

ANNEXE 9

RAPPORT DU LABORATOIRE SUBATECH

RAPPORT DU BURGEAP



LE SPÉCIALISTE DE L'ENVIRONNEMENT

CENTRE D'ETUDES DE
VAUJOURS

**Suivi hydrogéologique et
géochimique**



CEA/DAM

**CENTRE D'ETUDES DE
VAUJOURS**

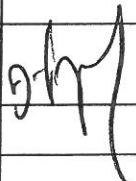
**Suivi hydrogéologique et
géochimique**

**Rapport de fin de
campagne**

CEA/DAM

Centre d'études de Vaujours
Suivi hydrogéologique et géochimique
Rapport de fin de campagne

Rapport rédigé en collaboration avec Jean Michel SCHMITT du Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris

Objet de l'indice	Date	Indice	Rédaction		Validation	
			Nom	Signature	Nom	Signature
Rapport provisoire	Août 2002		A.BARITEAU J.M. SCHMITT		D. FOUGEIROL	
Rapport corrigé après lecture des experts	23/08/02	a	A.BARITEAU J.M. SCHMITT		D. FOUGEIROL	
Rapport définitif après intégration de l'annexe 4	04/09/02	b	A.BARITEAU J.M. SCHMITT		D. FOUGEIROL	
		c				
		d				

Numéro de rapport :	R.3614
Numéro d'affaire :	A.8314
N° de contrat :	C.301511
Domaine technique :	T03

BURGÉAP
 27, rue de Vanves
 92772 BOULOGNE-BILLANCOURT Cedex
 Téléphone : 33(0)1.46.10.25.20 Télécopie : 33(0)1.46.10.25.64
 e-mail : agence.de.paris@burgeap.fr

SOMMAIRE

Avant-propos	6
1 Contexte de l'étude	7
2 Résultats du suivi hydrogéologique	8
2.1 Piézométrie de la nappe du Brie	8
2.2 Fonctionnement des puits d'infiltration	10
2.3 Conclusions sur les évolutions piézométriques de la nappe du Brie	10
2.4 La nappe de l'Eocène Supérieur	11
2.4.1 Rappel sur l'implantation et les caractéristiques techniques du sondage de reconnaissance aux formations infra-sannoisiennes	11
2.4.2 Piézométrie de la nappe de l'Eocène Supérieur au droit de la butte	12
3 Chimie et minéralogie des formations sannoisiennes et infra sannoisiennes	12
3.1 Chimie et minéralogie des formations du Sannoisien - compléments d'étude	13
3.2 Chimie et minéralogie des formations infra-sannoisiennes	15
3.3 Conclusion sur les formations sannoisiennes et infra sannoisiennes	17
4 Chimie des eaux	18
4.1 Résultats des analyses	18
4.1.1 La nappe des Calcaires de Brie	19
4.1.2 La nappe des colluvions	22
4.1.3 La nappe de l'Eocène Supérieur	23
4.1.4 Fonctionnement hydrogéochimique du système	25
4.2 Conclusion sur la chimie des eaux	25
5 Synthèse des résultats	26
5.1 Contamination résiduelle	26
5.2 Migration de l'uranium dans les eaux et les sols	26
5.2.1 Traversée des niveaux gypseux par les eaux infiltrées par puits	27
5.2.2 Vitesse de transfert au sein de la nappe du Brie	27
5.2.3 Qualité des eaux aux exutoires	28
5.3 Conclusions et recommandations	28

TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des piézomètres et puits utilisés pour le suivi piézométrique de la nappe du Brie.	8
Tableau 2 : Mesures du niveau piézométrique de la nappe du Brie (* niveau d'eau dans les piézomètres juste après leur installation).	9
Tableau 3 : Fluctuation des niveaux de la nappe du Brie entre novembre 2001 et fin mars/début avril 2002, période de recharge.	10
Tableau 4 : Mesure du niveau piézométrique de la Nappe de l'Eocène Supérieur au droit de la Butte de Vaujours.	12
Tableau 5 : Abondance naturelle des différents isotopes de l'uranium et rapports isotopiques naturels (d'après Reimann et de Caritat, 1998).	13
Tableau 6 : Résultats des analyses d'uranium des échantillons de la carotte B1	14
Tableau 7 : Description et cote des échantillons prélevés sur la carotte PzE.	15
Tableau 8 : Analyse chimique par FX des échantillons provenant de la carotte PzE. 15	
Tableau 9 : Analyse minéralogique semi-quantitative (DRX) sur roche totale des échantillons prélevés sur la carotte PzE	16
Tableau 10 : Analyse minéralogique semi-quantitative (DRX) de la fraction fine (< 2 µm) des échantillons prélevés sur la carotte PzE.	16
Tableau 11 : Concentration en uranium et isotopie de l'uranium dans les échantillons de la carotte PzE.	16
Tableau 12 : liste des points prélèvements.	18
Tableau 13 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux prélevées dans la nappe de Brie.	20
Tableau 14 : Etat d'équilibre des eaux issues de la nappe du Brie prélevées en avril. 21	
Tableau 15 : Teneur et isotopie de l'uranium dans les eaux de la nappe du Brie prélevées en novembre 2001 et avril 2002.	21
Tableau 16 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux issues de la nappe des colluvions	22
Tableau 17 : Etat d'équilibre des eaux de la nappe des colluvions	22
Tableau 18 : Teneur et isotopie de l'uranium dans les eaux provenant de la nappe des colluvions	23
Tableau 19 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux issues de la nappe de l'Eocène Supérieur	24
Tableau 20 : Etat d'équilibre des eaux issues de la nappe de l'Eocène Supérieur	24
Tableau 21 : Teneur et isotopie de l'uranium dans les eaux issues de la nappe de l'Eocène Supérieur	24

FIGURES		Version
Figure 1	Carte de localisation des points de suivi piézométrique de la nappe du Brie	
Figure 2	Evolution de la piézométrie de la nappe du Brie en PzB2, PzB3, PzB4 et PzB6 et de la pluviométrie à Vaujours	
Figure 3	Localisation des installations où l'uranium été mis en œuvre, des puits d'infiltration et de leur bassin versant	
Figure 4	Variation du niveau d'eau dans le puits d'infiltration P2 et de la pluviométrie à Vaujours	
Figure 5	Coupe géologique et technique du piézomètre PZE	
Figure 6	Localisation des points de prélèvement des eaux	
Figure 7	Coupe géologique et profil des teneurs en uranium de la carotte B1	
Figure 8	Diagramme de Piper des eaux prélevées dans la nappe du Brie en avril 2002.	
Figure 9	Profil chimique des eaux de la nappe du Brie prélevées en novembre 2001 et avril 2002.	
Figure 10	Isotopie de l'uranium dans les eaux de la nappe du Brie prélevées en novembre 2001 et avril 2002.	
Figure 11	Diagramme de Piper des eaux prélevées dans la nappe des colluvions et la nappe de l'Eocène Supérieur en avril 2002.	
Figure 12	Profil chimique des eaux de la nappe des colluvions prélevées en novembre 2001 et avril 2002.	
Figure 13	Profil chimique des eaux de la nappe de l'Eocène Supérieur prélevées en novembre 2001 et avril 2002.	
Figure 14	Relation entre les concentrations en Mg, K et Na et la concentration en uranium dans les eaux de la nappe de l'Eocène Supérieur	
Figure 15	Relation entre la concentration en sulfate et celle en calcium dans les eaux de la nappe des colluvions.	
Figure 16	Relation entre la concentration des eaux en sulfate et celles en calcium et magnésium non associées au carbonate (en bleu les eaux de la nappe du Brie, en vert des eaux de la nappe des colluvions).	
Figure 17	Fonctionnement hydrogéologique de la butte de Vaujours au droit du CEV	

ANNEXES

- Annexe 1 - Mesure des concentrations et de l'isotopie de l'uranium des eaux et des roches réalisée par SUBATECH et le CEA
- Annexe 2 - Bordereau d'analyses des eaux Campagne d'avril 2002
- Annexe 3 - Limites d'utilisation des études de pollution du milieu souterrain
- Annexe 4 - CEA/DAM - Rapport technique

Avant-propos

Le CEA/DAM a confié à BURGEAP l'étude de la migration de l'uranium au droit du centre d'étude CEA de Vaujours (CEV). Le présent rapport rend compte des résultats des investigations hydrogéologiques et géochimiques menées d'octobre 2001 à juin 2002 et en fait la synthèse.

Il fait suite aux rapports :

- R3288b du 6/09/01 " Synthèse documentaire historique et hydrogéologique", appelé dans la suite du texte "BURGEAP, 2001",
- R3460 du 06/02/02 "Reconnaissances hydrogéologiques et caractérisation géochimique des roches et des eaux souterraines.Rapport d'avancement", appelé dans la suite du texte "BURGEAP, 2002".

Le présent rapport ne reprend pas l'ensemble des données figurant dans les deux rapports précédents mais prend en compte l'ensemble des informations qu'ils contiennent pour interpréter les résultats obtenus et en faire la synthèse.

1 Contexte de l'étude

Le Fort de Vaujours est situé en limite du département de la Seine-Saint-Denis (93) et du département de la Seine et Marne (77) sur un promontoire, dit butte d'Aulnay, qui domine au nord le canal de l'Ourcq et au sud la vallée de la Marne. Il a été utilisé de 1955 jusqu'à la fin des années 1990 comme site d'étude et de recherche du CEA sur les poudres et explosifs. Durant certaines de ces expérimentations, de l'uranium métal (appauvri et/ou naturel), y a été utilisé. Le centre a été définitivement fermé le 31 décembre 1997. Cette fermeture s'est accompagnée du démantèlement des installations et de l'assainissement du site (anonymes, 1998).

La commission chargée de l'enquête publique demandée par le préfet de Seine et Marne, pour l'instauration de servitudes d'utilité publique faisant suite à la demande d'abandon du site de Vaujours par le CEA, a demandé la réalisation des compléments d'études suivants :

- une étude hydrogéologique détaillée,
- l'étude de la migration de l'uranium dans le sous-sol,
- l'évaluation des risques sanitaires potentiels liés à l'ancienne activité du site et à la pollution résiduelle actuelle.

Dans un premier temps, BURGÉAP a réalisé une synthèse documentaire complétée par des observations de terrain (BURGÉAP, 2001) qui a permis de rassembler les informations disponibles sur :

- l'historique du site et l'utilisation de l'uranium sur le site,
- le fonctionnement hydraulique du site (quantification des flux d'eau entrant et sortant),
- le contexte géologique et hydrogéologique local et régional
- l'utilisation de l'eau et l'identification des points d'eau pouvant s'avérer utiles dans la suite de l'étude.

Dans un second temps, le CEA/DAM a confié à BURGÉAP :

- la réalisation de reconnaissances hydrogéologiques, afin de lever les indéterminations sur le fonctionnement hydraulique du milieu souterrain,
- la caractérisation géochimique des eaux et des roches au droit et à l'aval du CEV, afin de repérer une éventuelle contamination du sous-sol par de l'uranium et d'étudier les conditions de sa migration dans le milieu naturel.

La première partie de ces investigations a été réalisée au cours du dernier trimestre 2001 ; les résultats obtenus ont été synthétisés dans un rapport (BURGÉAP, 2002).

Une phase d'investigations complémentaires s'est déroulée durant le printemps 2002. Le présent rapport rassemble les données recueillies au cours de cette seconde phase et fait la synthèse de l'ensemble des résultats obtenus sur la piézométrie de la nappe du Brie, le fonctionnement hydraulique des puits d'infiltration, la minéralogie des formations sannoisiennes et ludiennes et la chimie des nappes présentes au droit et à l'aval du site.

2 Résultats du suivi hydrogéologique

2.1 Piézométrie de la nappe du Brie

Sept piézomètres au Brie ont été réalisés dans l'enceinte de CEV en septembre 2001 dans les buts de :

- préciser la géométrie du réservoir du Brie,
- étudier les écoulements naturels de la nappe et les variations du niveau piézométrique sur un cycle hydrologique,
- caractériser le marquage éventuel du sous-sol du Fort Central par de l'uranium (Cf. § 3).

Les calcaires de Brie renferment une nappe perchée qui s'écoule vers le sud. Les argiles vertes du Sannoisien forment le substratum imperméable de cette nappe ; ces argiles, qui pendent globalement vers le Sud, sont à une cote voisine de 122 m NGF au nord du CEV et à environ 118 m NGF à l'extrémité sud du site (BURGEAP, 2002).

Les fluctuations du niveau de nappe du Brie ont été suivies sur les sept piézomètres réalisés grâce à un suivi manuel quasi-mensuel de l'ensemble des piézomètres et un enregistrement continu des variations de niveau de nappe sur quatre piézomètres depuis mi-décembre 2001 (figure 1 ; tableau 1).

Tableau 1 : Liste des piézomètres et puits utilisés pour le suivi piézométrique de la nappe du Brie.

Ouvrage	Manuel		Enregistrement en continu	
	Ouvrage suivi	période	Ouvrage suivi	période
PzB1	X	17/09/01 au 15/07/02	X	13/12/2001 au 27/03/02 puis à partir du 11/07/02
PzB2	X		X	
PzB3	X			
PzB4	X			
PzB5	X		X	13/12/2001 au 27/03/02 puis à partir du 11/04/02
PzB6	X		X	
PzB7	X			

Les fluctuations de niveau d'eau mesurées sur les piézomètres sont reportées dans le tableau 2 et illustrées par la figure 2 sur laquelle est aussi reportée la hauteur des précipitations enregistrées sur la station de Vaujours par Météo France.

Comme le montre la figure 2, il apparaît que l'alternance d'épisodes pluvieux et d'épisodes de temps sec se traduit par des fluctuations rapides du niveau piézométrique de la nappe ; ces fluctuations de niveau sont d'autant plus marquées que l'on se situe à l'amont hydraulique du système du fait de la géométrie du réservoir.

Les données du suivi manuel des niveaux de nappe et la figure 2 montrent aussi que, durant l'année hydrologique 2001/2002, la période de recharge de la nappe, c'est à dire la période de remontée des eaux et celle de hautes eaux, est comprise entre début novembre et fin mars, la période de vidange a débuté en avril.

Tableau 2 : Mesures du niveau piézométrique de la nappe du Brie (* niveau d'eau dans les piézomètres juste après leur installation).

	PzB1	PzB2	PzB3	PzB4	PzB5	PzB6	PzB7
cote m NGF							
Sol	129,72	127,11	127,47	124,97	123,89	126,62	124,7
Fond	121,19	120,04	118,58	119,78	119,02	119,05	121,53
NS le 17/09*	125,39	123,68	120,93	119,87	119,75	121,05	SEC
NS le 20/09	122,65	122,18	120,955	119,93	119,7	121,09	SEC
NS le 24/09	122,24	121,77	120,97	120,02	119,77	121,12	121,92
NS le 26/09	122,09	121,65	120,96	120,03	119,75	121,11	121,92
NS le 28/09	122,03	121,58	120,97	120,06	119,76	121,12	122,26
NS le 09/10	121,93	121,42	121,00	120,22	119,91	121,18	122,49
NS le 10/10	121,90	121,43	121,00	120,23	119,90	121,17	122,44
Piezomètres purgés le 10/10/01							
NS le 12/10	121,69	120,59	120,99	119,975	119,87	121,17	121,80
NS le 16/10	121,68	121,03	120,96	120,09	119,83	121,12	121,81
NS le 31/10	121,88	121,45	121,06	120,51	120,02	121,27	122,56
NS le 12/11	121,72	121,42	121,05	120,88	119,94	121,22	122,49
Piezomètres purgés le 12/11/01							
NS le 19/11	121,61	121,31	121,04	120,75	119,91	121,18	122,59
NS le 13/12	121,75						
NS le 18/01	121,78						
NS le 04/02	121,64	121,51	121,14	121,33	120,115	121,325	122,93
NS le 28/03	-	-	-	121,67	120,65	122,08	123,21
Piezomètres purgés le 28/03/02¹							
NS le 05/04	121,86	121,76	121,38	121,52	120,55	121,97	123,05
Piezomètres PzB1, PzB2 et PzB3 purgés le 18/04/02							
NS le 25/04	121,54	121,54	121,22				
NS le 04/07	121,76	121,28	121,02	120,42	119,69	121,14	122,3

Durant la période de recharge de la nappe, c'est-à-dire entre novembre et fin-mars/début avril, les données disponibles sur la nappe de Brie montrent que (tableau 3) :

- les fluctuations du niveau piézométrique sont de l'ordre de 0,7 à 0,9 m au niveau des piézomètres PzB4, PzB5, PzB6, PzB7, situés hors Fort Central, donc les plus éloignés des puits d'infiltration,
- les fluctuations du niveau piézométrique sont de l'ordre de 0,1 à 0,3 m au niveau des piézomètres PzB1, PzB2 et PzB3 situés dans le Fort Central, ce qui confirme l'effet de stabilisation du niveau piézométrique induits par les puits d'infiltration du fort central (P2, P5, P3 et P4) qui drainent la nappe, effet déjà noté durant l'automne 2001 sur le piézomètre PzB3 (BURGEAP, 2002).

La figure 2 montre en effet que le piézomètre PzB2 réagit de façon très amortie par rapport aux piézomètres PzB5 et PzB6. D'autre part, elle montre aussi que le niveau d'eau dans le piézomètre PzB1 augmente très brusquement après les épisodes pluvieux de janvier, mi-février et mi-mars, puis baisse rapidement dans les semaines qui suivent ; ceci est le signe d'une infiltration rapide des eaux météoriques vers la nappe du Brie dans ce secteur, suivi d'un drainage local important par les puits d'infiltration.

¹ N'ayant pu avoir accès au fort central le 28/03/02, ni mesure piézométrique ni purge des piézomètres PzB1, PzB2 et PzB3 n'ont pu être réalisées ce jour.

Tableau 3 : Fluctuation des niveaux de la nappe du Brie entre novembre 2001 et fin mars/début avril 2002, période de recharge.

Piézomètre	Fluctuations mesurées des niveaux de nappe (m)	
	du 19/11/01 au 4/02/02	12/11/02 au 28/03/02 ou au 05/04/02
PZB1	0,03	0,14
PZB2	0,20	0,34
PZB3	0,10	0,33
PZB4	0,58	0,79
PZB5	0,21	0,71
PZB6	0,23	0,86
PZB7	0,34	0,71

2.2 Fonctionnement des puits d'infiltration

Depuis sa construction, le Fort de Vaujours est équipé d'un système de drainage des eaux de pluie et des eaux de la nappe perchée du Brie par des puits d'infiltration profonds, à l'origine d'environ 35 mètres, atteignant le gypse ; ces puits évacuaient aussi les eaux de lavage des chambres de tir quand le site était exploité par le CEA (BURGEAP, 2001 ; BURGEAP, 2002).

Quatre puits d'origine sont toujours en fonctionnement, P2, P3, P4 et P5 ; parmi eux, le puits P2 draine le plus grand bassin versant qui a abrité des installations dans lesquelles de l'uranium a été mis en oeuvre (figure 3). Des eaux potentiellement chargées en uranium ont donc pu être acheminées vers le gypse par ce système. Il était donc important de mieux connaître le fonctionnement hydraulique de ces puits, en particulier d'évaluer leur temps de vidange. Pour ce faire, la variation du niveau d'eau dans le puits d'infiltration P2 est suivie en continu à l'aide d'un capteur de pression depuis le 13 décembre 2002 (figure 4).

La figure 4 montre :

- des variations de niveau très faibles, de 0 à quelques centimètres, après la plupart des pluies avec un retour rapide au niveau initial, ce qui indique que l'évacuation des apports d'eau supplémentaires dus à la pluie est très rapide, de l'ordre de quelques heures,
- un légère augmentation du "niveau de base" dans le puits entre fin décembre et mi-mars, après les périodes de fortes pluies et période de hautes eaux de la nappe du Brie, attribuable à la mise en charge des conduites d'évacuation dans le gypse du fait d'un débit de drainage de la nappe plus important.

Ce suivi montre que les variations de niveaux d'eaux dans le puits sont très réduites, au maximum de 20 cm et directement contrôlées par la pluviométrie, ce qui confirme que les surplus d'eau apportés par la pluie, comme les eaux provenant de la nappe du Brie, sont extrêmement rapidement infiltrés à travers des conduits préférentiels qui se sont créés au sein du gypse.

2.3 Conclusions sur les évolutions piézométriques de la nappe du Brie

La nappe du Brie qui s'écoule principalement vers le Sud, est de faible puissance, au maximum 2,6 m d'après nos mesures. Sa productivité est faible comme le montre le temps de mise en équilibre des niveaux après chaque purge. En période de recharge, c'est-à-dire de novembre à fin mars/début avril, les fluctuations de niveau d'eau observées sont directement liées à la pluviométrie ; la nappe réagit très rapidement aux épisodes pluvieux.

Les fluctuations du niveau piézométrique de la nappe au droit du Fort central sont amorties relativement à ce qui est observé hors Fort central ; ceci est dû au drainage de la nappe par les puits d'infiltration comme cela avait déjà été observé dès la première campagne de mesures à l'automne 2001 (BURGÉAP, 2002).

2.4 La nappe de l'Eocène Supérieur

2.4.1 Rappel sur l'implantation et les caractéristiques techniques du sondage de reconnaissance aux formations infra-sannoisiennes

Pour reconnaître les formations infra-sannoisiennes, un sondage de reconnaissance, dénommé PzE, a été réalisé sur le site de Vaujours dans le but de préciser :

- la nature et l'épaisseur des formations géologiques formant la butte de Vaujours (figure 5), en particulier la puissance des couches peu perméable ou imperméable séparant la nappe du Brie de la nappe régionale de l'Eocène Supérieur,
- la pression hydrostatique de la nappe de l'Eocène Supérieur, ainsi que la qualité de l'eau de cette nappe, notamment sa teneur en uranium,
- la minéralogie, la géochimie et les caractéristiques hydrogéologiques des formations situées entre les argiles vertes et l'aquifère de l'Eocène supérieur, c'est à dire les marnes supragypseuses et les masses et marnes du gypse.

Le sondage PZE a été implanté sur le site de Vaujours en concertation avec l'expert hydrogéologue, au sud du fort central, c'est à dire à l'aval hydraulique des infiltrations se produisant dans le fort central (figure 6) afin de pouvoir caractériser l'impact de ces infiltrations sur le milieu souterrain situé immédiatement à l'aval.

Réalisation du sondage :

Le sondage a été réalisé en carottage jusqu'à 85 mètres de profondeur, c'est-à-dire jusque dans les Calcaires de Saint Ouen puis poursuivi en destructif jusqu'à 101 m, soit une pénétration de 6 mètres dans les Sables de Beauchamp rencontrés à 95 m (figure 5).

Des essais d'infiltration au packer ont été réalisés à l'avancement pour tester la perméabilité des marnes supra-gypseuses, de la 1ère masse de gypse, des marnes d'entre deux masses et de la 2ème masse de gypse. Les résultats de ces essais montrent que les formations sous-jacentes aux calcaires de Brie (argiles vertes, marnes supragypseuses, masse et marnes du gypse) ont des perméabilités extrêmement faibles ; ceci confirme que les percolations d'eau atteignant naturellement les masses de gypse sont quasi-nulles (BURGÉAP, 2001 et BURGÉAP, 2002).

Equipement du forage :

Pour isoler l'aquifère de l'Eocène supérieur et éviter sa contamination par des eaux venant des horizons supérieurs, le sondage a été carotté dans un premier temps jusqu'au sommet des sables de Monceau rencontré à 78 m (base de la 4ème masse de gypse), puis réalisé jusqu'à cette cote et tubé avec cimentation étanche du tubage de diamètre intérieur 130 mm. Le sondage a ensuite été poursuivi jusqu'à 101 m.

Le sondage a alors été équipé en piézomètre avec un tube crépiné de 80 mm de 78 à 100 m de profondeur surmonté par un tube plein jusqu'à la surface. L'espace annulaire a été rempli avec du gravier filtre jusqu'à 78 m et cimenté en tête. Le piézomètre est fermé par un capot (figure 5).

2.4.2 Piézométrie de la nappe de l'Eocène Supérieur au droit de la butte

La nappe de l'Eocène Supérieure, contenue dans les sables de Monceau, les Calcaires de Saint Ouen et les Sables de Beauchamp, est la première nappe d'extension régionale rencontrée au droit du CEV (BURGÉAP, 2001).

Le niveau piézométrique de la nappe de l'Eocène Supérieur au droit de la Butte a été mesuré dans le piézomètre PZ3 de France Déchets et dans le piézomètre PZE (tableau 4). Ces mesures confirment les informations recueillies auprès de BPB Placo et France Déchets en juin 2001 (BURGÉAP, 2001), à savoir que le niveau piézométrique de la nappe de l'Eocène Supérieur, qui s'écoule globalement du nord vers le sud et est drainée par la Marne, est à une cote voisine de 60 NGF au droit du CEV et que la nappe est donc captive sous la butte, avec un niveau de charge hydraulique de l'ordre de 60 mètres plus profond que celui de la nappe du Brie qui s'établit vers 120 NGF.

Tableau 4 : Mesure du niveau piézométrique de la Nappe de l'Eocène Supérieur au droit de la Butte de Vaujours.

	12/11/01	05/04/02	18/04/02	04/07/02
PZ3 France Déchets	60,27			
PZE		60,06	61,28	61,13

3 Chimie et minéralogie des formations sannoisiennes et infra sannoisiennes

Sept sondages dans les Calcaires de Brie et la partie sommitale des argiles vertes (BURGÉAP, 2002), dont trois en carottage dans le Fort Central, et un sondage jusqu'au sables de Beauchamp, en carottage jusqu'au sommet des Calcaires de Saint Ouen (figure 7) ont été réalisés pour cette étude. Ces reconnaissances ont permis de préciser la nature et les épaisseurs des différents horizons au droit du CEV. Les carottes récupérées (B1, B2, B3 et E issues du respectivement carottage des piézomètres PzB1, PzB2, PzB3 et PzE) ont fourni des échantillons non remaniés en vu d'analyses chimiques et minéralogiques qui permettent de caractériser plus finement les formations rencontrées et de déterminer leur contenu en uranium et la signature isotopique de celui-ci.

Le prélèvement des échantillons a été effectué par le Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris ; le protocole suivi est décrit dans notre précédent rapport (BURGÉAP, 2002).

Les analyses chimiques des échantillons de roche ont été réalisées par spectrométrie de fluorescence X (FX) par le laboratoire de "Dynamique de la lithosphère" de l'Université Claude Bernard de Lyon. Les analyses minéralogiques semi-quantitatives des échantillons par diffraction de rayons X (DRX), sur roche totale et sur la fraction fine, ont été effectuées au Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris. Le contenu en uranium des échantillons a été dosé par spectrométrie gamma ou par spectrométrie de masse par SUBATECH (annexe 1). Les mesures isotopiques de l'uranium ($^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$) par TIMS, spectromètre de masse à thermo-ionisation, technique lourde mais très sensible, ont été effectuées par les laboratoires DASE/SRCE du CEA (annexe 1)¹. En préalable aux analyses d'uranium, les échantillons ont été séchés, broyés et homogénéisés par le centre de recherches pétrographiques et géochimiques, service d'analyse des roches et minéraux (CRPG/SARM) de Nancy.

¹ Voir aussi en annexe 4 le rapport technique établi par le CEA/DAM

3.1 Chimie et minéralogie des formations du Sannoisien - compléments d'étude

Des analyses chimiques et minéralogiques ont été effectuées en décembre 2001 sur des échantillons provenant de la carotte B2, 12 échantillons de calcaires et 2 échantillons d'argiles vertes. Ces analyses ont confirmé et complété les observations des terrains, à savoir que le Calcaire de Brie au droit du site est fortement altéré, les faciès les moins altérés sont principalement formés de calcite, les faciès altérés renferment des quantités importantes d'argiles, en particulier des illites, des interstratifiés illite/smectite et des smectites. Dans le haut du profil où le lessivage est plus intense, la kaolinite remplace partiellement les smectites et les illites.

Parallèlement, le contenu en uranium des mêmes échantillons de la carotte B2 et des échantillons provenant des carottes B1 et B3 (échantillons de calcaires et d'argiles vertes) a été analysé par spectrométrie gamma par SUBATECH. Ces trois carottes ont été prélevées dans le fort central à proximité d'installations dans lesquelles de l'uranium a été mis en œuvre (BURGEAP, 2002).

En préalable à l'examen des résultats, il faut rappeler que l'uranium est un élément ubiquiste dans le milieu naturel. Trois isotopes de cet élément sont naturellement présents sur terre, par ordre d'abondance l'uranium 238, l'uranium 235 et l'uranium 234. Dans le milieu naturel, les rapports d'abondance entre ces différents isotopes, dit rapport isotopique, sont connus et immuables, liés à l'histoire de la terre (tableau 5).

Tableau 5 : Abondance naturelle des différents isotopes de l'uranium et rapports isotopiques naturels (d'après Reimann et de Caritat, 1998).

Isotope	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U
Abondance naturelle (%)	99,2745	0,7200	0,0055
Rapport isotopique ²³⁵ U/ ²³⁸ U (%)	0,725		
Rapport isotopique ²³⁵ U/(²³⁸ U + ²³⁵ U + ²³⁴ U) (%)	0,720		

Ces analyses (tableau 6) ont montré que, globalement, les concentrations en uranium de ces échantillons sont du même ordre de grandeur que les concentrations en uranium classiquement mesurées dans ce type de formations (à la précision analytique près).

Toutefois sur les eaux en provenance du piézomètre PzB1 (tableau 15), la mesure isotopique (²³⁵U/²³⁸U) réalisée par le CEA a montré que ce rapport est légèrement mais significativement plus faible que le rapport isotopique naturel. Ce résultat marque un apport anthropique d'uranium appauvri au niveau de PzB1.

Il a donc été décidé de pousser plus avant les investigations concernant le contenu en uranium de la carotte B1, en particulier au niveau de l'interface Calcaire de Brie/argiles vertes qui est un niveau potentiel d'accumulation de l'uranium. Six échantillons supplémentaires ont donc été prélevés sur la carotte B1 à l'interface calcaire/argiles vertes ; leur contenu en uranium a été mesuré par spectrométrie de masse par SUBATECH, le rapport isotopique ²³⁵U/²³⁸U mesuré en TIMS par le CEA (annexe 1). Les résultats sont reportés dans le tableau 5 et illustré par la figure 7.

Tableau 6 : Résultats des analyses d'uranium des échantillons de la carotte B1

Echantillon	niveau	U	$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$	Description	remarques
		mg/kg	%		
B1/1	0,20-0,35	$2,5 \pm 1,2$		Dalle calcaire	
B1/2	1,00-1,25	$8,1 \pm 3,3$		Argile marneuse, nodules calcaires et graviers	cote imprécise, mauvaise récupération
B1/3	1,80-2,05	$5,3 \pm 2,4$		idem	
B1/4	2,75-3,00	$7,7 \pm 3,6$		Argilo-calcaire beige-crème	
B1/5	3,50-3,75	$6,7 \pm 3,2$		Idem bréchique avec silex	
B1/6	4,60-4,85	$2,4 \pm 1,1$		Calcaire beige bréchique	
B1/11	7,05-7,60	$6,6 \pm 0,4$	$0,714 \pm 0,012$	Calcaire argileux beige	base des faciès calcaire
B1/7	7,60-7,85	$5,5 \pm 2,6$		Calcaire argileux homogène, beige à blanchâtre	
B1/12	7,85-8,10	$5,0 \pm 0,3$	$0,704 \pm 0,018$	Argileux beige veiné de gris brun	
B1/8	8,10-8,40	$10,6 \pm 4,9$		Argilo-calcaire veiné beige	
B1/13	8,45-8,75	$8,8 \pm 0,5$	$0,702 \pm 0,017$	Argileux vert-ocre, veiné de beige et de gris	
B1/9	8,75-9,00	$9,8 \pm 4,1$		Idem + vert, localement bréchique	
B1/14	9,00-9,15	$4,3 \pm 0,3$	$0,733 \pm 0,024$	Argileux vert assez sombre, veiné de jaune	
B1/15	9,15-9,30	$3,7 \pm 0,2$	$0,711 \pm 0,015$	Id.	
B1/16	9,30-9,50	$3,6 \pm 0,2$	$0,736 \pm 0,023$	Argileux, plastique, vert plus clair et homogène	au dessous, argiles vertes homogènes

Des échantillons, en particulier B1/12 et B1/13, voir B1/11 et B1/15, montrent des rapports isotopiques plus ou moins significativement inférieurs au rapport isotopique de l'uranium naturel ce qui attestent d'un apport anthropique. Sur les autres points, les variations mesurées des teneurs en uranium ne semblent liées qu'aux variations de faciès.

Ces analyses confirment que de l'uranium d'origine anthropique est bien présent au droit de PzB1 à la base des Calcaires de Brie et au sommet des argiles vertes. Cependant les teneurs mesurées ne permettent pas de parler d'horizons d'accumulation de l'uranium.

3.2 Chimie et minéralogie des formations infra-sannoisiennes

Des analyses chimiques (majeurs et uranium) et minéralogiques ont été effectuées sur quelques échantillons provenant de la carotte PZE. Les résultats sont reportés dans les tableaux 8, 9, 10 et 11.

Tableau 7 : Description et cote des échantillons prélevés sur la carotte PzE.

Référence(s)	niveau	Description	Remarques
E1	16,85-17,10	Marneux clair, ± lité	<i>sommet des marnes blanches de Pantin</i>
E2	23,40-23,60	Marneux, gris verdâtre, veiné de gris-sombre, avec qq fentes à pyrite et gypse	<i>sommet des marnes bleues d'Argenteuil</i>
E3	33,90-34,15	Argileux, homogène blanchâtre, avec veinules de gypse jaune	<i>Transition Marnes Bleues- 1^{ère} Masse de Gypse</i>
E4	35,00-35,20	Gypse saccharoïde avec veinules argileuses et petites cavités de dissolution	<i>Partie supérieure 1^{ère} Masse de Gypse</i>
E5	39,45-39,70	Gypse saccharoïde beige-rosé avec lamines argileuses beige millimétriques	<i>1^{ère} Masse de Gypse</i>
E6	43,75-44,00	Fragments de gypse saccharoïde emballé dans argiles vertes, qq fragments de silex	<i>1^{ère} Masse de Gypse, base d'une cavité de dissolution possible (perte totale de 42,40 à 43,75)</i>
E7	48,40-48,60	Gypse saccharoïde faciès poreux ± vacuolaire	<i>Partie inférieure de la 1^{ère} Masse de Gypse. Zone apparemment plus perméable</i>
E8	57,50-57,70	Marnes blanches à structures de type bird's eyes dolomitique	<i>Marnes d'Entre Deux Masses</i>
E9		Faciès rubanné à gypse sableux, pied d'alouette et fer de lance	<i>2^{de} Masse de Gypse. Zone peut-être plus perméable</i>

Tableau 8 : Analyse chimique par FX des échantillons provenant de la carotte PZE.

Référence(s)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI	Total	Sr
	%													ppm
E1	5,36	1,12	0,52	0,06	1,52	49,19	0,23	0,2	0,06	0,06	0,92	40,7	99,93	374
E2	47,8	13,03	5,51	0,06	5,74	6,86	0,23	3,2	0,65	0,08	1,95	15,2	100,3	203
E3	18,7	3,24	1,48	0,04	4	35,75	0,2	0,6	0,12	0,08	1,36	33,5	99,08	509
E4	2,14	0	0,07	0	0,63	32,66	0,12	0	0,01	0,02	40,9	22,8	99,38	914
E5	2,18	0	0,07	0	0,57	31,86	0,12	0	0,01	0,02	41,3	22,8	98,97	315
E6	13,6	2,7	1,17	0,02	1,16	29,61	0,19	0,6	0,12	0,05	27,3	22,3	98,81	3420
E7	2,23	0	0,07	0	0,47	33,67	0,1	0	0,01	0,02	41,5	21,6	99,66	527
E8	11,4	1,62	1,06	0,03	17,8	26,24	0,24	0,2	0,07	0,07	0,3	40	99,01	172
E9	2,23	0	0,08	0	0,94	32,08	0,11	0	0,01	0,02	41	22,6	99,09	6420

Les analyses des échantillons E 1 à E 9 ont été réalisées après dessiccation à 45 °C pendant 24 h.

Le soufre a été analysé par gravimétrie (pp BaSO₄)

Les résultats pour les échantillons de gypse (E4, E5, E7 et E9) sont donnés à titre indicatif - un surdosage de la SiO₂ et un sous-dosage de CaO sont possibles.

Tableau 9 : Analyse minéralogique semi-quantitative (DRX) sur roche totale des échantillons prélevés sur la carotte PzE

Référence(s)	argile	quartz	calcite	dolomie	gypse	plagio	feld K	hématite
% massique								
E1	X	x	100					
E2	60	40	x	X			x	X
E3	20	X	80		x	x		
E4	5	x	30		65			
E5		x	10		90			
E6	20	x	20		60			
E7		x			100			
E8	20	x		80	x			
E9		x	5		95			

Tableau 10 : Analyse minéralogique semi-quantitative (DRX) de la fraction fine (< 2 µm) des échantillons prélevés sur la carotte PzE.

Référence(s)	Kaolinite	Illite	Illite/Smectite	Smectite	Attapulgitite	Sépiolite
% massique de la fraction < 2µm						
E1		15	40		45	
E2	<< 5	15	65	20		
E3					40	60
E4					5	95
E5		<< 5			<< 5	100
E6	5	10	85			
E7		20			80	
E8					30	70
E9		20		40	20	20

Tableau 11 : Concentration en uranium et isotopie de l'uranium dans les échantillons de la carotte PzE.

Référence(s)	U	²³⁵ U/ ²³⁸ U
	mg/kg	%
E1	1,3 ± 0,1	0,719 ± 0,030
E2	1,7 ± 0,1	0,729 ± 0,013
E3	1,2 ± 0,1	0,726 ± 0,033
E4	0,20 ± 0,01	0,729 ± 0,010
E5	0,40 ± 0,02	0,727 ± 0,027
E6	2,4 ± 0,2	0,718 ± 0,034
E7	0,50 ± 0,03	0,721 ± 0,031
E8	13,7 ± 0,7	0,719 ± 0,025
E9	0,10 ± 0,01	0,720 ± 0,012

Les faciès franchement gypseux (E4, E5, E7, E9) sont quasiment dépourvus d'argiles. Les formations supragypseuses, Marnes Blanches de Pantin et Marnes Bleues d'Argenteuil, présentent une fraction fine à illite et interstratifiés illite/smectite dominants. A partir du sommet de la 1^{ère} masse de gypse, la fraction fine est dominée par l'attapulgite et/ou la sépiolite, témoins de conditions évaporitiques. Une seule exception notable, E6, faciès bréchique à la base d'une cavité de dissolution probable, où l'on retrouve une paragenèse argileuse proche de E2. Ce résultat peut être considéré comme l'indice d'un transfert de type karstique au travers de la première masse de gypse.

Les analyses d'uranium des échantillons provenant de la carotte PzE montrent que les teneurs en uranium dans ces différents horizons sont très variables et liées à leur composition minéralogique ; les rapports isotopiques $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ mesurés sont en effet toujours assimilables à celui de l'uranium naturel.

3.3 Conclusion sur les formations sannoisiennes et infra sannoisiennes

La caractérisation géochimique des différents horizons formant la butte de Vaujours avait pour principal but de déceler les niveaux susceptibles d'accumuler l'uranium de part leur composition minéralogique ou leur localisation sur les zones potentielles de circulation.

Les analyses effectuées à partir des échantillons sélectionnés n'ont pas permis de détecter d'horizon d'accumulation d'uranium dans le Brie, les argiles vertes, les marnes supragypseuses, les deux premières masses du gypse, même si en B1 les mesures isotopiques ont montré que l'uranium trouvé était pour partie d'origine anthropique.

Les variations de teneurs en uranium observées sont toujours de l'ordre de grandeur de ce qui est classiquement mesuré en milieu naturel et ne semblent liées qu'aux variations de faciès. En effet, hormis la légère anomalie isotopique détectée sur quelques échantillons prélevés sur la carotte B1, les rapports isotopiques $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ mesurés sur les autres échantillons provenant de B1 ou PzE sont comparables à ceux de l'uranium naturel.

4 Chimie des eaux

Afin de déterminer les caractéristiques physico-chimiques des eaux qui s'écoulent à travers les formations présentes au droit et à l'aval du site et mieux comprendre les processus géochimiques qui s'y produisent, des prélèvements d'eau, sur lesquels a été réalisé un certain nombre d'analyses, en particulier celle de leur contenu en uranium, ont été effectués dans les différents aquifères rencontrés au droit et à l'aval du CEV en novembre 2001 (BURGÉAP, 2002) et en avril 2002. Le présent rapport rassemble les résultats de la campagne d'avril ; ces résultats sont comparés à ceux obtenus en novembre.

Durant cette seconde campagne, tous les points échantillonnés en novembre ont à nouveau été prélevés ; des échantillons ont aussi été prélevés en PZE (tableau 12) (figure 6).

Tableau 12 : liste des points prélèvements.

Points prélevés	Nov. 2001	Avril 2002	Nappe captée
PzB1	X	X	Nappe du Brie
PzB2	X	X	
PzB3	X	X	
PzB4	X	X	
PzB5	X	X	
PzB6	X	X	
PzB7	X	X	
Sce des Malades	X	X	
Sce J	X	X	
P9	X	X	
P2	X	X	
Puits K	X	X	Nappe des colluvions
Puits L	X	X	
Puits M	X	X	
PZE		X	Nappe de l'Eocène Supérieure
PZ3 France Déchets	X	X	
Puits Cagnet	X	X	

Les mêmes procédures d'échantillonnage, de conditionnement et d'analyses ont été adoptées au cours des deux campagnes. Elles ont été décrites dans notre rapport de décembre (BURGÉAP, 2002).

Au vu des résultats de la campagne de novembre, la liste des paramètres à analyser a été réduite en accord avec l'expert hydrogéologue. L'analyse du lithium, du manganèse, de l'aluminium et du fer a été supprimée ; leurs concentrations dans les eaux étaient souvent inférieures aux limites de quantification et n'apportaient aucune information complémentaire sur le fonctionnement géochimique des systèmes.

4.1 Résultats des analyses

Les tableaux 13, 16 et 19 rassemblent l'ensemble les résultats des analyses chimiques qui sont exprimés en concentration massique (mg/l) et en milliéquivalent par litre (meq/l) c'est-à-dire en concentration molaire de charge électrique. Les résultats des analyses ont été jugés corrects si l'erreur sur la balance ionique¹ était inférieure à $\pm 7\%$ ². Les tableaux 14, 17 et 20 renseignent sur l'état d'équilibre des eaux échantillonnées. Ces

¹ La balance ionique se définit, les concentrations étant exprimées en meq/l, comme:

$2 \times (\text{concentration totale en cations} - \text{concentration totale en anions}) / (\text{concentration totale en cations} + \text{concentration totale en anions})$

² Sur trois échantillons, l'erreur sur la balance ionique est supérieure à 7 %. Ces analyses n'ont pu être refaites par manque d'échantillon.

calculs d'équilibre ont été réalisés à l'aide du code de calcul géochimique CHESS (Van der Lee et De Windt, 2000) à partir des résultats analytiques bruts c'est-à-dire sans forcer l'équilibre ionique des solutions par ajustement de la concentration de l'un des constituants du système. Les tableaux 15, 18 et 21 rassemblent les données relatives au contenu et à l'isotopie de l'uranium dissous dans les eaux¹.

4.1.1 La nappe des Calcaires de Brie

Les eaux de la nappe du Brie ont été prélevées dans les sept piézomètres au Brie forés dans l'enceinte du CEV ainsi qu'à la source J et à celle des malades (figure 6). Des échantillons d'eau ont aussi été prélevés en P2 et P9, les deux principaux puits d'infiltration et de drainage du CEV qui ont pour fonction de drainer les eaux pluviales et en partie la nappe du Brie afin de maintenir à sec l'intérieur du Fort Central et des douves. Pour mémoire, il faut rappeler que le puits P9 s'est partiellement éboulé et qu'il n'est plus fonctionnel ; il est en permanence rempli d'eau (BURGÉAP, 2001).

Les eaux de la nappe du Brie (tableau 13) sont globalement des eaux neutres, modérément chargées (conductivité comprise entre 600 et 1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$), bicarbonatées calciques (figure 8), pauvres en potassium, en fer et en aluminium (BURGÉAP, 2002). Globalement la composition des eaux n'a pas variée entre novembre et avril (figure 9).

Les calculs d'équilibre effectués sur ces eaux, afin de savoir avec quels minéraux elles sont à l'équilibre, permettent aussi d'évaluer la fugacité du CO_2 , c'est-à-dire la pression partielle du CO_2 dans le système. Il faut rappeler à ce sujet que la pression partielle du CO_2 dans l'air est de 0,0003 atm (soit $\log f(\text{CO}_2) = -3,5$) ; dans les aquifères de surface, les pressions partielles de CO_2 , du fait des réactions chimiques et biochimiques qui s'y produisent, sont communément très supérieures à celle qui règne dans l'atmosphère (Morel, 1983).

Les fugacités de CO_2 calculées à partir des résultats analytiques bruts s'étagent entre $10^{-1.4}$ et $10^{-2.7}$. Les valeurs les plus fortes correspondent à des eaux proches de l'équilibre avec la calcite et la dolomite (PzB3, PzB4). Les valeurs plus faibles de fugacité (Source des malades et P2) traduisent vraisemblablement un rééquilibrage partiel avec l'atmosphère, qui entraîne une sursaturation apparente vis-à-vis des minéraux carbonatés. Toutes ces eaux sont assez fortement sous-saturées vis-à-vis du gypse mais proches de l'équilibre avec la cristobalite et la calcite (tableau 14).

¹ Voir aussi en annexe 4 le rapport technique établi par le CEA/DAM

Tableau 13 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux prélevées dans la nappe de Brie.

		temp	pH	Cond.	Eh	O ₂	HCO ₃	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	Ca	Mg	Na	K	SiO ₂	Sr	NH ₄	balance
		°C		µS.cm ⁻¹	mV	mg/l	terr.												%
novembre	PZB1	mg/l	11.7	7.2	957	503	397	441.8	145	14.4	1.9	110.0	7.4	88.6	3.90	23.80	0.71	0.17	
		meq/l					6.5	7.2	3.0	0.41	0.04	5.5	0.6	3.9	0.10	0.40	0.02	0.01	1.30
	PZB2	mg/l	10.9	7.1	1182	425	342	355.7	190	45.0	22.5	73.0	5.0	162.0	6.50	19.70	0.50	0.18	
		meq/l					5.6	5.8	4.0	1.27	0.45	3.7	0.4	7.0	0.17	0.33	0.01	0.01	0.20
	PZB3	mg/l	11.5	6.90	1560	431	499	526.0	278	86.0	4.0	158.0	17.0	155.0	4.90	15.80	0.69	<0.05	
		meq/l					8.2	8.6	5.8	2.42	0.08	7.9	1.4	6.7	0.13	0.26	0.02		-1.70
	PZB4	mg/l	12.0	6.8	913	467	439	464.4	107	4.2	10.2	162.0	15.4	9.4	2.00	23.10	0.82	0.08	
		meq/l					7.2	7.6	2.2	0.12	0.20	8.1	1.3	0.4	0.05	0.39	0.02	0.00	1.17
	PZB5	mg/l	13.9	6.8	1167	573	505	551.6	84	64.0	2.3	186.0	10.7	47.3	3.60	20.10	0.77	<0.05	
		meq/l					8.3	9.0	1.8	1.80	0.05	9.3	0.9	2.1	0.09	0.34	0.02		3.95
	PZB6	mg/l	13.3	7.00	937	424	400	423.5	93	19.9	25.5	148.0	21.0	16.0	1.90	15.80	0.68	0.17	
		meq/l					6.6	6.9	1.9	0.56	0.51	7.4	1.8	0.7	0.05	0.26	0.02	0.01	3.61
	PZB7	mg/l	13.2	7.2	1155	419	488	525.4	69	84.0	2.8	145.0	21.4	64.1	2.40	27.80	1.37	0.10	
		meq/l					8.0	8.6	1.4	2.37	0.06	7.3	1.8	2.8	0.06	0.46	0.03	0.01	0.50
	P2	mg/l	11.5	7.0	885	436	337	368.6	159	41.2	11.4	170.0	12.3	31.3	10.40	20.80	1.66	0.08	
		meq/l					5.5	6.0	3.3	1.16	0.23	8.5	1.0	1.4	0.27	0.35	0.04	0.00	9.09
	SCE MALADES	mg/l	8.7	7.7	930	489	387	412.5	96	40.3	8.4	139.0	10.8	27.0	2.20	14.50	0.63	<0.05	
		meq/l					6.3	6.8	2.0	1.14	0.17	7.0	0.9	1.2	0.06	0.24	0.01		-5.85
avril	SCE J	mg/l	11.0	6.7	1012	490	368	404.6	109	88.0	22.4	136.0	15.4	55.3	3.20	14.30	0.72	<0.50	
		meq/l					6.0	6.6	2.3	2.48	0.45	6.8	1.3	2.4	0.08	0.24	0.02		-5.97
	P9	mg/l	8.0	7.2	552	381	213	213.0	38	18.2	1.5	65.0	6.0	15.8	7.20	12.10	0.37	0.38	
		meq/l					3	3.5	0.8	0.51	0.03	3.3	0.5	0.7	0.18	0.20	0.01	0.02	-3.48
	PZB1	mg/l	12.9	7.1	610	215	nd	303.9	52	5.2	6.7	45.0	4.4	58.6	6.20	16.30	0.38	<0.05	
		meq/l						5.0	1.1	0.15	0.13	2.3	0.4	2.5	0.16	0.27	0.01		-17.36
	PZB2	mg/l	12.5	7.3	1010	225	359	389.9	130	52	25.9	45.0	5.0	142.0	7.70	18.40	0.38	<0.05	
		meq/l					5.9	6.4	2.7	1.46	0.52	2.3	0.4	6.2	0.20	0.31	0.01		-15.54
	PZB3	mg/l	12.6	6.9	1665	298	504	537.0	345	96	3.9	171.0	17.4	181.0	3.40	17.80	0.6	0.07	
		mg/l					8.3	8.8	7.2	2.70	0.08	8.6	1.5	7.9	0.09	0.30	0.01	0.00	-1.41
	PZB4	meq/l	12.9	7.0	656	389	427	450.0	66	2.8	6.8	155.0	8.1	7.4	0.90	19.70	0.76	<0.05	
		mg/l					7.0	7.4	1.4	0.08	0.14	7.8	0.7	0.3	0.02	0.33	0.02		2.27
	PZB5	meq/l	14.0	7.0	496	278	534	566.3	86	47.2	1.8	160.0	8.6	79.5	2.50	20.50	0.92	<0.05	
		mg/l					8.8	9.3	1.8	1.33	0.04	8.0	0.7	3.5	0.06	0.34	0.02		2.82
	PZB6	meq/l	14.6	7.2	819	313	381	409.4	76	17.4	25.1	134.0	18.3	15.5	1.40	15.50	0.65	<0.05	
		mg/l					6.2	6.7	1.6	0.49	0.50	6.7	1.5	0.7	0.04	0.26	0.01		1.51
	PZB7	meq/l	9.8	6.8	826	322	477	495.5	40	24.4	8.6	149.0	11.9	27.1	1.90	26.80	0.96	<0.05	
		mg/l					7.8	8.1	0.8	0.69	0.17	7.5	1.0	1.2	0.05	0.45	0.02		1.81
	P2	mg/l	12.4	8.2	909	345	366	382.6	110	46.6	10.6	140.0	12.1	35.4	10.40	21.80	1.04	<0.05	
		meq/l					6.0	6.3	2.3	1.31	0.21	7.0	1.0	1.5	0.27	0.36	0.02		0.22
avril	SCE MALADES	mg/l	11.7	7.7	894	370	390	419.8	101	25.6	18.6	156.0	10.3	25.6	2.00	15.90	0.79	<0.05	
		meq/l					6.4	6.9	2.1	0.72	0.37	7.8	0.9	1.1	0.05	0.27	0.02		2.50
	SCE J	mg/l	14.0	7.2	1074	367	392	421.0	109	68.0	18.1	156.0	16.5	45.4	2.90	16.20	0.96	<0.05	
		meq/l					6.4	6.9	2.3	1.92	0.36	7.8	1.4	2.0	0.07	0.27	0.02		2.40
	P9	mg/l	10.0	7.0	654	340	378	397.2	104	45.2	5.4	137.0	14.1	35.8	5.00	18.00	0.89	<0.05	
		meq/l					6.2	6.5	2.2	1.27	0.11	6.9	1.2	1.6	0.13	0.30	0.02		-0.18

Tableau 14 : Etat d'équilibre des eaux issues de la nappe du Brie prélevées en avril.

	PzB1	PzB2	PzB3	PzB4	PzB5	PzB6	PzB7	P2	Sce Mdes	Sce J	P9
log f(CO2)	- 1,78	- 1,89	- 1,42	- 1,56	- 1,48	- 1,76	- 1,41	- 2,70	- 2,24	- 1,76	- 1,64
SI Calc	- 0,47	- 0,24	- 0,08	+ 0,04	+ 0,17	+ 0,17	- 0,18	+ 1,12	+ 0,80	+ 0,20	- 0,07
SI Dolo	- 0,62	- 0,11	+ 0,17	+ 0,13	+ 0,41	+ 0,82	- 0,13	+ 2,51	+ 1,75	+ 0,77	+ 0,18
SI Cristo α	+ 0,13	+ 0,19	+ 0,17	+ 0,21	+ 0,20	+ 0,07	+ 0,41	+ 0,26	+ 0,14	+ 0,10	+ 0,24
SI Quartz	+ 0,71	+ 0,77	+ 0,75	+ 0,79	+ 0,78	+ 0,64	+ 1,00	+ 0,84	+ 0,73	+ 0,68	+ 0,82
SI Gypse	- 2,08	- 1,78	- 0,96	- 1,57	- 1,50	- 1,58	- 1,8	- 1,43	- 1,42	- 1,40	- 1,44

Tableau 15 : Teneur et isotopie de l'uranium dans les eaux de la nappe du Brie prélevées en novembre 2001 et avril 2002.

	PzB1	PzB2	PzB3	PzB4	PzB5	PzB6	PzB7	Sce Malades	Source J	P2	P9
Novembre 2001											
[U] $\mu\text{g/l}$	6,35 $\pm 0,32$	6,19 $\pm 0,31$	5,62 $\pm 0,28$	3,86 $\pm 0,19$	3,88 $\pm 0,19$	2,33 $\pm 0,12$	8,95 $\pm 0,45$	2,01 $\pm 0,10$	2,98 $\pm 0,15$	6,09 $\pm 0,31$	0,87 $\pm 0,04$
$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ %	0,7116 $\pm 0,0049$	0,7200 $\pm 0,0036$	0,7222 $\pm 0,0028$	0,7184 $\pm 0,0081$	0,7215 $\pm 0,0054$	0,7191 $\pm 0,0050$	0,7193 $\pm 0,0091$	0,7194 $\pm 0,0084$	0,7260 $\pm 0,0031$	0,7017 $\pm 0,0059$	0,7207 $\pm 0,0121$
Avril 2002											
[U] $\mu\text{g/l}$	5,9 $\pm 0,3$	6,0 $\pm 0,3$	7,0 $\pm 0,4$	2,6 $\pm 0,1$	3,9 $\pm 0,2$	2,0 $\pm 0,1$	3,4 $\pm 0,2$	2,2 $\pm 0,1$	2,8 $\pm 0,1$	6,8 $\pm 0,3$	4,0 $\pm 0,2$
$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ %	0,6709 $\pm 0,0054$	0,7177 $\pm 0,0061$	0,7266 $\pm 0,0186$	0,7200 $\pm 0,0067$	0,7230 $\pm 0,0037$	0,7233 $\pm 0,0065$	0,7242 $\pm 0,0080$	0,7226 $\pm 0,0081$	0,7232 $\pm 0,0073$	0,7097 $\pm 0,0063$	0,7205 $\pm 0,0061$

Les analyses effectuées en avril confirment en outre que :

- au droit du Fort Central, **les eaux de la nappe du Brie** (PzB1, PzB2, PzB3) sont enrichies en sulfates ce qui pourrait être attribué à la présence de remblais contenant du gypse dans le Fort Central et en sodium, l'origine de cette composante demeure inconnue ;
- au niveau des puits d'infiltration (P2 et P9), **les eaux de la nappe du Brie**, plus ou moins diluées par les eaux de ruissellement, en particulier en P9 à l'automne 2001, se chargent en sulfate au contact du gypse ;
- les eaux au niveau de deux sources ont des compositions très semblables, sauf en ce qui concerne les concentrations en sodium et chlorure qui sont sur les deux prélèvements plus élevée à la source J qu'à la source des malades, cette différence étant plus marquée en novembre qu'en avril ; ces éléments pourraient être la marque d'une composante "eaux de surface" ;
- les teneurs en uranium dans **la nappe du Brie, sur tous les échantillons**, sont globalement stables entre novembre et avril (tableau 15) ; elles sont, tant en novembre qu'en avril, deux à trois fois plus élevées au droit du Fort Central que dans le reste de la nappe, mais seules les eaux prélevées en P2 et PzB1 ont des rapports isotopiques $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ légèrement inférieurs à celui de l'uranium naturel, ce qui est la marque d'un apport anthropique très limité d'uranium appauvri (figure 10).

4.1.2 La nappe des colluvions

La nappe des colluvions est représentée par les eaux prélevées dans les puits D, K et L situés sur la commune de Courtry (figure 6). Seul le puits D a pu être pompé pour renouveler les eaux avant prélèvement.

Les eaux de la nappe des colluvions sont neutres, assez minéralisées (conductivité comprise entre 1400 et 2600 $\mu\text{S}/\text{cm}$), sulfatées calciques avec une composante carbonatée accessoire (tableau 16) (figure 11). Les concentrations en nitrates élevées, spécialement dans le puits K, sont attribuées à un apport anthropique. Globalement la composition des eaux n'a pas varié entre novembre et avril, mais les eaux prélevées en avril sont légèrement diluées par rapport à celles prélevées en novembre, dilution induite par la recharge de la nappe (figure 12).

Les calculs d'équilibre effectués montrent que ces eaux sont proches de l'équilibre (ou faiblement sursaturées) avec la cristobalite, la calcite et la dolomite mais légèrement sous saturées vis-à-vis du gypse (tableau 17).

Les teneurs en uranium dans les eaux de la nappe des colluvions sont plus faibles en avril qu'en novembre du fait de la dilution mais les rapports isotopiques $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ mesurés sur ces eaux, en novembre comme en avril, sont assimilables à celui de l'uranium naturel (tableau 18).

Tableau 16 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux issues de la nappe des colluvions

			temp °C	pH	Cond. $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$	Eh (mV)	O ₂ (aq) mg/l	HCO ₃ terr.	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	Ca	Mg	Na	K	SiO ₂	Sr	NH ₄	Balance %
novembre	PTS D	mg/l	11.4	7	2593	479			272	294.7	1113	41.0	40.0	515	15.9	40.2	46.9	16.4	3.59	<0.05
		meq/l							4.5	4.8	23.2	1.15	0.80	25.8	1.3	1.8	1.20	0.27	0.08	
	PTS L	mg/l	10.3	7.2	1640	458			277	300.2	587	30.0	24.0	271	11.4	30.0	85.7	11.8	2.12	<0.05
		meq/l							4.5	4.9	12.2	0.85	0.48	13.6	1.0	1.3	2.20	0.20	0.05	
	PTS K	mg/l	11.9	7.3	2013	482			223	262.4	794	20.0	105.0	356	12.2	22.6	80.2	12.8	2.71	<0.05
		meq/l							3.7	4.3	16.5	0.56	2.10	17.8	1.0	1.0	2.06	0.21	0.06	
avril	PTS D	mg/l	9.7	7.1	2540	352	1.5		291	305.7	1253	40.9	44.0	569	16.8	36.7	39.70	14.70	5.4	<0.05
		meq/l							4.8	5.0	26.1	1.15	0.88	28.5	1.4	1.6	1.02	0.25	0.12	
	PTS L	mg/l	10.4	7.1	1405	497	0.6		264	278.9	597	22.1	36.2	258	9.8	21.5	78.00	12.40	2.35	0.41
		meq/l							4.3	4.6	12.4	0.62	0.72	12.9	0.8	0.9	2.00	0.21	0.05	0.02
	PTS K	mg/l	10.9	7.3	1675	378	2.5		231	237.4	756	15.3	125	317	9.3	15.8	56.50	14.40	2.97	<0.05
		meq/l							3.8	3.9	15.8	0.43	2.50	15.9	0.8	0.7	1.45	0.24	0.07	

Tableau 17 : Etat d'équilibre des eaux de la nappe des colluvions

	Puits D	Puits K	Puits L
log f(CO ₂)	- 1,83	- 2,11	- 1,91
SI Calc	+ 0,19	+ 0,24	0,00
SI Dolo	+ 0,12	+ 0,24	- 0,13
SI Cristo	+ 0,16	+ 0,12	+ 0,07
SI Quartz	+ 0,74	+ 0,70	+ 0,65
SI Gypse	- 0,12	- 0,52	- 0,51

Tableau 18 : Teneur et isotopie de l'uranium dans les eaux provenant de la nappe des colluvions

	Puits D	Puits L	Puits K
Novembre 2001			
[U] µg/l	1,33 ± 0,07	0,45 ± 0,02	0,94 ± 0,05
²³⁵ U/ ²³⁸ U %	0,7223 ± 0,0067	0,7223 ± 0,0092	0,7222 ± 0,0064
Avril 2002			
[U] µg/l	1,00 ± 0,05	0,50 ± 0,02	0,20 ± 0,01
²³⁵ U/ ²³⁸ U %	0,7235 ± 0,0073	0,7249 ± 0,0046	0,7242 ± 0,0041

4.1.3 La nappe de l'Eocène Supérieur

Quatre prélèvements ont été effectués dans la nappe de l'Eocène Supérieur, première nappe régionale au droit du CEV, au cours de la campagne d'avril 2002, un dans le piézomètre France Déchets Pz3, deux dans le piézomètre PzE, à 75 et 90 mètres de profondeur, le dernier dans le puits Cagnet. Seuls deux prélèvements avaient été réalisés en novembre 2001, l'un dans le piézomètre France Déchets Pz3, l'autre dans le puits Cagnet (BURGÉAP, 2002).

Les eaux prélevées dans le Pz3 de France Déchets et dans PZE sont des eaux fortement minéralisées (conductivité comprise entre 2000 et 3000 µS.cm⁻¹), de type sulfaté calcique et magnésien (figure 11). Ce sont les eaux échantillonnées les plus minéralisées, les plus riches à la fois en sulfate, chlorure, strontium, potassium et silice (tableau 19). Les prélevées en Pz3FRD et en PZE à 95 mètres de profondeur sont faiblement réductrices, l'azote y est principalement sous forme ammoniacale. L'eau prélevée en PZE à 75 mètres de profondeur est légèrement moins minéralisée et a un caractère oxydant plus marqué, l'azote est y principalement sous forme nitrate. Ces résultats montrent que la nappe de l'Eocène supérieur est chimiquement stratifiée. Il n'y a pas d'évolution notable du chimisme de la nappe de l'Eocène Supérieure entre novembre et avril (figure 13)

Les calculs d'équilibre effectués montrent que ces eaux sont proches de l'équilibre avec la dolomite et la cristobalite, mais paraissent faiblement sous-saturées vis-à-vis du gypse et des carbonates (tableau 20).

La teneur en uranium dans la nappe de l'Eocène Supérieur est deux fois plus élevée en PZE qu'en Pz3 France Déchets mais conforme aux valeurs communément trouvées dans les eaux naturelles (tableau 21) ; cette différence paraît liée à des variations de faciès des formations de l'Eocène Supérieur entre ces deux points. Comme le montre la figure 14, il existe une anti-corrélation entre l'uranium en solution et les cations K, Mg, Na en solution, qui résulte probablement d'une adsorption de l'uranium sur les argiles. De plus, les rapports isotopiques ²³⁵U/²³⁸U mesurés sur les eaux provenant de la nappe de l'Eocène Supérieur sont assimilables à celui de l'uranium naturel.

L'eau du puits Cagnet est très différente de celles prélevées en Pz3 et PzE (tableaux 19 et 20) (figure 13) : c'est une eau peu minéralisée, bicarbonatée calcique qui ne présente aucune des caractéristiques précédentes.

De par sa profondeur et les données géologiques disponibles, il apparaît que le puits atteint les sables de Beauchamp (BURGÉAP, 2001). En l'absence de coupe géologique et technique, il n'est toutefois pas possible de déterminer avec certitude le niveau capté par ce puits.

Une explication possible de ces différences de chimie des eaux est que les eaux prélevées au puits Cagnet sont captées dans les sables de Beauchamp alors que les eaux captées en Pz3 et PzE proviennent des calcaires de Saint Ouen. Ceci indiquerait en tout cas que le chimisme de la nappe de l'Eocène Supérieur n'est pas homogène.

Tableau 19 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux issues de la nappe de l'Eocène Supérieur

			temp °C	pH	Cond. µS.cm ⁻¹	Eh (mV)	O ₂ (aq) mg/l	HCO ₃ terrain	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	Ca	Mg	Na	K	SiO ₂	Sr	NH ₄	Fe	balance %
nov	Pz3FRD	mg/l	9,2	6,6	2965	110		281	302,7	1536	112,0	<1	524	109,0	72,3	46,6	35,5	0,5	1,41	<0.05	
		meq/l						4,60	4,96	32,0	3,15	0,00	26,2	9,08	3,14	1,19	0,59	0,01	0,078		-0,11
avril		mg/l	14,9	7,3	2950	99	0,1	301	319,1	1530	103,0	0,2	558	94,0	69,6	30,8	38,5	15,8	1,01		
		meq/l						4,94	5,23	31,98	2,90	0,00	27,9	7,83	3,03	0,79	0,64	0,36	0,056		0,62
	PZE 95	mg/l	13,2	7,8	2660	125	1,8	132	140,3	1585	24	0,6	549	67,0	37,5	15,7	30,3	8,1	0,69	0,18	
		meq/l						2,16	2,30	33,0	0,68	0,01	27,5	5,58	1,63	0,40	0,51	0,18	0,038		-1,63
PZE 70	mg/l	12,6	7,6	2010	174	4,9	299	196,5	1050	23,3	11,2	401	48,4	21,1	14,6	35,3	9,3	0,38			
	meq/l						4,90	3,22	21,9	0,66	0,22	20,1	4,03	0,92	0,37	0,59	0,21	0,021		-1,43	
nov	PTS CAGNET	mg/l	12,9	6,6	1117	435		341	374,1	210	29,9	58,0	170	31,4	9,4	0,9	31,5	12,9	<0.05	<0.05	
		meq/l						5,59	6,13	4,4	0,84	1,16	8,5	2,62	0,41	0,02	0,53	0,29			-1,04
avr		mg/l	12,8	7,1	991	410	5,7	346	364,3	204	31,2	59	182	28,7	8,9	0,8	36,4	0,5	<0.05		
		meq/l						5,68	5,97	4,3	0,88	1,18	9,1	2,39	0,39	0,02	0,61	0,01			-0,66

Tableau 20 : Etat d'équilibre des eaux issues de la nappe de l'Eocène Supérieur

	Pz3 France Déchets	PzE 70	PzE90	Puits Cagnet
log f(CO ₂)	- 2,04	- 2,27	- 2,86	- 1,76
SI Calc	+ 0,56	+ 0,71	+ 0,67	+ 0,11
SI Dolo	+ 1,65	+ 1,79	+ 1,71	+ 0,73
SI Cristo	+ 0,46	+ 0,47	+ 0,39	+ 0,48
SI Quartz	+ 1,03	+ 1,05	+ 0,97	+ 1,06
SI Gypse	- 0,12	- 0,30	- 0,08	- 1,10

Tableau 21 : Teneur et isotopie de l'uranium dans les eaux issues de la nappe de l'Eocène Supérieur

	Fr. Déchets PZ3	PZE 95 m	PZE 80 m	PZE 70 m	Puits Cagnet
Novembre 2001					
[U] μg/l	2,95 ± 0,15	-	-	-	3,00 ± 0,15
²³⁵ U/ ²³⁸ U	0,7226				0,7238
%	± 0,0055				± 0,0055
Avril 2002					
[U] μg/l	3,8 ± 0,2	7,5 ± 0,4	8,0 ± 0,4	8,8 ± 0,4	2,7 ± 0,1
²³⁵ U/ ²³⁸ U	0,7243	0,7170	0,7241	0,7215	0,7231
%	± 0,0105	± 0,0084	± 0,0075	± 0,0071	± 0,0074

4.1.4 Fonctionnement hydrogéochimique du système

A l'examen des caractéristiques chimiques des différentes nappes, il apparaît clairement que les eaux plus fortement minéralisées (conductivités supérieures à 1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sont aussi les plus chargées en sulfates. Les eaux moins minéralisées, c'est-à-dire les eaux de la nappe du Brie, sont en général relativement pauvres en sulfates mais bicarbonatées calciques. Elles se minéralisent au contact des minéraux carbonatés qui composent les formations du Brie en particulier la calcite (CaCO_3) (BURGÉAP, 2002).

Les eaux de la nappe des colluvions ont une conductivité et une minéralisation intermédiaires entre les eaux de la nappe du Brie et celle de Pz3 de France Déchets et PzE. Leur concentration relativement importante en sulfates est liée à celle en calcium. Ces eaux sulfatées calciques se sont minéralisées au contact du gypse contenu dans les colluvions comme le montre la corrélation entre leur teneur en sulfate et celle en calcium et le rapport molaire proche de 1 (figure 15). La figure 16, sur laquelle le contenu en sulfate des eaux du Brie et des colluvions est mis en relation avec leur contenu en calcium (+) magnésium ne provenant pas des carbonates, montre de plus que les eaux de la nappe des colluvions apparaissent comme résultant d'un mélange entre les eaux du Brie bicarbonatées calciques et une "eau théorique" à l'équilibre avec le gypse.

La nappe des colluvions est donc naturellement alimentée pour partie par les eaux du Brie qui s'écoulent depuis le sommet de la butte vers le Sud par des sources et des écoulements hypodermiques au travers des colluvions, et pour partie par les eaux de pluie qui percolent à travers les colluvions riches en gypse qu'elles dissolvent progressivement. La construction des puits d'infiltration dans le Fort central a certainement créé une troisième alimentation, anthropique cette fois, de la nappe des colluvions (Cf. § 4.2).

4.2 Conclusion sur la chimie des eaux

La campagne de prélèvements et d'analyses des eaux d'avril a complété et confirmé les résultats obtenus en novembre (BURGÉAP, 2002), à savoir :

- au sommet de la butte, l'aquifère de Brie contient une nappe perchée de type bicarbonaté calcique moyennement minéralisée,
- sur le flanc sud de la Butte, en aval du CEV, l'aquifère des colluvions qui renferme une nappe assez minéralisée, sulfatée calcique, est naturellement alimentée en partie par les eaux de la nappe du Brie qui s'y infiltrent et en partie par l'infiltration des eaux météoriques, les puits infiltration formant la troisième source, anthropique, d'alimentation de cette nappe,
- la nappe de l'Eocène supérieur, première nappe régionale, captive sous la butte donc sans relation directe avec la nappe du Brie, est fortement minéralisée (sulfatée calcique) du fait de la présence de lentilles de gypse dans ces formations.

Sur l'ensemble des échantillons prélevés au cours des deux campagnes, les concentrations mesurées en uranium sont très inférieures au seuil de potabilité relatif à l'uranium.

Sur les échantillons provenant de la nappe de l'Eocène supérieur et de la nappe des colluvions, les rapports isotopiques $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ mesurés sont ceux de l'uranium naturel ; aucun apport anthropique n'a donc été décelé.

Sur les échantillons provenant, directement ou indirectement, de la nappe du Brie, deux échantillons, respectivement PzB1 et P2, ont, sur les deux campagnes, montré des rapports isotopiques $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ légèrement mais significativement inférieurs à celui de l'uranium naturel, marquant qu'une partie de l'uranium dissous trouvé dans ces eaux est de l'uranium appauvri d'origine anthropique résultant des anciennes activités du CEA sur le site. Les deux échantillons concernés ont été prélevés dans le nord du Fort central ou à sa proximité immédiate. Les deux campagnes ont aussi montré que les concentrations en uranium dans la nappe du Brie sont plus importantes au droit du fort central seul lieu dans le CEV dans lequel l'uranium a été mis en œuvre (BURGÉAP, 2001).

5 Synthèse des résultats

5.1 Contamination résiduelle

L'uranium est détecté dans les formations sannoisiennes et infra sannoisiennes, au droit du fort central ou à son aval immédiat, à des concentrations comparables à ce qui est classiquement observé dans ces types de formations. Toutefois au droit de PzB1, des échantillons à la base du calcaire de Brie et au sommet des argiles vertes ont des signatures isotopiques légèrement mais significativement différentes de celle de l'uranium naturel. Cependant, cette signature isotopique est assez différente (plus élevée) que celle des éclats d'uranium retrouvés lors des opérations d'assainissement du site (annexe1) ; ce résultat indique que l'origine l'uranium trouvé dans ces échantillons a une origine pour partie anthropique, pour partie naturelle. Par ailleurs, il faut noter que les concentrations trouvées dans ces échantillons marqués sont trop faibles pour dire qu'ils correspondent à des niveaux d'accumulation d'uranium.

L'uranium est aussi détecté dans les eaux de la nappe du Brie, première nappe rencontrée au droit du site, à des concentrations faibles, de 5 à 7 µg/l dans les piézomètres du fort central et de 2 à 4 µg/l dans les piézomètres hors du fort central. Ces concentrations sont comparables aux valeurs communément rencontrées dans les eaux naturelles (0,1 à 10 µg/l ; Hem, 1985) et inférieures aux normes de potabilité des eaux (20 µg/l dans la norme canadienne).

5.2 Migration de l'uranium dans les eaux et les sols

L'uranium retrouvé dans les formations sannoisiennes et dans les eaux de la nappe du Brie (qu'il soit d'origine naturelle ou pro parte anthropique), suit deux trajets : (1) une partie est drainée par le réseau du fort et par les puits d'infiltration et transite d'une manière ou d'une autre à travers les masses de gypse avant de rejoindre probablement la nappe des colluvions ; (2) l'autre partie s'écoule avec les eaux de la nappe du Brie et en rejoint les exutoires que constituent la source des Malades, la source J ou d'autres exutoires occultes situés à la périphérie de la butte sur son flanc sud principalement.

Un troisième trajet avait initialement été envisagé, à savoir la percolation des eaux à travers les argiles vertes. L'étude a montré que l'infime partie des eaux qui pouvaient traverser cet horizon quasi-imperméable le faisait d'une part à une vitesse très lente¹, d'autre part que les eaux ayant traversé cet horizon étaient nécessairement évacuées sur les coteaux par les horizons plus perméables des Marnes Blanches ou Bleues (calcaire hydraulique) (BURGÉAP, 2001) ; dans le cas contraire, le gypse sous jacent, roche très soluble et de cinétique de dissolution rapide, aurait disparu au cours des temps géologiques.

Cette troisième voie de transfert peut donc raisonnablement être écartée de l'évaluation des impacts et des risques résiduels de contamination. De plus, l'uranium interagissant avec le milieu, sa migration à travers les argiles vertes serait encore plus lente que celle de l'eau conduisant à des horizons d'accumulation de l'uranium dans les argiles, horizons d'accumulation que les reconnaissances effectuées n'ont pas mis à jour (Cf. § 5.1.) (annexe 3).

¹ Les vitesses verticales de percolation sont très faibles et commandées par les niveaux de plus faibles perméabilités intercalés dans les argiles vertes ou les marnes sous-jacentes. La fourchette des perméabilités verticales de ces niveaux est de l'ordre de 10^{-10} à 10^{-12} m.s⁻¹, soit pour une porosité de drainage de l'ordre de 10%, des vitesses d'écoulement vertical de l'ordre de quelques 1/10^{ème} de millimètres par an à quelques centimètres par an.

5.2.1 Traversée des niveaux gypseux par les eaux infiltrées par puits

Le régime naturel de circulation des eaux à travers les formations supragypseuses a été profondément modifié lors de la construction du Fort en 1870 du fait du creusement des puits d'infiltration qui atteignent le sommet de la première masse de gypse. Ces puits by-passent les écrans imperméables qui séparent la nappe du Brie des formations gypseuses.

Les observations de ces puits et le suivi du niveau d'eau dans le puits P2 ont montré que les eaux drainées par les puits d'infiltration ne stagnaient pas au fond des puits, mais étaient très rapidement évacuées. D'autre part, ces infiltrations d'eau provoquent la dissolution du gypse à la base des puits qui a pu et peut encore entraîner l'effondrement partiel ou total des puits (BURGEAP, 2001, BURGEAP, 2002). De telles dissolutions ont été observées directement lors de l'inspection caméra des puits (BURGEAP, 2002).

Ces données relatives aux vitesses d'infiltration et à la dissolution du gypse sont interprétées ainsi : les eaux infiltrées directement dans le gypse ont très vite élargi par dissolution des fissures préexistantes dans le gypse et ont ainsi créé un réseau d'évacuation des eaux ; ce réseau est sans doute localement canalisé par les horizons marneux très peu perméables intercalés dans le gypse et globalement contrôlé par le pendage des couches géologiques qui est de direction Nord-Sud (communication personnelle de BPB PLACO), c'est-à-dire que les écoulements se dirigeraient vers le coteau sud (secteur de Courtry). Toutefois les écoulements se faisant par un réseau de fissures, il n'est pas exclu qu'une partie des écoulements puisse se faire en amont pendage.

Dans tous les cas, les écoulements dans de telles fissures élargies par dissolution sont - à la différence de ce que l'on observe à la traversée des argiles vertes - très rapides et du type de ceux qui sont observés dans les milieux karstiques. L'expérience montre qu'en milieu karstique, les écoulements souterrains se produisent à des vitesses de l'ordre de la dizaine, voire de la centaine, de mètres par heure.

Il est donc très vraisemblable que les eaux infiltrées par les puits durant la période où le Fort était exploité par le CEA sont parvenues à leurs exutoires, essentiellement sur le flanc Sud de la butte, en quelques heures ou quelques jours. Dans ces conditions, l'examen de la qualité actuelle de l'eau des puits de Courtry est la meilleure estimation qui puisse être faite du risque résiduel éventuel lié aux activités passées du CEA dans le Fort de Vaujours.

5.2.2 Vitesse de transfert au sein de la nappe du Brie

Les vitesses d'écoulement horizontal des eaux de la nappe du Brie depuis leur zone d'infiltration jusqu'à leurs exutoires sur le flanc sud de la butte, la source des malades, la source J et les écoulements hypodermiques dans les colluvions, peuvent être évaluées à l'aide de la formule :

$$V = Ki/n$$

Avec :

V : vitesse d'écoulement en $m.s^{-1}$,

K : perméabilité horizontale des calcaires de Brie, en $m.s^{-1}$,

n: porosité de drainage,

i: le gradient hydraulique, sans dimension.

Seul le gradient, i, peut être évalué assez précisément sur le site à partir des mesures piézométriques réalisées. Il est de l'ordre de 1% dans l'axe nord-sud.

La transmissivité (T) de la nappe du Brie en région parisienne dans les secteurs où elle est productive est de l'ordre de 10^{-3} à $3.10^{-4} m^2.s^{-1}$ (Mégien, 1970). Compte tenu de la très faible productivité de la nappe à Vaujours et du caractère très altéré de la formation de Brie, la valeur adoptée pour ce calcul est de $10^{-4} m^2.s^{-1}$.

L'épaisseur de l'aquifère (e) étant d'environ 3 mètres, la perméabilité est alors de :

$$K = T/e$$

$$K = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$$

En adoptant une porosité de drainage égale à 2%, la vitesse d'écoulement est alors de 1,3 mètres par jour.

Avec cette vitesse de l'ordre du mètre par jour, le temps que met l'eau pour parcourir les 300 à 400 mètres qui séparent le fort central des bords de la butte est donc de l'ordre de l'année (aux erreurs près faites sur l'estimation de la transmissivité) et non de la dizaine ou de la centaine d'années.

5.2.3 Qualité des eaux aux exutoires

Les eaux de la nappe du Brie hors du fort central présentent des concentrations moyennes en uranium de l'ordre de 3 µg/l. Les sources présentent une concentration moyenne un peu inférieure semble-t-il, de l'ordre de 2,5 µg/l. Les incertitudes sur ces valeurs moyennes et sur le bilan global au niveau de la nappe du Brie ne permettent pas de conclure sur la réalité et la signification de cet écart, mais ces données excluent en tout cas l'existence d'un phénomène actuel de remobilisation d'uranium au niveau du CEV.

Les eaux drainées par les puits d'infiltration sont représentées par les échantillons prélevés dans les puits P2 et P9. Leur concentration moyenne actuelle en uranium serait de l'ordre de 6 µg/l. Les eaux s'infiltrant ensuite dans la masse de gypse, mais ni leur trajet exact, ni la vitesse exacte de ce transfert, ni le chimisme à ce niveau ne sont connus. Leur exutoire très probable est la nappe des colluvions échantillonnée au niveau des puits de Courtry au sud de la butte. Les eaux qui y sont prélevées sont des eaux à dominante sulfatée calcique, avec des teneurs moyennes en uranium de l'ordre de 0,9 µg/l en automne et un peu plus basse (0,6 µg/l) au printemps du fait des phénomènes de dilution liés à la recharge de la nappe. La nappe des colluvions (figure 17) doit être alimentée pour partie par les apports météoriques directs sur les colluvions du versant, et pour une autre partie par des eaux de la nappe du Brie réinfiltrées et par les eaux issues de la masse des gypses. Ces colluvions elles-mêmes renferment des quantités notables de gypse dont la dissolution peut évidemment contribuer au contenu en sulfate et calcium des eaux. La relative complexité de ce système empêche de tenter de reconstituer un bilan des différents termes du mélange, et de préciser le comportement de l'uranium le long de la voie de transfert à travers le gypse.

En tout état de cause, les concentrations observées dans les eaux de la nappe des colluvions restent très limitées, tout à fait banales pour des eaux naturelles, peu variables, et de signature isotopique parfaitement naturelle.

La nappe de l'Eocène Supérieur n'est pas en communication directe avec la nappe du Brie, elle n'a de communication qu'avec la nappe des colluvions au sud de Courtry où les formations ludiennes disparaissent. Les eaux de cette nappe montrent des concentrations en uranium de l'ordre de 4 à 8 µg/l, concentrations banales pour des eaux naturelles, et avec une signature isotopique elle-aussi naturelle.

5.3 Conclusions et recommandations

A l'issue des campagnes de reconnaissances hydrogéologiques et géochimiques (annexe 3) qui se sont déroulées entre octobre 2001 et juin 2002, il apparaît au vu des résultats que :

Les teneurs en uranium trouvées dans le sous-sol du Fort Central, seul lieu où de l'uranium métal a été mis en œuvre, et en PzE, situé à l'aval immédiat du Fort, sont faibles et conformes aux teneurs naturelles trouvées dans ces types de formations géologiques.

De même, les teneurs en uranium dans la nappe de Brie, première nappe rencontrée au droit du CEV, et dans la nappe des colluvions pour partie alimentée par la nappe du Brie, ainsi que les eaux s'écoulant à travers les puits d'infiltration, sont faibles et conformes aux teneurs rencontrées dans les eaux naturelles.

Les résultats obtenus à partir des reconnaissances effectuées montrent qu'il ne semble pas y avoir d'horizons d'accumulation d'uranium au droit du CEV et qu'en tout état de cause aucun phénomène de remobilisation d'uranium ne se produit actuellement au niveau du CEV.

Ces résultats n'excluent en rien d'appliquer le principe de précaution et de limiter dans l'avenir les usages possibles du site, en particulier du fort central.

Au vu des résultats qui viennent d'être exposés, et en l'absence de données précises sur la source uranium, c'est-à-dire les quantités d'uranium utilisées et la fréquence des tirs à l'uranium, il ne paraît ni utile, ni véritablement faisable de s'engager dans une modélisation de transfert de polluant, ici l'uranium, après prise en compte des phénomènes géochimiques. En effet en l'absence de données précises sur le terme source et en considérant le fait que l'uranium a été transféré *via* les puits d'infiltration vers la nappe des colluvions très rapidement sans qu'un marquage résiduel de cette nappe ne soit décelable, la modélisation n'apporterait pas d'information supplémentaire.

En revanche au terme de cette étude, le véritable risque nous apparaît être d'ordre géotechnique. En effet, l'infiltration des eaux de pluie et pour partie des eaux de la nappe de Brie dans le gypse *via* les puits d'infiltration provoque la dissolution du gypse et la création de poches de dissolution entraînant une instabilité potentielle des terrains sus-jacents. Des effondrements se sont déjà produits au 19^{ème} siècle et plus récemment (effondrement des puits P1, P9 et NP9, BURGEAP, 2001). Les risques d'effondrement étant importants, il est nécessaire d'envisager un autre moyen de drainer le site et d'évacuer les eaux de ruissellement.

BIBLIOGRAPHIE

- Anonymes (1998) - Dossier d'abandon du site de Vaujours par le CEA/DAM déposé le 09/03/98. CEA/DSR/B3, DO 150, 59 p. + annexes.
- BURGÉAP (2001) - Le site CEA de Vaujours dans son environnement - Synthèse documentaire historique et hydrogéologique. Rapport A.8314/C.301073/R.3288c, 40 p. + annexes.
- BURGÉAP (2002) - Reconnaissances hydrogéologiques et caractérisation géochimiques des roches et des eaux souterraines. Rapport d'avancement. Rapport A.8314/C.301511/R.3460, 38 p. + annexes.
- Hem J.D. (1985) - Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, third edition. US geol. Survey water supply paper 2254, p. 148.
- Mégnien C., Diffre P., Turland M., Berger G., Rambert B., Rampon G., Vilalard P., Marquet G., Lauverjat J., (1970) - Atlas des nappes aquifères de la région parisienne. BRGM, Paris, 159 p., 21 pl.
- Morel F.M.M. (1983) - Principles of aquatic chemistry. Wiley Interscience, 446 p.
- OMS (1993) - Guidelines for drinking water quality, WHO, Genève (2e édition), vol. 1.
- van der Lee J., De Windt L. (2000) - CHEES tutorial and coobook, updated for version 2.5. Rapport du Centre d'informatique géologique de l'Ecole des mines de Paris, LHM/RD/00/13, 96 p.

FIGURES

CEA / DAM - FORT DE VAUJOURS (93)

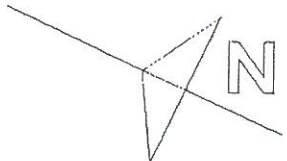
**CARTE DE LOCALISATION DES POINTS
DE SUIVI PIEZOMETRIQUE
DE LA NAPPE DU BRIE**

Fig. 1

R.3614
C.301511



- Suivi continu de la piézométrie
- Suivi manuel quasi mensuel de la piézométrie



ENTREE DU CENTRE

station d'irrigation

ZONE ENTREPRISES

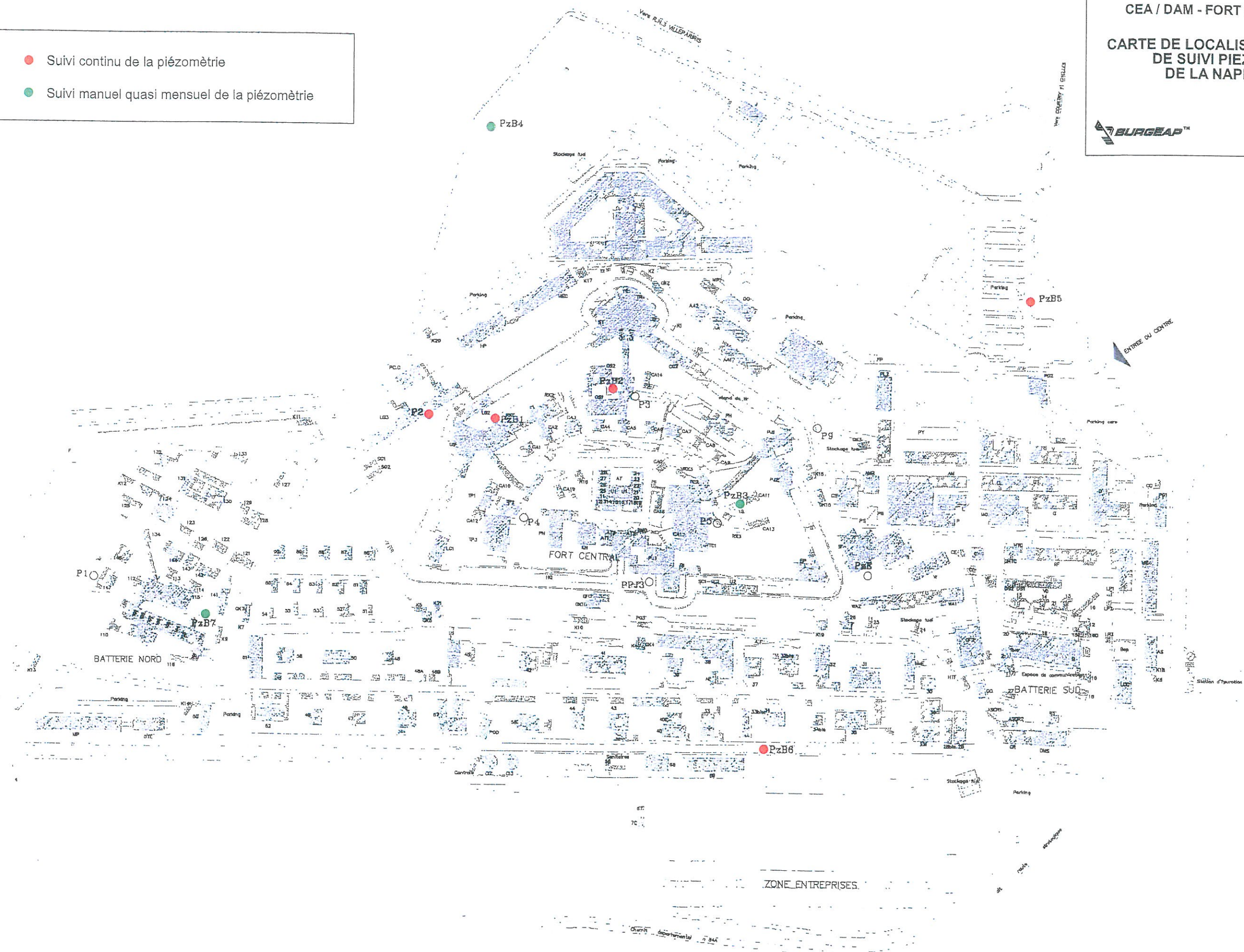
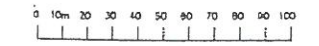
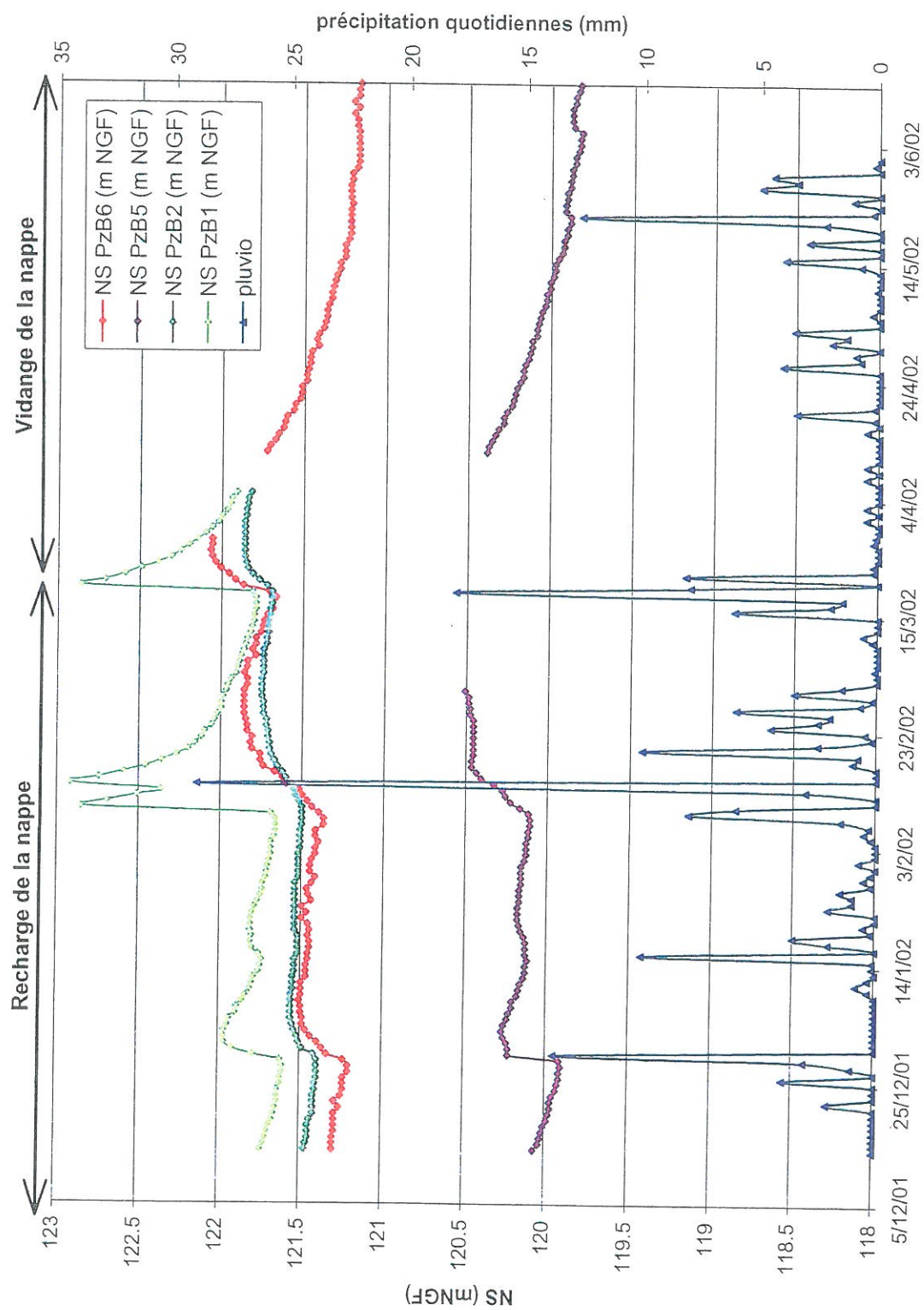


Figure 2 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Brie en PzB2, PzB3, PzB4 et PzB6 et de la pluviométrie à Vaujours



CEA / DAM - FORT DE VAUJOURS (93)

LOCALISATION DES INSTALLATIONS OU
L'URANIUM A ETE MIS EN ŒUVRE, DES PUIITS
D'INFILTRATION ET DE LEUR BASSIN VERSANT

Fig. 3

R.3614
C.301511



- P2 ○ Puits d'infiltration
- PzB1 ○ Piézomètre
- Casemate de stockage de l'Uranium
- Chambre de tir où l'Uranium a été utilisé

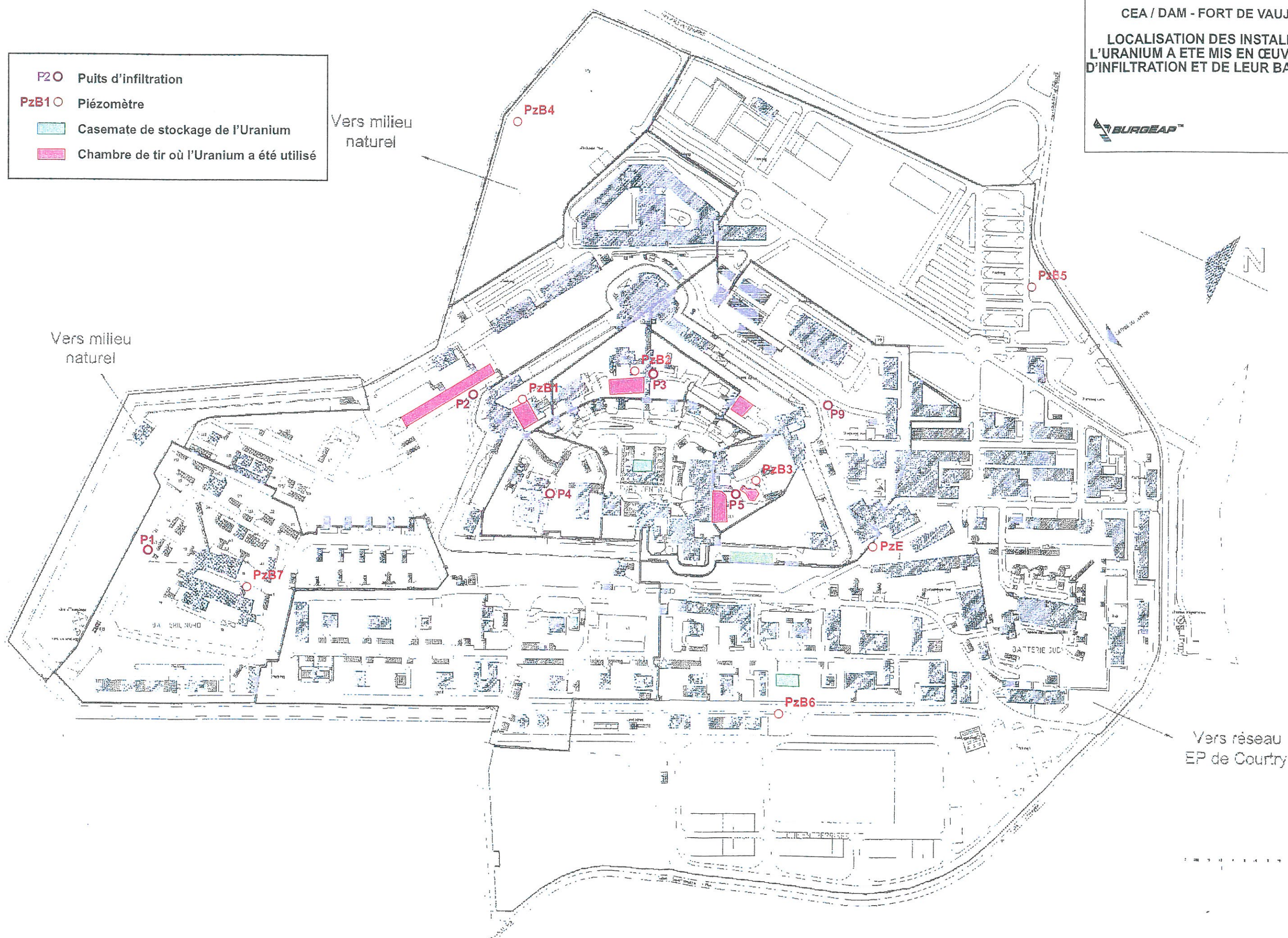
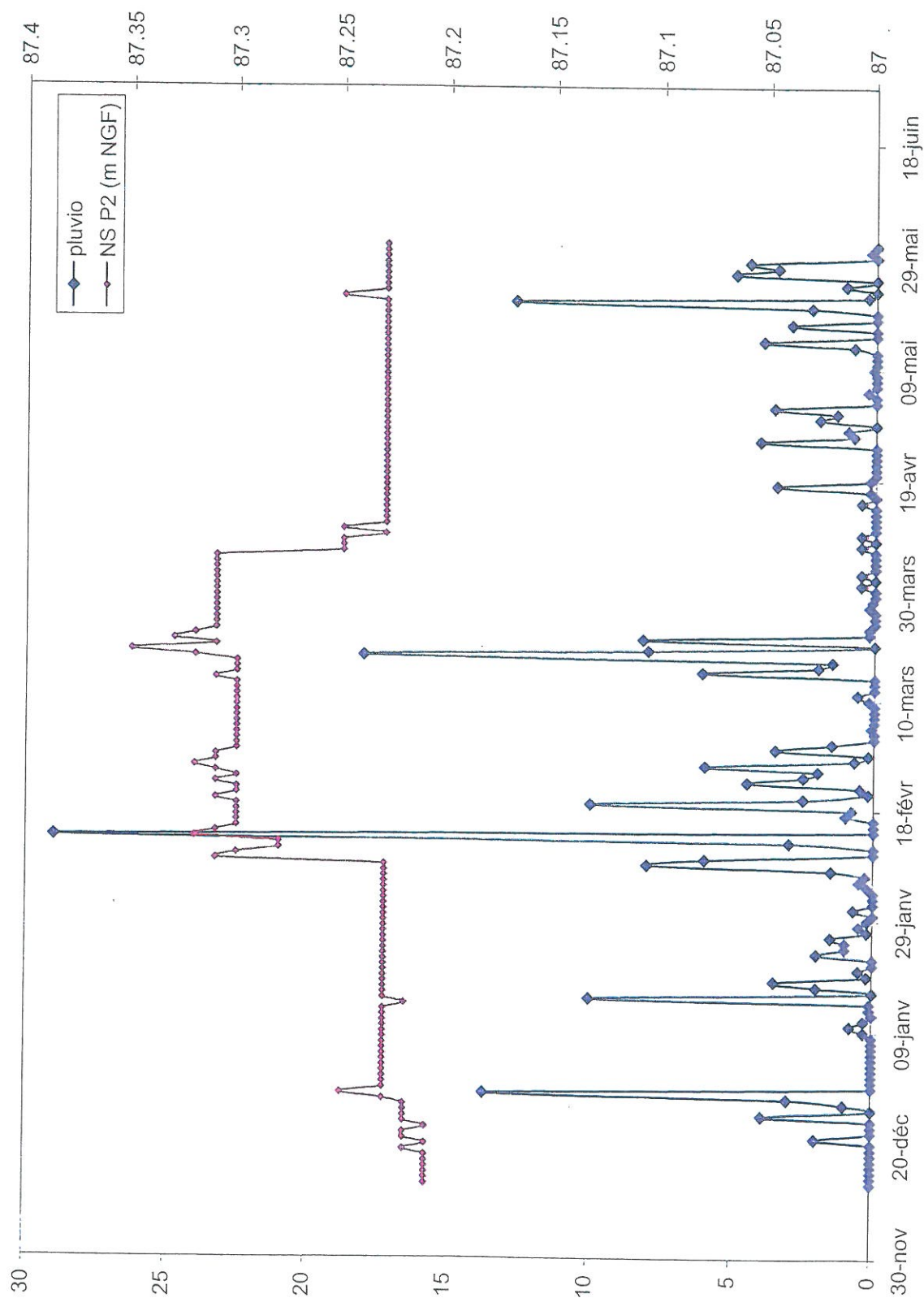
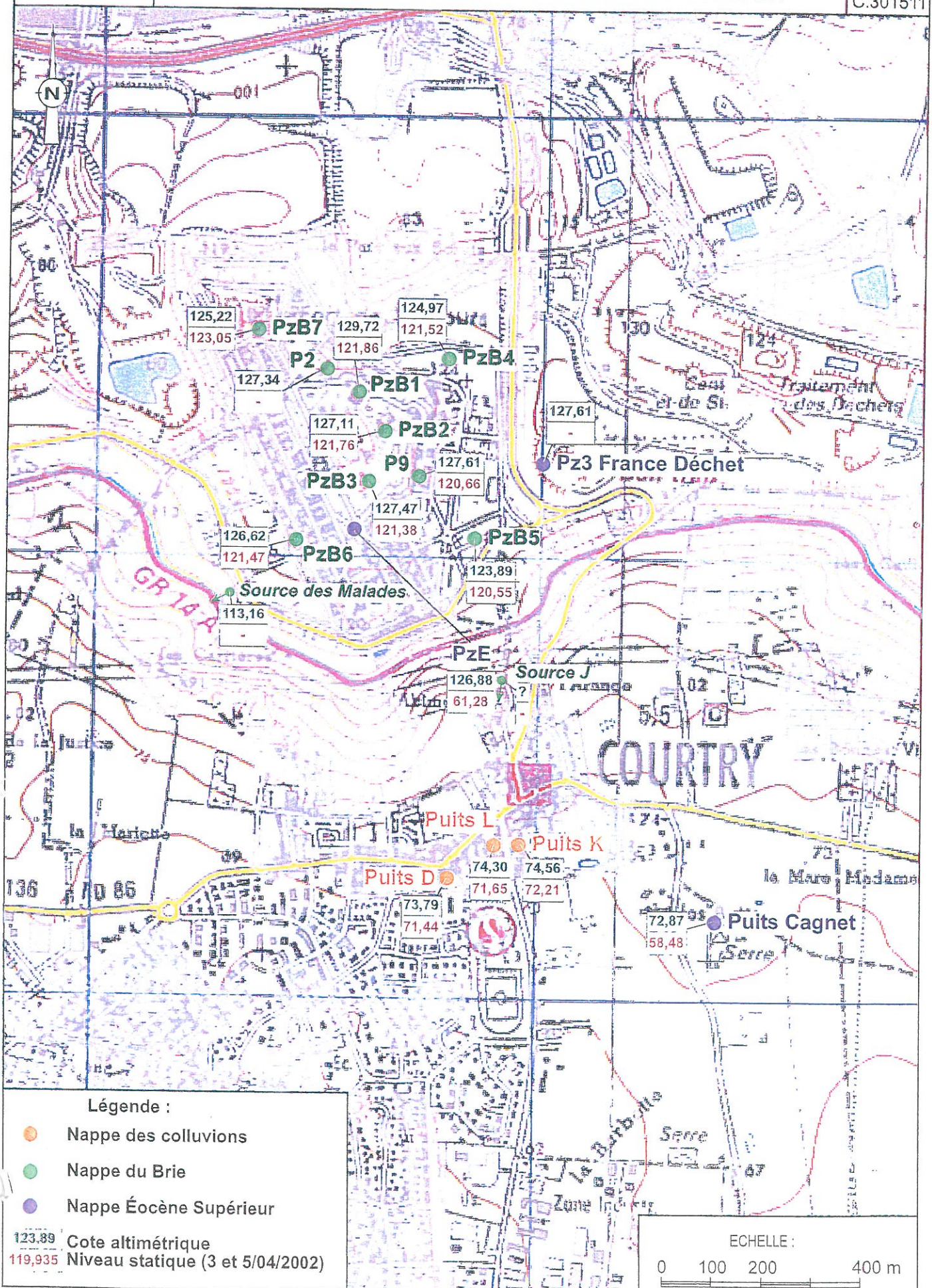


Figure 4 : Variation du niveau d'eau dans le puits d'infiltration P2 et de la pluviométrie à Vaujours



LOCALISATION DES POINTS DE PRELEVEMENTS DES EAUX

R.3614
C.301511





Coupe géologique
et profil des teneurs en uranium de la carotte B1

SITE : CEA - VAUJOURS (93)

Fig.7

R.3614

C.301511

Sondage n° : PzB1

Technique de sondage : Carottage

Profondeur : 10,20m

T° air :

Auteur : NC

Date : 13/09/01 Heure :

NS / rep :

Cote repère :

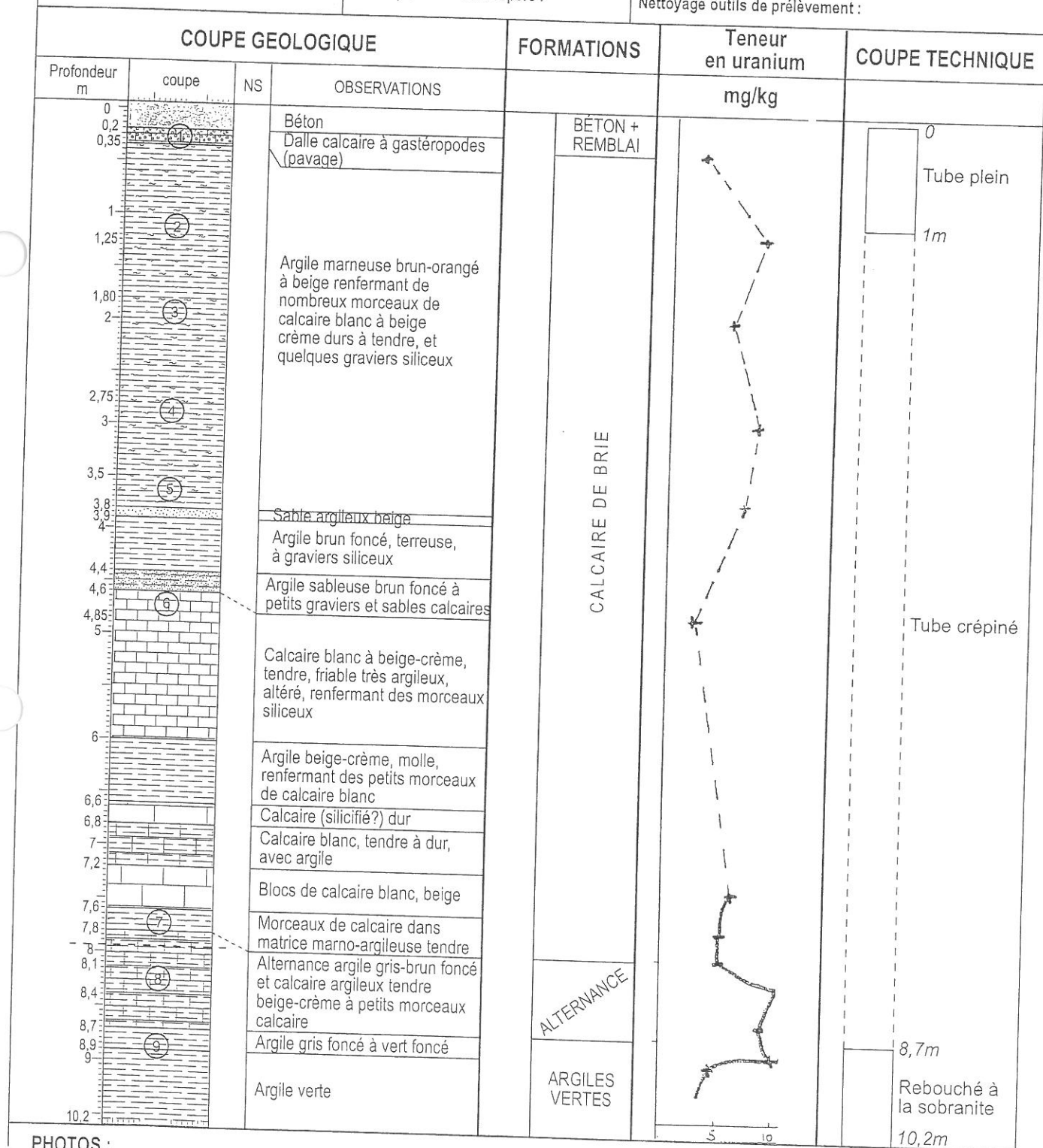
Mode de prélèvement :

Flaconnage :

Préparation des échantillons :

Mode et durée de conservation :

Nettoyage outils de prélèvement :



PHOTOS :

REMARQUES :

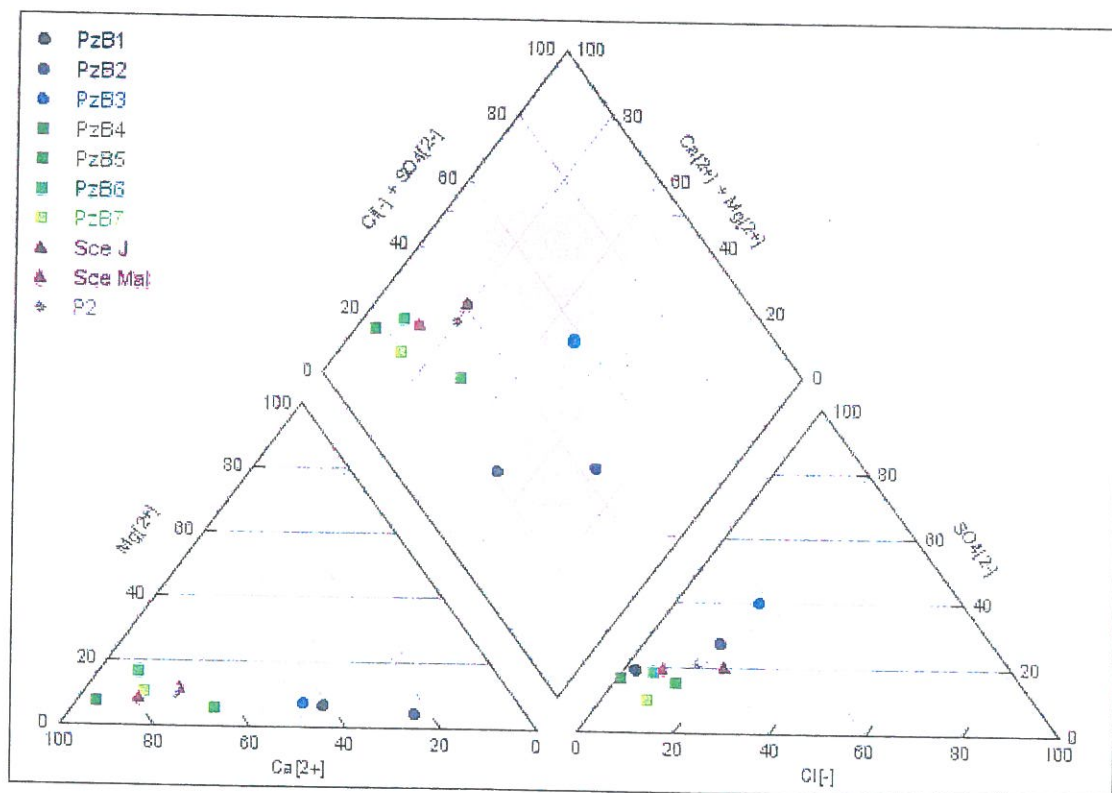


Figure 8 : Diagramme de Piper des eaux prélevées dans la nappe du Brie en avril 2002.

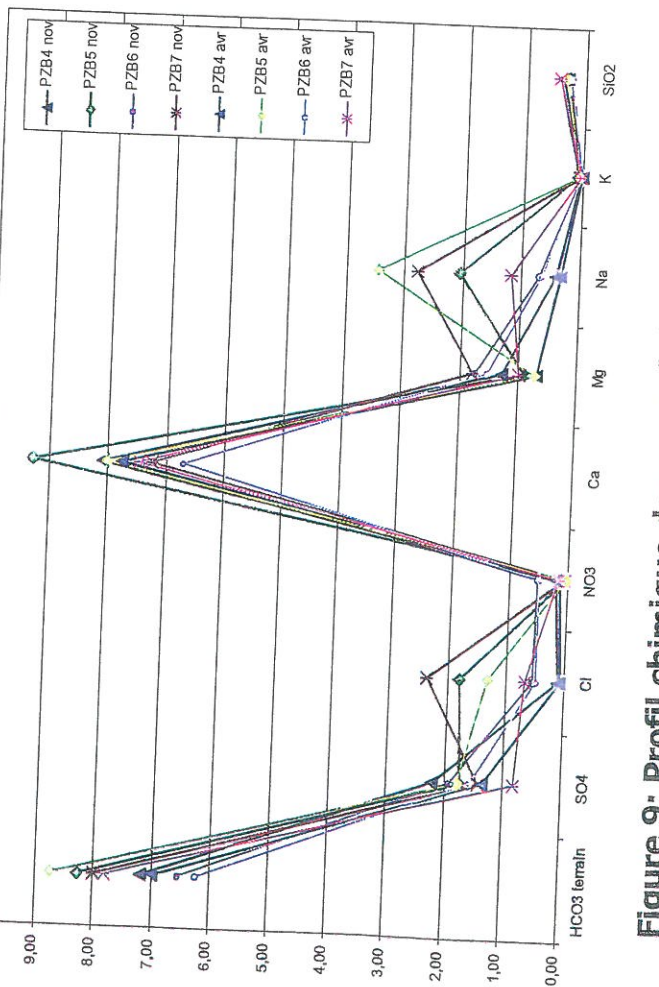
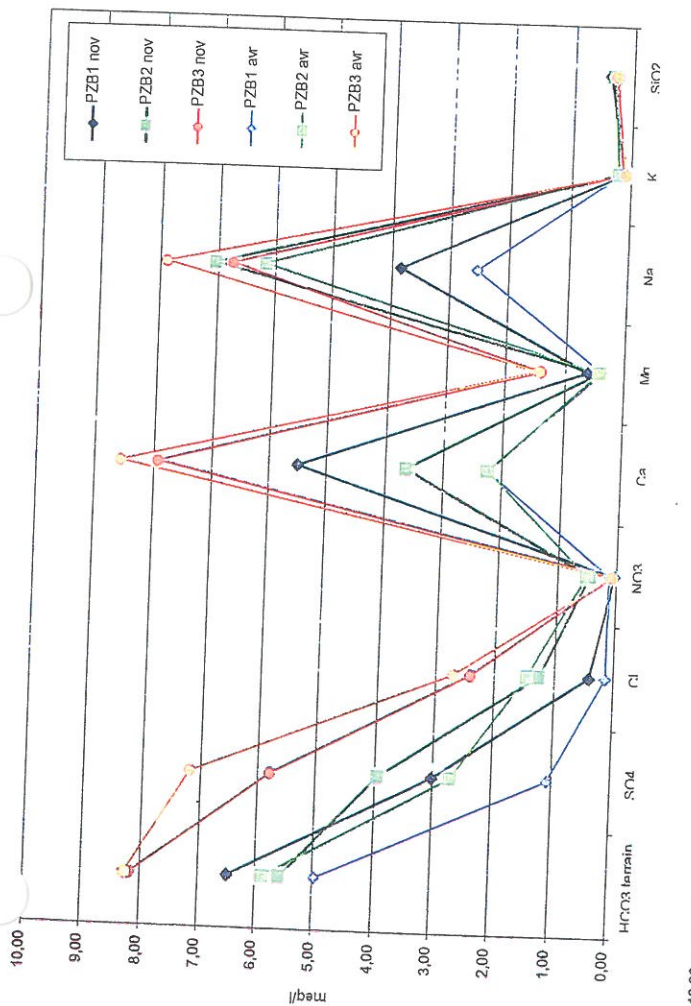
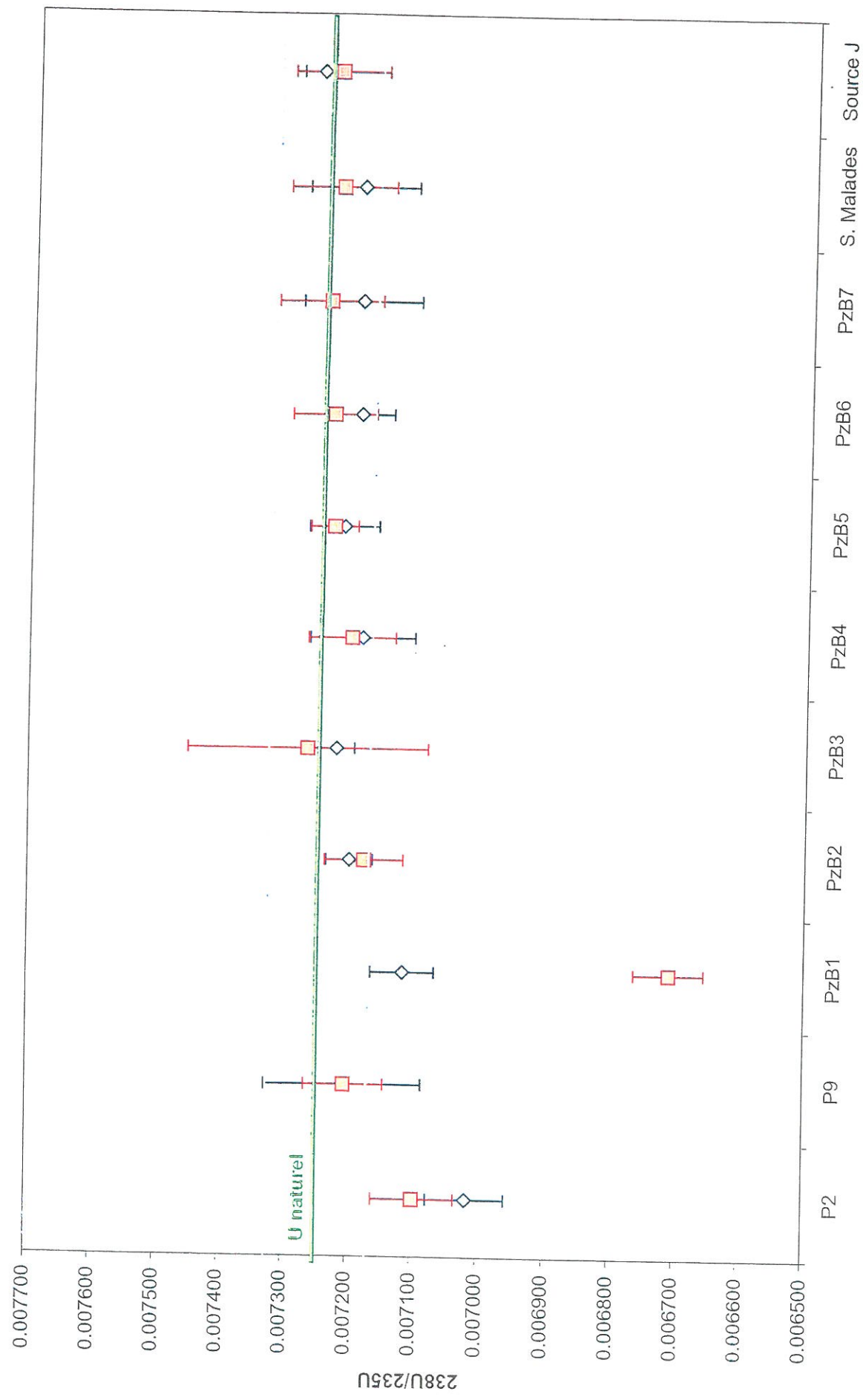


Figure 9: Profil chimique des eaux de la nappe du Brie. Résultats des campagnes de novembre 2001 et avril 2002

Figure 10 : Isotopie de l'uranium dans les eaux de la nappe du Brie prélevées en novembre 2001 et avril 2002.



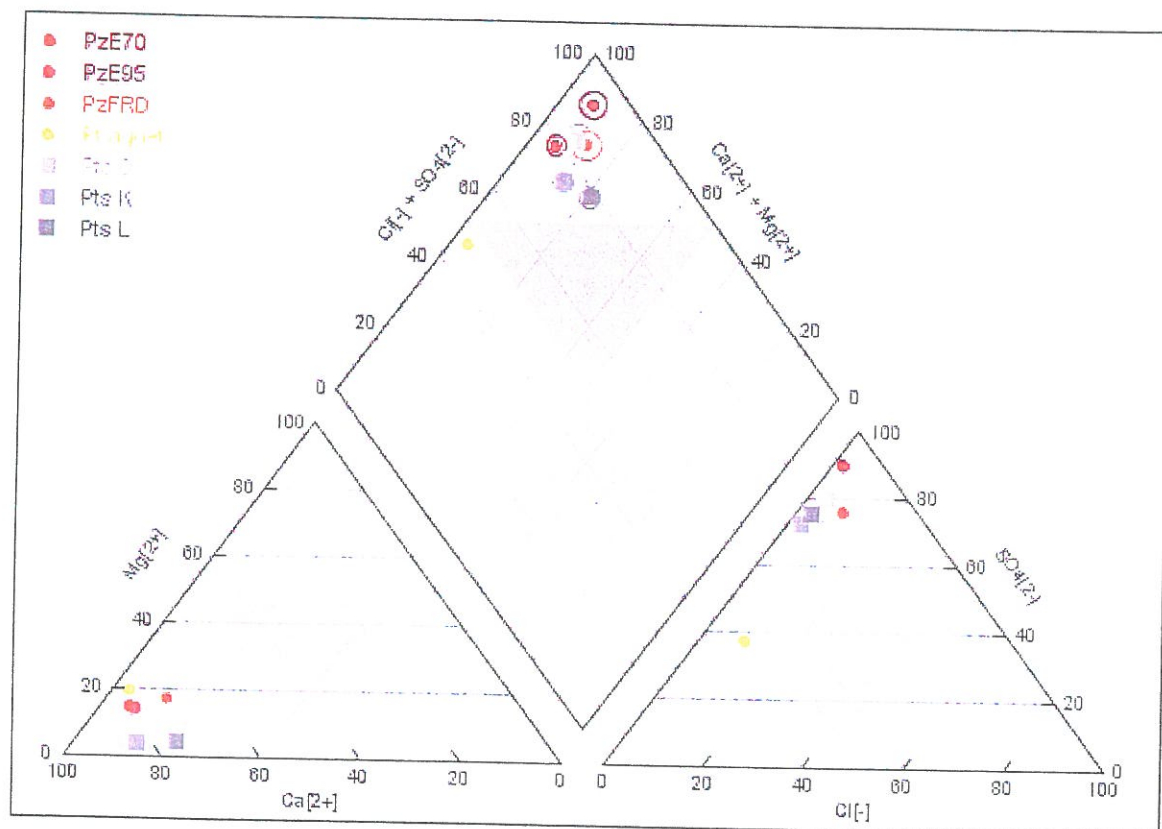


Figure 11 : Diagramme de Piper des eaux prélevées dans la nappe des colluvions et la nappe de l'Eocène Supérieur en avril 2002

Figure 12 : Profil chimique des eaux de la nappe des colluvions prélevées en novembre 2001 et avril 2002.

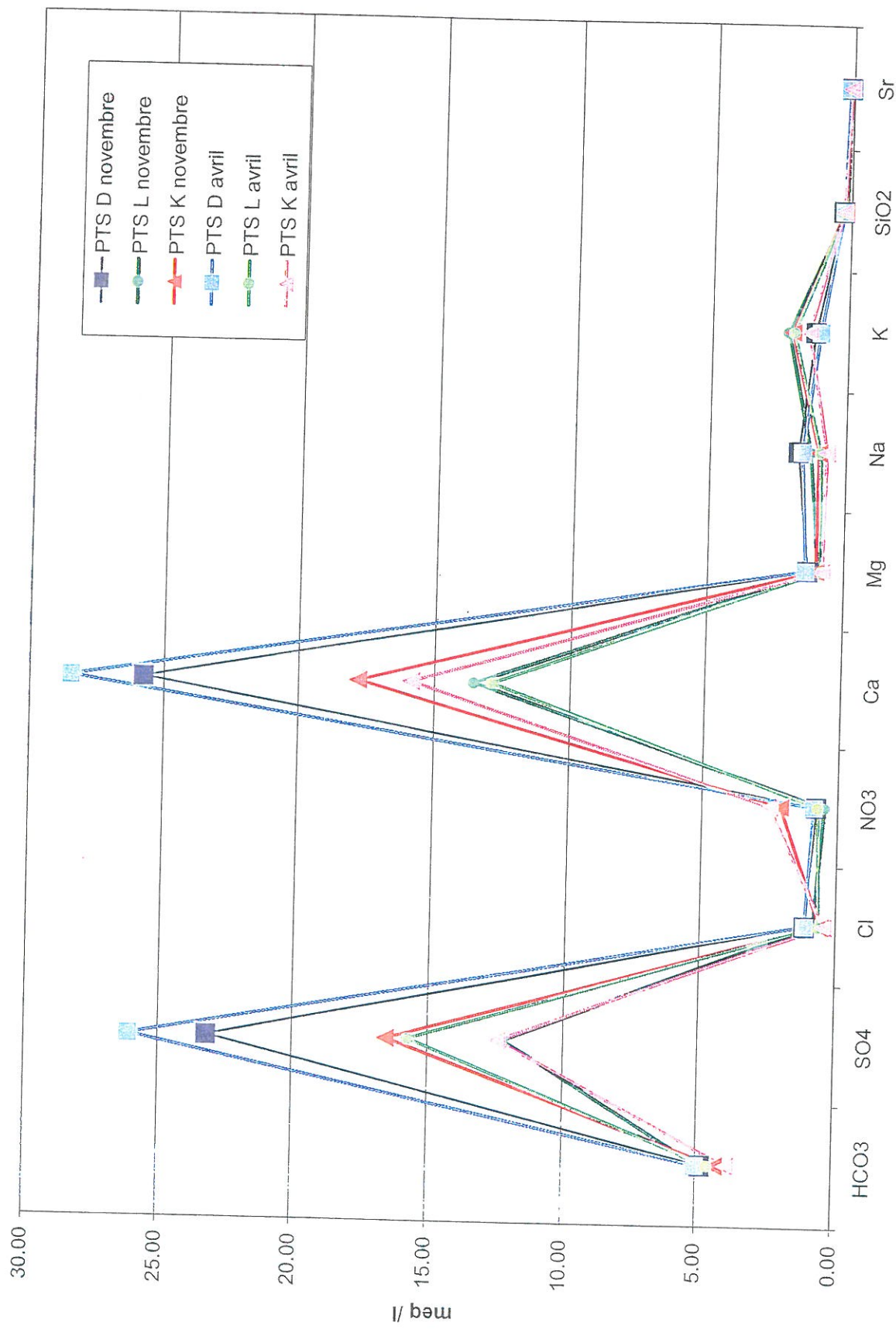


Figure 13 : Profil chimique des eaux de la nappe de l'Eocène Supérieur prélevées en novembre 2001 et avril 2002.

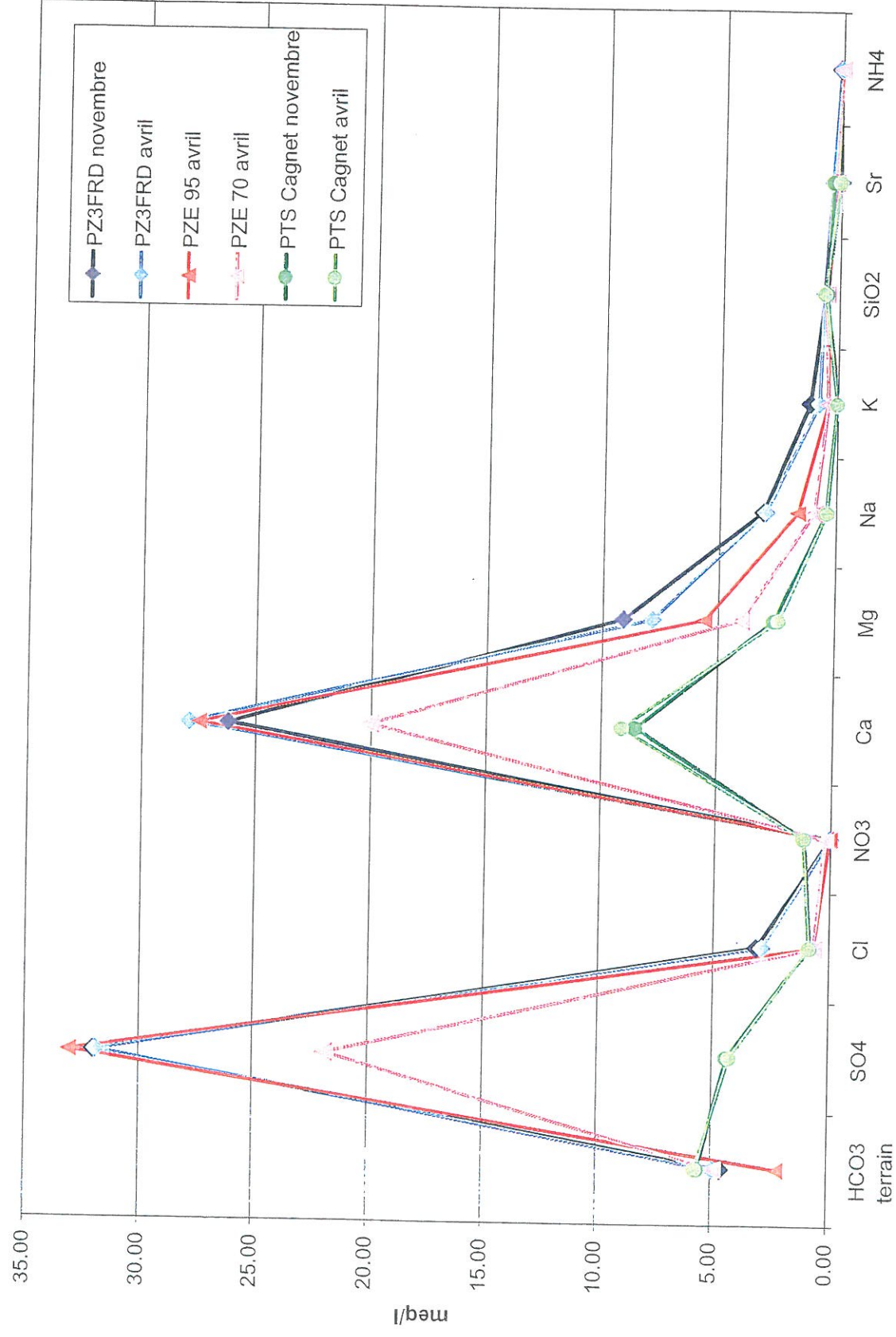


Figure 14 : Relation entre les concentrations en Mg, K et Na et la concentration en uranium dans les eaux de la nappe de l'Eocène Supérieur.

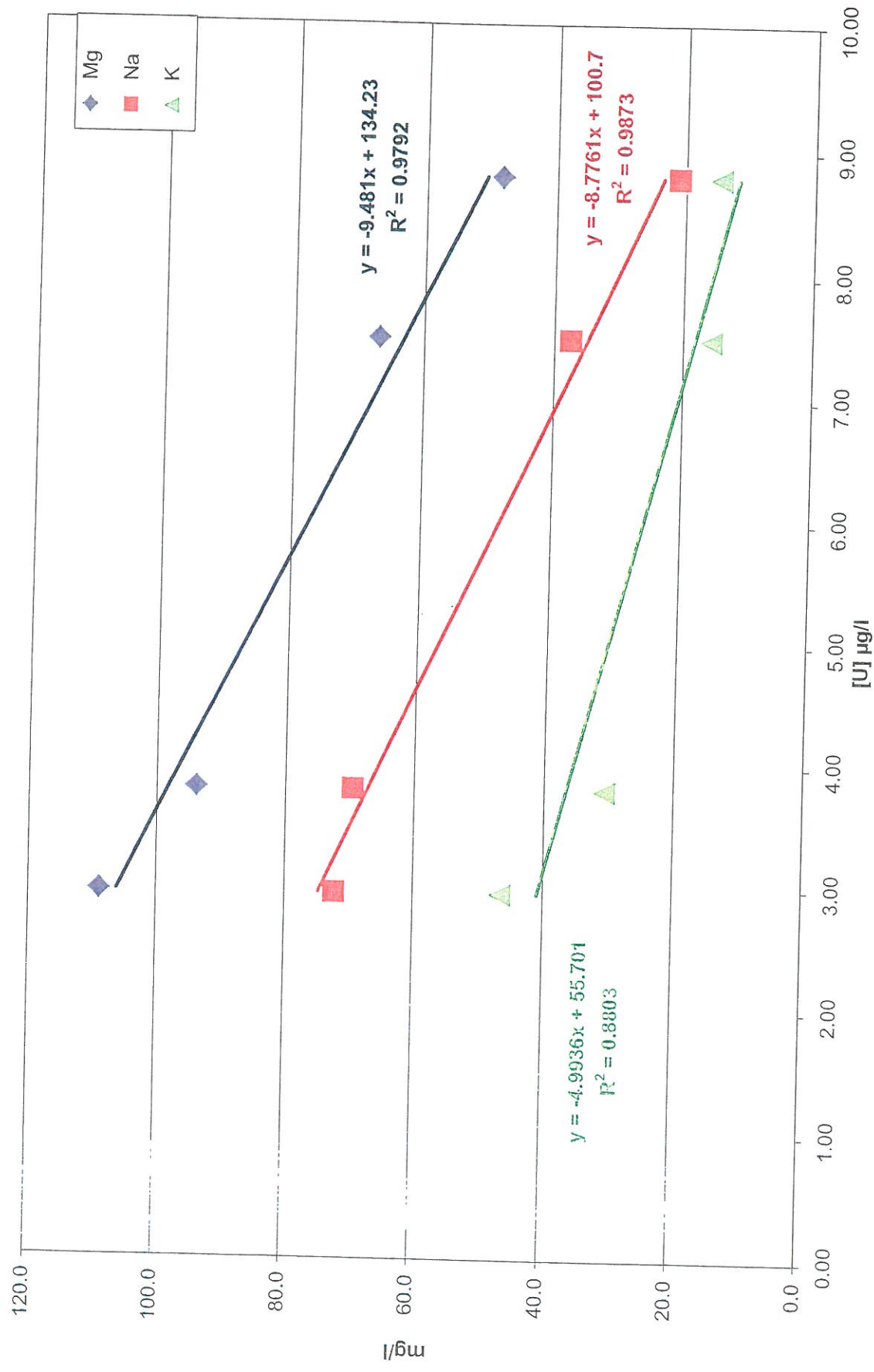


Figure 15 : Relation entre la concentration en sulfate et celle en calcium dans les eaux de la nappe des colluvions.

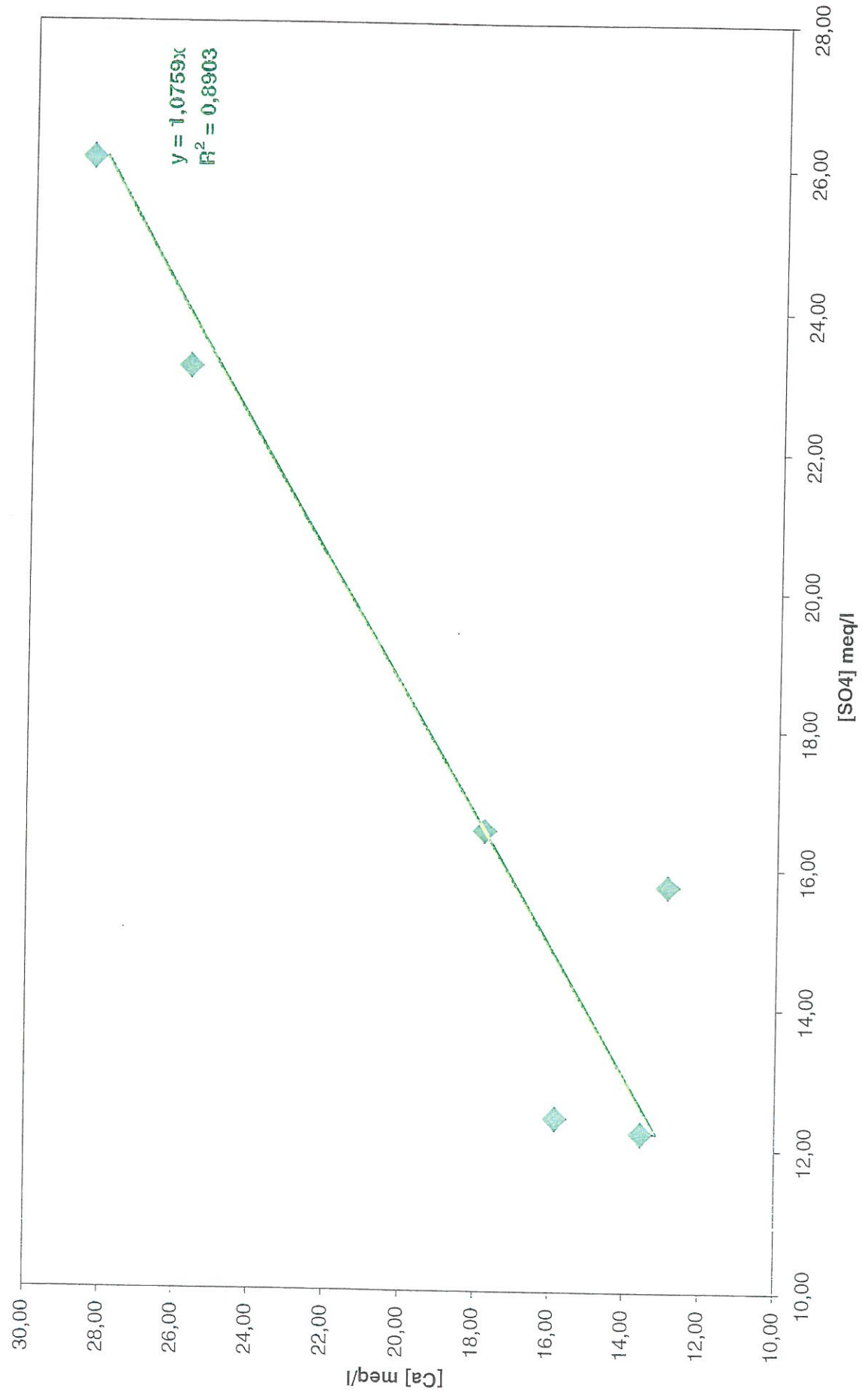
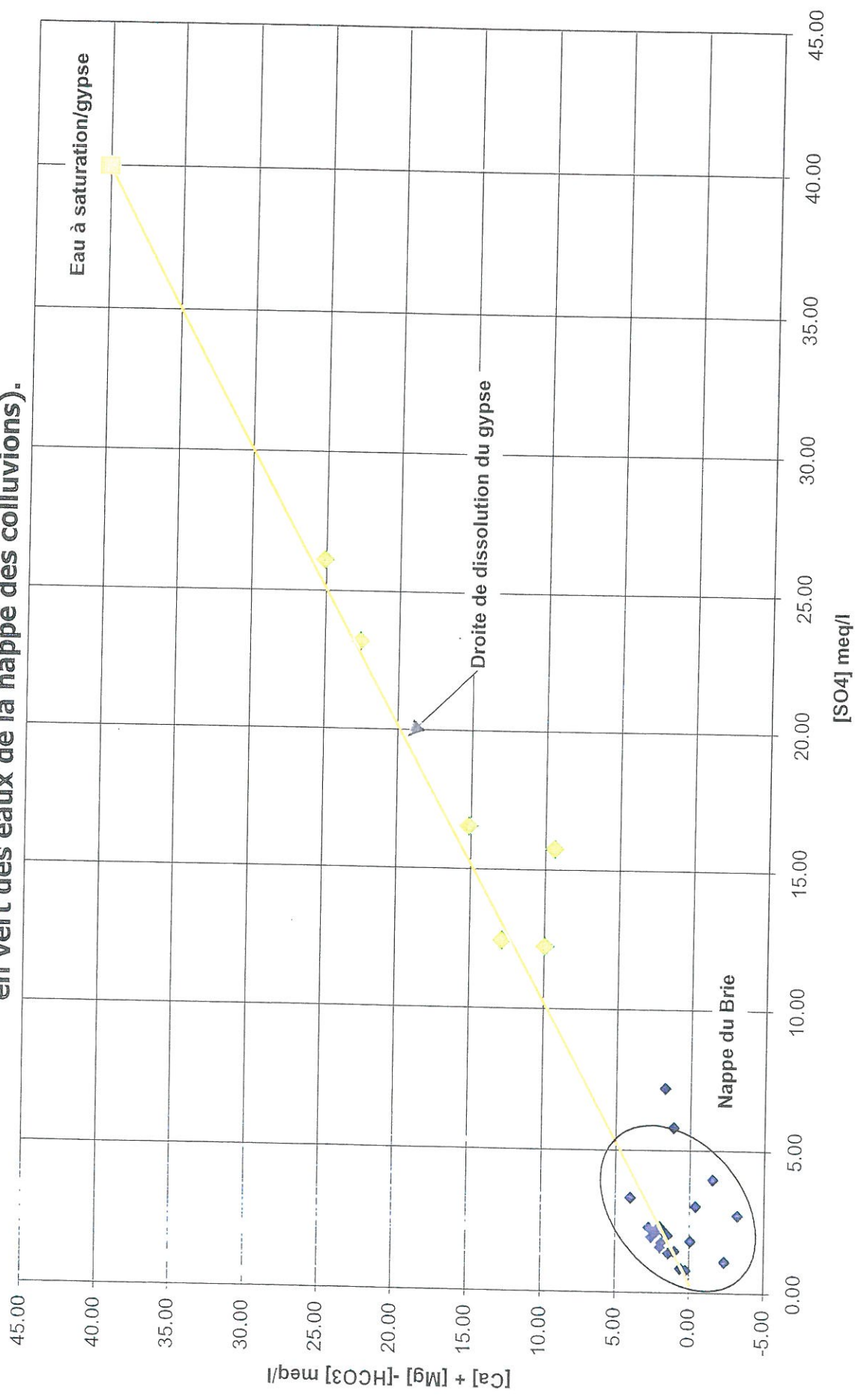
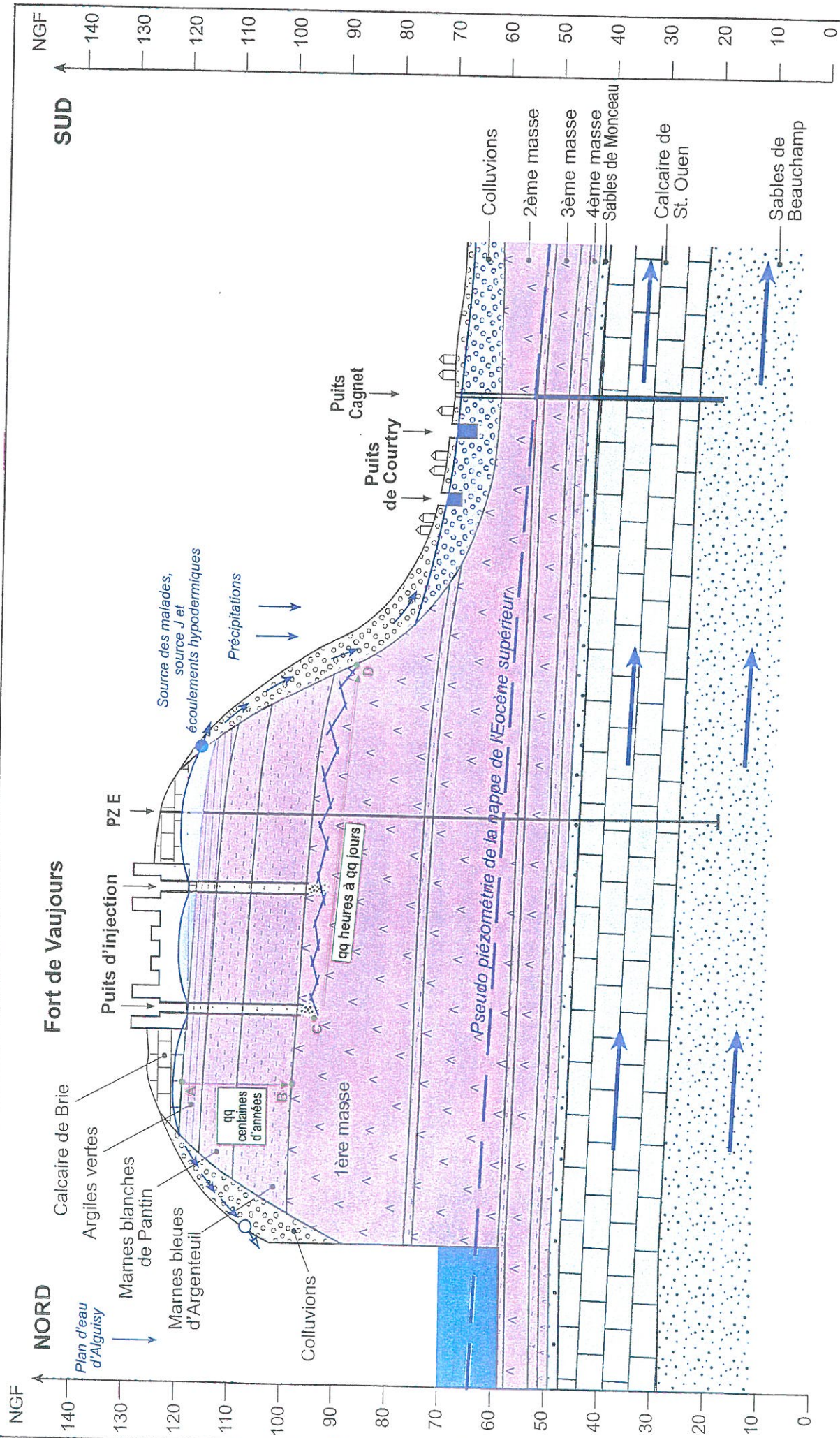


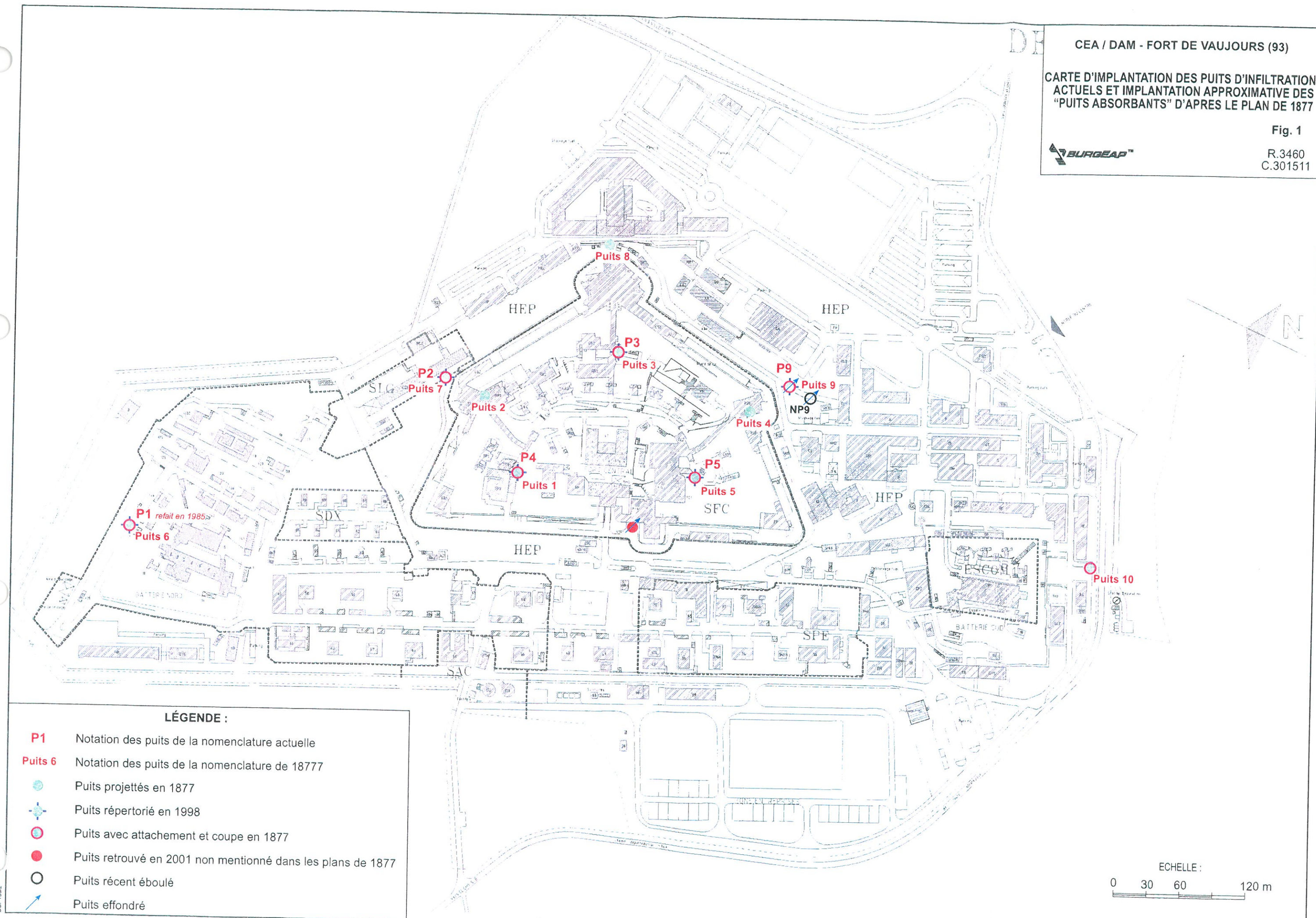
Figure 16 : Relation entre la concentration des eaux en sulfate et celles en calcium et magnésium non associées au carbonate (en bleu les eaux de la nappe du Brie, en vert des eaux de la nappe des colluvions).





CEA / DAM - FORT DE VAUJOURS (93)

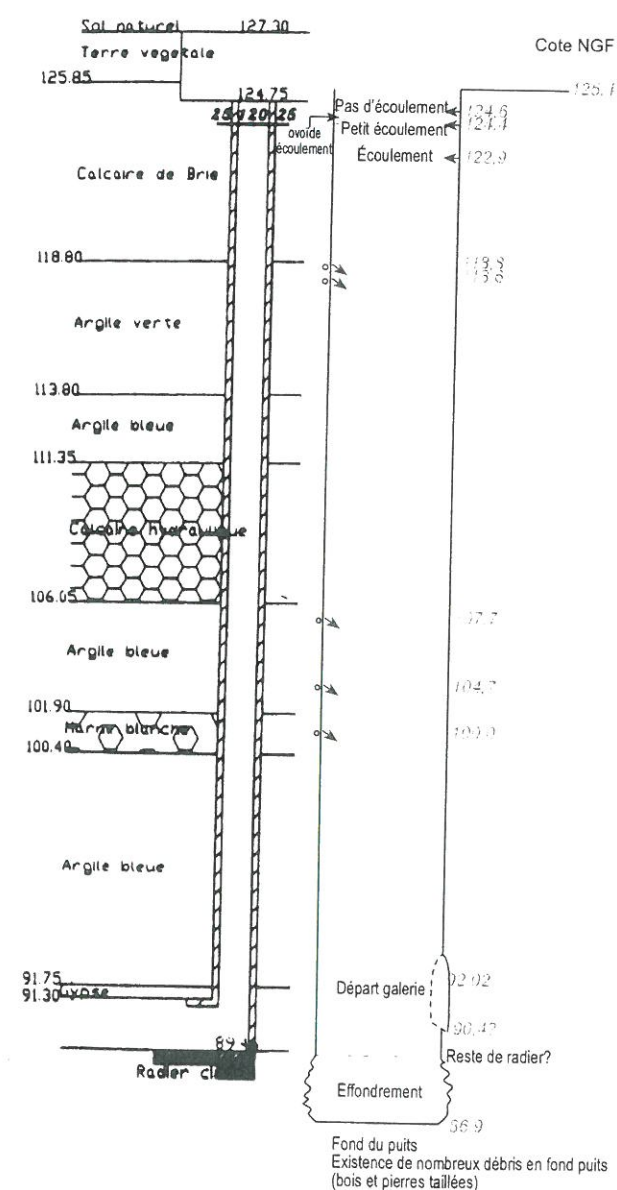
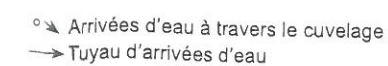
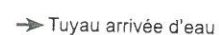
ANNEXES



R.3460
C.3011511



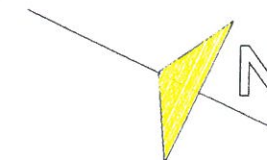
Puits P5



CARTE DE LOCALISATION DES RECONNAISSANCES DES FORMATIONS SANNOISIENNES

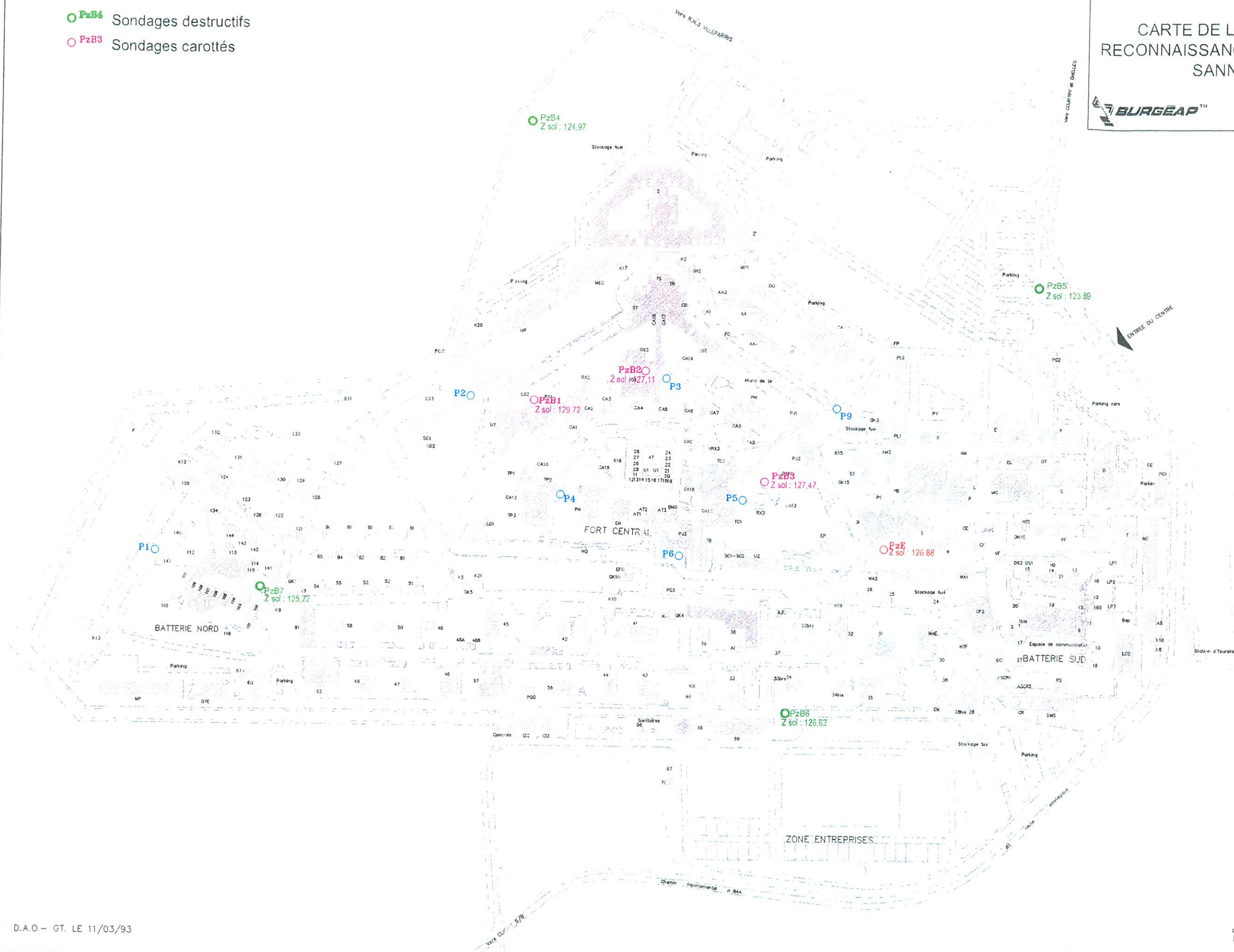
Fig.03
R.3460
C.301511

BURGEAP™



0 10m 20 30 40 50 60 70 80 90 100

- PzB4 Sondages destructifs
- PzB3 Sondages carottés

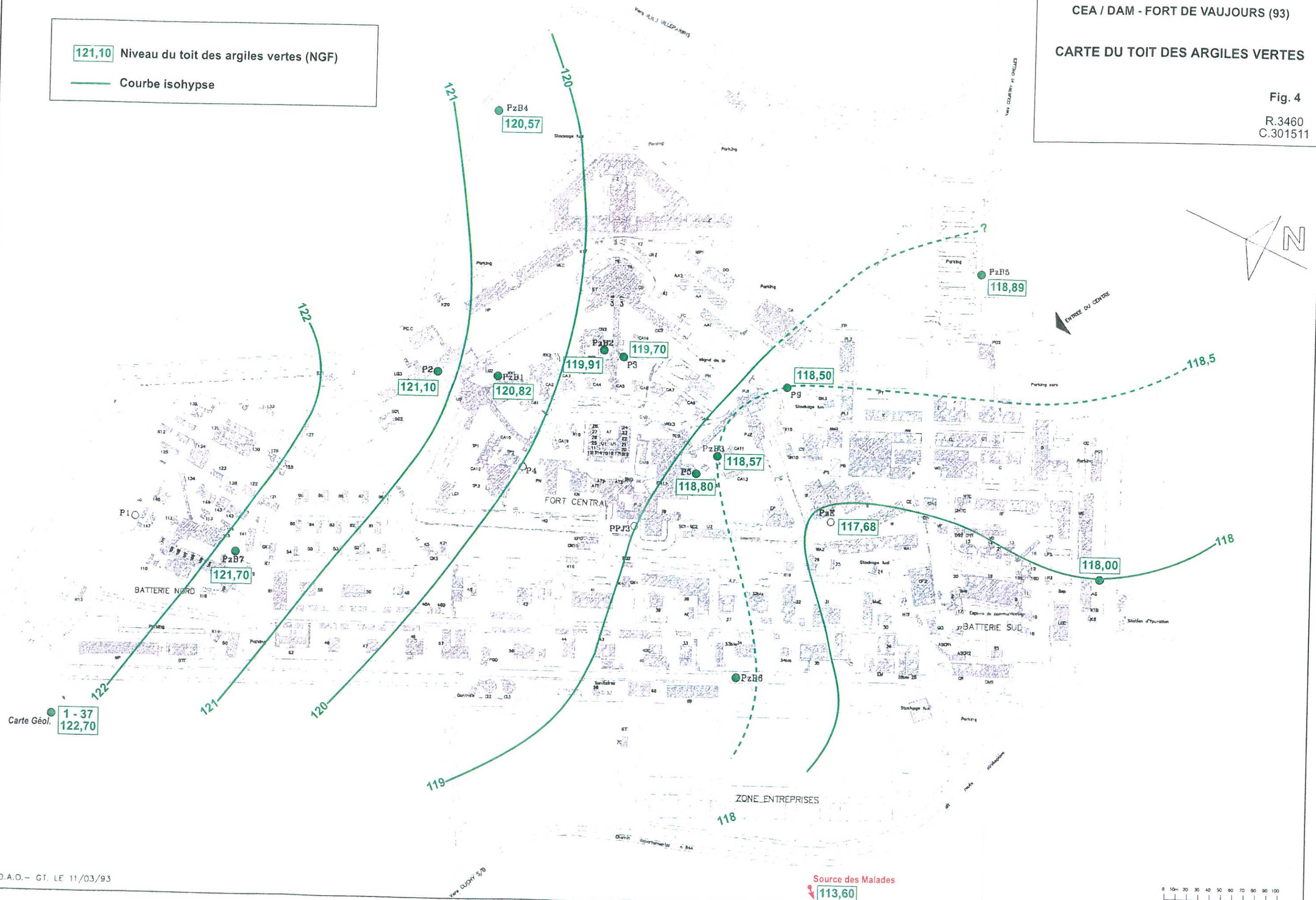


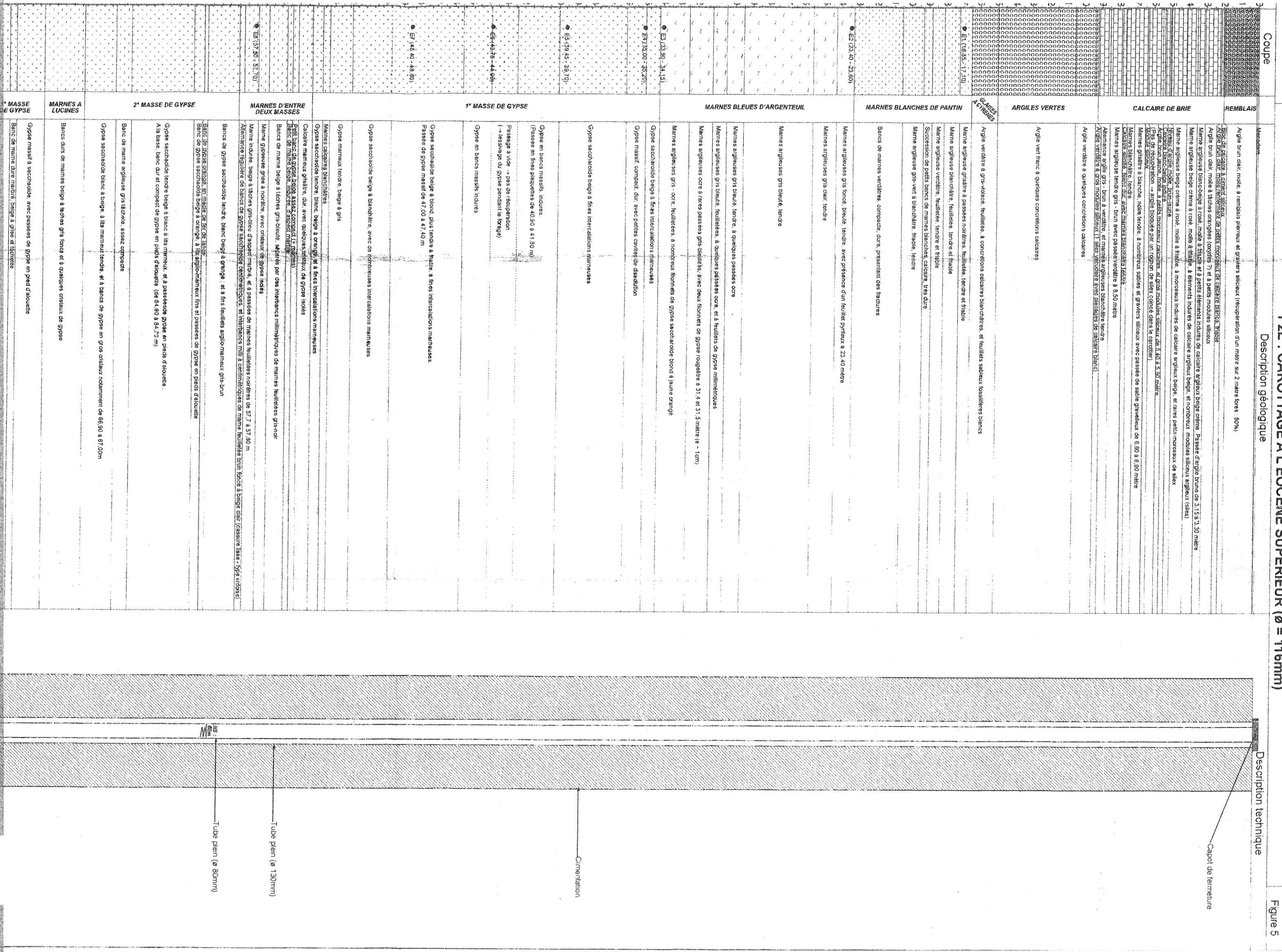
CARTE DU TOIT DES ARGILES VERTES

Fig. 4

R.3460
C.301511

121,10 Niveau du toit des argiles vertes (NGF)
— Courbe isohypse







LE SPÉCIALISTE DE L'ENVIRONNEMENT

**Reconnaissances
hydrogéologiques et
caractérisation
géochimique des roches**



CEA/DAM

**Reconnaitances
hydrogéologiques et
caractérisation
géochimique des roches
et des eaux souterraines.
Rapport d'avancement
Centre d'études de Vaujours**

CEA/DAM

Reconnaitances hydrogéologiques et caractérisation géochimique des
roches et des eaux souterraines
Rapport d'avancement
Centre d'études de Vaujours

Objet de l'indice	Date	Indice	Rédaction		Validation	
			Nom	Signature	Nom	Signature
Rapport provisoire			A. BARITEAU J. M. SCHMITT		D. FOUGEIROL	
		a				
		b				
		c				
		d				

Numéro de rapport :	R.3460
Numéro d'affaire :	A.8314
N° de contrat :	C.301511
Domaine technique :	T03

Rapport établi en collaboration avec Jean Michel SCHMITT du Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris

BURGÉAP
27, rue de Vanves
F-92772 BOULOGNE BILLANCOURT CEDEX
Téléphone 01.46.10.2520 Télécopie : 01.46.10.25.64
e-mail : agence.de.paris@burgeap.fr

R.3460/A.8314/C.301511	
ABu – J.M. SCHMITT - DF	
06/02/02	Page : 2

SOMMAIRE

Avant-propos	7
1. Contexte de l'étude	8
2. Examen de l'état des puits d'infiltration	9
2.1. Rappel des résultats de la synthèse hydrogéologique	9
2.2. Résultats des inspections caméra	9
3. Rappel sur le contexte géologique et hydrogéologique local	10
4. Reconnaissances hydrogéologiques de la nappe du Brie	11
4.1. Implantation et caractéristiques des piézomètres au Brie	11
4.2. Géométrie de l'aquifère du Brie	11
4.3. Piézométrie de la nappe du Brie	12
5. Reconnaissances hydrogéologiques dans les formations infra-sannoisiennes	14
5.1. Implantation et caractéristiques techniques du sondage de reconnaissance aux formations infra-sannoisiennes	14
5.2. Résultats des essais d'infiltration au packer réalisés à diverses profondeurs.	15
5.3. Conclusions sur les caractéristiques hydrogéologiques des masses et marnes de gypse	19
6. Chimie et minéralogie des formations du Sannoisien	20
6.1. Protocole de prélèvement des échantillons de roche	20
6.2. Analyse chimique	20
6.3. Analyse minéralogique	21
6.4. Contenu en uranium	23
7. Chimie des eaux	26
7.1. Sélection des points de prélèvement d'eau	26
7.2. Protocole de prélèvement, de mesures et d'analyse	27
7.3. Résultats des analyses	28
7.4. Conclusion sur la chimie des eaux	34
8. Conclusion	35

FIGURES

Figure 1	Carte d'implantation des puits d'infiltration actuels et implantation approximative des "puits absorbants" d'après le plan de 1877.
Figure 2	Repérage des effondrements et des arrivées d'eau dans les puits d'infiltration – Résultats de l'inspection caméra des puits
Figure 3	Carte de localisation des reconnaissances des formations sannoisiennes
Figure 4	Carte du toit des argiles vertes.
Figure 5	Evolution de la pluviométrie et du niveau piezométrique mesuré dans les piézomètres au Brie au cours du temps.
Figure 6	Esquisse piézométrique de la nappe du Brie au 12/11/01.
Figure 7	Carte de localisation des points de prélèvement des eaux.
Figure 8	Profil chimique des eaux de la nappe du Brie.
Figure 9	Profil chimique des eaux prélevées dans la nappe des colluvions et dans celle de l'Eocène Supérieur.
Figure 10	Relation entre la conductivité des eaux prélevées et leur concentration en sulfate (en rouge les eaux de la nappe du Brie, en vert des eaux de la nappe des colluvions et en bleu les eaux de la nappe de l'Eocène Supérieur).
Figure 11	Relation entre la conductivité mesurée dans la nappe du Brie et son contenu en calcium et carbonate.
Figure 12	Evolution de la concentration en calcium dans la nappe du Brie en fonction de celle en carbonate.
Figure 13	Relation entre la concentration en sulfate dans les eaux prélevées et celle en calcium (en rouge les eaux de la nappe du Brie, en vert des eaux de la nappe des colluvions et en bleu les eaux de la nappe de l'Eocène Supérieur).
Figure 14	Relation entre la concentration des eaux en sulfate et celles en calcium et magnésium non associées au carbonate (en rouge les eaux de la nappe du Brie, en vert des eaux de la nappe des colluvions et en bleu les eaux de la nappe de l'Eocène Supérieur).
Figure 15	Relation entre la concentration des eaux en carbonate et celles en calcium et magnésium non associées au sulfate (en rouge les eaux de la nappe du Brie, en vert des eaux de la nappe des colluvions et en bleu les eaux de la nappe de l'Eocène Supérieur).
Figure 16	Relation entre la concentration des eaux en sulfate et celles en calcium, magnésium et sodium non associées au sulfate et au chlorure dans la nappe du Brie.
Figure 17	Teneur en uranium dans les eaux prélevées
Figure 18	Teneur en uranium dans les eaux prélevées dans la nappe du Brie.
Figure 19	Relation entre la concentration en uranium dans les eaux et le rapport isotopique $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ (en rouge les eaux de la nappe du Brie, en vert des eaux de la nappe des colluvions et en bleu les eaux de la nappe de l'Eocène Supérieur).
Figure 20	Relation entre la teneur en silice et celle en uranium dans les eaux (en rouge les eaux de la nappe du Brie, en vert des eaux de la nappe des colluvions et en bleu les eaux de la nappe de l'Eocène Supérieur).

Tableaux

Tableau 1 : Cotes du toit des argiles vertes reconnues en sondage.

Tableau 2 : Mesures du niveau piézométrique de la nappe du Brie (* niveau d'eau dans les piézomètres juste après leur installation).

Tableau 3 : Description et cote des échantillons prélevés sur la carotte PzB2 pour l'analyse chimique par FX.

Tableau 4 : Analyse chimique par FX des calcaires de Brie et des argiles vertes.

Tableau 5 : Description et cote des échantillons prélevés sur la carotte PzB2 pour l'analyse minéralogique par DRX.

Tableau 6 : Résultats des analyses minéralogiques semi-quantitatives (DRX) sur roche totale des échantillons prélevés sur la carotte B2.

Tableau 7 : Résultats des analyses minéralogiques semi-quantitatives (DRX) de la fraction fine ($<2\mu\text{m}$) des échantillons prélevés sur la carotte B2.

Tableau 8 : Description et cote des échantillons des formations du Sannoisien prélevés pour l'analyse de leur contenu en uranium.

Tableau 9 : Abondance naturelle des différents isotopes de l'uranium et rapports isotopiques naturels (d'après Reimann et de Caritat, 1998).

Tableau 10 : Teneur en l'uranium dans les formations du Sannoisien.

Tableau 11 : Caractéristiques des puits captant la nappe des colluvions à Courtry.

Tableau 12 : Caractéristiques des puits captant la nappe de l'Eocène Supérieur.

Tableau 13 : Analyse des eaux, paramètres analysés, techniques analytiques et limite de quantification.

Tableau 14 : Composition des eaux prélevées dans les différentes nappes au droit et à l'aval du CEV.

Tableau 15 : Etat d'équilibre des eaux issues de la nappe du Brie.

Tableau 16 : Etat d'équilibre des eaux issues de la nappe des colluvions

Tableau 17 : Etat d'équilibre des eaux issues de la nappe des colluvions

Tableau 18 : Résultats des analyses d'uranium effectuées sur les eaux.

ANNEXES

- Annexe 1 - Coupes géologiques et techniques des piézomètres au Brie	40
- Annexe 2 - Pluviométrie à Vaujours et Roissy de septembre à décembre 2001 (Données Météo France)	41
- Annexe 3 - Résultats des essais d'infiltration dans les formations Sannoisiennes et ludiennes	42
- Annexe 4 - Protocole d'analyse du contenu en uranium des formations du Sannoisien	43
- Annexe 5 - Bordereaux d'analyse des eaux	44
- Annexe 6 - Limites d'utilisation des études de pollution du milieu souterrain	45

Avant-propos

Le présent mémoire présente les résultats de reconnaissances hydrogéologiques effectuées durant le dernier trimestre 2001 et ceux de la campagne de mesure et d'analyse des eaux qui s'est déroulée les 19, 20 et 21 novembre 2001.

Cette étude a pour but de mieux comprendre le fonctionnement hydrogéochimique de la butte de Vaujours au droit et aux alentours du centre d'étude CEA de Vaujours

1. Contexte de l'étude

Le Fort de Vaujours, situé en limite du département de la Seine-Saint-Denis (93) et du département de la Seine et Marne (77) sur un promontoire, dit butte d'Aulnay, qui domine au nord le canal de l'Ourcq et au sud la vallée de la Marne, a été utilisé de 1955 jusque dans les années 1990 comme site d'étude et de recherche du CEA sur les poudres et explosifs. Durant certaines de ces expérimentations, de l'uranium métal (appauvri et/ou naturel), a y été utilisé. Le centre a été définitivement fermé le 31 décembre 1997. Cette fermeture s'est accompagnée du démantèlement des installations et de l'assainissement du site (anonymes, 1998a).

La commission chargée de l'enquête publique demandée par le préfet de Seine et Marne, pour l'instauration de servitudes d'utilité publique faisant suite à la demande d'abandon du site de Vaujours par le CEA, a demandé la réalisation des compléments d'études suivants :

- une étude hydrogéologique détaillée,
- l'étude de la migration de l'uranium dans le sous-sol,
- l'évaluation des risques sanitaires potentiels liés à l'ancienne activité du site et à la pollution résiduelle actuelle.

Dans un premier temps, BURGEAP a réalisé une synthèse documentaire complétée par des observations de terrain (BURGEAP, 2001) qui a permis de rassembler les informations disponibles sur :

- l'historique du site et l'utilisation de l'uranium sur le site,
- le fonctionnement hydraulique du site (quantification des flux d'eau entrant et sortant),
- le contexte géologique et hydrogéologique local et régional
- l'utilisation de l'eau et l'identification des points d'eau pouvant s'avérer utiles dans la suite de l'étude.

Dans un second temps, le CEA/DAM a confié à BURGEAP la réalisation de reconnaissances hydrogéologiques, afin de lever les indéterminations restant sur le fonctionnement hydraulique du milieu souterrain, et la caractérisation géochimique des eaux et des roches au droit et à l'aval du Centre d'étude de Vaujours, afin de repérer une éventuelle contamination du sous-sol par de l'uranium et d'étudier les conditions de sa migration dans le milieu naturel.

Le présent rapport, qui est un rapport d'avancement, rassemble les données recueillies le terrain et au laboratoire de septembre à décembre 2001 sur, c'est-à-dire sur l'état des puits d'infiltration, la piézométrie de la nappe du Brie, les propriétés hydrauliques des formations infra-sannoisiennes, la chimie et la minéralogie des formations sannoisiennes (calcaire de Brie et argiles vertes) et la chimie des nappes présentes au droit et à l'aval du site. A l'issue du forage à l'Eocène Supérieur en cours de réalisation dans l'enceinte du CEV et de la seconde campagne de prélèvement d'eau, un second rapport sera rédigé ; il synthétisera l'ensemble des données géochimiques et hydrogéologiques recueillies au cours de cette étude et en donnera une interprétation.

2. Examen de l'état des puits d'infiltration

2.1. Rappel des résultats de la synthèse hydrogéologique

Les documents en date de la construction du fort et les documents récents ont permis de comprendre le fonctionnement hydraulique du CEV (BURGÉAP, 2001). Dès sa construction, le Fort de Vaujours a été équipé d'un système de drainage des eaux de pluie et des eaux de la nappe perchée du Brie qui comprenait sept puits d'infiltration, profonds d'environ 35 mètres qui atteignaient le gypse.

Actuellement, seuls cinq fonctionnent dont un (P1) refait en 1985. Les trois autres, dont un refait en 1989, sont partiellement ou totalement éboulés et n'assurent plus l'évacuation des eaux (figure 1). Ces éboulements sont dus à la formation de poches de dissolution dans le gypse, roche très soluble. Lors du fonctionnement du CEV, ces puits évacuaient aussi les eaux de lavage des chambres de tir. Ceci implique que des eaux potentiellement chargées en uranium aient pu atteindre le gypse. Il sera donc nécessaire de comprendre le cheminement des eaux dans le gypse (Cf. § 5).

Au vu des éboulements observés, il est apparu nécessaire de vérifier l'état des puits afin de savoir si des poches de dissolution s'étaient formées au droit des puits.

2.2. Résultats des inspections caméra

Une inspection caméra des puits en fonctionnement a donc été effectuée début septembre. Cette inspection a aussi permis de localiser les venues d'eau, de vérifier l'existence de départ des galeries de fond qui sont indiquées sur les documents relatifs à la construction des puits (figure 2). Les enregistrements sont consignés sur cinq cassettes vidéo (une par puits) qui ont été visionnées par l'expert hydrogéologue. Un extrait didactique de ces cassettes a été présenté au groupe de travail le 25 octobre 2001 et en commission plénière le 2 novembre 2001.

Cette inspection a montré que, sur les quatre puits d'origine en fonctionnement (P2, P3, P4 et P5), la base des cuvelages était effondrée, les pierres de tailles du cuvelage éboulées remplissant partiellement la cavité formée par dissolution à la base des puits. Toutefois, ces cavités apparaissent de relativement faibles dimensions ($< 10 \text{ m}^3$) à la verticale des puits. Cette inspection a aussi montré qu'il n'y avait pas ou peu d'eau au fond des puits, ce qui implique que les eaux s'infiltraient très rapidement.

Le puits P2 a été équipé le 13/12/2001 d'un capteur/enregistreur de pression qui permettra de préciser, à titre d'exemple, les variations du niveau d'eau dans le puits. Ces variations seront rapportées à la pluviométrie quotidienne.

3. Rappel sur le contexte géologique et hydrogéologique local

Le contexte géologique et hydrogéologique du site a été étudié dans le détail lors de la synthèse documentaire (BURGÉAP, 2001). Seules les principales caractéristiques sont ici rappelées.

Au droit du site, les formations rencontrées du sommet vers la base sont (Caudron et Labourguigne, 1971) :

- les calcaires de Brie et les marnes vertes (Sannoisien),
- les marnes supragypseuses, marnes blanches de Patin et Marnes Bleues d'Argenteuil (Ludien Supérieur),
- les trois masses de gypse séparées par des niveaux marneux (Ludien),
- les marnes à Pholadomyes (Ludien Inférieur),
- la quatrième masse de gypse (Bartonien)
- les sables de Monceau, les calcaires de Saint Ouen et les sables de Beauchamp (Eocène supérieur, Bartonien).

Les versants et la base de la butte d'Aulnay sont recouverts par des colluvions marno-gypseuses, formées aux dépens des formations supragypseuses et du gypse. Leur épaisseur peut dépasser 10 mètres.

Les calcaires de Brie renferment la première nappe rencontrée au droit du site. C'est une nappe perchée alimentée par la pluie qui s'écoule vers le sud par des sources et des écoulements hypodermiques au travers des colluvions qui recouvrent les versants de la butte.

Les sables de Monceau, les calcaires de Saint Ouen et les sables de Beauchamp forment l'aquifère de l'Eocène supérieur qui contient la première nappe pérenne et importante au droit du site. Cette nappe, tantôt libre tantôt semi-captive, s'écoule vers la Marne.

Ces deux nappes sont naturellement séparées par les argiles vertes, les marnes supragypseuses et les masses et marnes du gypse ; ces trois niveaux sont des horizons très peu perméables.

Sur les flancs sud de la butte, les colluvions marno-gypseuses sont aussi le siège d'une nappe superficielle atteinte par quelques puits de particuliers sur la commune de Courtry située en contre bas du Centre d'études de Vaujours.

4. Reconnaissances hydrogéologiques de la nappe du Brie

A l'issue de la synthèse documentaire, les données disponibles sur la piézométrie de la nappe du Brie étaient insuffisantes en nombre et en qualité pour lever les indéterminations sur l'écoulement de cette nappe et caractériser la géométrie du réservoir, en particulier celle de son substratum, les argiles vertes.

Aussi, sept piézomètres au Brie ont été réalisés dans l'enceinte de CEV afin de disposer de données fiables sur les écoulements naturels et sur la géométrie du réservoir, en particulier sur la cote du toit des argiles vertes.

Toutefois, l'implantation de ces piézomètres, c.-à-d. celle des sondages et carottages, devait tenir compte de différents objectifs. Ces reconnaissances devaient tout à la fois permettre de lever les indéterminations sur les écoulements, donc de disposer de deux profils piézométriques quasi-orthogonaux, et servir à caractériser le marquage éventuel du sous-sol du Fort par l'uranium et la migration de ce dernier à travers les différentes formations formant la butte d'Aulnay, donc être situées à l'aplomb ou à l'aval de zones polluées ou ayant été polluées en surface et permettre l'échantillonnage des eaux.

4.1. Implantation et caractéristiques des piézomètres au Brie

Pour tenir compte de l'ensemble de ces contraintes, trois carottages ont été réalisés dans le Fort Central, le premier B1 dans la zone comprise entre RX1 et LG2, le second B2 à proximité de CA14, le dernier B3 à proximité de RX3.

Afin de disposer d'un profil piézométrique NE-SW et d'un autre NW-SE, les sondages en destructif réalisés hors Fort Central ont été implantés l'un au Nord du site en contrebas d'un ancien stockage de fuel (B4), le second sur le parking situé à droite de l'entrée du CEV (B5), le troisième devant le bâtiment 34 (B6), le dernier entre les bâtiments 115, 141 et 114 (B7) (figures 3).

Les carottages comme les sondages en destructif ont été prolongés de 1 mètre dans les argiles vertes afin de disposer de données fiables sur la cote du toit de cette formation et de pouvoir caractériser cet horizon, en particulier sa teneur en uranium. Ce dernier mètre a ensuite été rebouché à l'aide d'argiles gonflantes type "sobranite". Les forages ont été équipés en piézomètre, PzB1, PzB2, PzB3, PzB4, PzB5, PzB6 et PzB7, avec un tubage PVC vissé, de diamètre intérieur 80 mm, crépiné sur la hauteur du calcaire de Brie en laissant au minimum 1 mètre de tube plein en tête. Les coupes géologiques et techniques sont données en annexe 1. Ces ouvrages ont été nivelés.

4.2. Géométrie de l'aquifère du Brie

Les forages au Brie ont permis de recueillir de nouvelles données sur la cote du toit des argiles vertes au droit du CEV (tableau 1). Ces données sont en accord avec celles disponibles sur la carte géologique (Caudron et Labourguigne, 1971) et sur les coupes des puits de 1877 (*in* BURGÉAP, 2001). Les nouvelles données confirment que les argiles vertes pendent globalement vers le Sud (figure 4). Leur cote est supérieure à 122 m NGF à l'extrémité nord du CEV et est voisine de 118 m NGF à l'extrémité sud.

Tableau 1 : Cotes du toit des argiles vertes reconnues en sondage.

	PzB1	PzB2	PzB3	PzB4	PzB5	PzB6	PzB7
	cote m NGF						
Sol ($\pm 0,02$)	129,72	127,11	127,47	124,97	123,89	126,62	124,70
toit des argiles vertes ($\pm 0,03$)	120,82	119,91	118,57	120,57	118,89	118,62	121,70

4.3. Piézométrie de la nappe du Brie

Le niveau de l'eau dans les piézomètres au Brie a été régulièrement suivi au cours des mois de septembre, octobre et novembre (tableau 2). Des capteurs de pressions suivent en continu les fluctuations du niveau d'eau dans les piézomètres PzB1, PzB2, PzB5 et PzB6 depuis le 13/12/01.

Tableau 2 : Mesures du niveau piézométrique de la nappe du Brie (* niveau d'eau dans les piézomètres juste après leur installation).

	PzB1	PzB2	PzB3	PzB4	PzB5	PzB6	PzB7
	cote m NGF						
Soi	129.72	127.11	127.47	124.97	123.89	126.62	124.7
Fond	121.19	120.04	118.58	119.78	119.02	119.05	121.53
NS le 17/09*	125.39	123.68	120.93	119.87	119.75	121.05	SEC
NS le 20/09	122.65	122.18	120.955	119.93	119.7	121.09	SEC
NS le 24/09	122.24	121.77	120.97	120.02	119.77	121.12	121.92
NS le 26/09	122.09	121.65	120.96	120.03	119.75	121.11	121.92
NS le 28/09	122.03	121.58	120.97	120.06	119.76	121.12	122.26
NS le 09/10	121.93	121.42	121.00	120.22	119.91	121.18	122.49
NS le 10/10	121.90	121.43	121.00	120.23	119.90	121.17	122.44
Piezomètres purgés le 10/10/01							
NS le 12/10	121.69	120.59	120.99	119.975	119.87	121.17	121.80
NS le 16/10	121.68	121.03	120.96	120.09	119.83	121.12	121.81
NS le 31/10	121.88	121.45	121.06	120.51	120.02	121.27	122.56
NS le 12/11	121.72	121.42	121.05	120.88	119.94	121.22	122.49
Piezomètres purgés le 12/11/01							
NS le 19/11	121.61	121.31	121.04	120.75	119.91	121.18	122.59

Fluctuation de la nappe du Brie :

Ces mesures sont reportées sur la figure 5 qui appelle les commentaires suivants :

- les piézomètres PzB1, PzB2, PzB7 montrent une lente mise à l'équilibre dans la période du 17 septembre au 10 octobre.
- Les ruptures des tracés piézométriques des 10 octobre et 12 novembre correspondent à deux purges avant les mesures physico-chimiques du 16 octobre et les prélèvements de novembre.

Hormis ces anomalies, le suivi réalisé permet de comparer les variations de la piézométrie de la nappe dans le temps à la pluviométrie (figure 5). On voit que :

- les pluies de la période du 17 septembre au 10 octobre se traduisent par une remontée des niveaux sur les piézomètres PzB4, PzB5, PzB6 de 0,12 à 0,35 m,
- les pluies de la période du 21 au 31 octobre se traduisent par une remontée des niveaux sur les piézomètres PzB1, PzB2, PzB4, PzB5, PzB6, PzB7 de 0,10 à 0,75 m,
- les pluies de la période du 20 novembre au 10 décembre se traduisent par une remontée des niveaux sur les piézomètres PzB1, PzB2, PzB5, PzB6 de 0,2 m (valeur approximative).
- Le niveau sur le piézomètre PzB3 varie très peu au cours de toute la période (17 septembre au 20 novembre) : il semble subir plus que les autres piézomètres l'effet de stabilisation piézométrique dû au drainage du fort central par les puits d'infiltration (notamment par le P5) : cette conclusion provisoire sera à vérifier lorsqu'on disposera d'une période plus longue d'observation.

Nous avons reporté sur la figure 5 les données pluviométriques des stations Météo France de Vaujours et de Roissy afin de les comparer puisque les données relatives à la station de Vaujours sont moins complètes que

celles de Roissy. Les données journalières des deux stations sont similaires ce qui nous autorise en cas de besoin à utiliser les données provenant de la station de Roissy.

Cartographie de la piézométrie de la nappe du Brie :

Les données mesurées le 12 novembre, avant d'effectuer la purge des piézomètres pour prélèvements, ont permis de tracer une piézométrie de la nappe du Brie en début de période de remontée de la nappe (figure 2). Cette piézométrie confirme, en la précisant, l'esquisse piézométrique tracée dans le rapport de synthèse hydrogéologique (BURGEAP, 2001). On voit que la nappe s'écoule principalement vers le Sud. Un écoulement peut aussi avoir lieu vers l'ouest (des piézomètres PzB1 ou PzB2 vers PzB4) : il s'agit toutefois d'un faible écoulement, car il concerne une très faible surface aquifère, et se situe dans un secteur où la nappe a une faible épaisseur (30 cm au PzB4).

Ces reconnaissances confirment que la nappe du Brie est de très faible puissance ; la puissance maximale mesurée est voisine de 2,5 mètres. Le temps de mise en eaux des piézomètres et leur purge du 10 octobre 2001 montrent aussi que la mise en équilibre des niveaux est lente, donc que la productivité de la nappe est faible.

5. Reconnaissances hydrogéologiques dans les formations infra-sannoisiennes

5.1. Implantation et caractéristiques techniques du sondage de reconnaissance aux formations infra-sannoisiennes

Pour reconnaître les formations infra-sannoisiennes, un sondage de reconnaissance, dénommé PzE, a été implanté sur le site de Vaujourn (figure 3). L'objectif de ce sondage est de préciser :

- la nature et l'épaisseur des formations géologiques situées sous les argiles vertes au droit du site de Vaujourn en allant jusqu'à la formation des sables de Beauchamp (Eocène supérieur) qui contient la première nappe d'extension régionale que l'on rencontre sous les argiles vertes,
- la pression hydrostatique de la nappe des sables de Beauchamp, ainsi que la qualité de l'eau de cette nappe, notamment sa teneur en uranium,
- la minéralogie, la géochimie et les caractéristiques hydrogéologiques des formations situées entre les argiles vertes et l'aquifère de l'Eocène supérieur, c'est à dire les masses et marnes du gypse.

Le sondage PZE a été implanté en concertation avec l'expert hydrogéologue sur le site de Vaujourn, du côté sud du fort central, c'est à dire à l'aval hydraulique des infiltrations se produisant dans le fort central (figure 3) afin de pouvoir caractériser l'impact de ces infiltrations sur le milieu souterrain situé immédiatement à l'aval.

Réalisation du sondage :

Le sondage était prévu en carottage jusqu' dans les sables de Beauchamp, avec une profondeur indicative de l'ordre de 90 m. Toutefois, au vu de la coupe géologique établie au fur et à mesure de l'avancement de la foration, il est apparu que les formations rencontrées au PzE sont plus épaisses que prévu, et que le sondage devait être poursuivi au delà de 90 m. Pour prendre en compte cette contrainte, tout en cherchant à optimiser le coût global des reconnaissances, il a été convenu en accord avec l'expert hydrogéologue de poursuivre le sondage au delà de 90 m en destructif au rotary à la boue (technique nettement moins onéreuse que le carottage) et de pénétrer de quelques mètres dans les sables de Beauchamp. Cette modalité permet de disposer d'un carottage des formations sommitales de l'Eocène supérieur sur plus d'une quinzaine de mètres, et de réaliser la prise de pression et la prise d'échantillon dans l'aquifère de l'Eocène supérieur.

Des essais d'infiltration au packer ont été réalisés à l'avancement pour tester la perméabilité des horizons suivants : marnes supra-gypseuses, 1ère masse de gypse, marnes d'entre deux masses, 2ème masse de gypse. Les résultats sont fournis au paragraphe 5.2.

Equipement du forage :

pour isoler l'aquifère de l'Eocène supérieur et éviter sa contamination par des eaux venant des horizons supérieurs, le sondage a été carotté dans un premier temps jusqu'au sommet des sables de Monceau rencontré à 78 m (base de la 4ème masse de gypse), puis réalésé jusqu'à cette cote et tubé avec cimentation étanche du tubage.

Le sondage a ensuite été poursuivi en carottage jusqu'à 90m, puis en destructif jusqu'à 101 m, soit une pénétration de 6 mètres dans les Sables de Beauchamp rencontrés à 95 m ; le sondage a ensuite été équipé en piézomètre avec un tube crépiné de 80 mm de 78 à 100 m de profondeur surmonté par un tube plein jusqu'à la surface. L'espace annulaire a été rempli avec du gravier filtre jusqu'à 78 m et cimenté en tête. Le piézomètre est fermé par un capot.

La coupe détaillée (annexe3) sera complétée après examen des carottes en cours à la date d'édition du rapport.

5.2. Résultats des essais d'infiltration au packer réalisés à diverses profondeurs.

Au cours de la foration des masses et marnes du gypse, trois essais d'infiltration au packer ont été réalisés. Les résultats (annexe 3) sont commentés ci-après.

5.21. Essai au packer n°1 à la base des argiles vertes.

a) Conditions d'essai :

- Date de l'essai : 9 et 10/10/2001
- Cote d'arrêt de la foration lors de l'essai : 53,50 m sous le sol (base de la première masse de gypse)
- Cote d'installation du packer : 16 m sous le sol (base des argiles vertes)
- Temps d'observation après remplissage du trou à l'eau : 48 heures

Niveaux géologiques testés lors de l'essai d'infiltration :

- espace annulaire supérieur (au dessus du packer) : calcaire de Brie et argiles vertes
- trou nu au dessous du packer : 1^{ère} masse de gypse et marnes supra gypseuses

b) Résultats :

b1 Observation des évolutions dans l'espace annulaire supérieur (au dessus du packer) :

- baisse du niveau d'eau en début d'essai ($\sim 1,5$ m/h), s'amortissant progressivement pour atteindre une cote d'équilibre avec le niveau de la nappe du Brie (5,90 m sous le sol) au bout de 23h30. Cette cote d'équilibre se maintient ensuite pendant les 25 dernières heures de l'essai ;
- volume d'eau absorbé : 44 litres en 23h30, soit en moyenne 2 litres/heure, variant de 11 litres/heure au début de l'essai (1^{ère} heure) à un débit nul pendant les 25 dernières heures d'observation (niveau stabilisé).

b2 Observation des évolutions dans le trou nu sous le packer :

- baisse de niveau similaire à celle de l'espace annulaire supérieur en début d'essai ($\sim 1,5$ m/h), puis se ralentissant pour atteindre une vitesse constante (0,08m/h) au bout de 5h30, vitesse qui se maintient pendant les 42h30 qui suivent jusqu' à la fin d'essai (niveau non stabilisé vers 9m 30 sous le sol en fin d'essai) ;
- volume d'eau absorbé : 7,8 litres en 48 heures, soit en moyenne 0,16 litre/heure, variant de 1,4 litre/heure au début de l'essai (1^{ère} heure) à 0,065 litre/heure valeur restant constante pendant les 42 heures précédant la fin de l'essai (niveau non stabilisé).

On déduit de ces observations les conclusions partielles suivantes :

- a) la stabilisation du niveau dans l'espace annulaire au dessus du packer en équilibre avec la nappe du Brie est logique et témoigne d'une bonne étanchéité du packer. Cette observation est confirmée par le fait que l'on n'observe pas de différence d'évolution des niveaux d'eau selon que la différence de pression entre l'annulaire au dessus du packer et le trou nu sous le packer est positive ou négative ;
- b) la baisse linéaire du niveau d'eau dans le trou nu sous le packer, qui prend un régime constant à partir de 20 000 secondes (5h1/2) correspond à une faible absorption d'eau (0,065 litre/heure)

par l'ensemble des formations sous-jacentes constituées par les marnes supra gypseuses et la première masse de gypse.

L'essai ne permet pas de dire au bout de combien de temps et à quel niveau s'établit le niveau (pression) d'équilibre de cet ensemble de formations, si ce n'est que ce niveau est à plus de 9,3 m sous le sol.

5.22. Essai au packer n°2 à la base de la première masse de gypse.

a) Conditions d'essai :

- Date de l'essai : 11 et 12/10/2001
- Cote d'arrêt de la foration lors de l'essai : 53,50 m sous le sol (base de la première masse de gypse)
- Cote d'installation du packer : 34 m sous le sol (base des marnes supra gypseuses)
- Temps d'observation après remplissage du trou à l'eau : 28h30.

Niveaux géologiques testés lors de l'essai d'infiltration :

- espace annulaire supérieur (au dessus du packer) : calcaire de Brie, argiles vertes et marnes supra gypseuses
- trous nu au dessous du packer : 1^{ère} masse de gypse

b) Résultats :

b1 Observation des évolutions dans l'espace annulaire supérieur (au dessus du packer) :

- l'évolution observée est identique (à la précision des mesures près) à celle observée au cours de l'essai n°1 : baisse du niveau d'eau en début d'essai (~1,5 m/h), s'amortissant progressivement pour atteindre une cote d'équilibre avec le niveau de la nappe du Brie (6,0 m sous le sol) au bout de 23 heures. Cette cote d'équilibre se maintient ensuite pendant les 5h30 qui suivent jusqu'à la fin de l'essai ;
- volume d'eau absorbé : 45 litres en 23 heures, soit environ 2 litres/heure en moyenne, variant de 11 litres/heure au début de l'essai (1^{ère} heure) à un débit nul pendant les 5 dernières heures d'observation (niveau stabilisé).

b2 Observation des évolutions dans le trou nu sous le packer :

- baisse de niveau plus rapide que celle observée dans l'espace annulaire, et cela dès le début de l'essai (baisse de 9m/h au cours de la première heure) ; cette baisse s'amortit progressivement, puis brusquement le niveau se stabilise à 13,5m sous le sol pendant 1h20 mn (7000 à 10000 secondes) ; puis le niveau se met à remonter doucement de 4,30 m en 24 heures sans se stabiliser ;
- volume d'eau absorbé à la descente du niveau d'eau : 11 litres en 2 heures, soit 5,5 litres/heure, variant de 7,4 litre/heure au début de l'essai (1^{ère} heure) à 3,9 litre/heure au cours de la deuxième heure ;
- volume d'eau restitué vers le sondage à la remontée : 3,4 litres en 24 heures, soit 0,14 litres/heure.

On déduit de ces observations les conclusions partielles suivantes :

- a) la stabilisation du niveau dans l'espace annulaire au dessus du packer en équilibre avec la nappe du Brie s'établissant de la même façon et à la même cote que lors de l'essai 1, on en déduit que les marnes supragypseuses qui sont testées en même temps que le Brie dans ce deuxième essai n'absorbent pas d'eau (en tous cas pas de façon mesurable) ;
- b) le fait que le niveau d'eau dans le trou nu sous le packer baisse sensiblement plus vite et jusqu'à une cote inférieure dans le 2^{ème} essai indique que la pression d'eau d'équilibre (si elle existe) dans la 1^{ère} masse de gypse est inférieure à celle des marnes supra-gypseuses (ce qui est logique dans un contexte de flux d'eau descendant). Il est même possible, sinon fortement probable, que cette pression soit nulle, c'est à dire que la première masse de gypse soit complètement dénoyée et que ses vides interconnectés soient en équilibre avec la pression atmosphérique ;
- c) la stabilisation brusque du niveau pourrait indiquer qu'un vide du gypse non interconnecté avec d'autres vides a été rempli lors de la descente rapide du niveau d'eau (apport de 11 litres environ) ;
- d) quant à la remontée du niveau d'eau après stabilisation, on ne voit pas d'autre explication logique qu'une fuite du packer apportant de l'eau depuis l'aquifère du Brie via l'annulaire supérieur vers le trou nu sous le packer. Cette fuite se produirait au débit de 0,14 l/h, valeur qui s'avèrerait supérieure à la capacité d'absorption de la 1^{ère} masse de gypse au droit du PZE puisque le niveau d'eau remonte dans le piézomètre. En revanche cette faible fuite au droit du packer n'empêche pas la mise en équilibre du niveau dans l'espace annulaire supérieur, si ce n'est que le niveau dans cet annulaire supérieur s'établirait dans cette hypothèse quelques millimètres ou dizaines de millimètres plus bas que le niveau d'équilibre naturel de la nappe du Brie aux environs immédiats du sondage ;
- e) on déduit des observations c) et d) que la première masse de gypse n'absorbe pratiquement pas d'eau (ou alors un débit extrêmement faible et non mesurable) au droit du sondage PZE, sauf pendant le remplissage temporaire d'un vide de petite dimension (quelques dm³).

5.23. Essai au packer n°3 à la base des marnes d'entre deux masses.

a) Conditions d'essai :

- Date de l'essai : 8 et 9 novembre 2001
- Cote d'arrêt de la foration lors de l'essai : 67 m sous le sol (base de la deuxième masse de gypse)
- Cote d'installation du packer : 58 m sous le sol (base des marnes d'entre deux masses)
- Temps d'observation après remplissage du trou à l'eau : 27h30.

Niveaux géologiques testés lors de l'essai d'infiltration :

- espace annulaire supérieur (au dessus du packer) : calcaire de Brie, argiles vertes, marnes supra gypseuses, 1^{ère} masse de gypse, marnes d'entre deux masses
- trous nu au dessous du packer : 2^{ème} masse de gypse

b) Résultats :

b1 Observation des évolutions dans l'espace annulaire supérieur (au dessus du packer) :

- l'évolution observée est légèrement différente de celle observée au cours des essais n°1 et 2 : la baisse du niveau d'eau en début d'essai est plus lente (~0,65 m/h au lieu de 1,4 à 12,7 m/h). Toutefois cette baisse, s'amortit progressivement comme dans les essais 1 et 2 pour atteindre une cote de « quasi-équilibre » avec le niveau de la nappe du Brie (5,75 m sous le sol) au bout de 27 heures. Même si l'équilibre n'est pas tout à fait atteint, on remarque que la cote de « quasi-

équilibre » est légèrement supérieure (de 15 à 25 cm) à celle observée lors des essais 1 et 2 des 9 au 12 octobre : cela est dû à une légère remontée de la nappe du Brie observée sur tous les piézomètres du site de Vaujours liée à la pluviométrie de la période du 16 au 26 octobre (figure 5);

- volume d'eau absorbé : 43 litres en 27 heures (très voisin des volumes observés sur les essais 1 et 2 soit environ 1,6 litres/heure en moyenne, variant de 5 litres/heure au début de l'essai (1^{ère} heure) à un débit quasi-nul pendant la dernière heure d'observation (niveau quasi-stabilisé).

b2 Observation des évolutions dans le trou nu sous le packer :

- baisse de niveau beaucoup plus rapide que celle observée dans l'espace annulaire lors de essais 1 et 2, et cela dès le début de l'essai (baisse de 13,5 m/h au cours des deux premières heures) ; cette baisse se ralentit brusquement à partir de 27 m sous le sol, pour passer à 0,4 m/h pendant 4 heures (120 à 15 000 secondes) ; puis la baisse de niveau se ralentit encore pour passer à 0,3 m/h pendant les 21 heures suivantes, pour atteindre un niveau de pseudo-équilibre vers 36,3 m sous le sol (non totalement stabilisé cependant) ;
- volume d'eau absorbé : 29 litres en 27h30 heures, soit 1 litre/heure en moyenne, variant de 11 litres/heure au début de l'essai (deux premières heures) pour atteindre moins de 0,05 litre/heure en fin d'essai ;

On déduit de ces observations les conclusions partielles suivantes :

- a) le niveau dans l'espace annulaire au dessus du packer s'établissant en équilibre avec la nappe du Brie comme pour les essais 1 et 2, on en déduit que les marnes supragypseuses, la première masse de gypse, et les marnes infragypseuses qui sont testées en même temps que le Brie dans ce troisième essai n'absorbent quasiment pas d'eau (en tous cas pas de façon mesurable), ce qui confirme les résultats des deux premiers essais ;
- b) le fait que le niveau d'eau dans le trou nu sous le packer baisse encore plus vite que dans le 2^{ème} essai et jusqu'à une cote nettement inférieure indique que le niveau d'eau d'équilibre dans la 2^{ème} masse de gypse s'établit à plus de 36 m sous le sol (donc à une cote inférieure à 90 IGN69) ;
- c) la stabilisation brusque du niveau pourrait indiquer comme dans le cas de l'essai 2 qu'un vide dans la 2^{ème} masse de gypse a été rempli lors de la descente rapide du niveau d'eau (apport de 21 litres environ) ;
- d) quant à la lente vidange de fin d'essai (décroissance de la vitesse de descente de 0,4 m/h à 0,05 m/h), elle correspondrait à une lente évacuation de l'eau dans la deuxième masse de gypse, phénomène qui semble s'amortir progressivement dans le temps.
- e) on déduit des observations c) et d) que la deuxième masse de gypse a une capacité d'absorption faible mais qui n'est pas saturée en fin d'essai au droit du forage PZE. On ne peut toutefois déterminer au vu de ce simple essai, si la baisse de niveau observée en fin d'essai caractérise le remplissage d'un vide isolé, ou s'il s'agit d'une percolation au travers d'un réseau de vides interconnectés entre eux, et tendant vers la pression d'équilibre de la formation. Il faudrait disposer pour cela d'un essai de beaucoup plus longue durée..

5.3. Conclusions sur les caractéristiques hydrogéologiques des masses et marnes de gypse

Les principaux enseignements tirés de ces essais sont récapitulés dans le tableau suivant :

Résultats synthétiques des essais au packer sur le piézomètre PZE

Formations testées	Eau infiltrée	Débit d'infiltr. en fin d'essai	Charge hydraulique moyenne au sommet de la formation	Linéaire de forage concerné par l'infiltration	Débit spécifique par mètre de charge et par mètre linéaire	Cote du niveau d'équilibre	Commentaires
	(l)	l/h	(m)	(m)	(m ³ /h/m/ml)	(m IGN69)	
Brie	44	0	Sans signification				
Argiles vertes	~0 (non mesurable)	~0	6	7	0	~121	
Marnes supra gypseuses	~0 (non mesurable)	~0	13	17	0	<117,6	
1^{ère} masse de gypse	8	<0,065	31	~20	<10 ⁻⁷	~114 ?	Remplissage d'un vide isolé
Marnes d'entre deux masses	~0	0	49,5	5	0	?	
2^{ème} masse de gypse	29	0,05	40	9	<1,4 10 ⁻⁷	<90,4	Remplissage d'un vide (connexion existante ou non avec un réseau d'écoulement)

L'examen du tableau amène les commentaires suivants :

- 1) Les argiles vertes, les marnes supra-gypseuses et les marnes d'entre deux masses ont une capacité d'absorption quasi-nulle non mesurable par essais au packer avec mise en charge pendant 24 à 48 heures
- 2) La première masse de gypse a une capacité d'infiltration quasi-nulle au droit du PZE, sauf pendant le remplissage d'un vide isolé de petite dimension (quelques dm³)
- 3) La deuxième masse de gypse a une capacité d'infiltration très faible au droit du PZE, inférieure à <1,4 10⁻⁷ m³/h/m par ml de forage. Une indétermination subsiste toutefois pour savoir s'il s'agit d'un remplissage temporaire d'un vide isolé, ou s'il s'agit d'un débit de percolation au sein d'un réseau d'écoulement interconnecté de très faible perméabilité.
- 4) La pression d'équilibre au sein des formations sous-jacentes aux argiles vertes, que l'on ne détermine pas car les évolutions ne sont pas stabilisées en fin d'essais, semble bien décroître avec la profondeur des formations : ceci est cohérent avec le schéma hydrogéologique selon lequel les formations des masses et marnes du gypse sont latéralement (en pied de butte) en contact avec le milieu extérieur à une cote inférieure à 90IGN69.

En conclusion, ces essais d'infiltration montrent que les formations sous-jacentes aux calcaires de Brie ont une perméabilité extrêmement faible. Ces résultats confirment que les percolations d'eau atteignant naturellement les masses de gypse sont quasi-nulles comme indiqué dans le rapport de synthèse de septembre 2001 (BURGEAP, 2001).

6. Chimie et minéralogie des formations du Sannoisien

Le forage de chaque piézomètre, en destructif ou en carottage, a donné lieu à une description des terrains rencontrés (plus ou moins précise en fonction de la technique de forage). Ces descriptions sont reportées sur les coupes (annexe 1).

Au vu des cuttings et des carottes, il apparaît que les calcaires de Brie sont très altérés ; ils présentent souvent un faciès très argileux et les niveaux silicifiés sont fréquents. Les calcaires de Brie forment un niveau assez hétérogène. Les argiles vertes apparaissent elles assez homogènes mais souvent granuleuses, dans leur partie sommitale du moins, qui a seule été observée. Pour caractériser plus finement ces formations, des analyses chimiques et minéralogiques ont été effectuées sur les carottes récupérées lors du forage des piézomètres.

6.1. Protocole de prélèvement des échantillons de roche

Les trois carottages réalisés dans le Fort Central (B1, B2 et B3) permettent de disposer d'échantillons de roche non remaniée en vu d'analyses chimiques et minéralogiques.

Pour l'échantillonnage, les carottes ont été découpées dans le sens de la longueur. Une moitié de chacune des demi-carottes a été reconditionnée et est conservée comme témoin. L'autre moitié a été coupée en deux ; un quart a servi à l'analyse de l'uranium, l'autre aux analyses chimiques et minéralogiques.

Les analyses chimiques et minéralogiques n'ont été effectuées que sur des échantillons provenant de la carotte B2. Neuf échantillons ont été soumis à analyse chimique. L'analyse minéralogique a portée sur ces mêmes échantillons et sur cinq faciès complémentaires.

L'analyse de l'uranium a été effectuée sur chacune des trois carottes. 4 échantillons de 25 cm de longueur ont été prélevés dans le mètre supérieur de la carotte, 4 échantillons de 25 cm de longueur dans la partie inférieure de la carotte (partie contenue dans la nappe) et un échantillon de 25 cm au milieu de la carotte. Les points de prélèvement sont reportés sur les coupes regroupées en annexe 1. Au total, l'uranium sera analysé sur 27 échantillons.

L'ensemble des prélèvements a été effectué à l'Ecole des Mines de Paris par le Centre d'Informatique Géologique.

6.2. Analyse chimique

L'analyse chimique des formations du Sannoisien par spectrométrie de fluorescence X (FX) a été réalisée par le laboratoire de "Dynamique de la Lithosphère" de l'Université Claude Bernard de Lyon, à partir de neuf échantillons prélevés sur la carotte B2. L'échantillonnage a porté sur un quart de carotte, sur une portion de longueur voisine de 5 cm. La description des échantillons est reportée dans le tableau 3. Les résultats des analyses sont reportés dans le tableau 4.

Tableau 3 : Description et cote des échantillons prélevés sur la carotte PzB2 pour l'analyse chimique par FX.

N° échantillon	Description sommaire	cote sondage (m)	remarques
B2/1	Béton + macadam	0,00-0,25	
B2/2	Remblais argileux, graviers + béton	0,25-0,50	
B2/3	calcaire crème et argiles brunes	0,50-0,75	cote imprécise, 30 cm de récupération entre 0,50 et 1,50 m
B2/4	Argilo-sableux brun	1,55-1,80	
B2/5	Argilo-calcaire ocre et blanc	3,25-3,50	
B2/6	Argilo-calcaire veiné ocre à crème	5,55-5,80	
B2/7	Calcaro-marneux, beige à brun verdâtre	5,80-6,00	
B2/8	Argileux varvé et marbré, vert et brun	6,80-7,10	
B2/9	Argiles vertes ± granulaires	7,20-7,45	

Tableau 4 : Analyse chimique par FX des calcaires de Brie et des argiles vertes.

	Humidité*	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	L.O.I.**	Total	Sr
	% massique	% massique sur matière sèche												ppm
B2/1	3.13	39.74 ±0.40	1.17 ±0.02	0.66 ±0.01	0.05 ±0.001	0.45 ±0.02	34.17 ±0.34	0.07 ±0.001	0.12 ±0.002	0.08 ±0.002	0.09 ±0.002	23.76	100.36	339 ±54
B2/2	3.15	46.40 ±0.46	5.07 ±0.07	2.13 ±0.04	0.04 ±0.001	1.16 ±0.02	23.44 ±0.23	0.28 ±0.006	1.14 ±0.023	0.37 ±0.007	0.05 ±0.001	20.11	100.19	447 ±72
B2/3	3.14	46.95 ±0.47	4.6 ±0.09	2.09 ±0.04	0.04 ±0.001	0.72 ±0.01	24.21 ±0.24	0.32 ±0.006	0.98 ±0.020	0.29 ±0.006	0.04 ±0.002	20.35	100.59	571 ±46
B2/4	1.53	82.08 ±0.82	6.00 ±0.08	2.31 ±0.05	0.06 ±0.001	0.47 ±0.01	2.71 ±0.05	0.6 ±0.012	1.53 ±0.031	0.58 ±0.012	0.06 ±0.001	4.14	100.54	115 ±18
B2/5	1.06	17.50 ±0.25	1.08 ±0.02	0.46 ±0.01	0.02 ±0.001	0.61 ±0.01	44.34 ±0.44	0.06 ±0.001	0.12 ±0.002	0.03 ±0.001	0.01 ±0.001	35.89	100.11	782 ±63
B2/6	14.59	25.36 ±0.25	5.36 ±0.08	2.01 ±0.04	0.05 ±0.001	3.52 ±0.07	36.28 ±0.36	0.18 ±0.004	1.07 ±0.021	0.34 ±0.007	0.61 ±0.012	25.47	100.25	440 ±70
B2/7	13.80	26.05 ±0.26	4.72 ±0.09	1.65 ±0.03	0.04 ±0.001	3.28 ±0.07	36.73 ±0.37	0.14 ±0.003	0.89 ±0.018	0.32 ±0.006	0.31 ±0.012	26.05	100.18	429 ±69
B2/8	11.41	34.98 ±0.35	7.81 ±0.11	2.89 ±0.06	0.03 ±0.001	2.75 ±0.06	26.76 ±0.27	0.22 ±0.004	2.01 ±0.040	0.51 ±0.010	0.35 ±0.014	21.15	99.46	1883 ±151
B2/9	16.06	53.68 ±0.54	15.12 ±0.21	6.15 ±0.09	0.04 ±0.001	4.01 ±0.08	6.93 ±0.10	0.21 ±0.004	4.15 ±0.083	0.79 ±0.016	0.32 ±0.013	8.52	99.92	222 ±36

*Les échantillons étant riches en humidité (teneur de 3 à 16% à l'instant du traitement), les analyses ont été réalisées après dessiccation en étuve (24 heures à 110°C)

**LOI : Lost Of Ignition, perte au feu à 1000°C pendant 1 heure 30.

Les échantillons B2/1, B2/2, B2/3, B2/4 et B2/5 ont été prélevés dans la partie de la carotte située au dessus du niveau de la nappe. Les échantillons B2/6, B2/7, B2/8 et B2/9 ont été prélevés dans la partie de la carotte située sous le niveau de la nappe. Ceci explique la différence d'humidité entre ces deux groupes d'échantillons. A l'intérieur de chacun de ces groupes, les variations d'humidité mesurées n'ont aucune signification en terme de variation de faciès du fait du stockage et du mode d'échantillonnage des carottes.

L'analyse chimique des échantillons est dans tous les cas cohérente avec leur lithologie.

4.3. Analyse minéralogique

L'analyse minéralogique semi-quantitative des formations du Sannoisien par diffraction de rayons X (DRX), sur roche totale et sur la fraction argileuse a été effectuée au Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris à partir d'échantillons prélevés sur la carotte B2. L'échantillonnage a porté sur un quart de

carotte, sur une portion de longueur voisine de 5 cm. La description des échantillons est reportée dans le tableau 5. Les résultats des analyses sont reportés dans les tableaux 6 et 7.

Tableau 5 : Description et cote des échantillons prélevés sur la carotte PzB2 pour l'analyse minéralogique par DRX.

N° échantillon	Description sommaire	cote sondage (m)	remarques
B2/2	Remblais argileux, graviers + béton	0,25-0,50	
B2/3a	Calcaire crème	0,50-0,75	cote imprécise, 30 cm de récupération entre 0,50 et 1,50 m
B2/3b	Argiles brunes	0,50-0,75	Idem
B2/4	Argilo-sableux brun	1,55-1,80	
B2/41	Calcaire silicifié	2,40	
B2/42	Calcaire peu silicifié	2,50	
B2/5	Argilo-calcaire ocre et blanc	3,90	
B2/51	Marneux beige	3,25-3,50	
B2/52	Marno-calcaire crème	4,70	
B2/6	Argilo-calcaire veiné ocre à crème	5,55-5,80	
B2/7	Calcaro-marneux, beige à brun verdâtre	5,80-6,00	
B2/71	Argilo-calcaire blanc	6,40	
B2/8	Argileux varvé et marbré, vert et brun	6,80-7,10	
B2/9	Argiles vertes ± granulaires	7,20-7,45	

Tableau 6 : Résultats des analyses minéralogiques semi-quantitatives (DRX) sur roche totale des échantillons prélevés sur la carotte B2.

N° ECH	Argiles	Quartz	Calcite	Portlandite Ca(OH) ₂	Aragonite CaCO ₃	FeldK	Plagio	Goethite
% massique								
B2/2	25	35	40			traces ?	<<5	
B2/3A	<<5	15	30	[55]				
B2/3B	30	70	<<5			<<5	<<5	traces ?
B2/4	20	5	75			<<5	<<5	
B2/41	<<5	35	65					
B2/42	20	5	75					
B2/5	<<5	<<5	100					
B2/51	<5	<<5	100					
B2/52	<<5	<5	100					
B2/6	25	10	65					<<5
B2/7	35	10	55			traces ?	<<5	<<5
B2/71	25	<<5	75					traces ?
B2/8	35	15	50		<5			
B2/9	70	25	5			traces ?	traces ?	

Ces analyses minéralogiques sur roche totale (tableau 6) montrent que les faciès les plus calcaires sont composés principalement de calcite, les matériaux les plus sableux ou les faciès silicifiés du calcaire de Brie par le quartz, les plus argileux contiennent des proportions importantes d'argiles. L'aragonite (CaCO₃) est détectée dans un seul échantillon correspondant au passage des marnes vertes au Calcaire de Brie. Des traces de goethite (FeOOH) et de feldspaths (K-feldspath ou plagioclases) apparaissent dans quelques échantillons. La Portlandite dans l'échantillon B2/3A est due à la présence de fragments de béton dans l'échantillon.

L'analyse sur roche totale permet un dosage global de la fraction argileuse, mais ne permet pas l'identification des phases qui la composent. Cette identification se fait par une analyse spécifique de la fraction fine ($< 2\mu\text{m}$) des échantillons ; les résultats de ces analyses sont rassemblés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Résultats des analyses minéralogiques semi-quantitatives (DRX) de la fraction fine ($< 2\mu\text{m}$) des échantillons prélevés sur la carotte B2.

N° ECH	Kaolinite	Illite	Illite/Smectite	Smectite	Attapulgite	Sépiolite
	% massique					
B2/2	<<5	10	30	60		
B2/3A	néant					
B2/3B	20	20	45	15		
B2/4	20	20	30	30		
B2/41	X	x	XX	XX		
B2/42	5	15	40	30	10	
B2/5		10	40	50		
B2/51	<<5		5		70	25
B2/52	<<5	25	15	20	25	15
B2/6			<<5		85	15
B2/7			<5		90	10
B2/71		20		15	35	30
B2/8			10	40	25	25
B2/9		50	40	10		

Le spectre de la fraction argileuse est relativement riche et varié. L'illite, les interstratifiés illite/smectite, et la smectite dominent généralement dans les faciès les plus argileux. La kaolinite est présente essentiellement dans le haut du profil et correspond vraisemblablement à un lessivage plus intense de ces niveaux. Les argiles magnésiennes de type attapulgite et sépiolite, sont abondantes dans la partie inférieure du Calcaire de Brie.

Les résultats des analyses minéralogiques sont cohérents avec ceux des analyses chimiques globales des échantillons de ce sondage (tableau 4) ; ils permettent de plus d'identifier les phases minérales susceptibles de contrôler la chimie des eaux de la nappe du Brie.

6.4. Contenu en uranium

Afin de connaître le contenu en uranium des formations du Sannoisien, 27 échantillons de ces formations ont été prélevés sur les trois carottes disponibles en vu de leur analyse par spectrométrie gamma. Les échantillons (tableau 8) ont été prélevés par le Centre d'informatique géologique et l'Ecole des Mines de Paris et préparés (broyés à $80\mu\text{m}$, séchés et homogénéisés) par le centre de recherches pétrographiques et géochimiques (CRPG), service d'analyse des roches et minéraux (SARM) de Nancy. Les analyses d'uranium ont été réalisées par SUBATECH.

En préalable à l'examen de ces résultats, il faut rappeler que l'uranium est un élément ubiquiste dans le milieu naturel. Trois isotopes de cet élément sont naturellement présents sur terre, par ordre d'abondance l'uranium 238, l'uranium 235 et l'uranium 234. Dans le milieu naturel, les rapports d'abondance entre ces différents isotopes, dit rapport isotopique, sont connus et immuables (tableau 9) ; ils sont liés à l'histoire de la terre.

Le protocole d'analyse et les résultats complets des analyses d'uranium font l'objet du rapport SUBATECH n°02-9-C (annexe 3). Les résultats des analyses sont résumés dans le tableau 10.

Les concentrations en uranium mesurées sur les échantillons de calcaire de Brie ou d'argiles vertes provenant de carottes prélevées dans le Fort Central, au droit de zones contiguës à des installations dans lesquelles de l'uranium a été utilisé (BURGEAP, 2001) sont du même l'ordre de grandeur que les concentrations en uranium classiquement mesurées dans ce type de formation.

Il est impossible d'utiliser les rapports isotopiques $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ pour discriminer la provenance de l'uranium du fait des incertitudes importantes sur les mesures des concentrations en uranium.

Tableau 8 : Description et cote des échantillons des formations du Sannoisien prélevés pour l'analyse de leur contenu en uranium.

N° échantillon	Description sommaire	cote sondage (m)	remarques
Carotte PzB1			
B1/1	Dalle calcaire	0,20-0,35	
B1/2	Argile marneuse, nodules calcaires et graviers	1,00-1,25 ?	cote imprécise, mauvaise récupération
B1/3	idem	1,80-2,05	
B1/4	Argilo-calcaire beige-crème	2,75-3,00	
B1/5	Idem bréchique avec silex	3,50-3,75	
B1/6	Calcaire beige bréchique	4,60-4,85	
B1/7	Calcaire argileux homogène, beige à blanchâtre	7,60-7,85	
B1/8	Argilo-calcaire veiné beige	8,10-8,40	
B1/9	Idem + vert, localement bréchique	8,75-9,00	
Carotte PzB2			
B2/1	Béton + macadam	0,00-0,25	
B2/2	Remblais argileux, graviers + béton	0,25-0,50	
B2/3	calcaire crème et argiles brunes	0,50-0,75	cote imprécise, 30 cm de récupération entre 0,50 et 1,50 m
B2/4	Argilo-sableux brun	1,55-1,80	
B2/5	Argilo-calcaire ocre et blanc	3,25-3,50	
B2/6	Argilo-calcaire veiné ocre à crème	5,55-5,80	
B2/7	Calcaro-marneux, beige à brun verdâtre	5,80-6,00	
B2/8	Argileux varvé et marbré, vert et brun	6,80-7,10	
B2/9	Argiles vertes ± granulaire	7,20-7,45	
Carotte PzB3			
B3/1	Béton ciment sombre, surfacage + fin	0,00-0,25	
B3/2	Sol brun argileux, avec racines	0,25-0,50	
B3/3	Argilo-sableux brun homogène	0,95-1,20	
B3/4	Argilo-sableux brun jaune	1,50-1,75	
B3/5	Sableux orangé avec qq gravillons	2,55-2,80	
B3/6	Calcaire fragmenté avec gros silex	3,70-4,00	
B3/7	Idem ss gros silex	6,00-6,30	
B3/8	Argilo-calcaire litté clair	6,80-7,05	
B3/9	Idem brun à verdâtre	7,75-8,00	
B3/10	Argiles vertes ± granulaire	9,00-9,25	

Tableau 9 : Abondance naturelle des différents isotopes de l'uranium et rapports isotopiques naturels (d'après Reimann et de Caritat, 1998).

Isotope	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁴ U
Abondance naturelle (%)	99,2745	0,7200	0,0055
Rapport isotopique ²³⁵ U/ ²³⁸ U (%)	0,725		
Rapport isotopique ²³⁵ U/(²³⁸ U+ ²³⁵ U+ ²³⁴ U) (%)	0,720		

Tableau 10 : Teneur en l'uranium dans les formations du Sannoisien.

N° échantillon	[²³⁸ U] mg/kg ms	[²³⁵ U] µg/kg ms
Carotte PzB1		
B1/1	2,5±1,2	< 40
B1/2	8,1±3,3	60±22
B1/3	5,3±2,4	48±18
B1/4	7,7±3,6	< 94
B1/5	6,7±3,2	45±21
B1/6	2,4±1,1	< 51
B1/7	5,5±2,6	< 93
B1/8	10,6±4,9	70±33
B1/9	9,8±4,1	70±30
Carotte PzB2		
B2/1	2,3±1,1	< 58
B2/2	3,4±1,6	< 63
B2/3	2,7±1,2	< 69
B2/4	2,5±1,2	< 74
B2/5	6,3±2,8	< 63
B2/6	7,3±3,3	48±21
B2/7	5,9±2,8	< 93
B2/8	8,1±4,1	51±25
B2/9	4,3±2,1	< 80
Carotte PzB3		
B3/1	1,3±0,7	< 24
B3/2	3,3±1,5	< 79
B3/3	2,8±1,3	< 80
B3/4	2,7±1,5	< 85
B3/5	0,9±0,5	< 39
B3/6	13,0±5,7	107±58
B3/7	3,1±1,5	< 60
B3/8	4,1±2,0	< 88
B3/9	8,9±4,1	70±45
B3/10	4,6±2,1	< 83

7. Chimie des eaux

Afin de déterminer les caractéristiques physico-chimiques des eaux qui s'écoulent à travers les formations présentes au droit et à l'aval du site et de mieux comprendre les processus géochimiques qui s'y produisent, des prélèvements d'eau, sur lesquels a été réalisé un certain nombre d'analyses, en particulier celle de leur contenu en uranium, ont été effectués dans les différents aquifères rencontrés au droit et à l'aval du CEV.

La sélection des points de prélèvements hors CEV a été effectuée en commun accord avec l'expert à l'issue d'une campagne de mesures physico-chimiques sur l'ensemble des points d'eau répertoriés dans le cadre de la synthèse documentaire (BURGEAP, 2001). Cette campagne a eu lieu le 16 octobre 2001. Les prélèvements ont été effectués les 19, 20 et 21 novembre 2001.

7.1. Sélection des points de prélèvement d'eau

Les points de prélèvements, leur cote altimétrique et le niveau statique des nappes en chaque point sont reportés sur la figure 7.

7.11. La nappe du Brie

Les eaux de la nappe du Brie ont été prélevées dans les 7 piézomètres au Brie installés dans le CEV, à la source des malades située sur le flanc sud de la butte sous le CEV et à la source J, source captée située à Courtry, route de la Bergerie.

7.12. Les eaux de la base des puits d'infiltration

Les eaux à la base des puits d'infiltration ont été prélevées en fond du puits P2 et dans le puits P9, puits partiellement éboulés et rempli en permanence d'eau. Les autres puits d'infiltration étaient secs ; aucun échantillon d'eau n'a pu y être prélevé.

7.13. Les eaux de la nappe des colluvions sur le flanc Sud de la butte

Les eaux de la nappe des colluvions ont été prélevées sur la commune de Courtry, dans les puits D, L et K situés respectivement 19, rue du Général de Gaulle, 22 rue Van Wyngène et 19 rue Van Wyngène. Les caractéristiques de ces puits sont reportées dans le tableau 11.

Tableau 11 : Caractéristiques des puits captant la nappe des colluvions à Courtry.

Puits	Diamètre (m)	Profondeur (m)	Niveau statique (m NGF)	Hauteur d'eau (m)
D	~1,20	2,47	72,02	0,70
L	~1,0	3,12	71,89	1,19
K	~0,8	3,02	71,55	0,86

7.14. Les eaux de la nappe de l'Eocène Supérieur

Les eaux de la nappe de l'Eocène supérieur ont été échantillonnées en deux points (tableau 12) :

le piézomètre PZ3 de France Déchets qui atteint les calcaires de Saint d'Ouen,

le puits Cagnet situé sur la commune de Courtry, qui atteindraient les Sables de Beauchamp d'après les données disponibles dans le secteur sur la carte géologique et sur la banque de données du sous-sol du BRGM.

Tableau 12 : Caractéristiques des puits captant la nappe de l'Eocène Supérieur.

Puits	Diamètre (m)	Profondeur (m)	Niveau statique (m NGF)	Hauteur d'eau (m)
Pz3	0,10	80	60,27	12,66
Cagnet	~1,0	~37,00	55.95	18.84

7.2. Protocole de prélèvement, de mesures et d'analyse

7.2.1. Prélèvement des eaux

Du fait de la faible productivité de la nappe du Brie et afin de renouveler malgré tout l'eau prélevée, les piézomètres au Brie ont été vidangés le 12 novembre 2001, soit une semaine avant le prélèvement. Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'une bouteille Mécabollier.

Avant prélèvement, les puits Cagnet et le puits D, ainsi que le piézomètre Pz3 de France Déchets ont été mis en pompage. Les prélèvements ont été réalisés après stabilisation des paramètres pH, conductivité et température mesurés en continu pendant le pompage. Il est à noter que l'eau dans le puits D n'a pu être entièrement renouvelée du fait de la faible productivité de la nappe et du grand volume mort du puits. Les échantillons d'eau ont été prélevés au tuyau de sortie des pompes.

Aucune vidange des puits L et K n'a pu être effectuée avant prélèvement. Le puits P9, puits d'infiltration éboulé rempli d'eau (BURGÉAP, 2001) n'a évidemment pas été vidangé. Dans ces différents puits, les eaux ont été prélevées à la bouteille Mécabollier.

Avant chaque prélèvement en puits ou en piézomètre, le niveau statique a été mesuré.

7.2.2. Mesures physico-chimiques effectuées sur le terrain

Lors du prélèvement, la température, la conductivité, le pH et le potentiel rédox (Eh) ont été mesurés à l'aide de la sonde multiparamètre ISY. Ces mesures ont été effectuées *in situ* sur l'ensemble des piézomètres au Brie, les puits D L et K et P9. La mesure *in situ* n'a pas été possible sur les sources, les puits P2 et Gagnet et le piézomètre Pz3 de France Déchets. Dans le cas des sources et du puits P2, les mesures ont été faites immédiatement après prélèvement des eaux. Pour le puits Cagnet et le PZ3 de France Déchets, les mesures ont été faites dans un seau qui recueillait en continu les eaux pompées.

La sonde multiparamètre YSI avait été étalonnée avant la campagne de prélèvement. Elle a été réétalonnée en cours de campagne pour les paramètres pH et conductivité. Un dysfonctionnement de la sonde à oxygène a empêché toute mesure de ce paramètre.

Rapidement après prélèvement, les eaux ont été filtrées à 0,45 µm sous pression à l'aide d'une pompe péristaltique.

Immédiatement après filtration, l'alcalinité (TAC) des eaux a été mesurée par titrage à l'acide sulfurique avec détection colorimétrique du virage (titrateur digital HACH, détection vert de bromocresol/rouge de méthyle).

7.2.3. Conditionnement des eaux

Les eaux filtrées ont été conditionnées dans des flacons Nalgène de 100ml à usage unique immédiatement après filtration. Sept lots par échantillons ont été fabriqués en fonction des besoins analytiques ultérieurs :

- lot n° 1 : 100 ml non acidifiés pour le dosage des anions majeurs
- lot n° 2 : 100 ml acidifiés à 2% HNO₃ suprapur pour dosage de cations majeurs
- lot n° 3 : 100ml acidifiés à 2% HNO₃ suprapur pour dosage des traces
- lot n° 4 : 100 ml acidifiés à 2% HNO₃ suprapur pour dosage de l'uranium total
- lot n° 5 : 100 ml acidifiés à 2% HNO₃ suprapur toujours pour dosage de l'uranium total
- lot n° 6 : 100 ml acidifiés à 2% HNO₃ suprapur pour la détermination des différents isotopes de l'uranium

lot n° 7 : 100 ml acidifiés à 2% HNO₃ suprapur toujours pour la détermination des différents isotopes de l'uranium

Les flacons ont été bouchés à vide d'air, puis conservés au froid (glacière de terrain, puis réfrigérateur) jusqu'à l'analyse.

Le même lot de HNO₃ suprapur a été utilisé pour acidifier l'ensemble des échantillons. Un blanc analytique (eau ultra pure + acide 2%) a été fabriqué pour chaque laboratoire.

Les lots n° 1, 2, et 3 ont été expédiés au Laboratoire Santé, Environnement et Hygiène de Lyon (LSEHL). Les lots 4 et 6 ont été expédiés à SUBATECH, les lots 5 et 7 au CEA de Bruyères-Le-Chatel.

7.24. Analyse chimique des eaux, protocole analytique et limites de quantification

Le tableau 13 rassemble la liste des paramètres analysés sur chaque lot d'échantillon, la méthode analytique utilisée, les normes appliquées pour ces analyses et les limites de quantification. Seules les analyses effectuées par le LSEHL et SUBATECH sont à ce jour disponibles ; les rapports d'analyse sont regroupés en annexe 4.

Tableau 13 : Analyse des eaux, paramètres analysés, techniques analytiques et limite de quantification.

N° lot	paramètres	Technique analytique	Norme de référence	LQ (mg/l)
Laboratoire : LSEHL				
1	HCO ₃ ⁻	potentiométrie	NF EN ISO 9963-1	6
1	NO ₃ ⁻	CI	NF EN ISO 10304	0,1
1	Cl ⁻	CI	NF EN ISO 10304	0,1
1	SO ₄ ²⁻	CI	NF EN ISO 10304	0,2
2	Ca ²⁺	AAS flamme	NF T90-005	0,5
2	Mg ²⁺	AAS flamme	NF T90-005	0,1
2	Na ⁺	ICP - AES	ISO 11885	1,0
2	K ⁺	ICP - AES	ISO 11885	0,5
2	NH ₄ ⁺	Bleu d'Indophénol	NF T90-015-1	0,05
3	Al ³⁺	ICP-MS		0,1
3	Fe	ICP-MS		0,05
3	Sr ²⁺	ICP-MS		0,05
3	Mn ²⁺	ICP-MS		0,03
3	Li ⁺	ICP-MS		0,05
3	SiO ₂	ICP-MS	ISO 11885	1,0
Laboratoire : SUBATECH				
4/6	238U /265U	ICP-MS		
CEA-DIF de Bruyères le Châtel				
5/7	238U /265U	TIMS		

7.3. Résultats des analyses

Le tableau 14 rassemble l'ensemble des résultats d'analyse. Les résultats sont exprimés à la fois en concentration massique (mg/l) et en milliéquivalent par litre (meq/l) c'est-à-dire en concentration molaire de charge électrique. Les résultats des analyses ont été jugés corrects si l'erreur sur la balance ionique¹ était inférieure à ±7%. Un échantillon (P2) a une balance ionique supérieure à 7%. Toutefois les volumes échantillonnés n'ont pas permis de refaire l'analyse complète des échantillons ; seuls les cations ont été réanalysés sur certains échantillons.

¹ La balance ionique se définit, les concentrations étant exprimées en meq/l, comme:

$2 \times (\text{concentration totale en cations} - \text{concentration totale en anions}) / (\text{concentration totale en cations} + \text{concentration totale en anions})$

Tableau 14 : Composition des eaux prélevées dans les différentes nappes au droit et à l'aval du CEV (incertitudes sur les mesures +/-5%).

EOCENE SUP			NAPPE DES COLLUVIONS				NAPPE DU BRIE dans CEV										BRIE hors CEV		BRIE dilué
	PZ3FRD	PTS CAGNET	PTS D	PTS K	PTS L	PZB1	PZB2	PZB3	PZB4	PZB5	PZB6	PZB7	P2	SCE MALADES	SCE J	P9			
NS m NGF temp °C pH Cond, µS,cm-1 Eh (mV)	60,27 9,2 6,6 2964,7 110	54,71/55,95 12,9 6,6 1117 435	72,02 11,4 7,0 2593,4 479	71,55 11,9 7,3 2013 482	71,89 10,3 7,2 1640 458	121,72 11,7 7,2 957 503	121,42 10,9 7,1 1182 425	121,05 11,5 6,9 1560 431	120,88 12 6,8 913 467	119,94 13,9 6,8 1167 573	121,22 13,3 7,0 937 424	120,49 13,2 7,2 1155 419	- 11,5 7,0 885 436	- 8,7 7,7 930 489	- 11,0 6,7 1012 490	120,66 8,0 7,2 552 381			
	303 281 4,60 1536 31,98	374,1 341 5,59 210 4,37	294,7 272 4,46 1113 23,17	262,4 323 4,30 794 16,53	300,2 277 4,54 587,0 12,22	441,8 397 6,5 145,0 3,02	355,7 342 5,6 190,0 3,96	526,0 499 8,18 278,0 5,79	464,4 439 7,2 107,0 2,23	551,6 505 8,28 84,0 1,75	423,5 400 6,56 93,0 1,94	525,4 488 8,00 69,0 1,44	368,6 337 5,52 159,0 3,31	412,5 387 6,34 96,0 2,00	404,6 368 6,04 109,0 2,27	213,0 nd 3,49 37,5 0,78			
	112 3,16 <1	29,9 0,84 58,0	41,0 1,16 40,0	20,0 0,56 105,0	30,0 0,85 24,0	14,4 0,41 1,9	45,0 1,27 22,5	86,0 2,43 4,0	4,2 0,12 10,2	64,0 1,81 2,3	19,9 0,56 25,5	84,0 2,37 2,8	41,2 1,16 11,4	40,3 1,14 8,4	88,0 2,48 22,4	18,2 0,51 1,5			
	meq/L meq/L meq/L meq/L meq/L	0,94 524 26,15 109,0 8,97	0,94 145 8,48 31,4 2,58	0,65 515 25,70 15,9 1,31	1,69 356 17,76 12,2 1,00	0,39 271 13,52 11,4 0,94	0,03 110 73 5,49 7,4	0,36 73 3,64 5,0 0,41	0,06 158 7,88 17,0 1,40	0,16 162 8,08 15,4 1,27	0,04 186 9,28 10,7 0,88	0,41 148 7,39 21,0 1,73	0,05 145 7,24 21,4 1,76	0,18 170 8,48 12,3 1,01	0,14 139 6,94 10,8 0,89	0,36 120 6,79 15,4 1,27	0,02 65 3,24 6,0 0,49		
Na K NH4	72,3 3,14 46,6	9,4 0,41 0,9	40,2 1,75 46,9	22,6 0,98 80,2	30,0 1,30 85,7	88,6 3,85 3,9	162,0 7,05 6,5	155,0 6,74 4,9	9,4 0,41 2,0	47,3 2,06 3,6	16,0 0,70 1,9	64,1 2,79 2,4	31,3 1,36 10,4	27,0 1,17 2,2	55,3 2,41 3,2	15,8 0,69 7,2			
	1,19 1,41 0,08	0,02 <0,05	1,20 <0,05	2,05 <0,05	2,19 <0,05	0,10 0,17	0,17 0,18	0,13 <0,05	0,05 0,08	0,09 <0,05	0,05 0,17	0,06 0,10	0,27 0,08	0,06 <0,05	0,08 <0,50	0,18 0,38			
	meq/L meq/L meq/L																		
SiO2	35,5 0,59 <0,1	31,5 0,52 <0,1	16,4 0,27 <0,1	12,8 0,21 <0,1	11,8 0,20 <0,1	23,8 0,40 <0,1	19,7 0,33 0,19	15,8 0,26 <0,1	23,1 0,38 <0,1	20,1 0,33 <0,1	15,8 0,26 0,84	27,8 0,46 <0,1	20,8 0,35 <0,1	14,5 0,24 <0,1	14,3 0,24 <0,1	12,1 0,20 <0,1			
Fe	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,12 0,00 0,01	<0,05	<0,05	<0,05	0,03 0,01 0,03	<0,05	0,78 0,01 1,66	<0,05	<0,05	0,09			
Sr	12,90 0,29 0,65	0,48 0,01 <0,03	3,59 0,08 0,18	2,71 0,06 <0,03	2,12 0,05 <0,03	0,71 0,02 0,08	0,50 0,01 <0,03	0,69 0,02 <0,03	0,82 0,02 <0,03	0,77 0,02 <0,03	0,68 0,02 <0,03	1,37 0,03 <0,03	1,66 0,04 0,56	0,63 0,01 <0,03	0,72 0,02 <0,03	0,37 0,01 0,07			
Mn	0,02	<0,05	0,01	<0,03	<0,03	0,003	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,02 0,06 0,01	<0,05	<0,05	<0,05			
Li	0,15 0,02	<0,05	0,05 0,01	0,05 0,01	0,05 0,01	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,06 0,01	<0,05	<0,05	<0,05			
erreur balance %	0,22	-1,99	2,03	-5,49	0,06	1,21	0,97	-1,79	1,26	3,78	4,69	0,26	9,39	5,80	-5,49	-3,61			

Avant d'étudier les relations pouvant exister entre les différentes nappes échantillonnées, l'hydrochimie de chacune sera examinée. L'état d'équilibre¹ des eaux sera aussi calculé à l'aide du logiciel CHESS développé par le Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris (van der Lee, 1999). Enfin, le contenu en uranium des eaux sera discuté.

7.31. La nappe des Calcaires de Brie

Les eaux de la nappe du Brie ont été prélevées dans les piézomètres au Brie forés dans l'enceinte du CEV ainsi qu'à la source J et à celle des malades. Le profil chimique des eaux qui y ont été prélevées est illustré par la figure 8.

Les eaux de la nappe du Brie sont globalement des eaux neutres, modérément chargées (conductivité comprise entre 900 et 1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$), carbonatées calciques, avec une composante sulfatée sodique accessoire. Elles sont pauvres en potassium, en fer et en aluminium.

Les sources J et des malades ont des compositions très voisines, sauf en ce qui concerne le sodium et le chlorure dont les concentrations sont deux fois plus élevées à la source J. Ceci pourrait être dû à une contamination anthropique.

Dans l'enceinte du CEV, les eaux de la nappe du Brie ont des compositions globalement voisines de celles des sources, mais les eaux prélevées en PzB1, PzB2 et PzB3, c'est-à-dire dans le Fort Central, sont notablement plus riches en sulfate et souvent en sodium. Les eaux prélevées en PzB3, PzB5 et PzB7 apparaissent aussi anormalement riches en chlorure.

Des échantillons d'eau ont aussi été prélevés en P2 et P9, les deux principaux puits d'infiltration et de drainage du CEV. Ces puits ont pour fonction de drainer les eaux pluviales et en partie la nappe du Brie afin de maintenir à sec l'intérieur du Fort Central et des douves. Pour mémoire, il faut rappeler que le puits P9 s'est partiellement éboulé et qu'il n'est plus fonctionnel ; il est en permanence rempli d'eau (BURGEAP, 2001).

La comparaison entre les eaux prélevées en P2 et celles prélevées dans les différents piézomètres ont des chimies comparables (figure 8). Les eaux prélevées au fond de P2 sont bien les eaux de la nappe du Brie drainées par le puits et infiltrées dans le gypse.

L'eau prélevée dans le puits P9 apparaît proche du type chimique des eaux du Brie (figure 8) mais présente une minéralisation environ moitié moins forte, attribuée à un phénomène de dilution par les eaux météoriques que recueille ce puits.

Les calculs d'équilibre effectués sur ces eaux afin de savoir avec quels minéraux les eaux sont à l'équilibre, permettent aussi d'évaluer la fugacité du CO_2 , c'est-à-dire la pression partielle du CO_2 dans le système. Il faut rappeler à ce sujet que la pression partielle du CO_2 dans l'air est de 0,0003 atm (soit $\log f(\text{CO}_2) = -3,5$) ; dans les aquifères de surface, les pressions partielles de CO_2 , du fait des réactions chimiques et biochimiques qui s'y produisent, sont communément très supérieures à celle qui règne dans l'atmosphère (Morel, 1983). Ces calculs montrent que les eaux de la nappe du Brie sont toujours proches de l'équilibre avec la cristobalite et la calcite, sous-saturées vis-à-vis du gypse (tableau 15).

¹ Une eau est à l'équilibre avec la roche qui la contient si elle est à l'équilibre avec l'ensemble des minéraux formant cette roche. L'état d'équilibre d'une eau se mesure à l'aide de l'indice de saturation SI que l'on calcule à partir des résultats d'analyse et des constantes thermodynamiques à l'aide de logiciels spécifiques. Si SI par rapport à un minéral est nulle la solution est à l'équilibre vis-à-vis de ce minéral, si SI est positif la solution est sursaturée, le minéral peut potentiellement précipiter, si SI est négatif la solution est sous-saturée, le minéral peut potentiellement se dissoudre.

Tableau 15 : Etat d'équilibre des eaux issues de la nappe du Brie.

	PzB1	PzB2	PzB3	PzB4	PzB5	PzB6	PzB7	P2	Sce Mdes	Sce J	P9
log f(CO2)	-1,79	-1,76	-1,44	-1,41	-1,32	-1,59	-1,68	-1,68	-2,22	-1,42	-2,05
SI Calc	0,06	-0,34	-0,13	-0,22	-0,18	-0,03	0,26	-0,09	0,57	-0,57	-0,43
SI Dolo	0,26	-0,54	0,08	-0,14	-0,27	0,42	1,02	-0,01	1,34	-0,71	-0,59
SI Cristo	-0,17	-0,23	-0,34	-0,19	-0,25	-0,38	-0,13	-0,22	-0,32	-0,37	-0,37
SI Quartz	0,89	0,83	0,72	0,87	0,81	0,68	0,92	0,84	0,75	0,69	0,70
SI Gypse	-1,40	-1,46	-1,07	-1,38	-1,46	-1,49	-1,65	-1,21	-1,48	-1,49	-2,060

7.32. La nappe des colluvions

La nappe des colluvions est représentée par les eaux prélevées dans les puits D, K et L situés sur la commune de Courtry.

Ces eaux sont neutres, assez minéralisées (conductivité comprise entre 1600 et 2600 $\mu\text{S}/\text{cm}$), sulfatées calciques avec une composante carbonatée accessoire (figure 9). Elles sont proches de l'équilibre avec la cristobalite, la calcite et la dolomite mais légèrement sous saturées vis-à-vis du gypse (tableau 16).

Tableau 16 : Etat d'équilibre des eaux issues de la nappe des colluvions

	Puits D	Puits K	Puits L
log f(CO2)	-1,82	-1,98	-1,96
SI Calc	0,09	0,41	0,13
SI Dolo	-0,04	0,64	0,17
SI Cristo	-0,16	0,03	-0,04
SI Quartz	0,74	0,62	0,63
SI Gypse	-0,20	-0,42	-0,59

7.33. La nappe de l'Eocène supérieur

Deux prélèvements ont été effectués dans cette nappe, un dans le piézomètre France Déchets Pz3, l'autre dans le puits Cagnet.

L'eau prélevée dans le Pz3 de France Déchets est une eau fortement minéralisée (conductivité de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), de type sulfaté calcique et magnésien (figure 9). C'est l'eau échantillonnée la plus minéralisée, la plus riche à la fois en chlorure, en strontium, et une des plus riche en potassium.

Elle est proche de l'équilibre avec la dolomite et la cristobalite, mais paraît faiblement sous-saturée vis-à-vis du gypse et des carbonates (tableau 17).

Tableau 17 : Etat d'équilibre des eaux issues de la nappe des colluvions

	Pz3 France Déchet	Puits Cagnet
log f(CO2)	-1,50	-1,59
SI Calc	-0,43	-0,26
SI Dolo	-0,26	0,13
SI Cristo	0,003	-0,07
SI Quartz	1,06	0,99
SI Gypse	-0,14	-1,18

L'eau du puits Cagnet est en fait très différente de celle prélevée en Pz3 (figure 9) : c'est une eau peu minéralisée, calco-carbonatée qui ne présente aucune des caractéristiques précédentes.

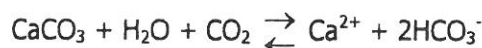
De part sa profondeur et les données géologiques disponibles, il apparaît que le puits atteint les sables de Beauchamp. En l'absence de coupe géologique et technique, il n'est pas possible de déterminer avec certitude le niveau capté par ce puits.

Une explication possible de ces différences de chimie des eaux est que les eaux prélevées au puits Cagnet sont captées dans les sables de Beauchamp alors que les eaux captées en PZ3 proviennent des calcaires de Saint Ouen. Si cette hypothèse est vraie, cela indique que la nappe de l'Eocène Supérieur est stratifiée.

7.34. Fonctionnement géochimique du système

A l'examen des caractéristiques chimiques des différentes nappes et comme le montre la figure 10, il apparaît clairement que les eaux plus fortement minéralisées (conductivités supérieures à 1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sont aussi chargées en sulfates. Les eaux moins minéralisées sont en général relativement pauvres en sulfates mais carbonatées calciques ; leur conductivité est en grande partie contrôlée par leur concentration en calcium et carbonate (figure 11)

Pour les eaux de faibles minéralisation, c'est-à-dire les eaux de la nappe du Brie, la concentration en calcium est liée à celle en carbonate (figure 12). Les eaux de la nappe du Brie se minéralisent au contact des minéraux carbonatés qui composent les formations du Brie (cf. § 4.3), en particulier la calcite (CaCO_3). Il faut remarquer que le rapport Ca/HCO_3 , exprimé en meq, est en moyenne voisin de 1 (0,99 avec $r^2 = 0,73$), c'est à dire proche du coefficient stochiométrique de l'équation de dissolution de la calcite



Les eaux de la nappe des colluvions ont une conductivité et une minéralisation intermédiaire entre les eaux de la nappe du Brie et celle de Pz3 de France Déchets. Il apparaît clairement que leur forte concentration en sulfates est liée à celle en calcium (figure 13). Ces eaux se sont donc minéralisées au contact du gypse contenu dans les colluvions. La figure 14, sur laquelle le contenu en sulfate des eaux est mis en relation avec leur contenu en calcium (+) magnésium ne provenant pas des carbonates, montre que les eaux de la nappe des colluvions est un mélange entre les eaux du Briecalco-carbonatées et une "eau théorique" à l'équilibre avec le gypse

Ces résultats sont cohérents avec le fonctionnement hydrogéologique de la butte : l'eau de la nappe du Brie s'écoule depuis le sommet de la butte vers le Sud par des sources et des écoulements hypodermiques au travers des colluvions. La nappe des colluvions est donc alimentée pour partie par les eaux du Brie et pour partie par les eaux de pluie. Ces eaux réagissent progressivement avec le gypse contenu dans les colluvions et acquièrent ainsi leur caractère sulfaté calcique.

Les teneurs en carbonate sont assez bien corrélées avec celles en calcium et magnésium non associées au sulfate (figure 15). Ceci confirme que le calcium ne provenant pas de la dissolution des sulfates provient de celle de la calcite. Toutefois certains points sont situés sous la droite de dissolution de la calcite, c'est-à-dire apparaissent déficitaires en calcium par rapport à leur contenu en carbonate. Ce déficit apparent peut être attribué au phénomène d'échange de cations qui se produit en surface des argiles. En effet, les cations divalents¹ ont en général une plus grande affinité avec les argiles que les cations monovalents, aussi les cations divalents en solution sont "captés" par les argiles qui "relarguent" en compensation des cations monovalents en solution.

De tels échanges d'ions se produisent en particulier dans la nappe du Brie puisque la relation entre la teneur carbonate et la somme des teneurs en calcium, magnésium et sodium, non associés au sulfate et au chlorure, est linéaire et correspond à la droite de dissolution de la calcite (figure 16). Ce processus chimique explique en partie les fortes teneurs en sodium observées dans certains piézomètres au Brie.

¹ Cation monovalent : cation qui porte une charge positive, soit Na^+ , K^+ ...

Cation divalent : cation qui porte deux charges positives, soit Ca^{++} , Mg^{++}

7.35. Contenu en uranium des eaux

Le contenu en uranium des différentes eaux prélevées ainsi que le rapport isotopique de l'uranium dissout ont été mesurés par SUBATECH (tableau 18). Le rapport d'analyse, qui fait état de la méthodologie employée, est consultable en annexe 4.

Les résultats obtenus montrent que les teneurs en uranium mesurées dans les eaux des différentes nappes au droit et à l'aval du CEV sont très en deçà de la concentration maximale admissible pour l'eau potable (100 µg/l) définie par l'OMS (OMS, 1993). Il faut toutefois remarquer que les valeurs les plus élevées ont été mesurées sur les échantillons provenant de la nappe du Brie (figure 17). Parmi ces échantillons, ceux prélevés les plus à l'amont de l'écoulement (cf. § 4.3.), dont ceux du fort central, montrent les plus fortes concentrations en uranium (figure 18).

Tableau 18 : Résultats des analyses d'uranium effectuées sur les eaux.

Echantillon	²³⁸ U (µg/l)	²³⁵ U (µg/l)	²³⁵ U/ ²³⁸ U (%)
Limite potabilité	100		-
Nappe du Brie			
PzB1	6,35 ± 0,32	(4,51 ± 0,22) 10 ⁻²	(0,709 ± 0,035)
PzB2	6,19 ± 0,31	(4,59 ± 0,23) 10 ⁻²	(0,742 ± 0,037)
PzB3	5,62 ± 0,28	(4,07 ± 0,20) 10 ⁻²	(0,724 ± 0,036)
PzB4	3,86 ± 0,19	(2,86 ± 0,14) 10 ⁻²	(0,741 ± 0,037)
PzB5	3,88 ± 0,19	(2,97 ± 0,15) 10 ⁻²	(0,765 ± 0,038)
PzB6	2,33 ± 0,12	(1,74 ± 0,09) 10 ⁻²	(0,745 ± 0,037)
PzB7	8,95 ± 0,45	(6,73 ± 0,34) 10 ⁻²	(0,752 ± 0,038)
Puits 2	6,09 ± 0,31	(4,45 ± 0,22) 10 ⁻²	(0,730 ± 0,037)
Source malade/1	2,01 ± 0,10	(1,45 ± 0,07) 10 ⁻²	(0,723 ± 0,036)
Source J	2,98 ± 0,15	(2,13 ± 0,11) 10 ⁻²	(0,717 ± 0,036)
Puits 9	0,87 ± 0,04	(6,25 ± 0,31) 10 ⁻³	(0,718 ± 0,036)
Nappe des colluvions			
Puits D	1,33 ± 0,07	(1,00 ± 0,05) 10 ⁻²	(0,753 ± 0,038)
Puits K	0,45 ± 0,02	(3,19 ± 0,16) 10 ⁻³	(0,710 ± 0,036)
Puits L	0,94 ± 0,05	(6,94 ± 0,35) 10 ⁻³	(0,738 ± 0,037)
Nappe de l'Eocène Supérieur			
PZ3/1 fr dcht	2,95 ± 0,15	(2,20 ± 0,11) 10 ⁻²	(0,745 ± 0,037)
Puits Gagnet	3,00 ± 0,15	(2,21 ± 0,11) 10 ⁻²	(0,737 ± 0,037)

Au vu de ces résultats, deux questions se posent : ces valeurs plus élevées en uranium sont-elles le fait des activités passées du CEA ou sont-elles liées à la nature de l'encaissant ?

Les rapports isotopiques ²³⁵U/²³⁸U mesurés sur les échantillons, compris entre 0,00709 et 0,00765, ne sont pas significativement différents du rapport isotopique de l'uranium naturel (0,0072) du fait des incertitudes de mesure (figure 19). Cette donnée ne permet donc pas de discriminer l'uranium naturellement présent dans les eaux d'un éventuel apport lié aux activités du CEA.

La figure 20 montre que pour les eaux de la nappe du Brie et celle de la nappe des colluvions, globalement plus la charge en silice est importante plus celle en uranium est grande bien qu'aucune corrélation formelle ne puisse être établie. Cette observation tend à prouver que l'uranium mesuré dans les eaux proviendrait des roches.

Néanmoins à ce jour, aucune des données disponibles ne permet de répondre avec certitudes aux questions relatives à la provenance de l'uranium dans les eaux de la nappe du Brie.

Pour tenter d'y répondre il faudra :

affiner l'analyse isotopique afin de vérifier si la signature isotopique de l'uranium dans les eaux prélevées est ou non différente de la signature isotopique de l'uranium naturel,

disposer d'échantillons d'eau provenant d'un environnement géochimique similaire (autre butte tertiaire du Bassin Parisien par exemple la butte de Romainville ou celle de Rosny) afin de caractériser leur contenu en uranium hors influence des installations du CEA.

7.4. Conclusion sur la chimie des eaux

Cette première campagne de prélèvement a permis de caractériser trois types d'eau contenus dans trois aquifères distincts rencontrés au droit et à l'aval du site :

au sommet de la butte, l'aquifère de Brie qui contient une nappe de type carbonaté calcique moyennement minéralisée,

sur le flanc sud de la Butte, en aval du CEV, l'aquifère des colluvions qui renferment une nappe assez minéralisée, sulfatée calcique, en partie alimentée par les eaux de la nappe du Brie qui s'y infiltrent,

la nappe de l'Eocène supérieur, première nappe régionale, fortement minéralisée du fait de la présence de lentilles de gypse dans ces formations.

La nappe des colluvions est pour partie alimentée par la nappe du Brie et acquière sa minéralisation au contact du gypse contenu dans les colluvions.

Les concentrations en uranium mesurées sur ces eaux sont très inférieures au seuil de potabilité relatif à l'uranium ; les rapports isotopiques ne permettent pas, du fait des incertitudes de mesure, de conclure à l'origine naturelle ou anthropique de l'uranium dissous dans les eaux échantillonnées.

8. Conclusion

Les reconnaissances entreprises ont permis de vérifier l'état des puits d'infiltration, de préciser la géométrie et la piézométrie de la nappe du Brie, d'étudier certaines caractéristiques hydrauliques des formations sannoisiennes et ludiennes, de caractériser la chimie et la minéralogie des calcaires de Brie et des argiles vertes et de déterminer la chimie des eaux des différentes nappes au droit et à l'aval du CEV.

Les principales conclusions sont les suivantes:

les bases du cuvelage des puits d'infiltration datant de l'origine du fort sont toutes effondrées, néanmoins les cavités reconnues au droit des puits apparaissent relativement réduites ; il apparaît aussi que les eaux s'infiltrant très rapidement dans ces puits ; les variations de niveau d'eau dans le puits P2 sont suivies en continu pour être comparées à la pluviométrie quotidienne depuis mi décembre ce afin de mieux comprendre le fonctionnement hydraulique de ces puits ;

la nappe du Brie, de faible puissance et productivité, s'écoule principalement vers le sud dans le sens du pendage de son substratum, les argiles vertes ; au vu des premières données piézométriques, elle semble réagir rapidement aux épisodes pluvieux ;

les essais d'infiltration réalisés à diverses profondeurs dans le forage PzE montrent que les formations situées sous les calcaires du Brie jusqu'au pied de la seconde masse de gypse sont très peu perméables au droit de ce forage ; les débits qui pourraient s'écouler à travers les argiles vertes, les marnes supragypseuses et les marnes d'entre deux masses sont trop faibles pour être évalués par la technique utilisée ; les masses de gypse montrent une faible capacité d'absorption liée au remplissage de vides de petites tailles (10 à 30 litres) qui paraissent pas ou mal connectés à un réseau d'écoulement ;

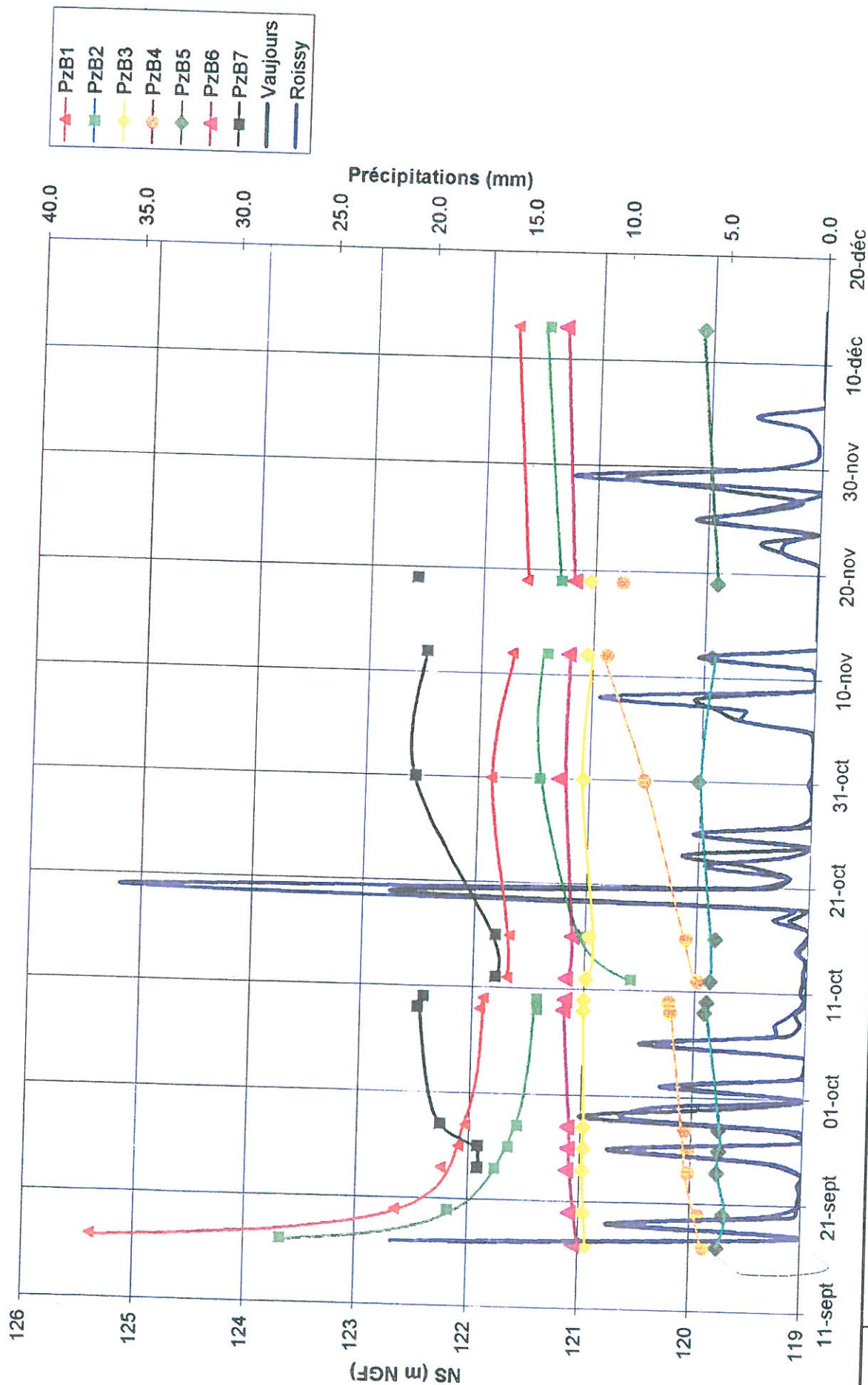
les analyses des roches et des eaux ont montré que les concentrations en uranium dans les eaux comme dans les solides sont très faibles, de l'ordre de grandeur des concentrations naturelles en uranium ; du fait des incertitudes de mesures et des faibles concentrations analysées, il n'est pas possible de discriminer l'origine de l'uranium.

la caractérisation géochimique des eaux des différentes nappes rencontrées au droit et à l'aval du site a permis de mieux comprendre le fonctionnement hydrogéochimique au voisinage du CEV, en particulier les relations entre les différentes nappes.

BIBLIOGRAPHIE

- Anonymes (1998) - Dossier d'abandon du site de Vaujours par le CEA/DAM déposé le 09/03/98. CEA/DSR/B3, DO 150, 59 p. + annexes.
- BURGÉAP (2001) – Le site CEA de Vaujours dans son environnement - Synthèse documentaire historique et hydrogéologique. Rapport A.8314/C301073/R3288c, 40 p. + annexes.
- Caudron M., Labourguigne J. (1971) – Notice de la carte géologique au 1/50 000 de Lagny, 2^{de} édition, Ed. BRGM, 45 p.
- Morel F.M.M. (1983) – Principles of aquatic chemistry. Wiley Interscience, 446 p.
- OMS (1993) - Guidelines for drinking water quality, WHO, Genève (2e édition), vol. 1.
- van der Lee J., De Windt L. (2000) – CHEES tutorial and coobook, updated for version 2.5. Rapport du Centre d'informatique géologique de l'Ecole des mines de Paris, LHM/RD/00/13, 96 p.

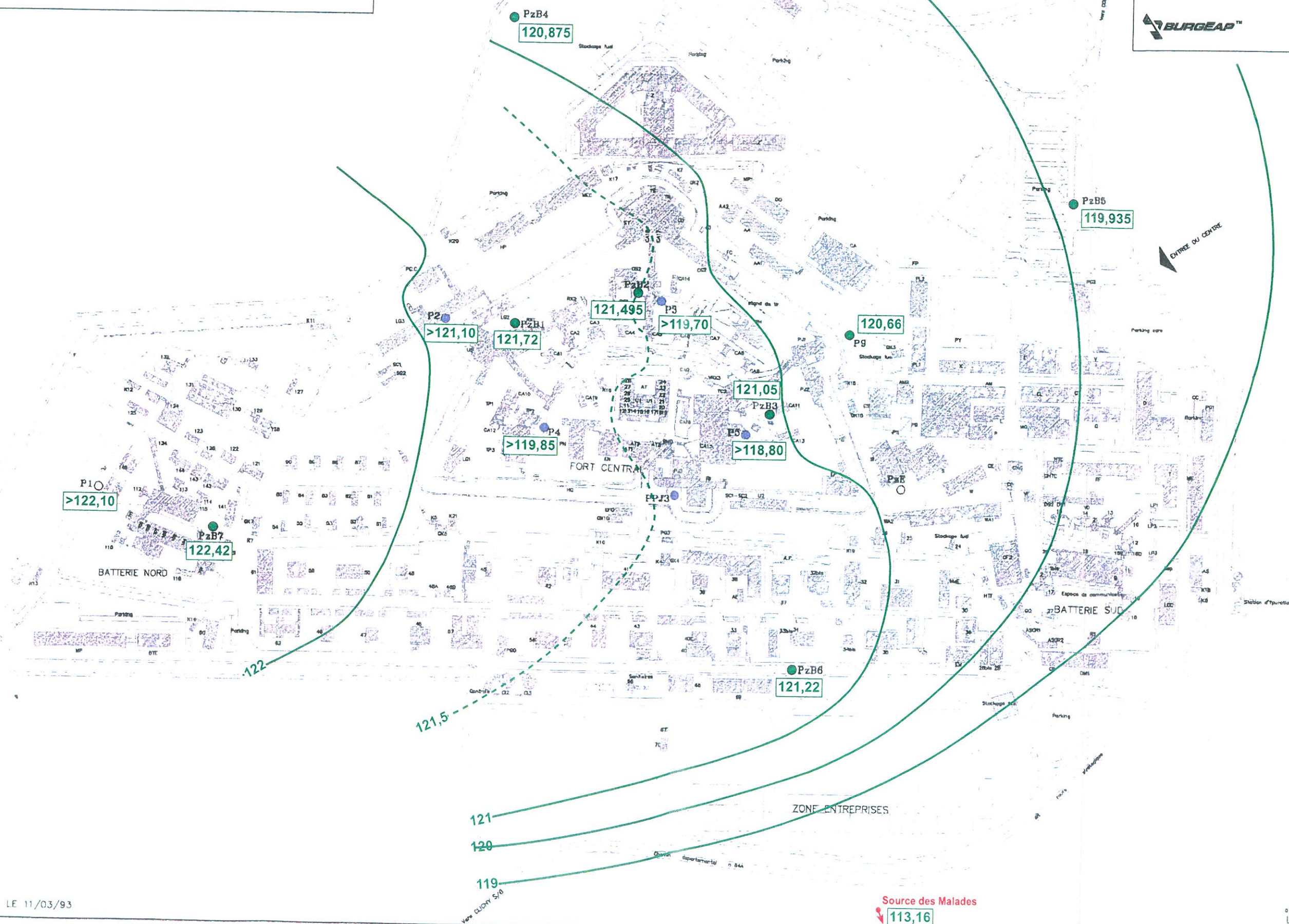
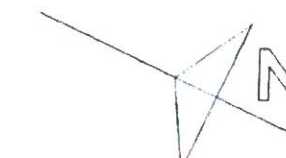
FIGURES



CARTE DES ESQUISSES PIEZOMETRIQUES DE LA NAPPE DU BRIE

R.3460
C.301511

— Courbe piézométrique

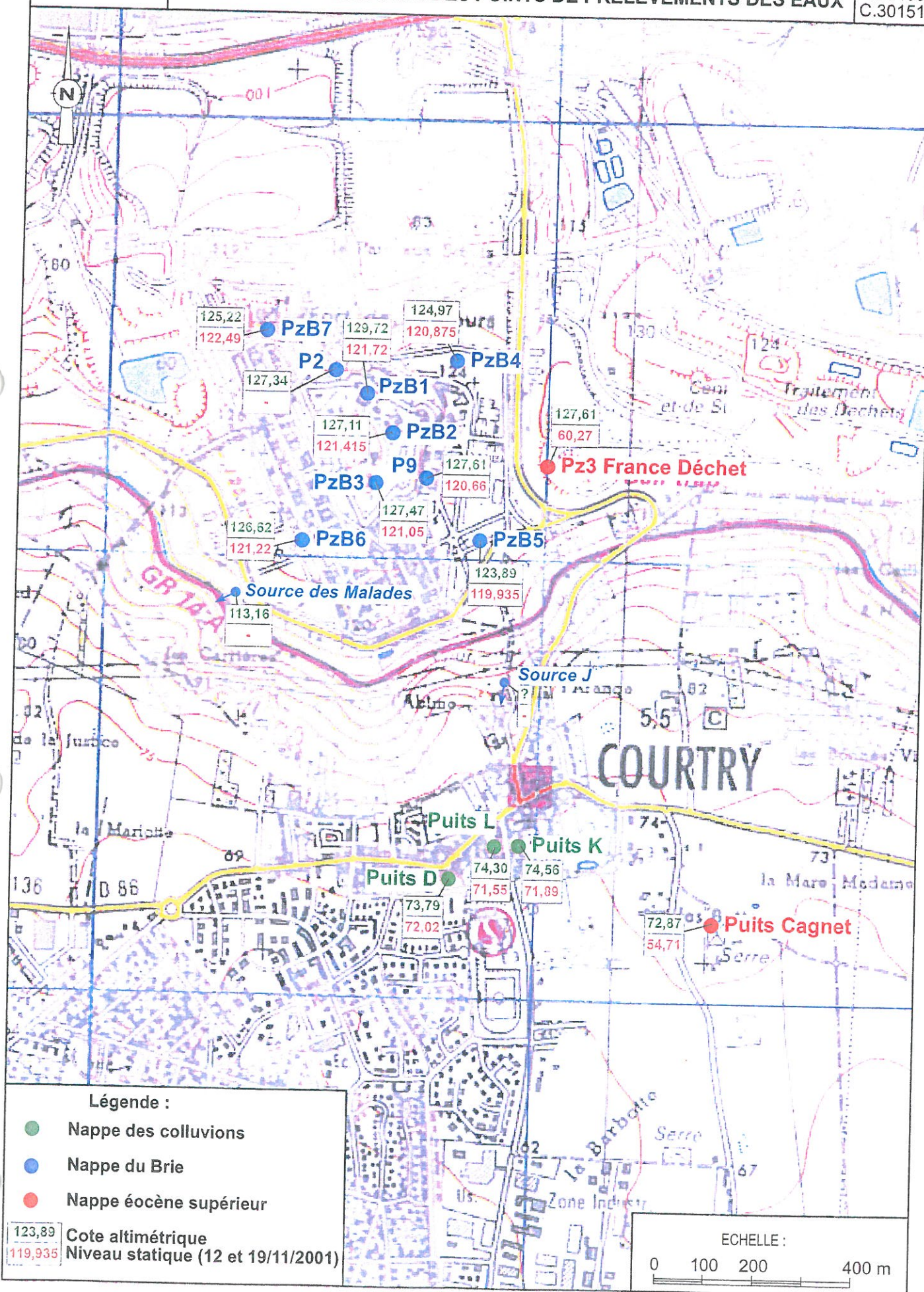


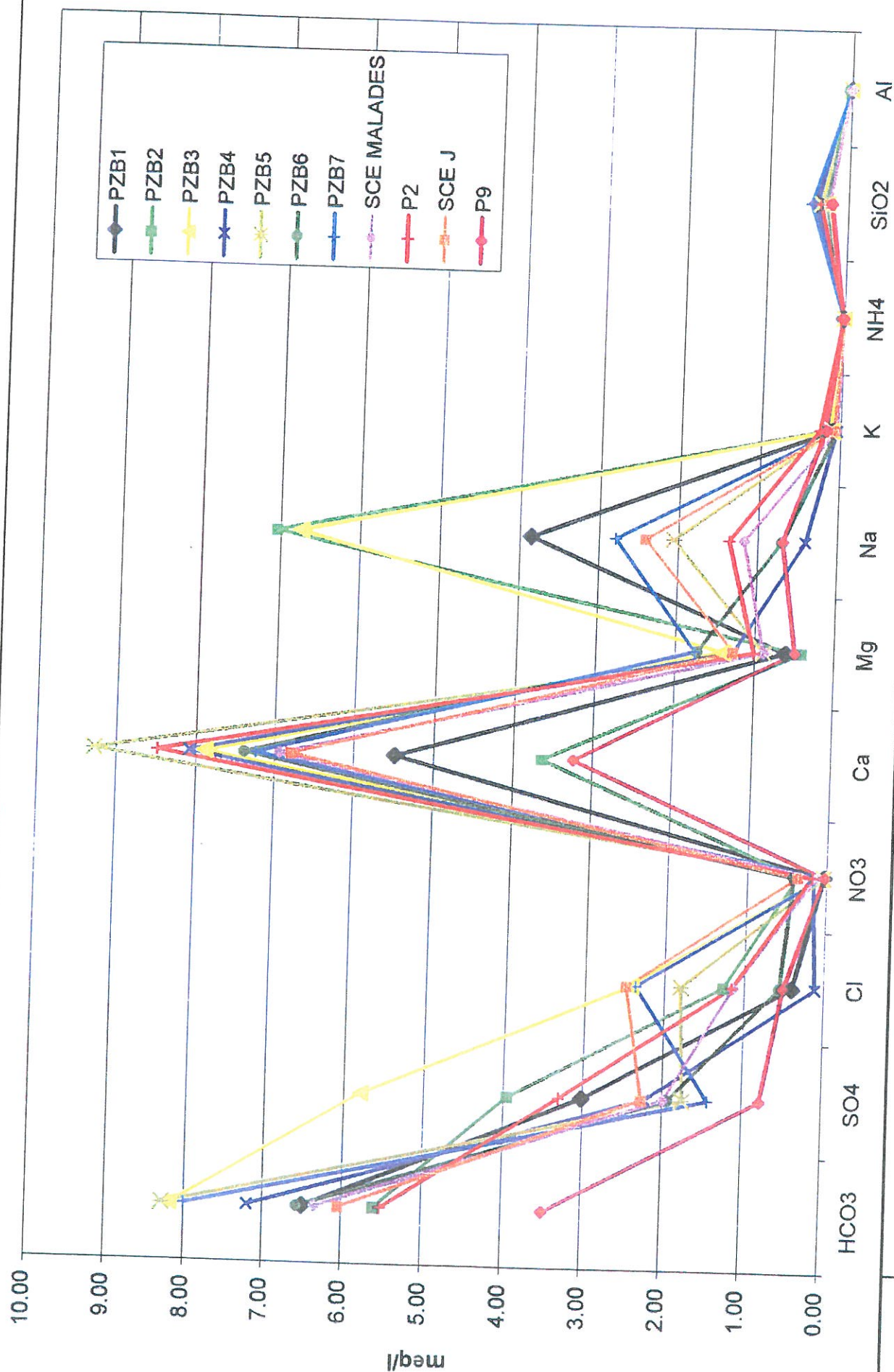
BGP135/2

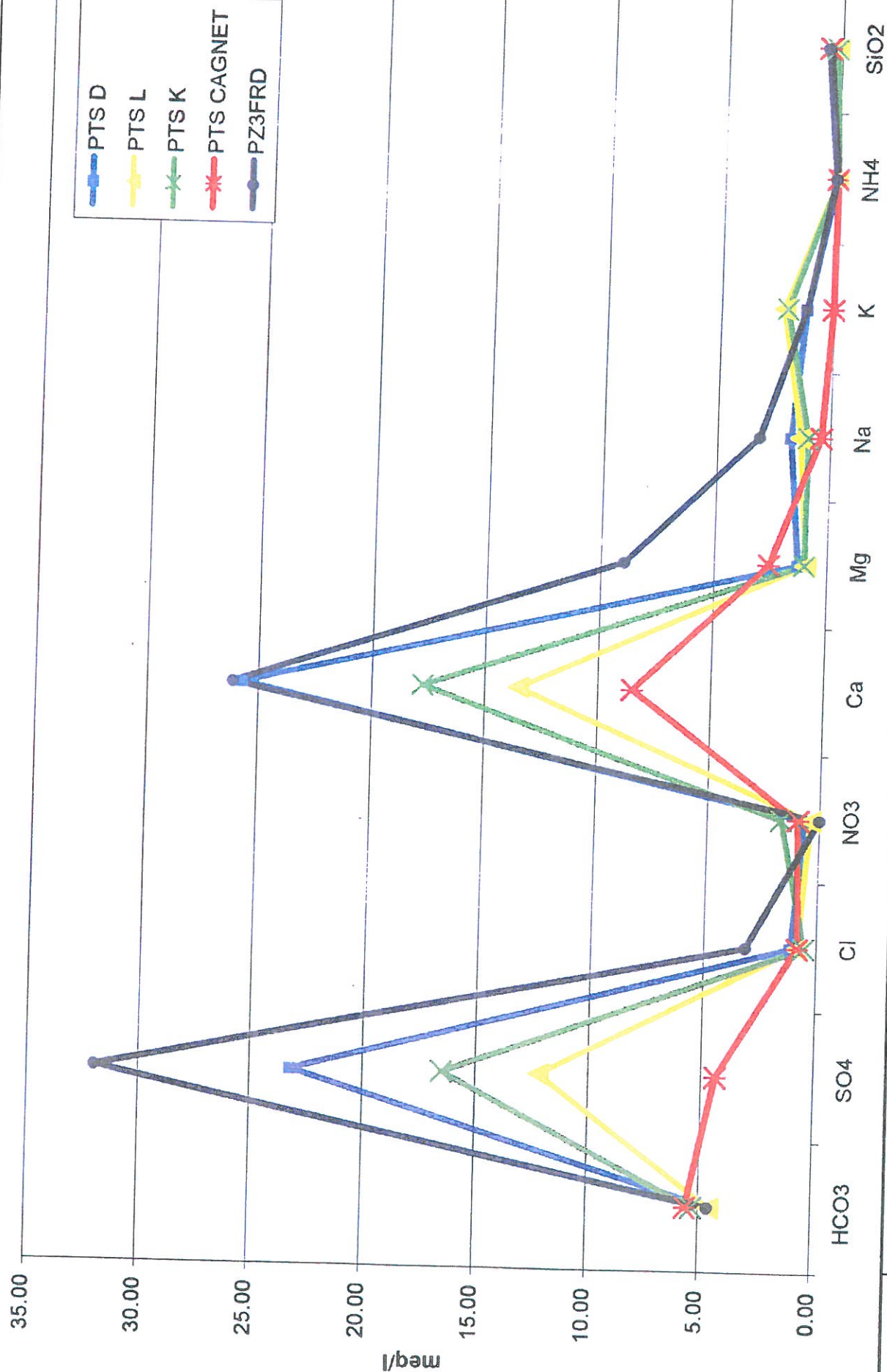
D.A.D. - GT. LE 11/03/93

Source des Malades
113,16









CEA / DAM - FORT DE VAUJOURS (93)

PROFIL CHIMIQUE DES EAUX PRELEVEES DANS LA NAPPE DES COLLUVIONS ET
DANS CELLE DE L'EOCENE SUPERIEUR