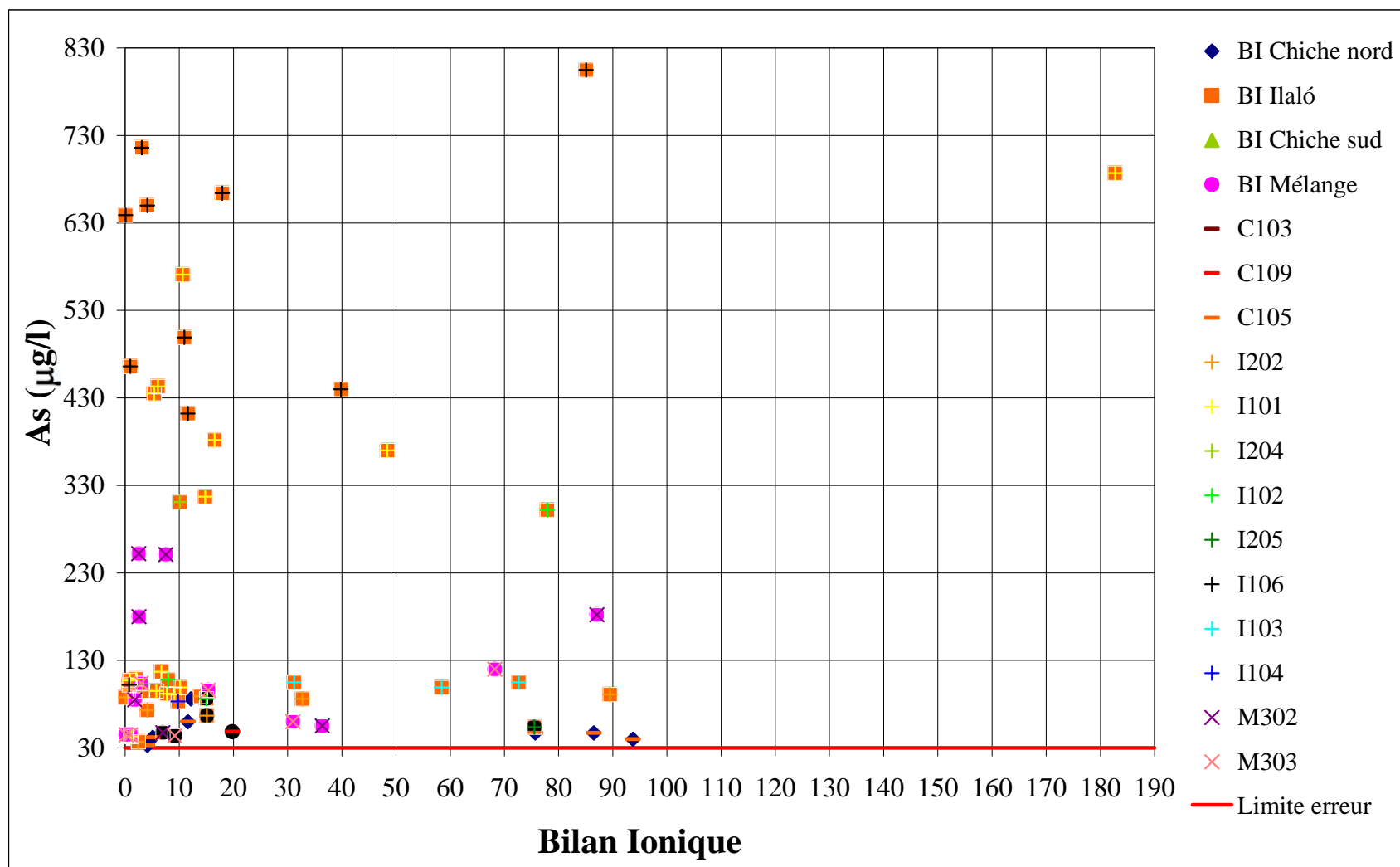


Figure 52. Relation As avec bilan ionique par forage et par aquifère au dessus du seuil de l'erreur instrumentale de 30 $\mu\text{g/l}$.

RELATION ENTRE ARSENIC ET PARAMÈTRES PHYSIQUES DE L'EAU : pour expliquer les variations temporelles de l'As

Tableau 23. Code couleur du bilan ionique appliqué sur les figures de la variation temporelle de l'As.

◆	Bilan ionique < 10
◆	10 < Bilan ionique < 30
◆	31 < Bilan ionique < 60
◆	61 < Bilan ionique < 80
◆	Bilan ionique > 80
+	Ions majeurs incomplets

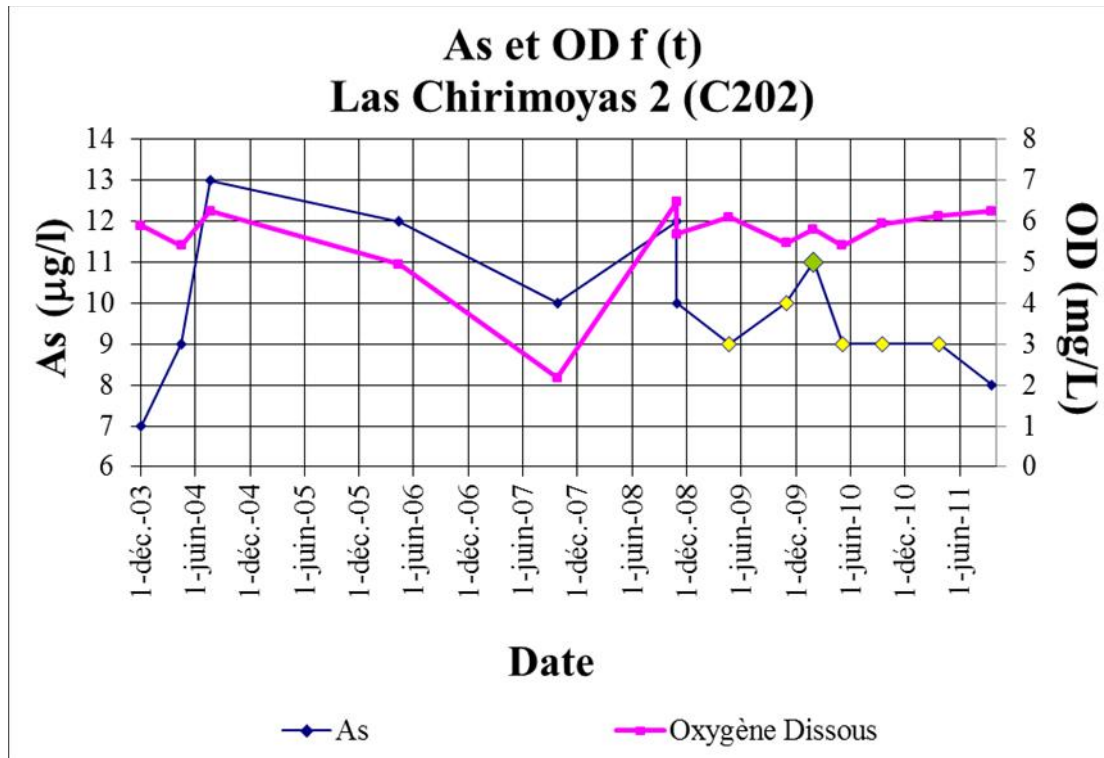


Figure 53. Relation As et oxygène dissous, dans la source Las Chirimoyas 2 de l'aquifère Chiche.

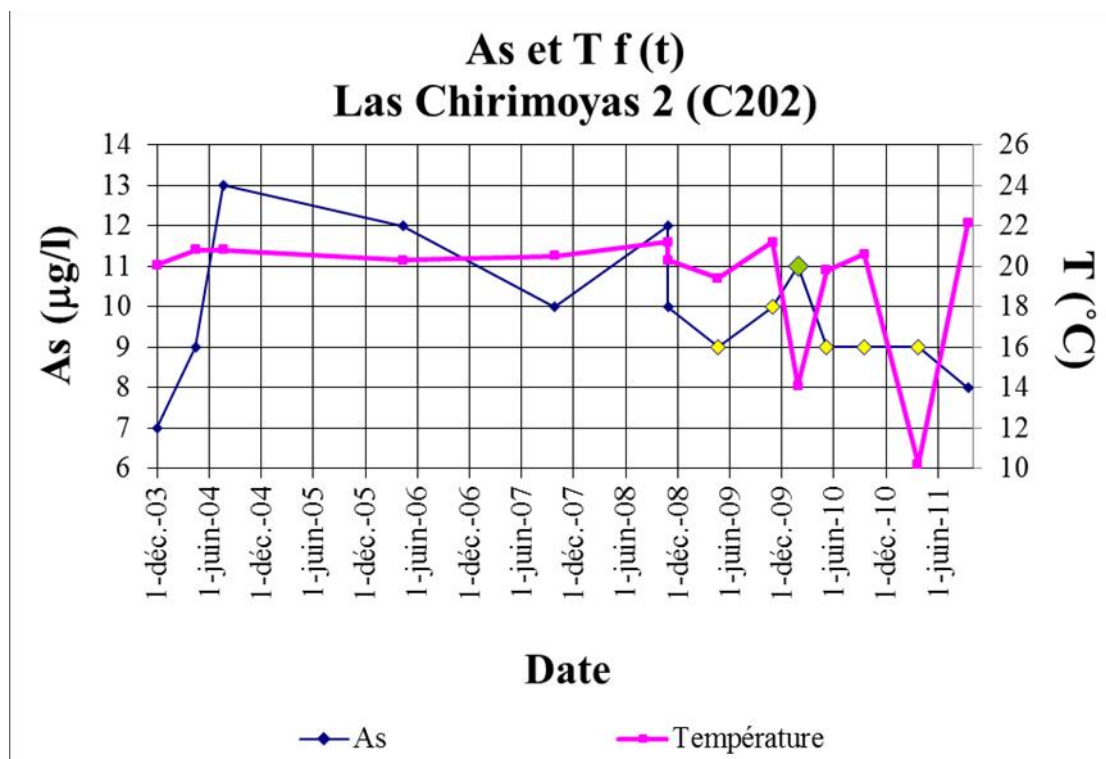


Figure 54. Relation As et température de l'eau, dans la source Las Chirimoyas 2 de l'aquifère Chiche.

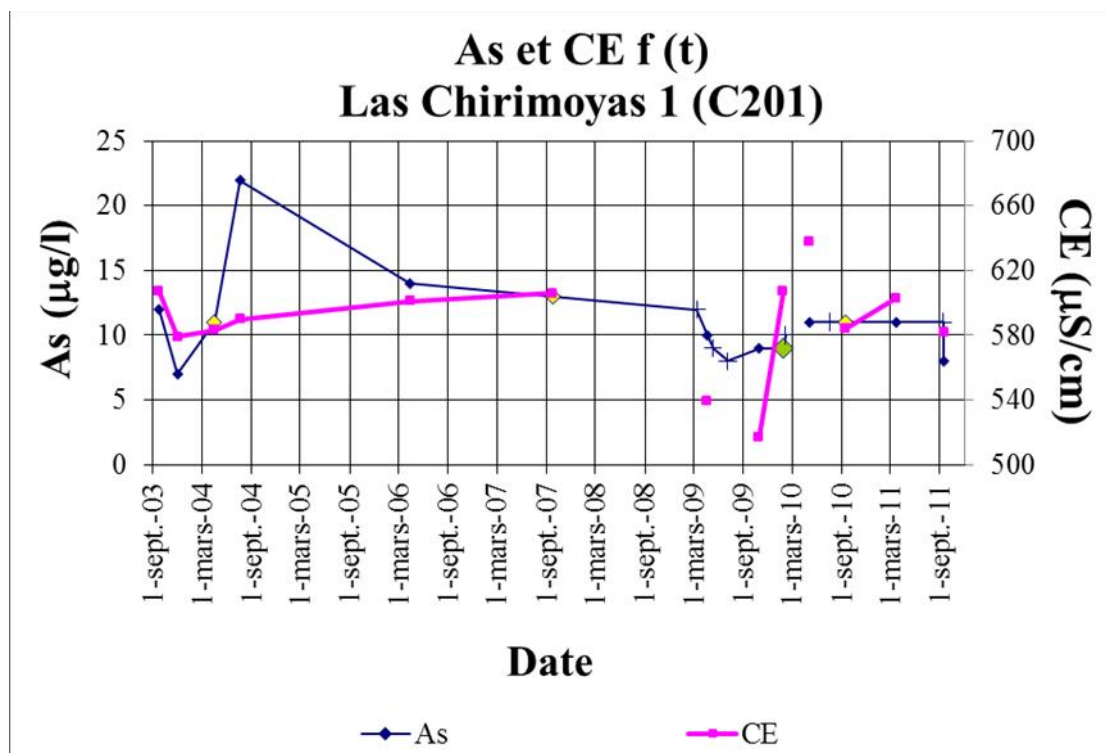


Figure 55. Relation As et CE, dans la source Las Chirimoyas 1 de l'aquifère Chiche.

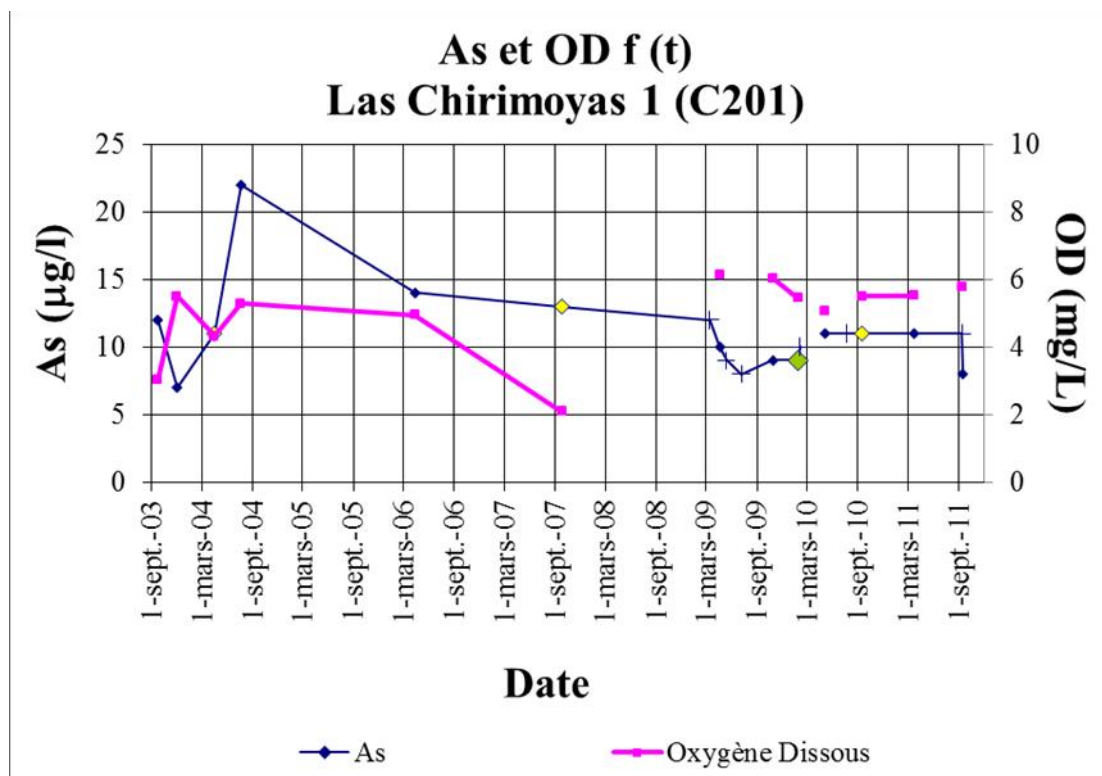


Figure 56. Relation As et oxygène dissous, dans la source Las Chirimoyas 1 de l'aquifère Chiche.

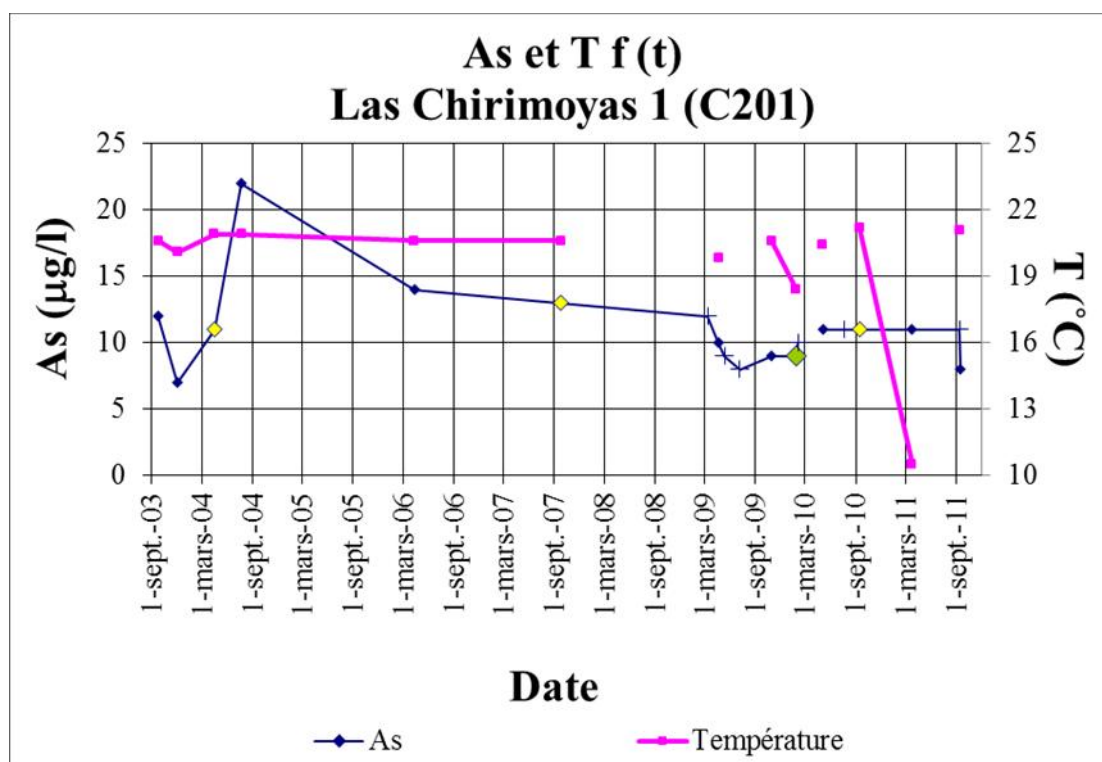


Figure 57. Relation As et température de l'eau, dans la source Las Chirimoyas 1 de l'aquifère Chiche.

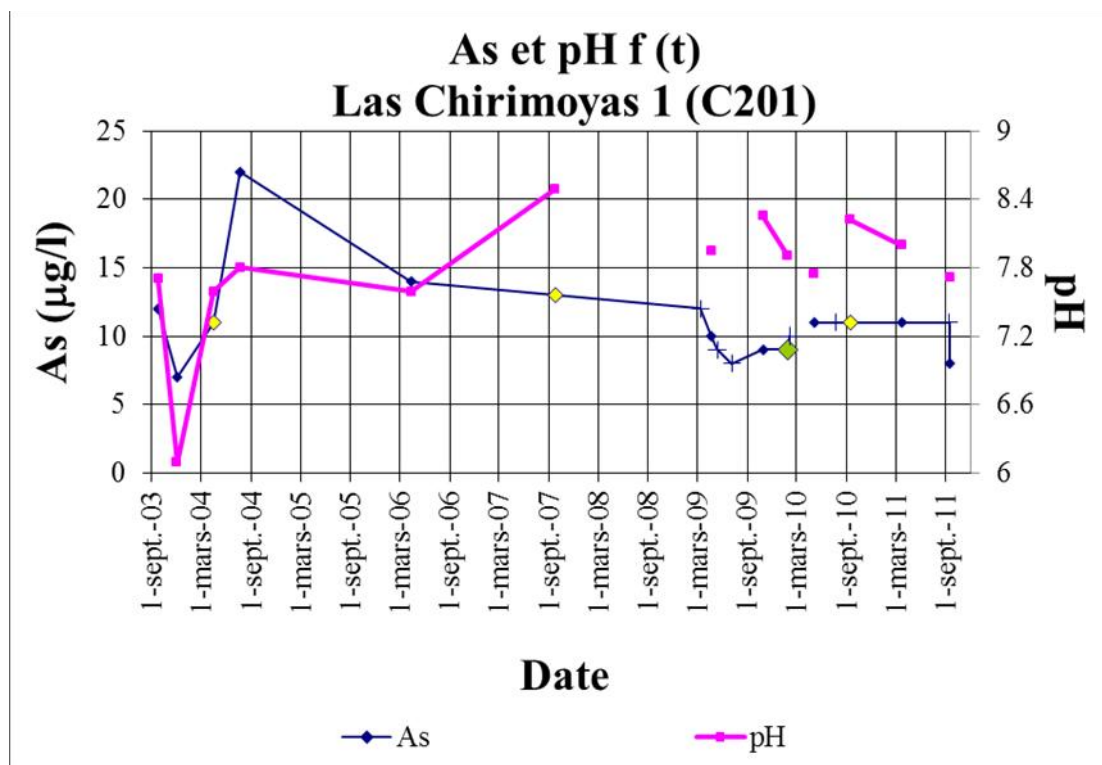


Figure 58. Relation As et pH, dans la source Las Chirimoyas 1 de l'aquifère Chiche.

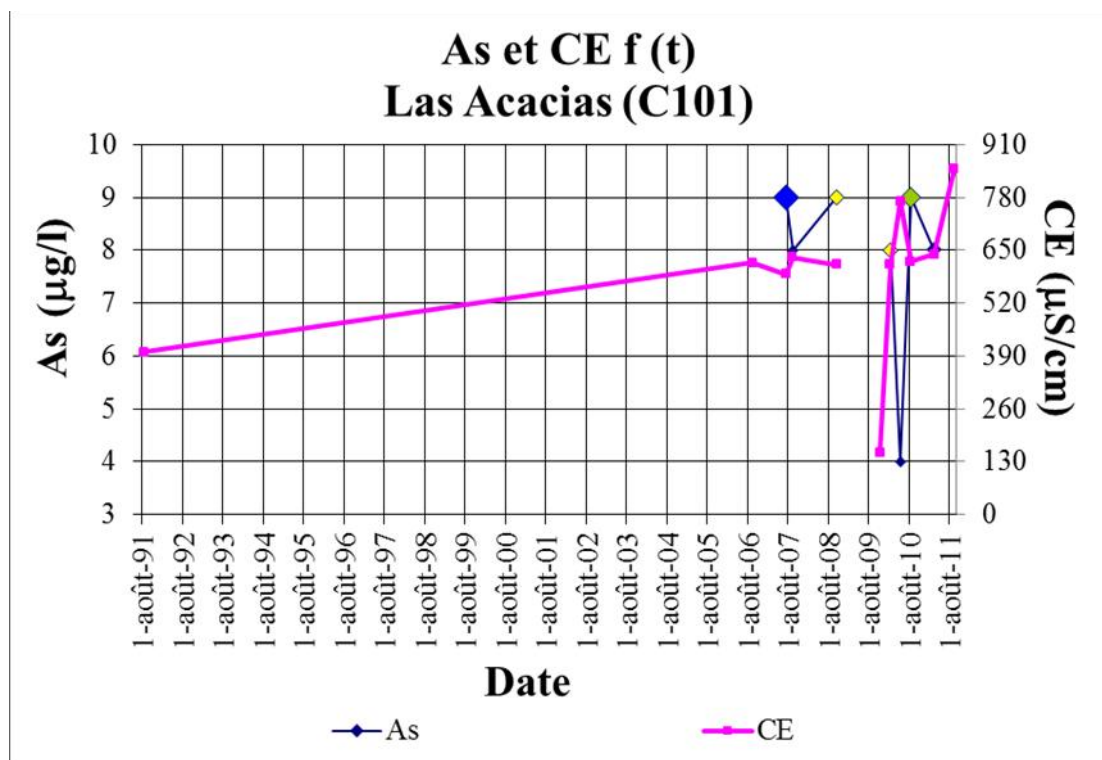


Figure 59. Relation As et CE, dans le forage Las Acacias de l'aquifère Chiche.

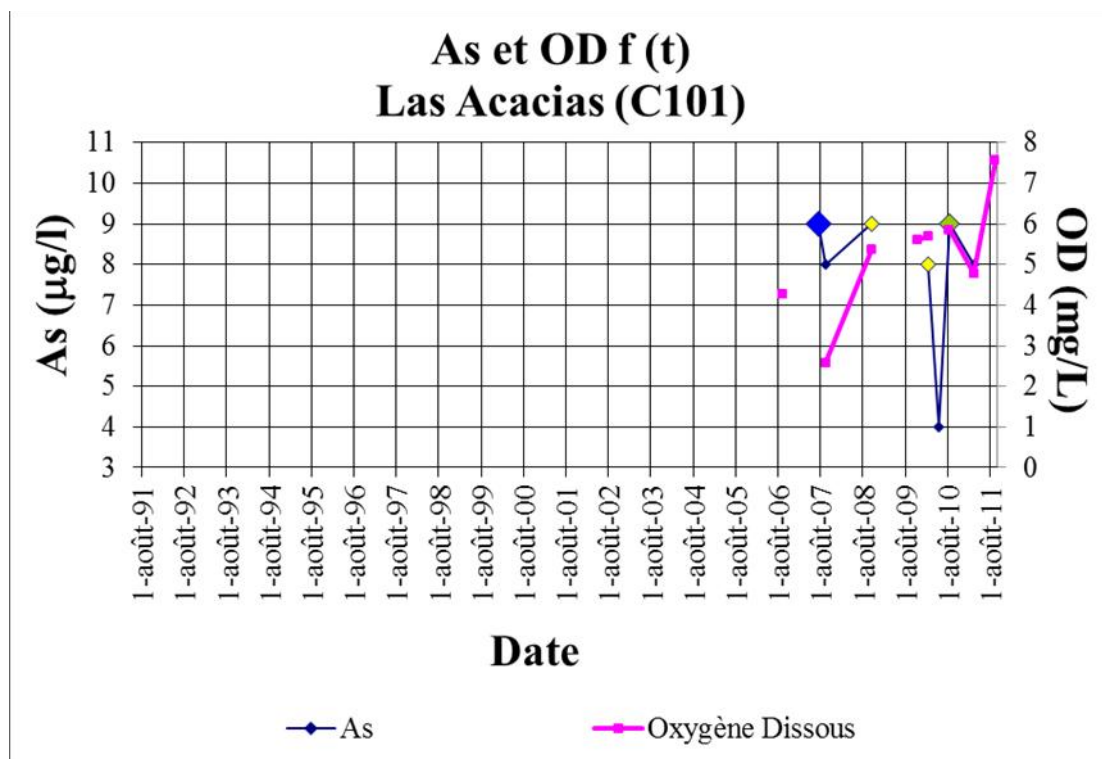


Figure 60. Relation As et oxygène dissous, dans le forage Las Acacias de l'aquifère Chiche.

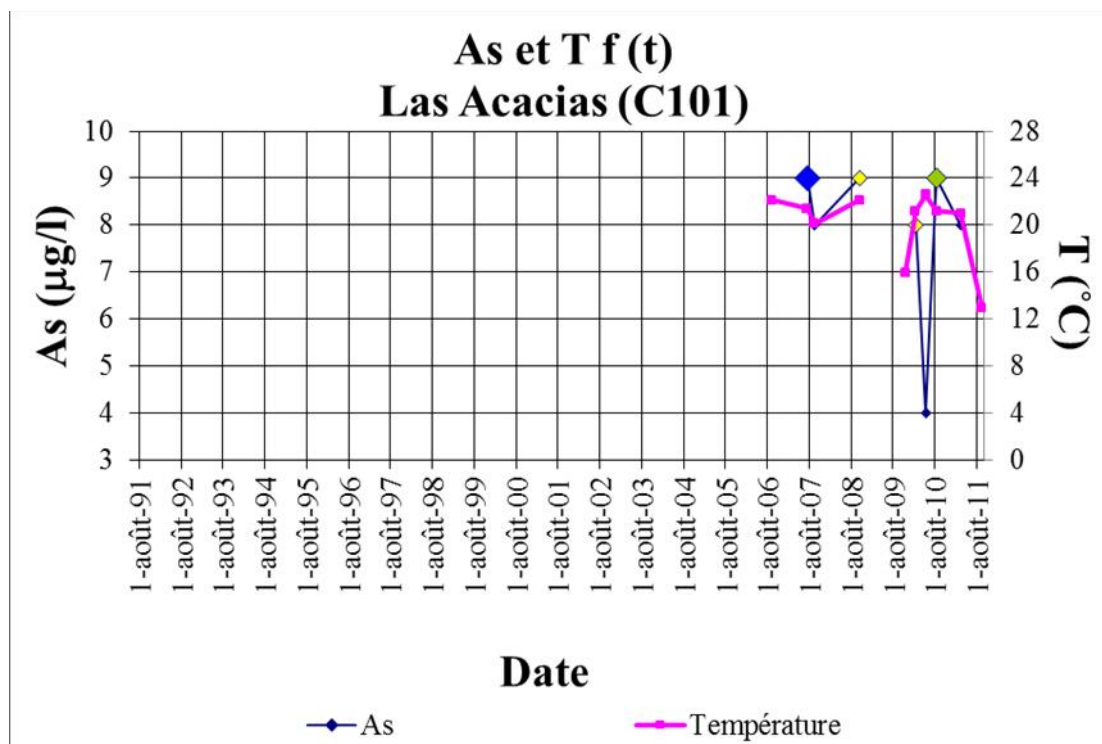


Figure 61. Relation As et température de l'eau, dans le forage Las Acacias de l'aquifère Chiche.

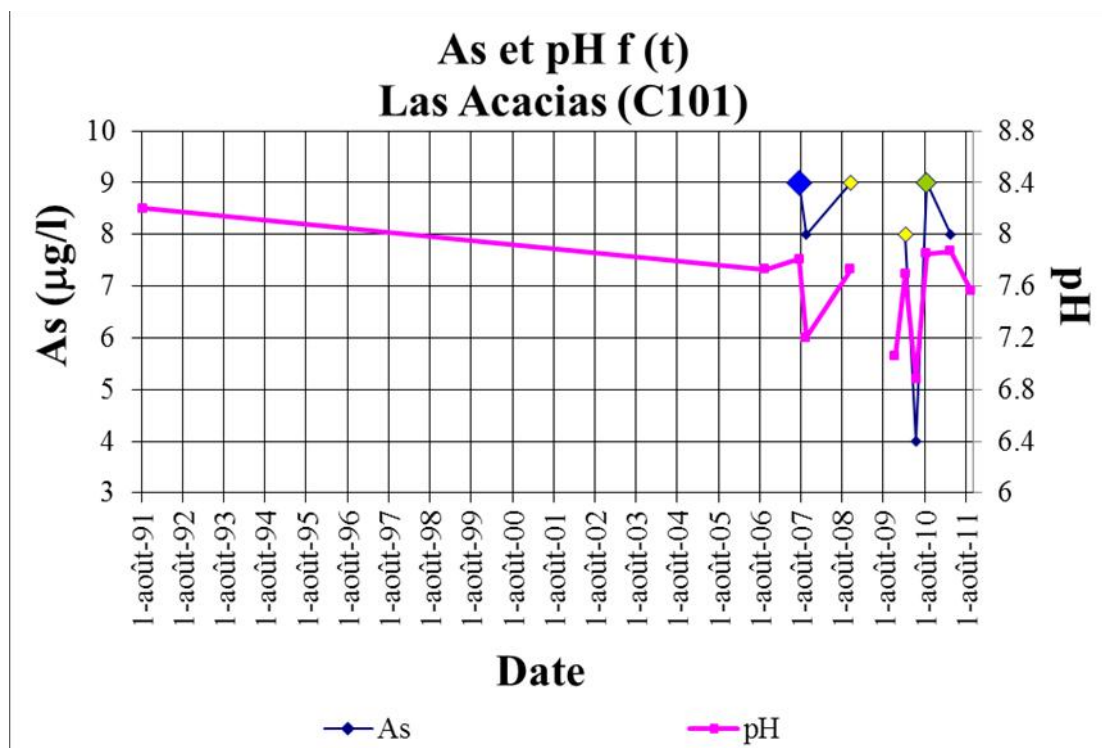


Figure 62. Relation As et pH, dans le forage Las Acacias de l'aquifère Chiche.

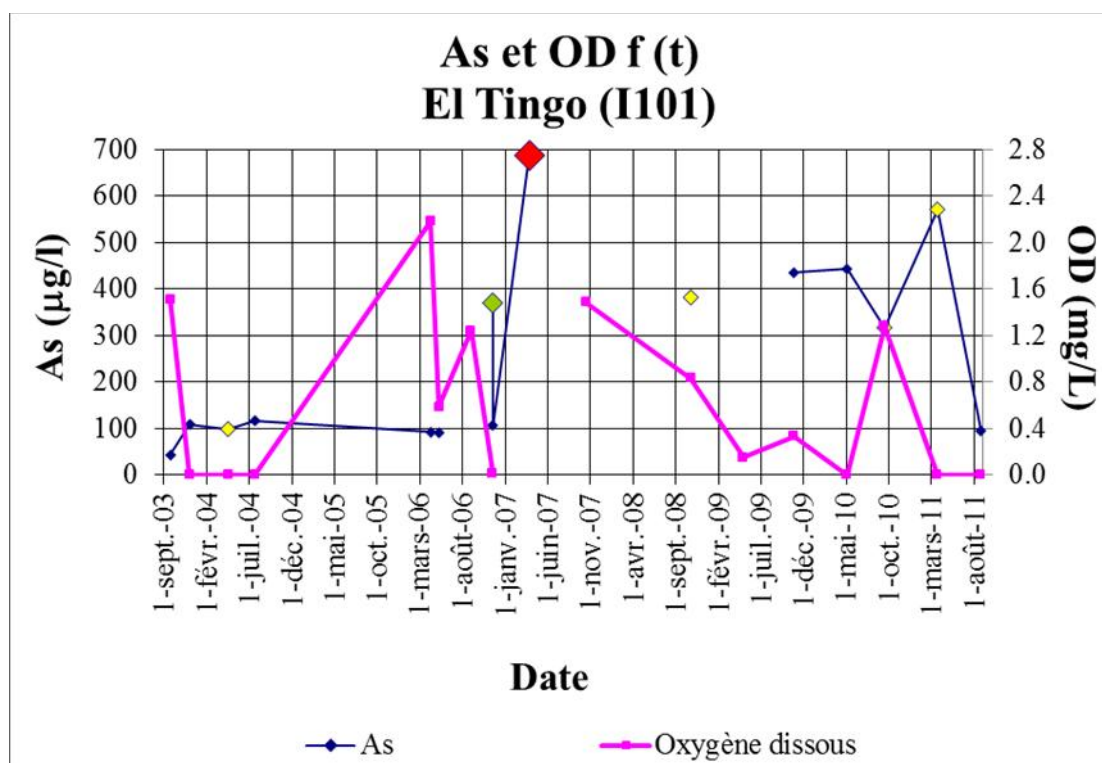


Figure 63. Relation As et oxygène dissous, dans le forage El Tingo de l'aquifère Ilaló.

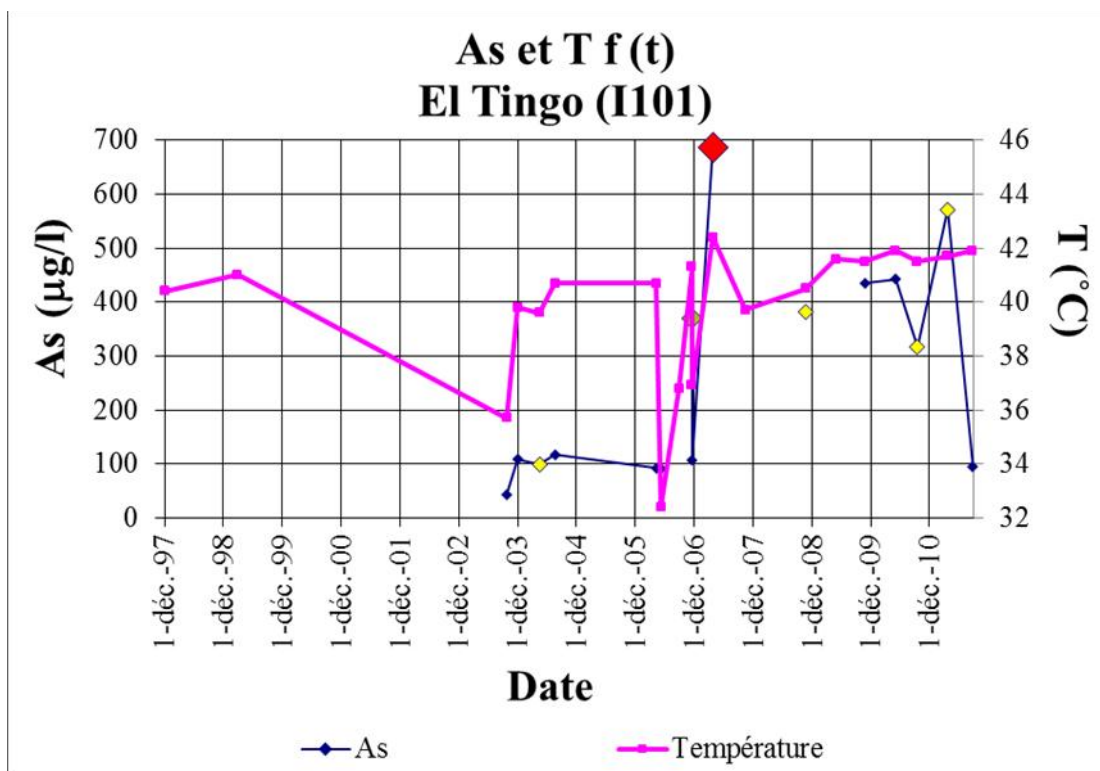


Figure 64. Relation As et température de l'eau, dans le forage El Tingo de l'aquifère Ilaló.

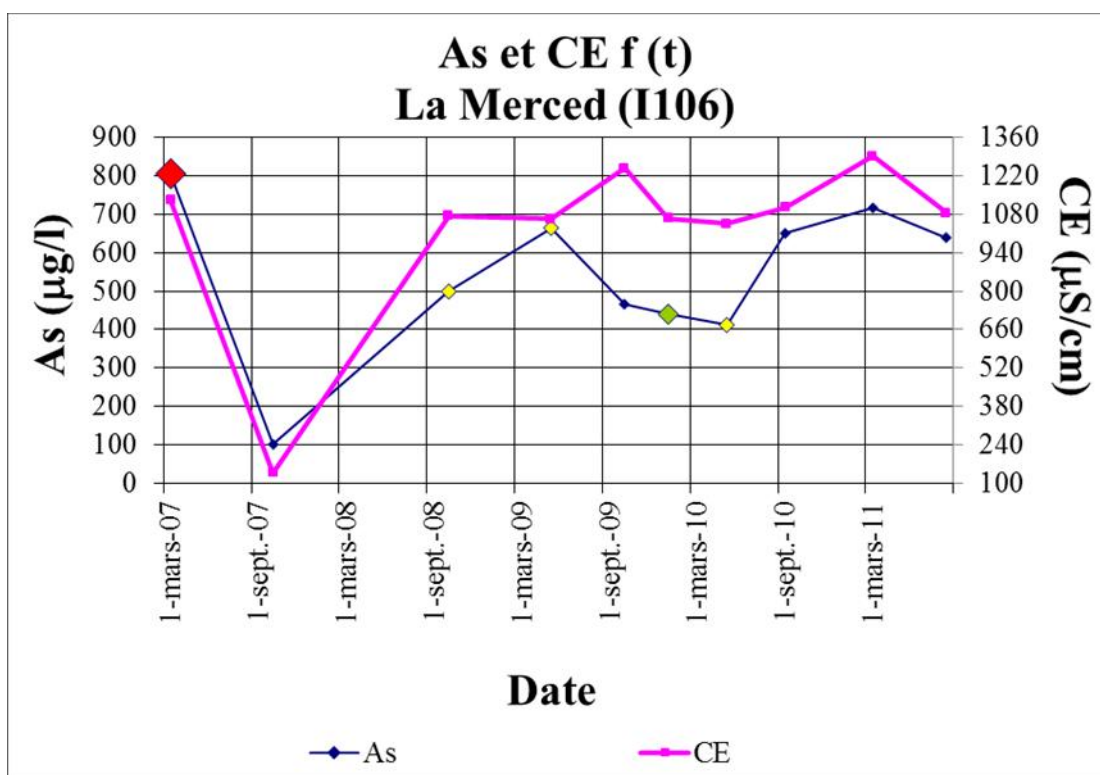


Figure 65. Relation As et CE, dans le forage La Merced de l'aquifère Ilaló.

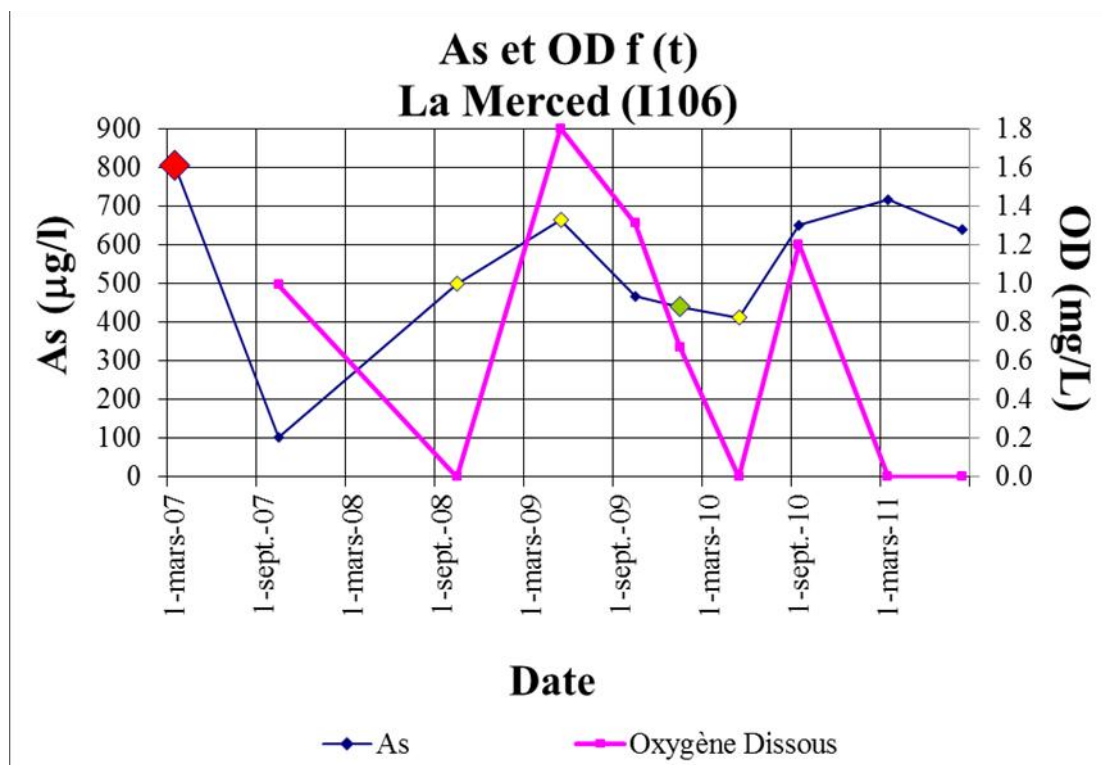


Figure 66. Relation As et oxygène dissous, dans le forage La Merced de l'aquifère Ilaló.

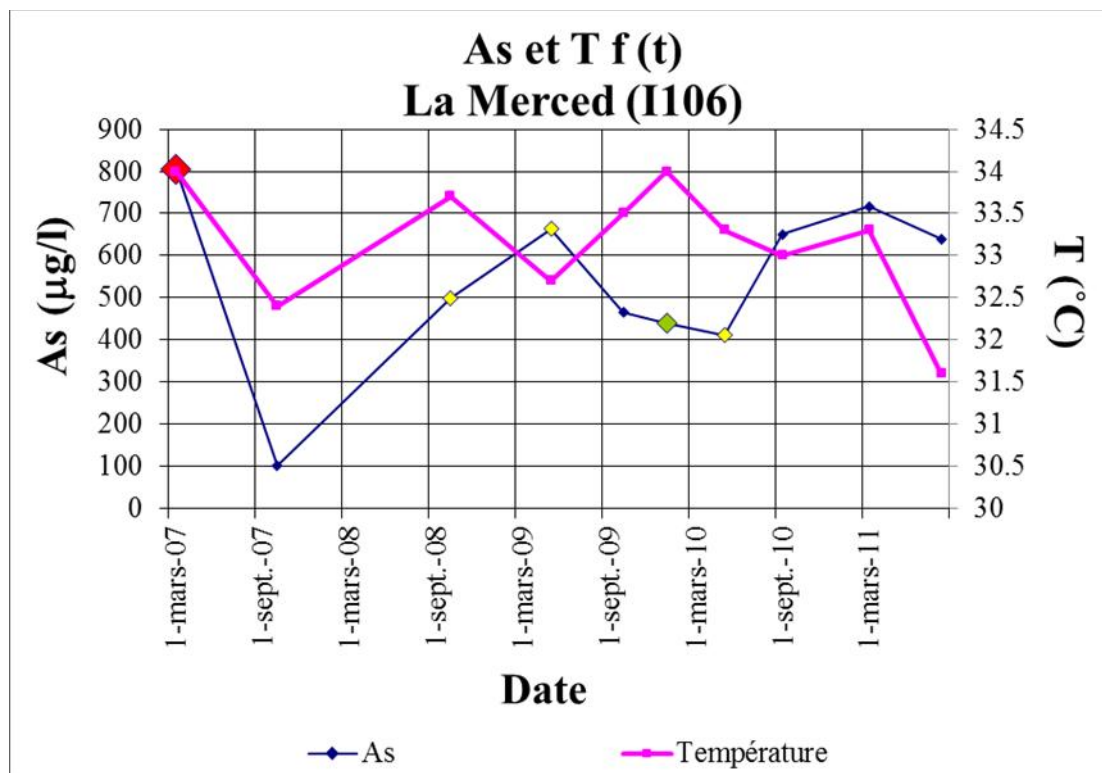


Figure 67. Relation As et température de l'eau, dans le forage La Merced de l'aquifère Ilaló.

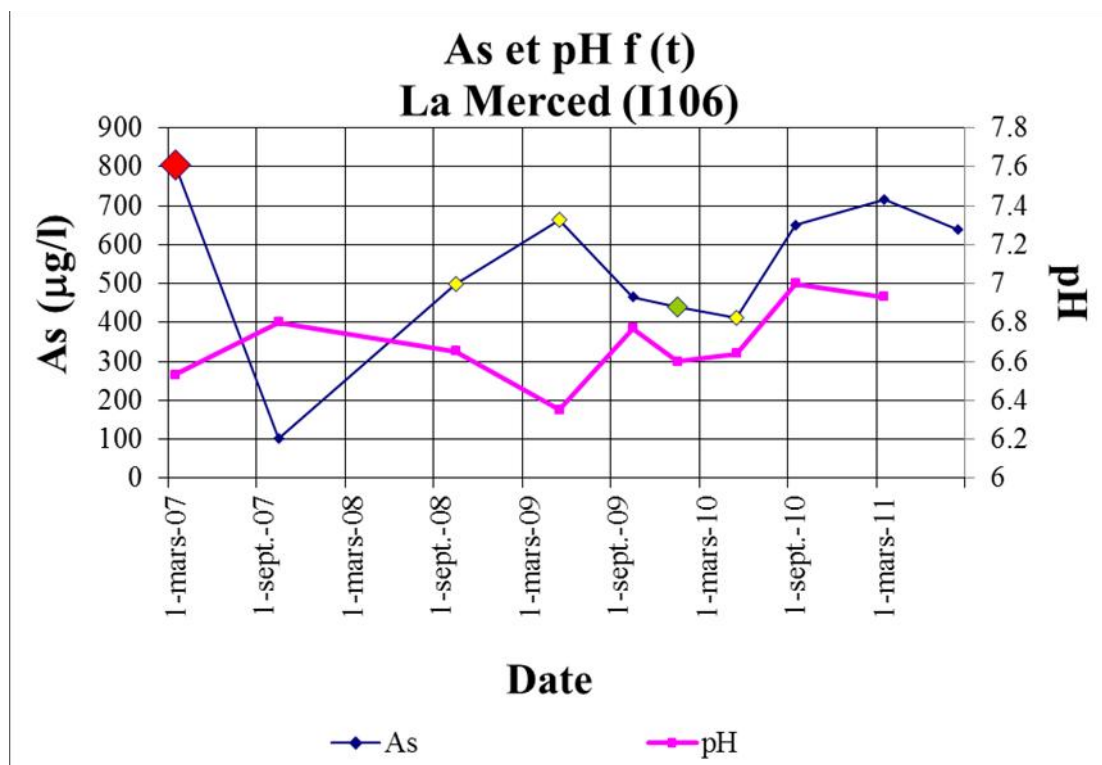


Figure 68. Relation As et pH, dans le forage La Merced de l'aquifère Ilaló.

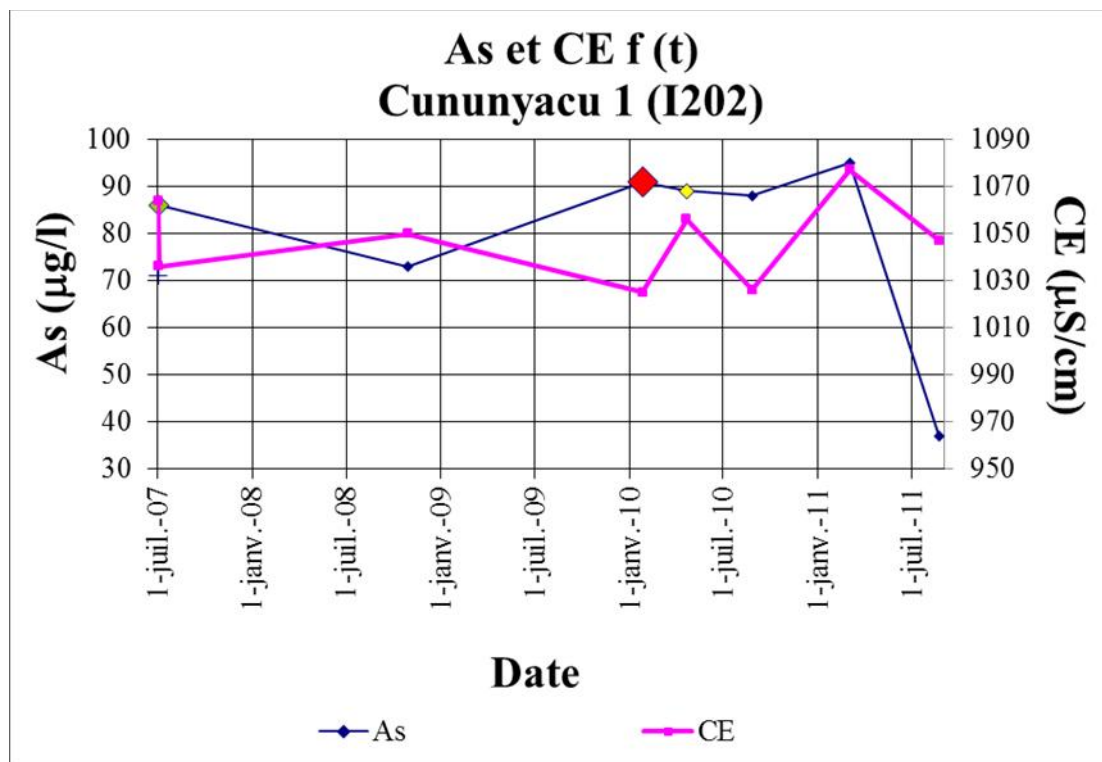


Figure 69. Relation As et CE, dans la source Cununyacu 1 de l'aquifère Ilaló.

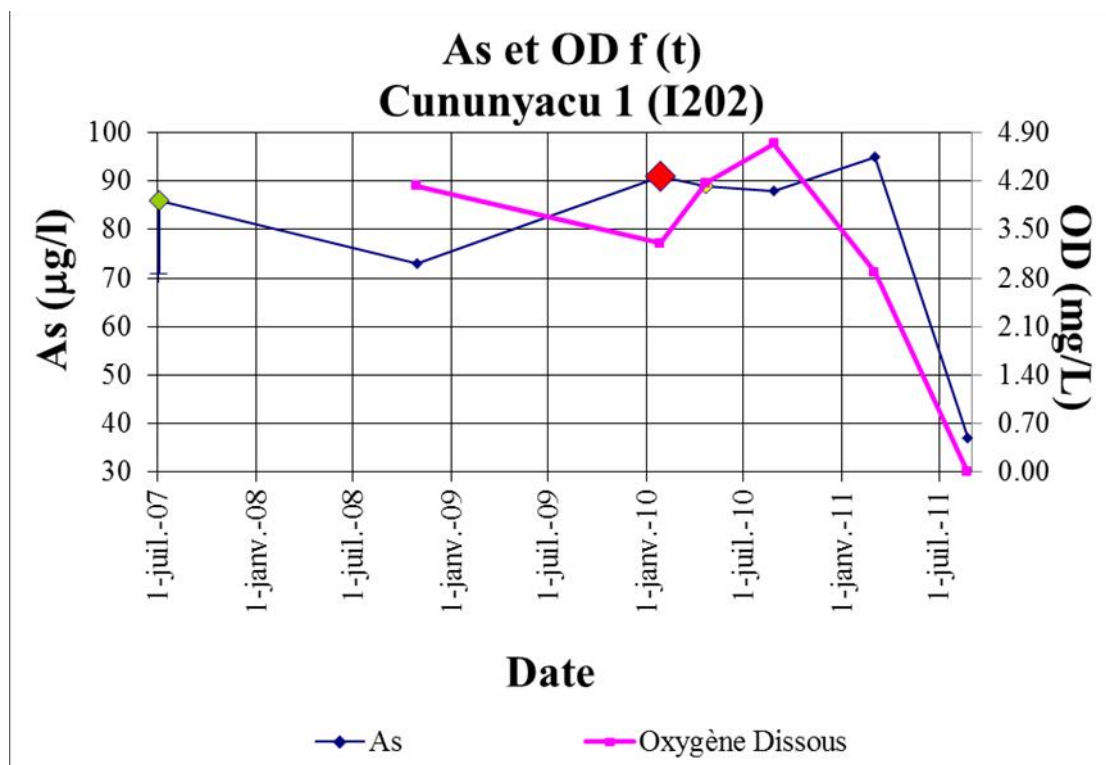


Figure 70. Relation As et oxygène dissous, dans la source Cununyacu 1 de l'aquifère Ilaló.

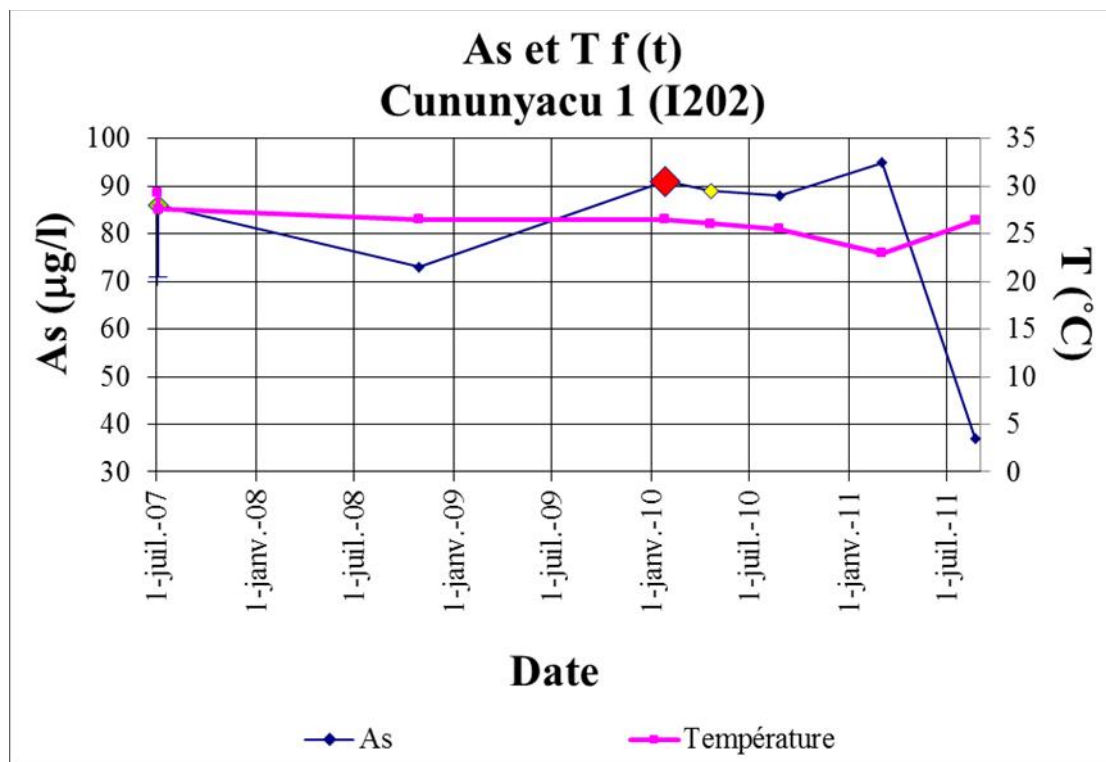


Figure 71. Relation As et température de l'eau, dans la source Cununyacu 1 de l'aquifère Ilaló.

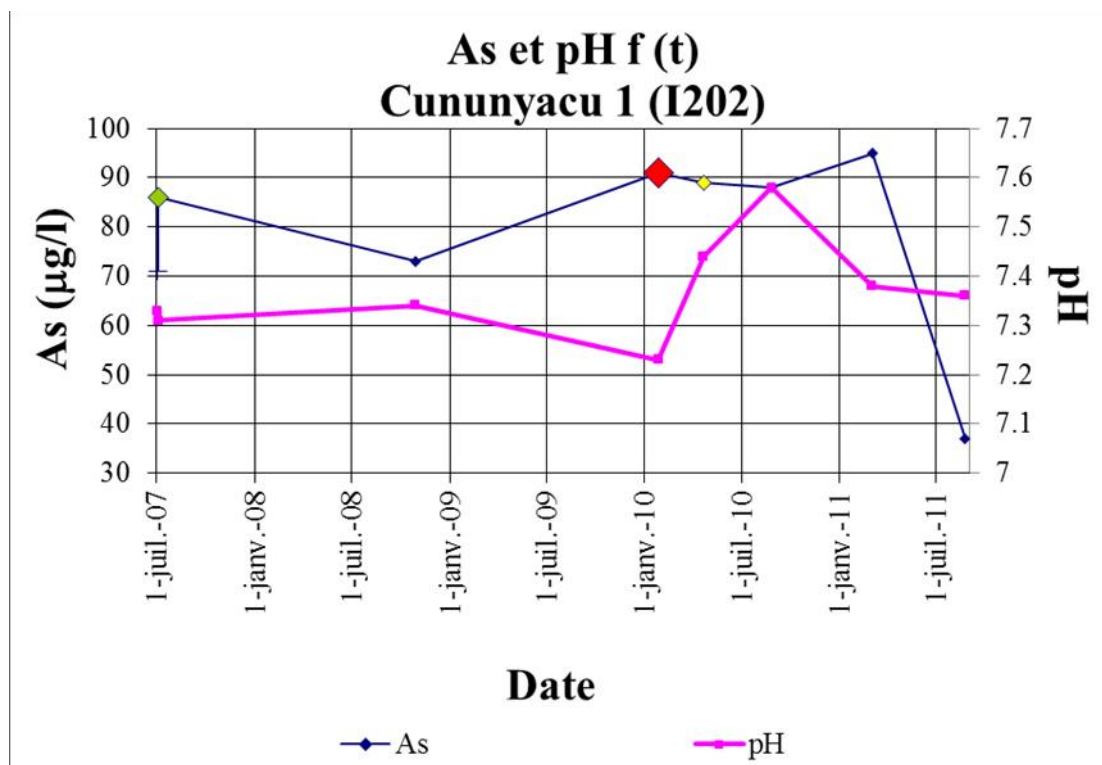


Figure 72. Relation As et pH, dans la source Cununyacu 1 de l'aquifère Ilaló.

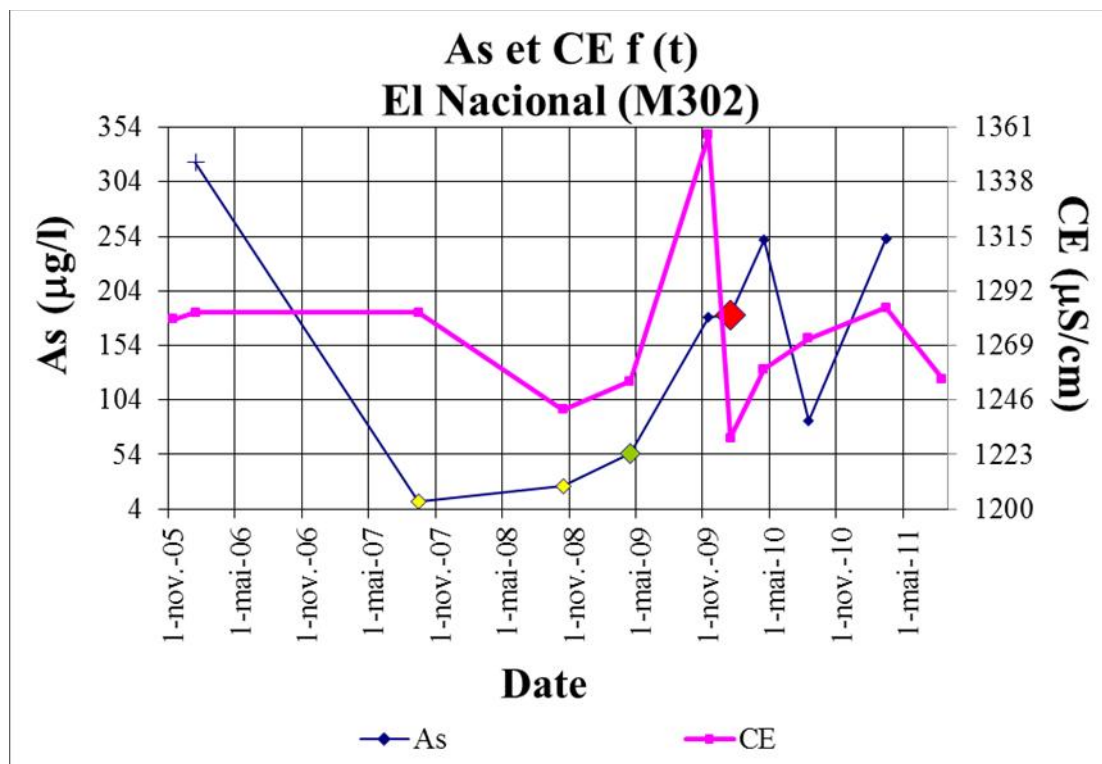


Figure 73. Relation As et CE, dans le forage mélangé El Nacional.

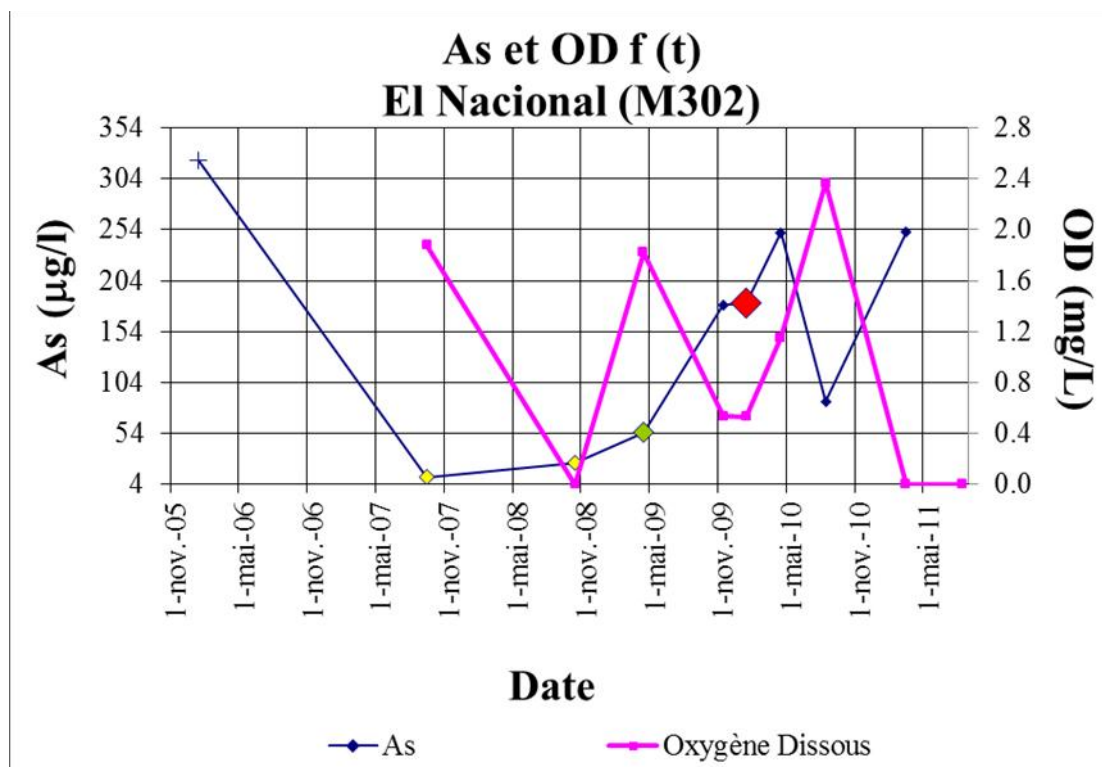


Figure 74. Relation As et oxygène dissous, dans le forage mélangé El Nacional.

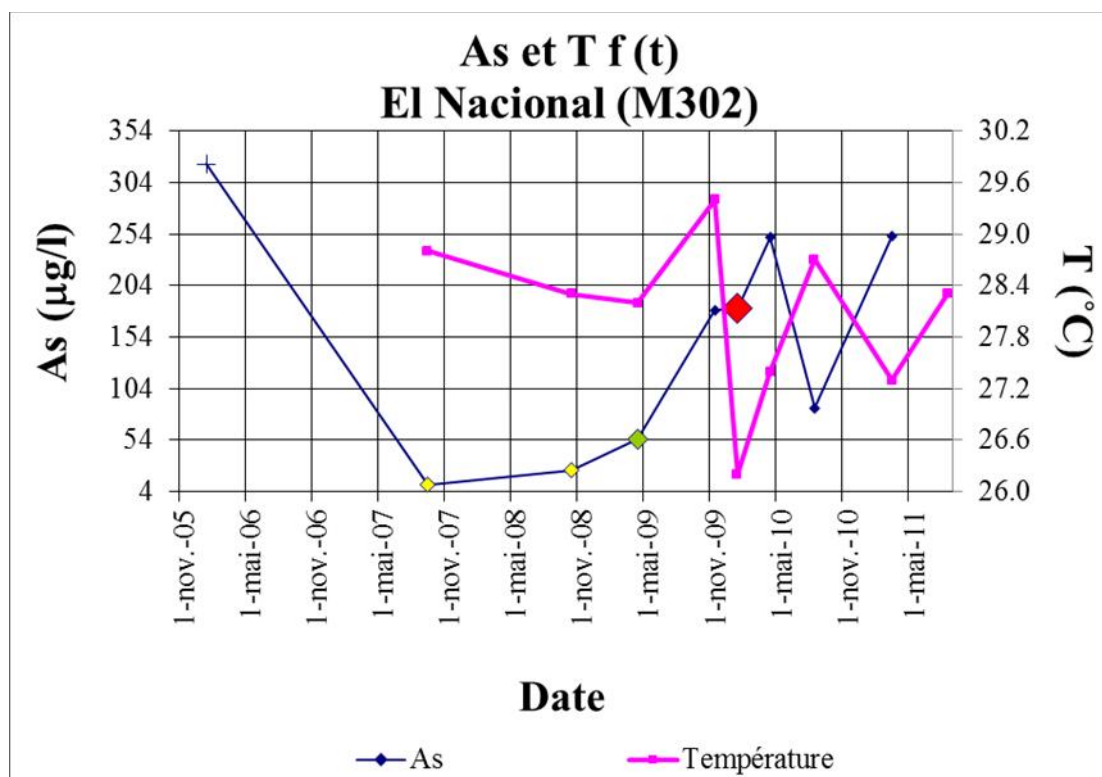


Figure 75. Relation As et température de l'eau, dans le forage mélangé El Nacional.

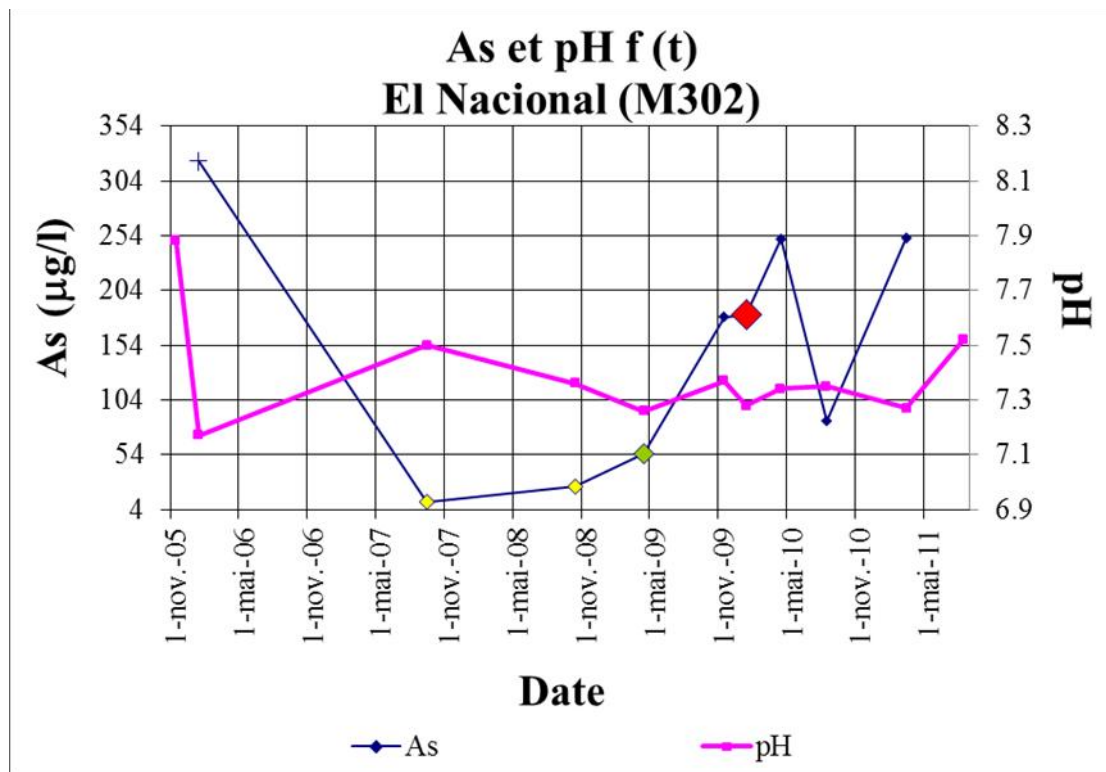


Figure 76. Relation As et pH, dans le forage mélangé El Nacional.

ANNEXE 6A

FRACTIONNEMENT ISOTOPIQUE

La coexistence de deux phases e.g. liquide – vapeur pour l’eau, induit une différenciation isotopique appelée le fractionnement isotopique.

Ce fractionnement quand il est à l’équilibre, donc dépendant uniquement de la température, peut être décrit en définissant le coefficient de fractionnement α , par exemple entre une phase liquide et une phase vapeur à l’équilibre :

$$r_{l/v} = \frac{R_l}{R_v} = \frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_l}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_v} \quad (3)$$

La variabilité du coefficient de fractionnement étant très petite on a introduit la notion d’enrichissement isotopique, exprimé en ‰ défini ainsi :

$$\epsilon_{l/v} = r_{l/v} - 1 = \pm u_l - u_v \quad (4)$$

où ϵ représente la différence de composition isotopique entre les deux phases.

Le fractionnement hors équilibre est associé à la diffusion qui a lieu lors des changements d’état avec un réservoir infini, tels que l’évaporation de l’océan, ou lors des changements d’état rapides. Les molécules contenant les isotopes lourds diffusent moins vite que les molécules légères. A l’évaporation, ceci induit un effet additionnel qui se combine à l’effet isotopique à l’équilibre.

Le fractionnement cinétique à l’évaporation dépend des conditions météorologiques à la source : température de surface de l’océan, humidité relative de l’air dans la couche de surface et vitesse du vent (Merlivat et Jouzel 1979).

Les deux isotopes n’étant pas de même masse, leur coefficient de diffusivité (fonction de T °C) est différent, mais leur rapport ne varie pratiquement pas à l’équilibre. Il existe donc une relation entre les effets de fractionnement du ^2H et du ^{18}O , et l’on note donc dans les eaux naturelles une relation entre les valeurs de $^2\delta$ et $^{18}\delta$ (Craig 1961).

RELATIONS ENTRE LE ^2H ET LE ^{18}O

La condensation étant un processus à l’équilibre l’ ^{18}O et le ^2H sont respectivement corrélées à la température de condensation. Dans ces conditions, le rapport théorique des diffusivités isotopiques dans l’air entre les deux isotopes est proche d’un facteur 8 (Jouzel 1986), ce que l’on constate sur la base des mesures isotopiques des précipitations non évaporées à l’échelle mondiale, e.g. Rozanski et al. (1993).

La relation entre les deux isotopes stables de l'eau, ^2H et ^{18}O , est connue comme la Droite Météorique Mondiale, DMM, (Global Meteoric Water Line, GMWL) et elle est donc caractérisée par une pente de 8 et une ordonnée à l'origine avec l'axe ^2H ($d=+10\text{‰}$, la valeur $^2\delta$ pour $^{18}\delta = 0\text{‰}$). La relation générale de la droite de l'eau météorique est écrite sous la forme suivante:

$$^2\delta = 8^{18}\delta + d$$

Avec $s = 8$ définissant le rapport du fractionnement isotopique entre le deutérium et l'oxygène 18 pour le processus de condensation de la vapeur atmosphérique, et d se définissant comme l'excès en deutérium (Gat et al. 2001) qui est fonction de l'origine de la vapeur. La DMM de pente 8 et d'excès en deutérium 10‰ définit en fait, les conditions d'origine de la plus grande partie de la vapeur circulant à l'échelle mondiale qui est évaporée au dessus des zones équatoriales et tropicales marines.

Sur les continents, pendant l'avancée des masses de vapeur marine différentes sources de vapeurs de compositions isotopiques (évaporation des surfaces d'eau, évaporation des sols, transpiration des plantes) vont se mélanger avec la vapeur d'origine marine, ce qui complexifie l'interprétation isotopique de la précipitation localement.

Les isotopes stables peuvent donc être utilisés pour caractériser le cycle de l'eau dans sa totalité et chaque compartiment de ce cycle, montrera des compositions isotopiques différentes. Par conséquent, les isotopes sont des outils très performants pour reconnaître l'origine de l'eau et les chemins que ces eaux ont parcourus.

ANNEXE 6B

Tableau 24. Données des isotopes stables du système aquifère, exprimé en ‰.

ID	Type	Origine	Station	Date	¹⁸ O	D	d exc	NP	dh
C101	forage	Chiche nord	Las Acacias	13/05/2010	-10,03	-75,3	4,9	2337	-651
C102	forage	Chiche nord	Cementerio	30/04/2010	-10,47	-76,5	7,2	2341	-519
C102	forage	Chiche nord	Cementerio	27/08/2010	-10,34	-77,0	5,7	2341	-558
C102	forage	Chiche nord	Cementerio	21/04/2011	-11,16	-77,0	12,3	2341	-309
C103	forage	Chiche nord	El Carrizal	23/04/2010	-10,88	-77,6	9,5	2354	-392
C103	forage	Chiche nord	El Carrizal	27/08/2010	-10,66	-78,7	6,5	2354	-462
C103	forage	Chiche nord	El Carrizal	21/04/2011	-10,79	-78,0	8,3	2354	-422
C103	forage	Chiche nord	El Carrizal	21/09/2011	-10,71	-79,0	6,7	2354	-444
C104	forage	Chiche nord	La Esperanza - MICEI	27/08/2010	-9,80	-74,2	4,3	2315	-720
C104	forage	Chiche nord	La Esperanza - MICEI	21/04/2011	-9,90	-74,3	4,9	2315	-691
C104	forage	Chiche nord	La Esperanza - MICEI	28/09/2011	-9,92	-75,0	4,4	2315	-683
C105	forage	Chiche nord	Patagua	23/04/2010	-10,97	-79,0	8,8	2341	-365
C105	forage	Chiche nord	Patagua	27/08/2010	-10,72	-78,8	7,0	2341	-442
C105	forage	Chiche nord	Patagua	21/04/2011	-11,22	-80,8	9,0	2341	-291
C105	forage	Chiche nord	Patagua	30/09/2011	-10,17	-76,9	4,5	2341	-608
C106	forage	Chiche nord	San Patricio	23/04/2010	-11,12	-80,3	8,6	2355	-322
C106	forage	Chiche nord	San Patricio	21/04/2011	-11,56	-80,4	12,1	2355	-188
C106	forage	Chiche nord	San Patricio	27/08/2010	-11,17	-80,8	8,5	2355	-307
C107	forage	Chiche nord	Santa Rosa	23/04/2010	-10,30	-77,2	5,2	2344	-570
C107	forage	Chiche nord	Santa Rosa	27/08/2010	-10,25	-76,8	5,2	2344	-585
C107_1	piézomètre	Chiche nord	Santa Rosa Pz	21/04/2011	-10,27	-77,1	5,1	2342	-578
C108	forage	Chiche nord	Arq. Diego Andrade (17 m)	21/06/2010	-10,45	-76,8	6,8	2283	-523
C109	forage	Chiche nord	Arq. Diego Andrade Casa	04/06/2010	-10,88	-78,5	8,6	2299	-393
C110	forage	Chiche nord	Casa Baca	25/06/2010	-10,81	-78,7	7,8	2315	-416

ID	Type	Origine	Station	Date	¹⁸ O	D	d exc	NP	dh
C112	forage	Chiche nord	Fábrica Nestlé	21/06/2010	-11,25	-80,7	9,3		-282
C113	forage	Chiche nord	Hospital de los Valles	25/06/2010	-10,43	-76,1	7,3	2318	-531
C151	forage	Chiche sud	Pozo Acosta Soberón	20/04/2011	-10,76	-76,2	9,9	2540	-430
C152	forage	Chiche sud	Pozo La Cocha 1	20/04/2011		-80,6		2600	
C153	forage	Chiche sud	Pozo La Cocha 2	20/04/2011	-11,52	-79,6	12,6	2580	-199
C154	forage	Chiche sud	Pozo La Cocha 3	20/04/2011		-80,4		2590	
C156	forage	Chiche sud	Pozo Los Arupos	20/04/2011	-10,95	-76,0	11,6	2456	-372
C201	source	Chiche nord	Las Chirimoyas 1	19/04/2010	-10,35	-76,6	6,1	2225	-555
C201	source	Chiche nord	Las Chirimoyas 1	27/08/2010	-10,31	-76,9	5,5	2225	-568
C201	source	Chiche nord	Las Chirimoyas 1	20/05/2011	-10,81	-76,7	9,8	2225	-416
C202	source	Chiche nord	Las Chirimoyas 2	20/05/2011	-10,60	-76,6	8,2	2225	-479
C204	source	Chiche nord	EEQ	26/10/2012	-10,97	-79,3	8,4	2230	-366
C205	source	Chiche nord	John Daane	28/05/2010	-10,74	-78,2	7,7	2160	-437
C206	source	Chiche nord	Vertiente San Pedro	20/05/2011	-11,56	-79,9	12,6	2206	-187
I101	forage	Ilaló	El Tingo Antiguo	21/04/2010	-12,67	-91,6	9,8	2470	148
I102	forage	Ilaló	El Tingo Nuevo	21/04/2010	-12,96	-91,8	12,0	2470	238
I102	forage	Ilaló	El Tingo Nuevo	27/08/2010	-12,65	-92,2	9,1	2470	144
I102	forage	Ilaló	El Tingo Nuevo	20/04/2011	-12,70	-92,1	9,6	2470	159
I104	forage	Ilaló	Rumihuayco 2	23/04/2010	-11,59	-82,6	10,2	2429	-177
I104	forage	Ilaló	Rumihuayco 2	21/04/2011	-11,47	-82,0	9,7	2429	-216
I105	forage	Ilaló	Pozo 5 Naval	20/04/2011	-11,32	-80,7	9,9	2534	-259
I106	forage	Ilaló	La Merced	20/04/2011	-11,36	-80,4	10,4	2578	-249
I202	source	Ilaló	Cununyacu interne	21/04/2010	-11,54	-80,7	11,7	2320	-192
I202	source	Ilaló	Cununyacu interne	27/08/2010	-11,36	-80,1	10,8	2320	-247
I202	source	Ilaló	Cununyacu interne	20/05/2011	-11,93	-80,4	15,1	2320	-76
I203	source	Ilaló	Cununyacu externe	21/04/2010	-11,42	-80,5	10,8	2320	-231
I203	source	Ilaló	Cununyacu Externe	24/06/2010	-11,36	-80,2	10,7	2320	-247
I203	source	Ilaló	Cununyacu externe	20/05/2011	-11,50	-80,0	12,0	2320	-205
I204	source	Ilaló	El Tingo Carrizal	20/05/2011				2480	
I204	source	Ilaló	El Tingo Carrizal	21/04/2010	-12,41	-88,4	10,9	2480	71
I205	source	Ilaló	El Tingo Piscina	21/04/2010	-11,64	-84,6	8,5	2470	-165
I206	source	Ilaló	Rumiloma 1	27/08/2010	-11,51	-82,6	9,4	2320	-203
I206	source	Ilaló	Rumiloma 1	20/05/2011	-11,85	-82,6	12,2	2320	-101
I207	source	Ilaló	Rumiloma 2	19/04/2010	-11,69	-82,8	10,7	2320	-147
I208	source	Ilaló	Rumiloma 3	20/05/2011	-11,91	-83,9	11,4	2320	-81
M301	forage	Mélange	VCH 1	20/04/2011	-13,11	-88,0	16,8	2471	282

Annexe 6B

ID	Type	Origine	Station	Date	¹⁸ O	D	d exc	NP	dh
M302	forage	Mélange	El Nacional	19/04/2010	-11,74	-82,7	11,3	2326	-132
M302	forage	Mélange	El Nacional	27/08/2010	-11,50	-83,3	8,7	2326	-207
M302	forage	Mélange	El Nacional	21/04/2011	-11,88	-83,1	11,9	2326	-92
M303	forage	Mélange	La Primavera 1	30/04/2010	-10,62	-77,2	7,7	2331	-472
M303	forage	Mélange	La Primavera 1	13/05/2010	-10,65	-77,1	8,1	2331	-463
M303	forage	Mélange	La Primavera 1	27/08/2010	-10,42	-76,5	6,8	2331	-532
M303	forage	Mélange	La Primavera 1	21/04/2011	-11,05	-76,7	11,7	2331	-342
M303	forage	Mélange	La Primavera 1 Ap pomp	04/08/2010	-10,72	-78,3	7,5	2331	-442
M303_1	piézomètre	Mélange	La Primavera 1 Pz	21/04/2011	-10,85	-77,5	9,3	2331	-402
M305	forage	Mélange	Rumihuayco 1	23/04/2010	-11,30	-80,3	10,1	2429	-267
M305	forage	Mélange	Rumihuayco 1	27/08/2010	-11,55	-82,2	10,2	2429	-190
M305	forage	Mélange	Rumihuayco 1	21/04/2011	-12,14	-83,6	13,5	2429	-13
V1	source	Chiche nord	Cascade	21/04/2010	-11,35	-82,5	8,3	2297	-251