

Etude radiologique et hydrogéologique du site de Vaujours

Rapport d'expertise à Messieurs les Préfets de Seine Saint Denis et de Seine et Marne

Robert Guillaumont, Jean Pierre Adloff et Laurent Dever

I - Généralités

De 1955 à fin 1997 le site de Vaujours a servi au CEA pour diverses expérimentations concernant la mise au point de la force de dissuasion française et en particulier de nombreux tirs utilisant de l'uranium y ont été réalisés. Les tirs à l'air libre ont cessé au début des années 1960. Ils ont ensuite été poursuivis en casemates jusqu'en 1992. Ils ont mis en œuvre environ 1200 kg d'uranium pour l'essentiel récupérés après les tirs, excepté la faible partie dispersée sous forme de très fines particules d'uranium oxydé. Le centre d'étude de Vaujours (CEV) a été assaini entre août 1996 et janvier 1998. Le dossier d'abandon d'activité du CEV décrit, à la date de février 1998, l'état radiologique du site. Un projet d'instauration de servitudes d'utilité publique a été soumis à enquête publique du 9 mai au 10 juin 2000. Cette enquête a révélé de fortes préoccupations exprimées par plusieurs mairies et associations locales visant à une meilleure connaissance et à une meilleure compréhension de la situation radiologique et hydrogéologique du site.

1 – Instances mises en place pour l'expertise

Afin de répondre à ces préoccupations, le Préfet de la Seine et Marne et le Préfet de la Seine Saint Denis ont conjointement décidé de faire procéder par le CEA à un complément d'étude et à une expertise très ouverte et transparente sur les conditions de son déroulement. Pour cela ils ont mis en place une Commission de Suivi (CS) relative à l'abandon du site. Un groupe d'experts indépendants, présidé par le professeur R. Guillaumont, a été chargé d'effectuer l'expertise technique concernant la situation radiologique et hydrogéologique du CEV, selon les termes d'une lettre de mission figurant en annexe 1. Par ailleurs l'expertise de la situation sanitaire a été conduite par un « Groupe Santé » qui remet un rapport séparé de celui-ci.

La réunion d'installation de CS s'est tenue le 25 janvier 2001 à Courtry. Lors de cette réunion, il a été décidé la constitution d'un groupe de travail technique (GT) présidé par la DRIRE Ile de France, dont la composition est quadripartite comme la CS, (représentants de l'état, des élus, des associations et du CEA/ Ministère de la Défense). Ce GT a lui même désigné un groupe de travail restreint (GTR) pour analyser régulièrement les résultats radiologiques et ceux concernant l'hydrogéologie et pour proposer en conséquence les actions à mener (l'annexe 2 donne la composition du CS, GT et GTR).

Le CEA, maître d'ouvrage des études techniques, a proposé au professeur Guillaumont de désigner les sociétés Subatech et Burgéap, respectivement compétentes dans les domaines de la surveillance radiologique et de l'hydrogéologie, comme maîtres d'œuvre techniques. Par ailleurs le professeur Guillaumont et ses collègues experts, les professeurs J. P. Adloff et L. Dever, ont demandé au CEA d'effectuer également des mesures radiométriques.

Les comptes rendus de toutes les réunions du CS, du GT et du GTR sont disponibles auprès de la DRIRE ainsi que les documents techniques et rapports émis au cours de l'expertise.

Tous les détails des débats, des mesures et de leur interprétation y figurent. Ce rapport va à l'essentiel.

2 - Site de Vaujours

La figure 1 présente le plan du CEV en distinguant le fort central et l'extérieur du fort. On y voit notamment les zones de tirs où de l'uranium a été mis en œuvre et les puits de drainage des réseaux de collecte des eaux pluviales (et des eaux de lavage des casemates de tirs), éléments qui sont fréquemment cités dans ce rapport. La figure 2 situe le CEV dans son contexte environnemental. On y distingue les sources exutoires des eaux du site et les puits qui ont fait l'objet d'investigations.

Une synthèse documentaire concernant l'hydrogéologie du site de Vaujours effectuée par Burgéap montre qu'au droit du site se trouvent deux nappes d'eau. La première est une nappe perchée (nappe du Brie) qui au droit du fort central est à une profondeur maximale d'une dizaine de mètres et qui s'écoule vers le sud. La seconde est une nappe profonde (nappe de l'Eocène supérieur) d'extension régionale, à une profondeur de 80 mètres environ, qui s'écoule également vers le sud. Entre ces deux nappes, on rencontre du haut vers le bas, les argiles vertes, milieu très peu perméable sur lequel repose la nappe perchée, puis des marnes et enfin le gypse. Compte tenu de la très faible perméabilité des argiles vertes, la quantité d'eau qui les traverse vers le gypse est très faible. Les écoulements d'eau au dessus des argiles sont essentiellement horizontaux vers le sud et ressortent sur les côtés de la butte de Vaujours dans des colluvions argilo-marneuses de 10 mètres d'épaisseur. Quatre sources ont été identifiées dont 3 sont des exutoires de la nappe du Brie. Le reste d'eau d'infiltration ressort sous la forme d'écoulements hypodermiques difficiles à caractériser car très diffus et recouverts par des éboulis.

L'historique des puits du site a été reconstitué à partir des archives de 1870 qui décrivent ces ouvrages. Certains puits originaux sont encore en place.

3 - Objectifs de l'expertise

Les travaux complémentaires devant être entrepris sur le CEV avaient pour but de valider les résultats des mesures radiométriques déjà réalisées (teneurs en uranium et débits de dose), de faire des mesures supplémentaires en surface, en sub-surface et en profondeur et de réexaminer l'hydrogéologie du site pour préciser le cheminement des eaux d'écoulement des puits et d'une façon générale la concentration en uranium des eaux et l'origine de cet uranium.

L'atteinte de ces objectifs devait permettre de répondre aux questions retenues par l'enquête publique et même d'aller au delà puisqu'il devait en résulter une étude globale de l'état radiologique et hydrogéologique du site.

4 - Conditions de l'expertise

Le GTR a défini en premier un cahier des charges pour l'expertise qui a été approuvé par le GT et ensuite par la CS. Dans ce document général les rôles du CEA, de Subatech, de Burgéap et de la Criirad, conseiller-expert pour le compte des Associations, sont précisés ainsi que les moyens à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs. Lors du déroulement des travaux le même processus décisionnel a été suivi : discussions et propositions techniques par

le GTR, approbation par le GT puis présentation à la CS pour approbation finale. Il en a été ainsi pour toutes les grandes opérations réalisées sur le terrain qui ont fait l'objet de protocoles particuliers. Le suivi des mesures a été fait en temps réel par le GTR afin de décider, au vu des résultats d'éventuelles modifications, voire des réorientations des mesures à venir à une date donnée. Cela a conféré au GTR le caractère décisionnel nécessaire pour mener l'étude en un an et demi.

Cette façon de procéder a bien fonctionné et le dialogue au sein du GTR et du GT a toujours été très constructif.

II - Etudes sur le terrain et mesures en laboratoires

1 – Cahier des charges

Il définit en 7 points le programme des études à conduire telles qu'on pouvait logiquement les prévoir en mars 2001 compte tenu des informations disponibles. Ce cahier des charges a été suivi dans son esprit. Il a guidé le déroulement des travaux.

2 – Mesures concernant l'uranium

Les mesures radiométriques de terrain permettent de détecter et de mesurer les radionucléides émetteurs gamma d'énergie suffisante et les émetteurs bêta si l'appareil de mesure est proche de la source (sols ou murs). Les mesures radiométriques courantes en laboratoire permettent de mesurer les radionucléides émetteurs gamma, bêta ou alpha. La précision des mesures est limitée du fait des fluctuations statistiques radioactives et il s'ensuit que les rapports isotopiques mesurés par radioactivité gamma ou alpha, comme par exemple le rapport uranium 235/uranium 238 (U235/U238), sont entachés d'une grande incertitude. Les techniques de spectrométrie de masse permettent de mesurer directement, sans faire appel à la radioactivité, les concentrations de nombreux isotopes dans un échantillon donné. Dans leur version la plus performante on peut avoir accès aux rapports isotopiques avec une très grande précision. Ces mesures sont longues et délicates à mettre en œuvre, notamment sur des échantillons solides de sols qu'il faut complètement dissoudre. Le CEA disposant de cette technique a été sollicité pour faire ces mesures.

L'uranium utilisé dans les expériences à Vaujours était de l'uranium naturel et des uraniums de qualité militaire appauvris en U235. Cette particularité a été précieuse pour l'expertise.

L'uranium naturel a une composition isotopique invariable caractérisée par un rapport isotopique atomique U235/U238 égal à 0,00725. U238 n'émet pas de gamma facilement mesurables mais il est en équilibre avec des radionucléides qui sont ses descendants. Ces derniers ont la même activité que U238 et certains d'entre eux sont des émetteurs gamma facilement mesurables. Il s'agit des radionucléides suivants: thorium 234, protactinium 234métastable et radium 226 avec ses descendants notamment bismuth 214 et plomb 214 (qui signent en général l'uranium naturel). U235, également en équilibre avec ses descendants, est généralement mesuré par ses propres rayonnements gamma.

L'uranium naturel manufacturé (ou anthropique) a la même composition isotopique que l'uranium naturel mais il n'est plus en équilibre avec le radium 226. L'uranium appauvri est caractérisé par un rapport isotopique U235/U238 inférieur à celui de l'uranium naturel et il n'est pas non plus en équilibre avec le radium 226 et ses descendants. L'analyse des terres

contaminées et enlevées de Vaujours lors de l'assainissement du site en 1998 et actuellement entreposées montre que l'uranium utilisé à Vaujours a un rapport isotopique atomique moyen U235/U238 de 0,00671 (plusieurs mesures ont été faites sur ces terres) mais de l'uranium avec un rapport isotopique aussi faible que 0,002 a aussi été utilisé en zone RX1. Cette différence d'isotopie (relativement à l'isotopie naturelle) même lorsqu'elle est très faible permet de "tracer" l'uranium anthropique, c'est à dire de connaître où se trouve l'uranium ayant servi aux expérimentations du CEV.

L'activité moyenne en uranium naturel des sols de la région de Vaujours correspond à environ 40 becquerels de U238 par kilogramme de sol sec (40 Bq/kg en U238) soit une concentration d'environ 3 milligrammes de U238 par kilogramme de sol (1 Bq de U238 correspond à 80 microgrammes de U238). La présence de cet uranium et de ses descendants induit un débit de dose moyen à 1 mètre du sol de l'ordre de 0,025 microgray par heure dû au rayonnement gamma (ou de 0,025 millisievert ce qui est équivalent dans le cas du rayonnement gamma). A cela il faut ajouter l'effet des rayonnements gamma des autres radionucléides naturels présents dans les sols, qui conduit à une dose à peu près égale à celle donnée par l'uranium. Ainsi le débit de dose naturel à 1 mètre du sol est de l'ordre de 0,05 microgray par heure. En raison de la présence dans les sols de radionucléides naturels il convient de déterminer, avant toute mesure d'activité, le bruit de fond d'activité naturelle pour chaque appareil de mesure de radioactivité.

En cas de marquage d'une zone du sol par un excès d'uranium naturel ou appauvri (par rapport à la teneur naturelle), l'activité et le débit de dose augmentent au droit de la zone par rapport aux valeurs naturelles. Dans ce rapport, on appelle « points singuliers », des zones définies comme ayant une activité gamma supérieure à 3 fois le bruit de fond du site. Cette limite est de nature opérationnelle et n'a rien de réglementaire, elle permet seulement de repérer sans contestation un marquage du sol, compte tenu des variations naturelles de radioactivité.

Il convient de rappeler que les limites d'activité de U238 et de débit de dose de référence indiqués par la Direction Générale de la Santé (DGS) en 1998 pour que le site de Vaujours soit rendu accessible au public, sont respectivement de 5000 Bq/kg et 1 microgray par heure (à 1 mètre du sol). Ces valeurs sont considérées par la Criirad comme non fondées. Notons qu'un sol contaminé à 5000 Bq/kg de U238 anthropique donnerait une dose annuelle de 0,06 millisievert (calculée pour un séjour de 2000 heures), soit vingt fois inférieure à la valeur d'exposition du public de 1 millisievert par an fixée par le décret de droit français 2002-460 du 4 avril 2002.

La concentration de l'uranium naturel dans les eaux naturelles est de quelques microgrammes par litre.

Les résultats obtenus par Subatech, la Criirad et le CEA ont toujours été concordants aux incertitudes de mesures près.

3 - Déroulement des travaux et résultats

Plusieurs opérations lourdes se sont déroulées sur le terrain. Certaines ont donné des résultats directs. Pour les autres les mesures ont été faites en laboratoire. Les opérations sur le terrain ont été menées par Subatech et la Criirad en présence des Associations, du CEA et quelques fois d'un expert.

3.1 - Campagnes de « scanning gamma »

Le repérage de points singuliers au sol et sur les murs intérieurs des casemates était la première opération à entreprendre. Elle a eu lieu selon un maillage plus ou moins serré compte tenu de la configuration du terrain et selon un protocole défini.

Cette cartographie gamma s'est déroulée en 2 temps : une première campagne du 23 avril au 11 mai 2001 puis une seconde du 10 au 12 juillet en zone CA14 (à l'intérieur du fort central) couplée avec la deuxième campagne de prélèvements d'échantillons de sol (voir ci-dessous). L'extérieur et l'intérieur du fort central (y compris les casemates d'expérimentation) ont été complètement explorés. Au total, 36 points singuliers ont été mis en évidence, dont 2 à l'extérieur du fort central. Les activités de trois de ces points, dont les deux à l'extérieur du fort, étaient dues à des débris de sources radioactives de paratonnerres (présence de radium 226 et d'américium 241). Les points singuliers détectés et leurs activités par rapport au bruit de fond sont présentés sur la figure 3. Les débris de sources de paratonnerre ont été enlevés le 26 juin 2001.

L'activité des murs des casemates a été supprimée par piquage.

3.2 - Campagne de prélèvements d'échantillons

Un protocole définissant les modalités de prélèvement de sol, la préparation des lots à analyser et la répartition des lots ainsi que la méthode de mesure par spectrométrie gamma, a été approuvé par les différentes parties. Des prélèvements ont été effectués en surface ou sous-surface et en profondeur par sondage et carottage (voir ci-dessous).

3.2.1 - Prélèvements de sols et de mousses

Deux campagnes de prélèvements ont été effectuées : du 26 au 29 juin 2001 puis du 10 au 12 juillet. En chaque emplacement, 3 échantillons de sol ont été prélevés sur une profondeur de 30 cm : tranche 0 - 10 cm, tranche 10 - 20 cm et tranche 20 - 30 cm. A l'exception de la zone CA14, des prélèvements de sols ont été réalisés sur l'ensemble des points singuliers détectés par le scanning gamma. Pour CA14, compte tenu du nombre important de points singuliers dans cette zone (17), un échantillonnage représentatif (9 prélèvements) a été choisi. Dans l'aire de brûlage, malgré l'absence de point singulier, deux prélèvements ont été effectués. Enfin des prélèvements de référence ont été réalisés.

Les résultats des mesures pour les sols sont présentés sur la figure 4. Ils correspondent à l'analyse de l'ensemble des tranches 0-10 cm et 20-30 cm de tous les points singuliers et des points de référence.

Des prélèvements de mousses, utilisées comme bio-indicateurs, ont été réalisés par la Criirad à l'intérieur et à l'extérieur du site de Vaujours : 3 à l'intérieur du fort central, 3 à l'extérieur du fort central et 3 à l'extérieur du site de Vaujours.

La localisation des prélèvements de mousses est présentée sur la figure 5.

Ces résultats appellent les remarques suivantes.

Echantillons de référence toutes zones

L'activité des prélèvements de référence, correspondant au bruit de fond, mesurée sur 8 points du fort central (1 en RX1, 4 en CA14, 1 en PH, 2 autres en RX3) correspond à la teneur naturelle moyenne en uranium des sols de la région, d'environ 40 Bq/kg en U238.

Zone RX1 et PH

L'activité des échantillons prélevés en zone RX1 (PS4 et PS5) et PH (PS2 et PS3) correspond à un niveau d'activité naturelle. Les débits de dose plus élevés que la normale observés lors des mesures de la cartographie gamma par Subatech sur ces quatre points singuliers ont pour origine la radioactivité naturelle des pierres et roches environnantes qui ont été écartées dans la préparation des échantillons de terrain.

Zone en face de la casemate CA3

Les 2 échantillons prélevés au niveau des points singuliers PS1 et PC9 présentent un net marquage en U238 : activité de 12 000 Bq/kg en surface et 270 Bq/kg dans la tranche 20 - 30 cm. Cet uranium provient probablement d'une contamination résiduelle au moment de l'évacuation des déchets contaminés de la zone RX1 (ces points coïncident avec l'emplacement de la benne destinée à recevoir ces déchets).

Zone de la casemate CA5

Les échantillons prélevés en surface au niveau du point singulier PS8 présentent un marquage en radium 226 et américium 241 : environ 700 Bq/kg en radium et 60 Bq/kg en américium. Cette activité est due à quelques reliquats des débris de la source de paratonnerre qui avaient été supprimés par le CEA lors de son intervention le 26 juin 2001. Cette zone n'est pas contaminée en uranium. Dans les échantillons de sols au point singulier PS8, il n'y a pas de plutonium 241 qui aurait pu donner naissance à son descendant l'américium 241. Les teneurs en isotopes plutonium 239 et plutonium 240 proviennent des retombées des expérimentations nucléaires mondiales. Il en est de même pour le césium 137. Compte tenu de l'ensemble de ces résultats, il y a deux origines possibles pour expliquer la présence de cet américium. La première, peu probable, serait un détecteur d'incendie (432 détecteurs ont été retirés en 1997). La seconde, plus vraisemblable, serait un ancien paratonnerre à l'américium 241 installé par les militaires et foudroyé (voir fiche du CEA sur ces mesures).

Zone RX3

L'activité en surface atteint 30 000 Bq/kg en U238 au point PS7 et est comprise entre 900 et 1300 Bq/kg dans la tranche 20 - 30 cm des 3 points singuliers PS6, PS7 et PC8.

Zone CA14

On observe des contaminations élevées en U238 en surface, atteignant 150 000 Bq/kg au niveau du point singulier PS14. Les tranches 20-30 cm présentent des valeurs comprises entre 400 et 1 800 Bq/kg. Quelques fragments d'uranium métallique ont été trouvés. La zone contaminée représente une surface de 200 m² environ (20 mètres sur 10 mètres).

Mousses

Aucune trace d'uranium n'a été détectée sur les 9 échantillons de mousse (résultats inférieurs à une limite de détection de 150 Bq/kg sec de mousse), à l'exception d'un échantillon prélevé sur un muret de la zone RX1 pour lequel une activité de l'ordre de 200 Bq/kg sec, soit légèrement au dessus du bruit de fond, a été mesurée. Les mousses ne

révèlent pas d'impact environnemental à l'extérieur du fort central, c'est à dire dans le site de Vaujours et son environnement.

Les rapports isotopiques U235/U238, mesurés par spectrométrie gamma avec une incertitude importante, ne permettent pas de conclure quant à la présence ou non d'uranium anthropique dans les prélèvements de sol effectués.

A la suite de ces mesures il a été décidé, selon le processus décrit, et conformément à un protocole présenté par le CEA, de procéder à l'enlèvement des terres autour de tous les points singuliers (après un contrôle gamma de surface, très fin, autour des prélèvements) et sur toute la zone CA14 jusqu'à la profondeur nécessaire pour éliminer toute activité dépassant 3 fois le bruit de fond. Après cette opération une nouvelle cartographie gamma détaillée devait être effectuée et des prélèvements devaient être réalisés et analysés en cas de découverte de nouveaux points singuliers.

La zone CA14 n'a pas été utilisée pour les expérimentations et n'a pas fait l'objet de travaux d'assainissement en 1997-1998. Il était donc surprenant qu'elle soit contaminée en uranium. Le scénario le plus probable pour expliquer la contamination constatée est que des déchets, considérés comme peu contaminés selon les recommandations de l'époque, ont été déplacés depuis la zone PH pendant les années 1958-1960. Compte tenu de l'importance des opérations d'assainissement du fort central entreprises par le CEA en 1997-1998, la prise en compte de la zone CA14 n'aurait pas occasionné une augmentation importante des coûts. Cette zone n'a donc pas été volontairement oubliée lors des opérations d'assainissement.

3.2.2 - Prélèvements en profondeur

Pour déceler une éventuelle accumulation d'uranium en profondeur, la concentration de l'uranium et le rapport isotopique U235/U238 ont été mesurés par spectrométrie de masse sur des échantillons de forage notamment sur des carottes des forages PzB1 et PzE (voir ci-dessous) correspondant aux différents horizons des terrains. L'interface calcaire de Brie/argiles vertes (entre 7 et 9 mètres) a été particulièrement examiné en raison d'une possible rétention préférentielle d'uranium sur les minéraux argileux durant les dernières décennies.

Il n'y a pas d'anomalies de concentration en uranium dans les carottes des forages PzB1 et PzE correspondant notamment aux calcaires du Brie, aux argiles vertes, aux marnes supragypseuses, et aux deux premières masses du gypse, ni aux interfaces. Les variations de concentration (figure 6) sont liées à la nature des couches lithologiques c'est à dire à leur composition minéralogique ce qui ne confirme pas l'hypothèse d'une accumulation d'uranium au cours du temps dans cette zone. Les rapports isotopiques U235/U238 à l'interface calcaire du Brie/argiles vertes sont, aux incertitudes près, ceux de l'uranium naturel. Deux échantillons (vers 8-9 mètres) présentent un rapport isotopique atomique de 0,00705 avec des incertitudes associées qui sembleraient indiquer un très léger écart par rapport aux valeurs naturelles mais ces écarts ne peuvent être considérés comme vraiment significatifs. Aucun apport d'uranium appauvri utilisé dans les expérimentations n'est donc décelable.

3.3 - Campagne d'enlèvement de terres contaminées

L'assainissement de la zone CA 14 et des points singuliers dans le fort de Vaujours a été réalisé selon un cahier des charges établi par le CEA. Cette opération lourde a nécessité le

traitement d'une surface d'environ 950 m² en CA14. Elle a permis de récupérer des petits morceaux d'uranium métallique oxydé en surface (872 grammes). Le bilan déchets est de 2 fûts de 200 l (71 kg) de déchets FA (faible activité) et de 20 "big-bag" (environ 18 tonnes) de terre contaminée TFA (très faible activité). Tous les déchets ont été évacués du site.

3.4 - Campagne de contrôle radiologique et de mesure par « Autonuc »

Les mesures de contrôle du site ont été réalisées selon un protocole adopté le 12 avril 2002 en GTR. Un contrôle supplémentaire consistant en 4 prélèvements de sol en des points des zones CA 14 et RX1 choisis par la Criirad a aussi été réalisé. La campagne de détection gamma auto-portée Autonuc en dehors du fort central s'est déroulée comme prévu. Les Associations ont participé à ces deux contrôles.

Lors du contrôle de la zone CA 14 et des zones où se trouvaient les points singuliers il n'a pas été détecté d'activité supérieure à 3 fois le bruit de fond. En fait toutes les activités mesurées sont proches de celles des bruits de fond des terrains et des roches. Les débits de doses à 1 m du sol sont normaux.

Ainsi, compte tenu de la totalité des mesures qui ont été effectuées et notamment des mesures de contrôle il n'existe plus, sur le fort central, en surface et en sub-surface de points d'activité anormale. En effet la fourchette des valeurs mesurées est comprise dans les fluctuations radioactives du bruit de fond.

En dehors du fort central les mesures faites à l'aide d'un système de détecteur gamma haute performance auto-porté "Autonuc" montrent qu'il n'y a pas d'anomalie radiologique. Ainsi les doutes sur la présence d'une éventuelle source radioactive comme celles trouvées précédemment sont levés.

3.5 - Campagne de reconnaissance des puits

Des inspections avec caméra des puits en fonctionnement ont été effectuées en septembre 2001 afin de vérifier leur état et de confirmer ou infirmer l'existence de poches de dissolution qui auraient pu se former au droit de ces puits. Lors de ces inspections, les observations ont montré qu'il n'y a aucune dissolution importante de gypse en fond de puits (peut être de l'ordre de 10 mètres cubes au maximum), que des éboulis existent sur quelques mètres dans tous les fonds de puits et qu'il n'y a pas de sédiments au fond des puits. La mesure de concentration en uranium dans les sédiments qui avait été planifiée n'a, de ce fait, pu avoir lieu. Des galeries horizontales d'évacuation repérées sur certains puits n'ont pas pu être examinées. Des galeries doivent se trouver sous les éboulis.

3.6 - Campagnes de forages, d'implantation de piézomètres et de forage profond

Une coupe schématique des formations géologiques du site de Vaujours est donnée figure 8. L'objectif de ces campagnes était de mieux caractériser ces formations géologiques et les nappes d'eau du site, de lever les indéterminations qui subsistaient au vu des informations disponibles sur le fonctionnement du système de percolation des eaux souterraines, en particulier d'identifier les exutoires en contrebas du site de Vaujours des eaux transitant par les puits de drainage et de mesurer les concentrations en uranium dans les eaux et horizons du sous-sol. Sept sondages (PzB1 à PzB7), dont 3 carottés, ont été réalisés en septembre 2001 dans le calcaire du Brie et ont été équipés de piézomètres. Ces sondages d'une dizaine de

mètres ont été effectués à proximité immédiate de points singuliers. Un huitième sondage (PzE) a une profondeur supérieure à 80 mètres jusqu'à l'Eocène a été carotté puis équipé de « packers » fin 2001. Sa partie inférieure non carottée a atteint les sables de Beauchamp (100 m).

La localisation des sondages à l'intérieur et à l'extérieur du fort central est portée sur la figure 9.

En étudiant les niveaux d'eau et les débits des piézomètres, on a établi :

- le sens d'écoulement préférentiel de la nappe du calcaire de Brie. Les relevés topographiques précis de la tête des puits, ainsi que l'établissement de la chronique des variations de niveaux piézométriques, montrent que la nappe du Brie répond très rapidement aux événements pluviométriques et que son écoulement se fait quasi intégralement vers le sud. Pour aller aux colluvions le trajet des eaux d'infiltration au droit du site, qui est d'environ de 3 à 400 mètres, demande un an.

- la perméabilité des formations. Le relevé des niveaux d'eau dans le forage PzE suite à l'individualisation des différentes formations géologiques par des packers montre qu'il n'existe aucune percolation « per descensum » de l'eau au travers des formations des argiles vertes, marnes supragypseuses et gypse « stricto sensu ». Les temps de transit calculés sont de l'ordre de plusieurs centaines voire milliers d'années et cela confirme, par la même, le caractère imperméable de ces formations.

- la charge de la nappe de l'Eocène. La nappe de l'Eocène (Sables de Beauchamp) est en charge (niveau piézométrique à une cote supérieure à celle du toit de l'aquifère) sous une couverture de calcaire marneux qui peut être considérée comme imperméable.

Sous conditions d'infiltrations naturelles, aucune percolation vers les horizons sous-jacents au calcaire de Brie n'est possible. Seules les percolations rapides (quelques jours) des eaux de pluie et de la nappe perchée du Brie, drainées par les puits, sont possibles. Elles vont aux colluvions où elles sont diluées par les eaux de ruissellement.

3.7 - Campagnes de prélèvement d'eaux

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux au droit (piézomètres) et à l'aval (sources et puits) du site de Vaujours, c'est à dire sur le flanc Sud de la butte ont été déterminées en analysant les eaux à partir des prélèvements effectués en novembre 2001 et en avril-mai 2002. Trois aquifères ont été échantillonnés : l'aquifère des calcaires de Brie, l'aquifère des Sables de Beauchamp (Eocène) et l'aquifère contenu dans les colluvions en bordure de pente de la butte. Novembre marque le début de la période de recharge des nappes et avril la fin de la période de recharge. Ces deux campagnes de prélèvement d'eau ont permis de cerner les variations de concentrations de nombreux éléments, y compris celles de l'uranium, en fonction des conditions météorologiques (essentiellement pluviométrie). Trois prélèvements supplémentaires ont été effectués lors de la deuxième campagne dans la nappe de l'Eocène au niveau du piézomètre PzE à différentes profondeurs.

Les concentrations en uranium des eaux collectées par les puits du fort central ont aussi été mesurées.

Les protocoles de prélèvements, de conditionnement et d'analyse des eaux ont été approuvés selon le processus habituel et ont été similaires au cours des deux campagnes. La figure 10 donne les valeurs des concentrations en uranium pour les deux campagnes. La figure 11 donne l'ensemble des valeurs des rapports isotopiques U235/U238.

Les analyses des éléments majeurs font ressortir que :

- les eaux de la nappe du Brie sont carbonatées calciques, assez faiblement minéralisées. Le profil chimique des eaux est semblable entre novembre 2001 et avril 2002. Au droit du Fort Central, les eaux de la nappe du Brie (PzB1, PzB2, PzB3) sont enrichies en sulfates (mais aussi en sodium d'origine inconnue). En effet 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, se chargent en sulfate et calcium au contact du gypse. Les concentrations en uranium dans la nappe du Brie sont globalement stables entre novembre 2001 et avril 2002. Elles sont deux à trois fois plus élevées au droit du fort central que dans le reste de la nappe. Seules les eaux prélevées dans le piézomètre PzB1 ont des rapports isotopiques U235/U238 légèrement inférieurs à celui de l'uranium naturel
- les eaux de la nappe des Colluvions sont sulfatées calciques, assez fortement minéralisées. La teneur en éléments des eaux prélevées en avril 2002 sont légèrement inférieures à celles des eaux prélevées en novembre 2001 en raison de la dilution due à la recharge de la nappe. Pour la même raison les teneurs en uranium sont plus faibles en avril 2002 qu'en novembre 2001. Le rapport isotopique U235/U238 mesuré sur ces eaux est celui de l'uranium naturel.
- les eaux de la nappe de l'Eocène Supérieur (Pz3 France-Déchets et PzE), première nappe régionale au droit du site de Vaujours, sont des eaux sulfatées calciques, fortement minéralisées. La teneur en uranium dans la nappe de l'Eocène Supérieur est deux fois plus élevée en PzE qu'en Pz3 France-Déchets. Cette différence est liée à des variations de faciès des formations de l'Eocène Supérieur entre ces deux points de prélèvement comme le confirment les rapports isotopiques U235/U238 mesurés sur ces eaux, qui sont caractéristiques de l'uranium naturel.

Ainsi les eaux de l'aquifère du calcaire de Brie présentent un faciès bicarbonaté calcique. En revanche, les eaux de l'aquifère de l'Eocène et dans une moindre mesure les eaux des colluvions présentent un faciès sulfaté calcique. Ces eaux sont donc différentes. Il apparaît que le faciès chimique des différentes eaux échantillonnées représente un mélange entre les eaux bicarbonatées calciques du calcaire de Brie et une eau à saturation vis à vis du gypse.

Pour ce qui concerne les eaux de ruissellement seules celles collectées dans le puits P2 présentent un rapport isotopique U235/U238 inférieur à celui de l'uranium naturel. A l'extérieur du site aucune anomalie de ce rapport n'a été constaté.

L'ensemble de ces mesures montrent que les concentrations en uranium 238 ne présentent pas d'anomalies, sont faibles et dans une gamme de concentration comprise entre 2 et 10 microgrammes par litre conformes aux valeurs naturelles. Les concentrations les plus élevées ont été mesurées sur les échantillons provenant du fort central dans la partie la plus en amont de l'écoulement. Elles diminuent à mesure qu'on s'éloigne en suivant le sens de l'écoulement. Les valeurs les plus faibles sont atteintes au niveau des puits de Courtry. Toutes ces valeurs sont très inférieures au seuil de potabilité des eaux souterraines qui est de 100 microgrammes par litre. Les valeurs des rapports isotopiques U235 /U238 indiquent clairement que les eaux

souterraines ne contiennent que de l'uranium naturel. Seules les valeurs mesurées en PzB1 (nappe du Brie) et P2 (eaux de ruissellement et partiellement nappe du Brie) montrent un rapport isotopique influencé par de l'apport d'uranium anthropique. Le puits P2 draine la plus large partie des eaux de ruissellement du site et des eaux de la nappe du Brie récupérées par les douves du fort central, le piézomètre PzB1 ne récolte que des eaux du Brie. Le puits P2 et le piézomètre PzB1 sont proches de la zone de tir RX1. Dans toutes les autres eaux (nappes du Brie, des colluvions et de l'Eocène Supérieur) ce marquage n'est pas décelable malgré la précision des mesures.

Ces mesures montrent que l'uranium dispersé à l'époque autour des zones de tir mentionnées ci-dessus a marqué le sol superficiellement d'une façon diffuse et que cet uranium est actuellement encore lixivié par les eaux allant au puits de drainage P2. De l'uranium est ainsi transféré via ce puits vers la nappe des colluvions où il est très dilué puisque aucun marquage en uranium appauvri n'y est décelé.

Des mesures complémentaires d'activité en tritium dans les eaux ont été réalisées à la demande de la Criirad. Les teneurs en tritium dans les eaux sont toutes inférieures à 10 Bq/l (pour les deux campagnes) et proches des valeurs typiques en région parisienne. Il n'y a pas d'apport anthropique local.

III – Conclusions

L'état radiologique du sous-sol et des nappes d'eau et le système hydrogéologique du site de Vaujours sont maintenant bien connus.

1 - Etat radiologique du site en surface

Il subsiste un marquage superficiel résiduel du sol, faible et diffus, du fort central d'une extension surfacique probablement limitée autour de la zone de tir RX1. Il s'ensuit que les eaux de ruissellement et de percolation vers le Brie collectées par le puits P2 sont localement marquées par l'uranium anthropique (uranium des expérimentations). De même, il subsiste un marquage souterrain, également faible et diffus, sous la zone RX1 qui explique le marquage observé dans le piézomètre PzB1. Les concentrations en uranium tant du sol que des eaux souterraines sont normales. On entend par là des concentrations en uranium cohérentes avec celles qui sont connues pour le milieu naturel,

A l'extérieur du fort central et sur le site il n'y a aucune anomalie radiologique.

2 - Hydrogéologie du site

Les nappes d'eaux souterraines ont leur propres caractéristiques qui montrent qu'il n'y a pas d'infiltrations naturelles verticales au travers des argiles vertes, des marnes supra-gypseuses et du gypse. Il n'y a pas de mélange des eaux de ruissellement avec les eaux de ces nappes. Les eaux de ruissellement drainées par les puits sont diluées par les eaux des colluvions.

3 - Etat radiologique du sous-sol du site

Le sous-sol du fort central (excepté localement la nappe du Brie) n'est pas marqué par l'uranium anthropique. Les variations locales de concentration en uranium jusqu'à la profondeur de 80 mètres sont liées à des variations naturelles de faciès. Les eaux des nappes

sous jacentes au site (excepté localement la nappe du Brie) ne sont pas marquées par l'uranium anthropique et elles ont des concentrations normales en uranium.

4 - Etat radiologique des environs du site

Aucune trace d'uranium utilisé dans des expérimentation n'a été décelée dans les puits aux environs du site.

IV – Recommandations

Toutes les mesures radiométriques et radiologiques réalisées sur le CEV pendant : a) les opérations de détection de zones surfaciques présentant des anomalies de radioactivité, b) l'enlèvement des parties contaminées ou simplement marquées, puis finalement c) lors des contrôles finaux pour vérifier que la radioactivité avait retrouvé ses valeurs naturelles, permettent de considérer que l'état radiologique du CEV est conforme aux règles prescrites par la DGS en 1998. La concentration en uranium du terrain en surface et sub-surface est même beaucoup plus faible que celle demandée par la DGS. En effet la radioactivité est celle du bruit de fond naturel. Toutefois la mesure d'une radioactivité surfacique égale au bruit de fond naturel n'exclut pas qu'il n'y ait pas en profondeur de source de radioactivité (uranium d'expérimentation) non détectable depuis la surface. Cela est valable pour tout terrain, mais compte tenu des expérimentations avec l'uranium effectuées dans le passé au CEV il semble raisonnable, par précaution, de maintenir la servitude qui avait été projetée concernant la radioactivité, mais de la limiter à l'emprise du fort central.

L'infiltration des eaux dans les puits de drainage du CEV conduit à la circulation d'eau au travers des fissures présentes dans le gypse. Ces eaux sortent, à flanc de butte, dans les colluvions où elles se diluent très fortement dans les eaux de ruissellement. Aucune anomalie de teneurs chimiques et isotopiques en uranium n'y a été détecté, ni dans les sources et puits de la périphérie du CEV. L'infiltration des eaux dans les puits provoque la dissolution du gypse et la création de poches de dissolution entraînant une instabilité des terrains sus-jacents. Des effondrements de ces terrains ont déjà eu lieu. Pour éviter tout risque géotechnique (futurs effondrements) les puits devraient être comblés. Cela évitera aussi toute propagation dans les eaux souterraines de l'uranium d'expérimentation encore présent de façon locale et diffuse en surface et sub-surface et par conséquent un éventuel marquage en uranium liée à un nouveau devenir du fort.

Annexes

- 1 - Lettre de mission
- 2 - Composition des instances
- 3 - Liste des documents tenue par la DRIRE
- 4 - Uranium

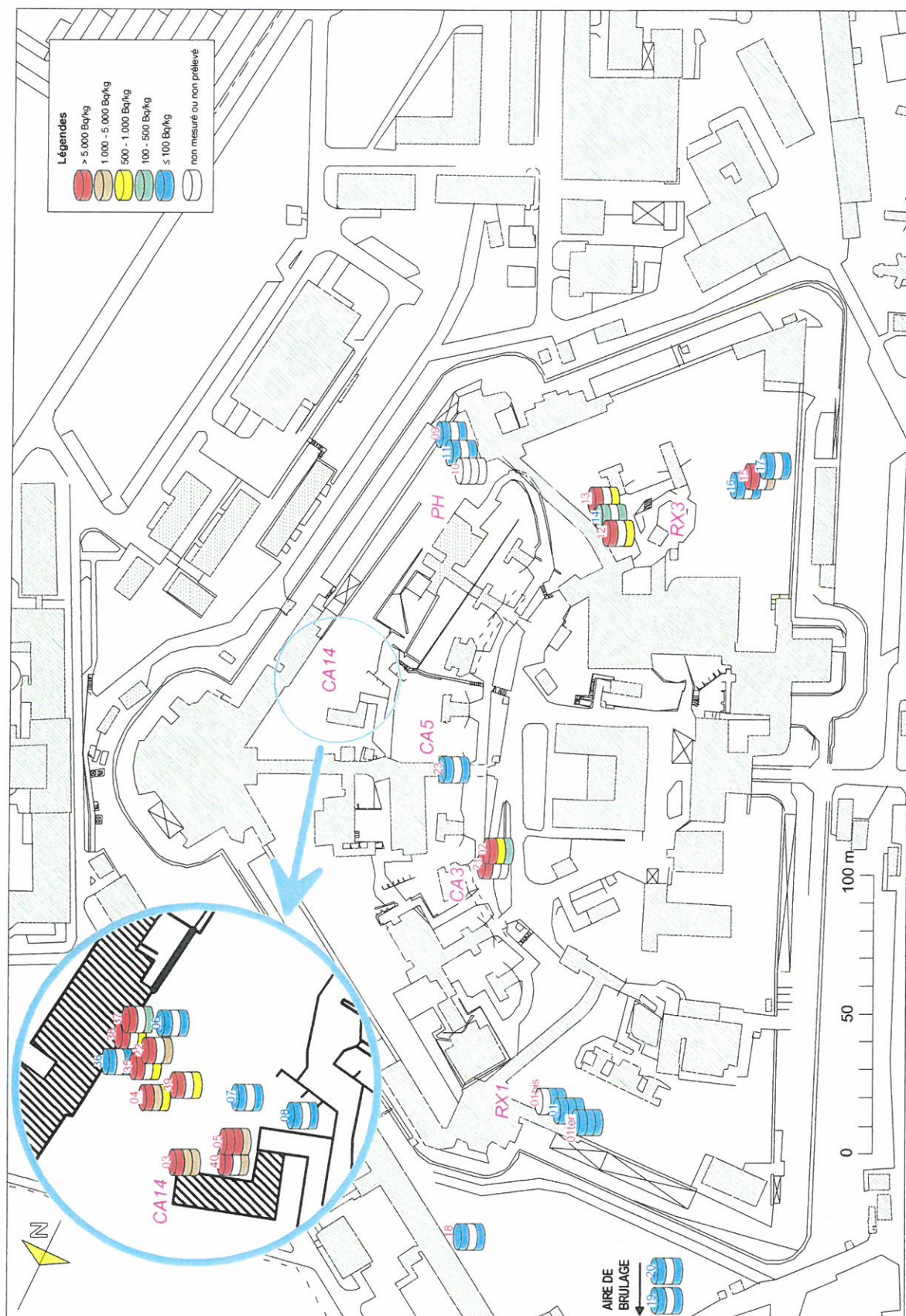


Figure 4 : Radioactivité en ^{238}U des prélèvements de sol

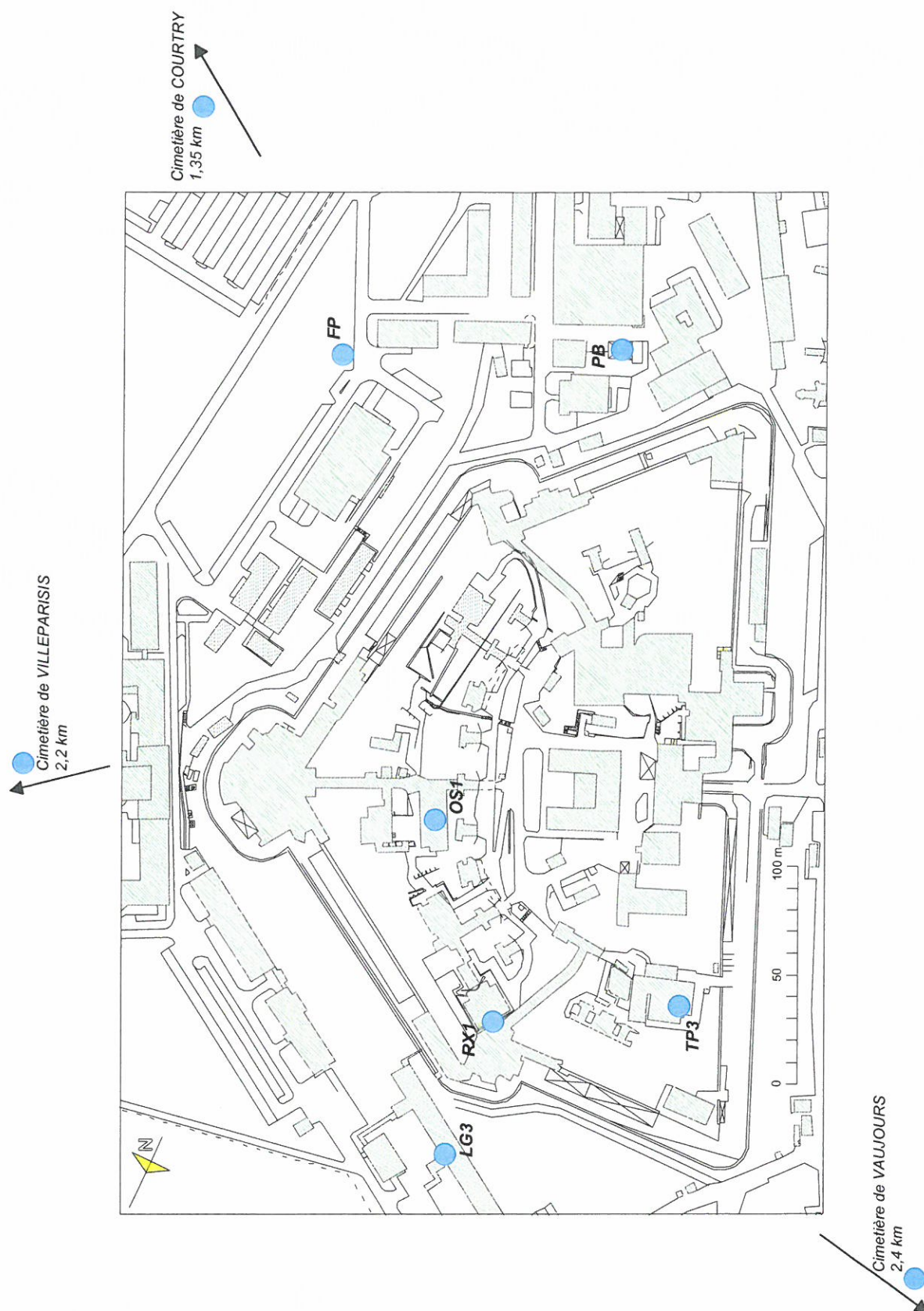


Figure 5 : Localisation des prélèvements de souris

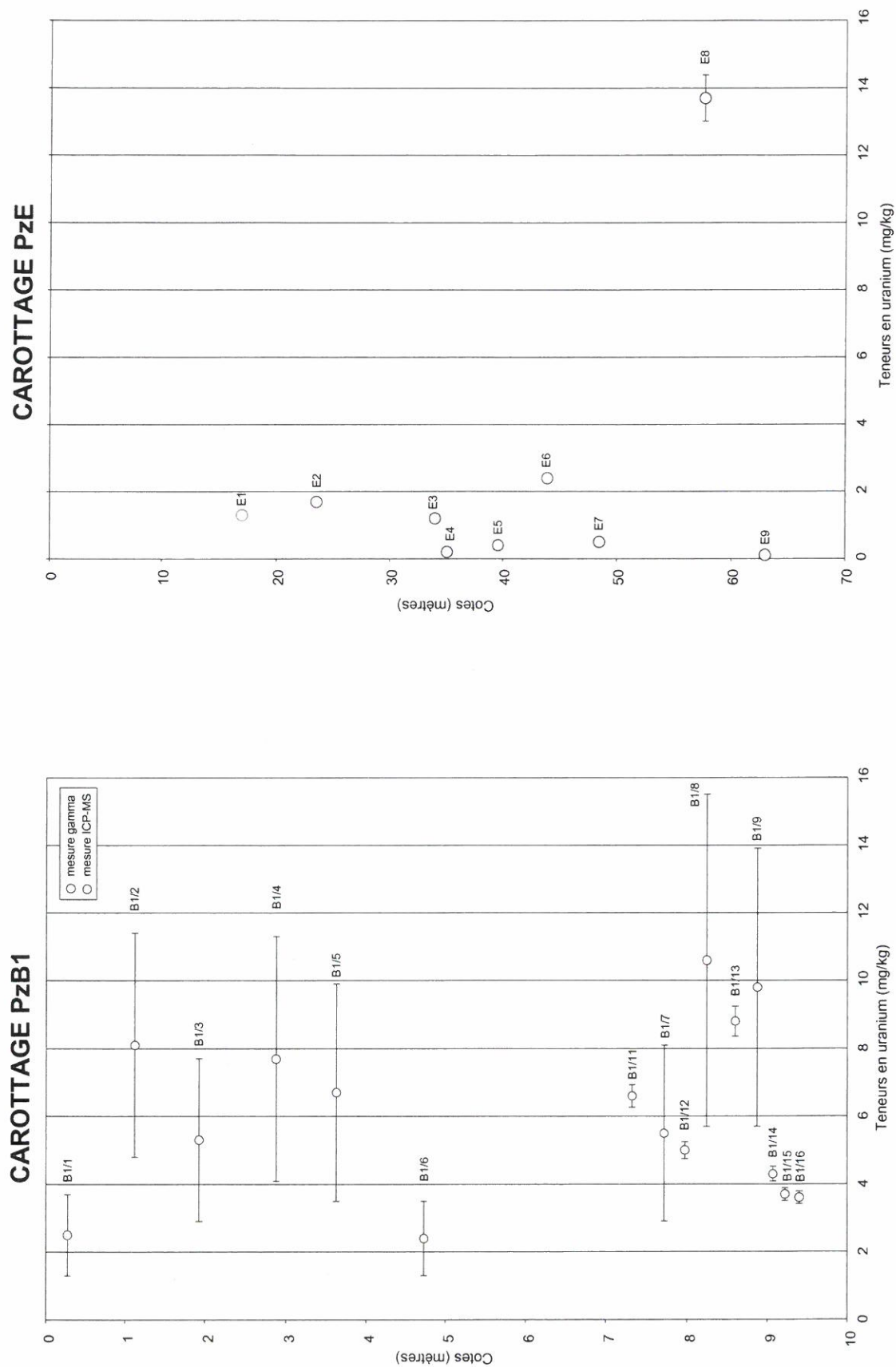


Figure 6 : Concentration en uranium des échantillons de carottes des forages PzB1 et PzE

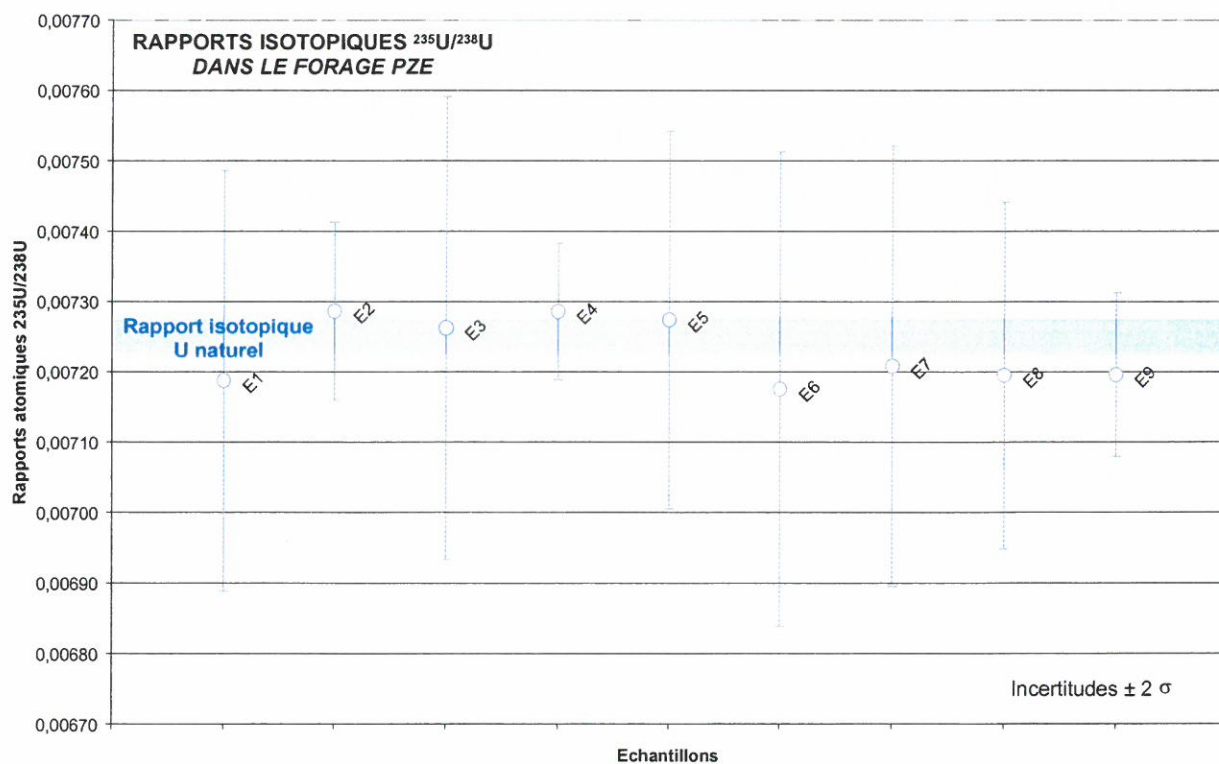
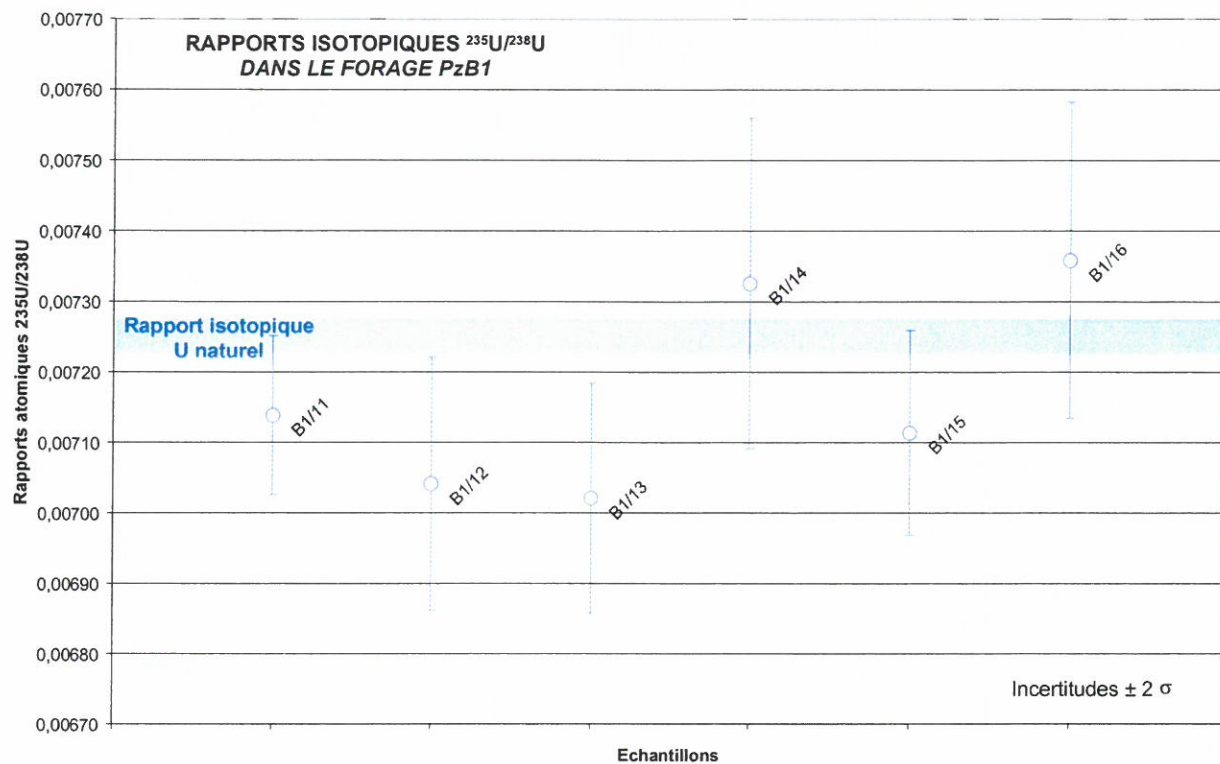


Figure 7 : Rapports isotopiques $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ dans les échantillons de carottes des forages PzB1 et PzE

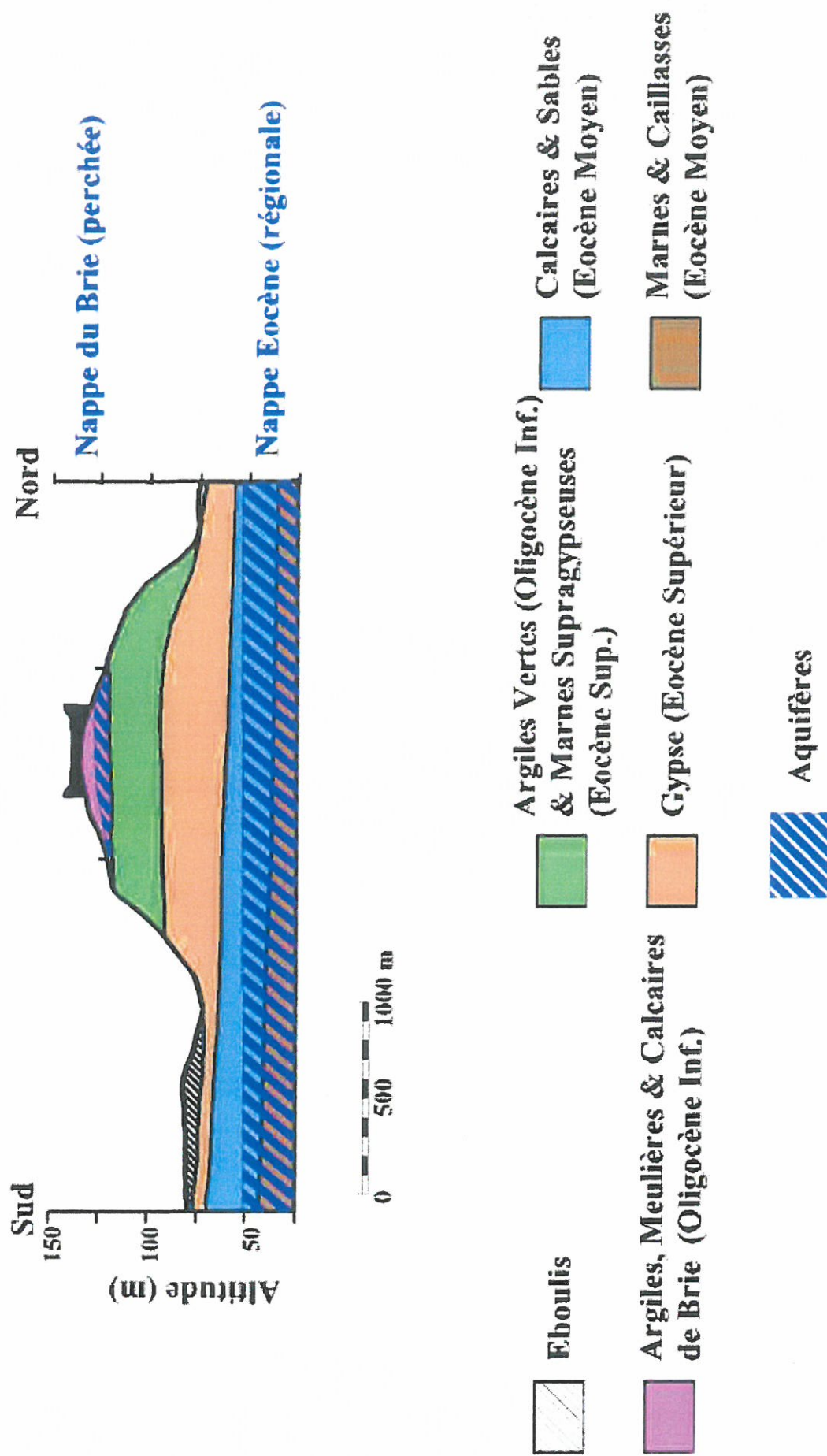


Figure 8 : Coupe géologique et hydrogéologique synthétique du promontoire de Vaujours

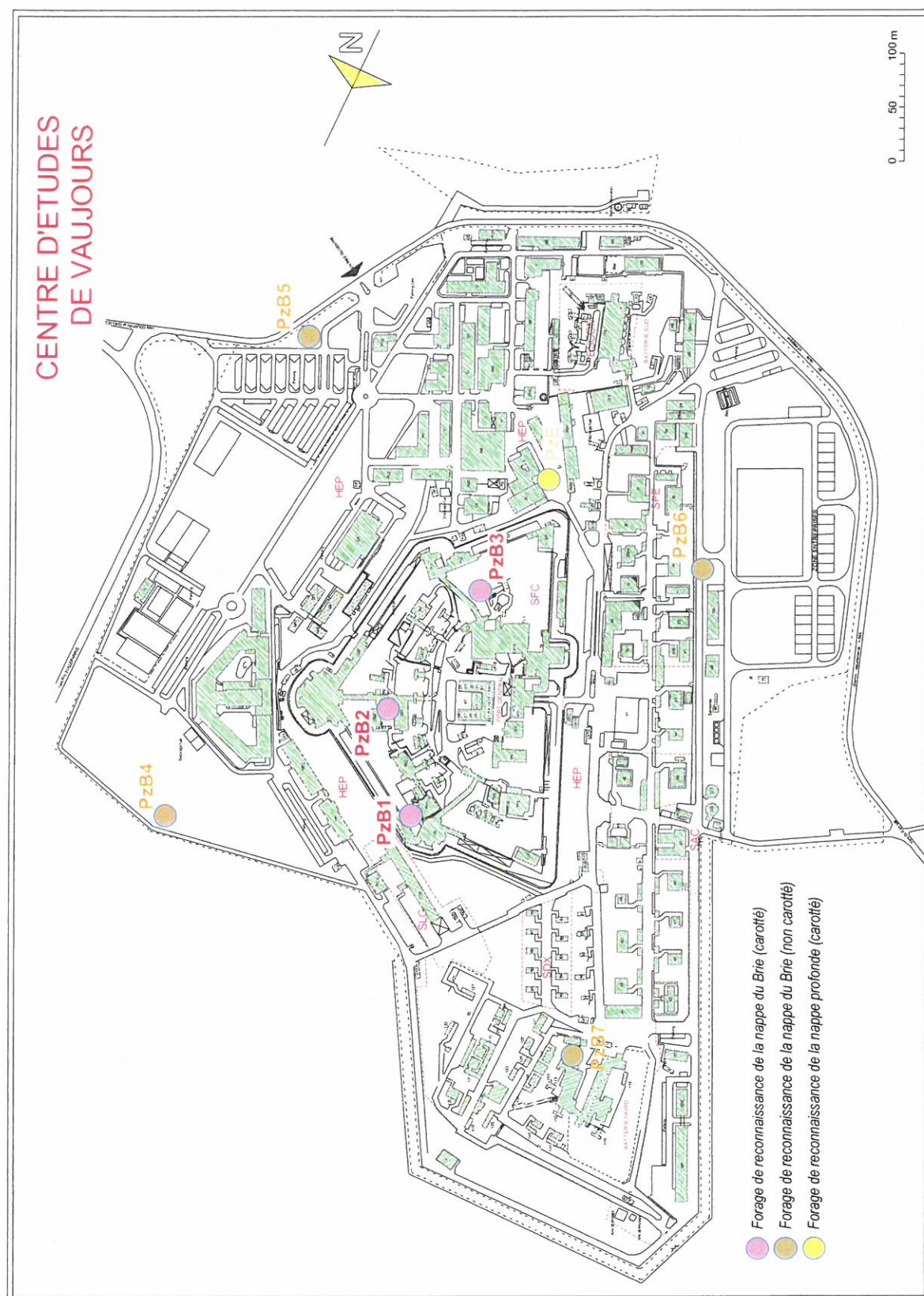


Figure 9 : Localisation des piézomètres

TENEURS EN URANIUM

Comparaison des mesures réalisées sur les eaux prélevées en Novembre 2001 et en Avril-Mai 2002
(Mesures SUBATECH)

● Novembre 2001
● Avril - Mai 2002

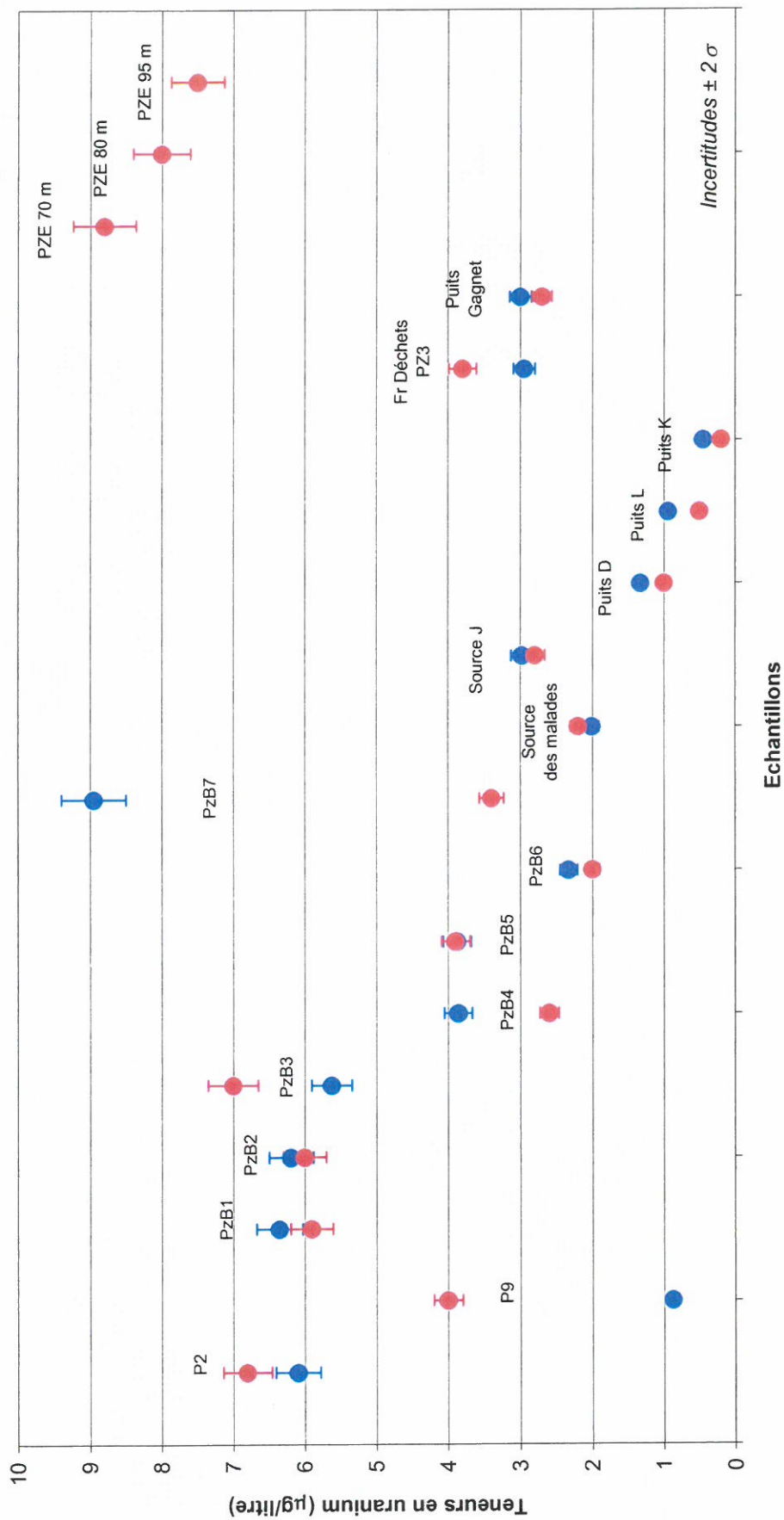
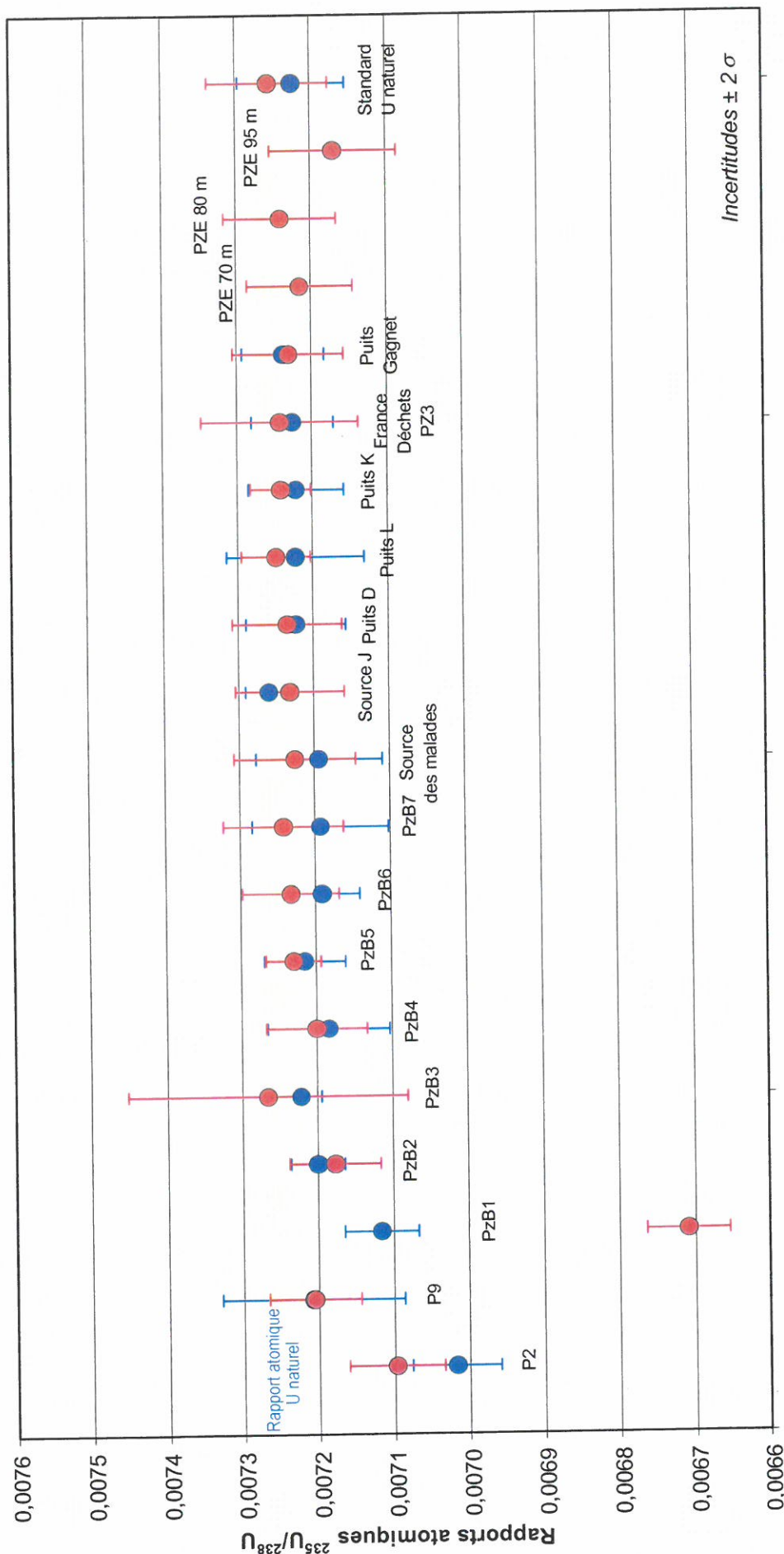


Figure 10 : Comparaison des teneurs en uranium des eaux

RAPPORTS ISOTOPIQUES $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ Comparaison des mesures réalisées sur les eaux prélevées en Novembre 2001 et en Avril-Mai 2002 (Mesures CEA)

● Novembre 2001
 ● Avril - Mai 2002



Echantillons
 Figure 11 : Comparaison des rapports atomiques $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ dans les échantillons d'eau