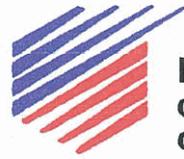


Collectivité Territoriale de Mayotte



Ministère de l'Economie,
des Finances et
de l'Industrie

Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte

*Synthèse des résultats des reconnaissances géologiques,
hydrogéologiques, géophysiques et émanométriques radon.*

Propositions d'implantation des sondages de reconnaissance

Etude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM (fiche99-D-650)

M. Cruchet, M. Daesslé, A. Gérard, P. Lachassagne

septembre 2000
Rapport BRGM RP-50386-FR
2000 SGR/MAY 30



BRGM

L'ENTREPRISE AU SERVICE DE LA TERRE

*Campagne prioritaire d'exploration des eaux souterraines à Mayotte –
Implantation des sondages*

Mots clés : Collectivité Territoriale, Eaux souterraines, Emanométrie radon, France, Géologie, Géophysique, Hydrogéologie, Implantation de sondages de reconnaissance, Mayotte.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

CRUCHET M., DAESSLE M., GERARD A., LACHASSAGNE P. (2000) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte - Synthèse des résultats des reconnaissances géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et émanométriques radon - Propositions d'implantation des sondages de reconnaissance – Rap. BRGM/RP-50386-FR – 2000 SGR/MAY 30, 54 p., 17 fig., 3 ann.

Synthèse

Dans le cadre d'un programme prioritaire d'exploration par forages des eaux souterraines à Mayotte, le BRGM a conduit fin 1999 - début 2000, un volet préliminaire de synthèse des données d'études antérieures et de nouvelles investigations de terrain (géologie, géophysique - méthodes électriques -, géochimie des gaz dans les sols - émanométrie radon -), sur huit zones sélectionnées en concertation avec les services de la DAF, sur la base de leurs potentialités hydrogéologiques, mais aussi à partir d'autres critères (accès, besoins de la population, infrastructures d'adduction existantes,...).

Ces études ont eu comme objet l'optimisation des sites d'implantation des sondages de reconnaissance, dans chacune de ces huit zones, à partir de l'interprétation et du croisement des résultats des différentes approches mise en œuvre.

L'objectif a été d'identifier dans le sous-sol, des formations géologiques :

- présentant des propriétés hydrodynamiques favorables (existence d'une perméabilité primaire ou secondaire) ;
- situées dans un contexte morphologique permettant la saturation en eau des roches réservoir et une bonne alimentation de l'aquifère et, en contexte littoral, sa protection vis à vis du biseau salé.

14 sondages de reconnaissance ont été ainsi implantés au mieux sur les zones de :

- Kaouéni
- Koualé Légion
- Mtsangamouji
- Béja
- Tsaranano
- Mronabéja
- Mréréni

Tout au long de la campagne, en fonction des résultats acquis en foration, ces sondages de reconnaissance pourront être transformés en forages d'exploitation ou leur implantation pourra être affinée.

Sommaire

1. OBJECTIFS.....	6
2. MÉTHODOLOGIE DE LA PROSPECTION	8
3. PROPOSITION D'IMPLANTATION DES FORAGES D'EXPLORATION	10
3.1. SITE DE KAOUËNI.....	10
3.1.1. Reconnaissance des formations sédimentaires.....	10
3.1.2. Reconnaissance des formations volcaniques.....	15
3.2. SITE DE KOUALÉ - LÉGION.....	18
3.3. SITE DE MTSANGAMOUJI.....	24
3.4. SITE DE BÉJA	29
3.5. SITE DE TSARARANO.....	35
3.6. SITE DE MRONABÉJA	40
3.7. SITE DE MRÉRÉNI	44
3.8. SITE DE LONGONI.....	49
4. RÉCAPITULATIF	53
5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	54

Liste des figures :

FIGURE 1 : SITUATION DES ZONES ET DES SITES PRÉSÉLECTIONNÉS POUR LA RÉALISATION DE LA CAMPAGNE DE FORAGE 1999-2000	7
FIGURE 2 : SITE DE KAOUËNI - LOCALISATION DE LA ZONE DE PROSPECTION	11
FIGURE 3 : SITE DE KAOUËNI. CARTE D'IMPLANTATION DES FORAGES DE RECONNAISSANCE.....	16
FIGURE 4 : SITE DE KOUALÉ. LOCALISATION DE LA ZONE DE PROSPECTION	19
FIGURE 5 : SITE DE KOUALÉ-LÉGION. CARTE D'IMPLANTATION DU FORAGE DE RECONNAISSANCE	22
FIGURE 6 : SITE DE KOUALÉ-LÉGION AMONT. CARTE D'IMPLANTATION DU FORAGE DE RECONNAISSANCE. 23	
FIGURE 7 : SITE DE MTSANGAMOUJI. LOCALISATION DE LA ZONE DE PROSPECTION.....	25
FIGURE 8 : SITE DE MTSANGAMOUJI. CARTE D'IMPLANTATION DES FORAGES DE RECONNAISSANCE.....	28
FIGURE 9 : SITE DE BÉJA. LOCALISATION DE LA ZONE DE PROSPECTION	30
FIGURE 10 : SITE DE BÉJA. CARTE D'IMPLANTATION DES FORAGES DE RECONNAISSANCE.....	32
FIGURE 11 : SITE DE TSARARANO. LOCALISATION DE LA ZONE DE PROSPECTION.....	36
FIGURE 12 : SITE DE TSARARANO. CARTE D'IMPLANTATION DES FORAGES DE RECONNAISSANCE.....	39
FIGURE 13 : SITE DE MRONABÉJA. LOCALISATION DE LA ZONE DE PROSPECTION	41
FIGURE 14 : SITE DE MRONABÉJA. CARTE D'IMPLANTATION DU FORAGE DE RECONNAISSANCE.....	43
FIGURE 15 : SITE DE MRÉRÉNI. LOCALISATION DE LA ZONE DE PROSPECTION	45
FIGURE 16 : SITE DE MRÉRÉNI. CARTE D'IMPLANTATION DES FORAGES DE RECONNAISSANCE.....	48
FIGURE 17 : SITE DE LONGONI. LOCALISATION DE LA ZONE DE PROSPECTION.....	50

Liste des tableaux :

**TABLEAU 1 : PROFONDEURS PRÉVISIONNELLES DES SONDAGES DE RECONNAISSANCE ET LOCALISATION
PROPOSÉE (À LA LUMIÈRE DES DONNÉES GÉOLOGIQUES, GÉOPHYSIQUES ET RADON)..... 53**

Liste des annexes :

Annexe 1 : Synthèse bibliographique

Annexe 2 : Prospection émanométrique : principes, mise en œuvre et méthode d'interprétation ;

Résultats des campagnes de prospection radon :

- 2.1. Site de Kaouéni
- 2.2. Site de Koualé Légion
- 2.3. Site de Mtsangamouji
- 2.4. Site de Béja
- 2.5. Site de Tsararano
- 2.6. Site de Mronabéja
- 2.7. Site de Mréréni

Annexe 3 : Coupes géoélectriques de référence [extraites du rapport BRGM/R-40750 – 2000 SGR/MAY 24, juillet 2000]

- Figure A3-1 : Site de Kaouéni - Coupes géo-électriques
- Figure A3-2 : Site de Mtsangamouji - Coupes géo-électriques
- Figure A3-3 : Site de Béja - Coupes géo-électriques
- Figure A3-4 : Site de Tsararano - Coupes géo-électriques
- Figure A3-5 : Site de Mréréni - Coupes géo-électriques
- Figure A3-6 : Site de Longoni - Coupes géo-électriques

1. Objectifs

La Collectivité Territoriale de Mayotte, assistée par la Direction de l'Agriculture et de la Forêt, met actuellement en œuvre un programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines sur l'île de Mayotte. Ce programme a été initié en 1998 par le BRGM à partir de sa dotation de service public, par une évaluation technique et économique de la faisabilité d'un tel programme (rapport BRGM/R 40184 – 98 REU 26).

Au cours de l'année 1999, suivant les recommandations faites par le BRGM, il a été décidé par la Collectivité Territoriale de lancer **un programme d'exploration prioritaire** sur une dizaine de zones réparties sur le pourtour de l'île, choisies en fonction de leur intérêt hydrogéologique et/ou des besoins de proximité en eau.

En mai 1999, de nouvelles reconnaissances géologiques de terrain ont été conduites par le BRGM sur les sites prioritaires. A l'issue de cette campagne, en concertation avec la Direction de l'Agriculture et de la Forêt, **8 sites ont été sélectionnés** (cf. figure 1). La sélection s'est faite en tenant compte des résultats des études et travaux antérieurs :

- campagne de prospection géophysique par sondages électriques réalisée en 1987 sur des sites répartis sur l'ensemble de l'île [Daesslé et Verrez, 1987] ;
- résultats des sondages de reconnaissance et essais de pompage réalisés en 1992 sur plusieurs des sites ayant fait l'objet de la prospection géophysique [Mauroux, 1992] ;
- réalisation de deux forages d'exploitation sur le site de Kaouéni [Salesse et al., 1991].

Sur la base de ce programme prévisionnel, relativement au type de sondage et linéaire de foration pour chaque site, un dossier de consultation des entreprises (DCE) a été préparé par le BRGM, dans le cadre de la procédure d'appel d'offres des travaux de forage [Daesslé et Cruchet, 1999]. Dans le DCE, il a été prévu de réaliser, au cours de la campagne prioritaire de forages, 14 sondages de reconnaissance et 9 forages d'exploitation (par transformation des sondages en forage d'exploitation, ou par nouvelle foration).

Afin d'optimiser l'implantation des forages, des prospections détaillées ont été lancées sur les secteurs cibles (prospection géo-électrique, prospection par émanométrie radon).

Cette étude a été conduite dans le cadre de la programmation de Service public 1999 du Service géologique régional du BRGM (fiche SP 99-D-650), sur financement de la Collectivité Territoriale de Mayotte et à partir des fonds propres du BRGM (convention BRGM / Collectivité Territoriale, signée le 11 mai 1999).

Le présent rapport récapitule les résultats acquis et l'interprétation qui en a été faite pour une implantation prévisionnelle des sondages sur les 8 sites retenus.

Campagne prioritaire d'exploration des eaux souterraines à Mayotte -
Implantation des sondages

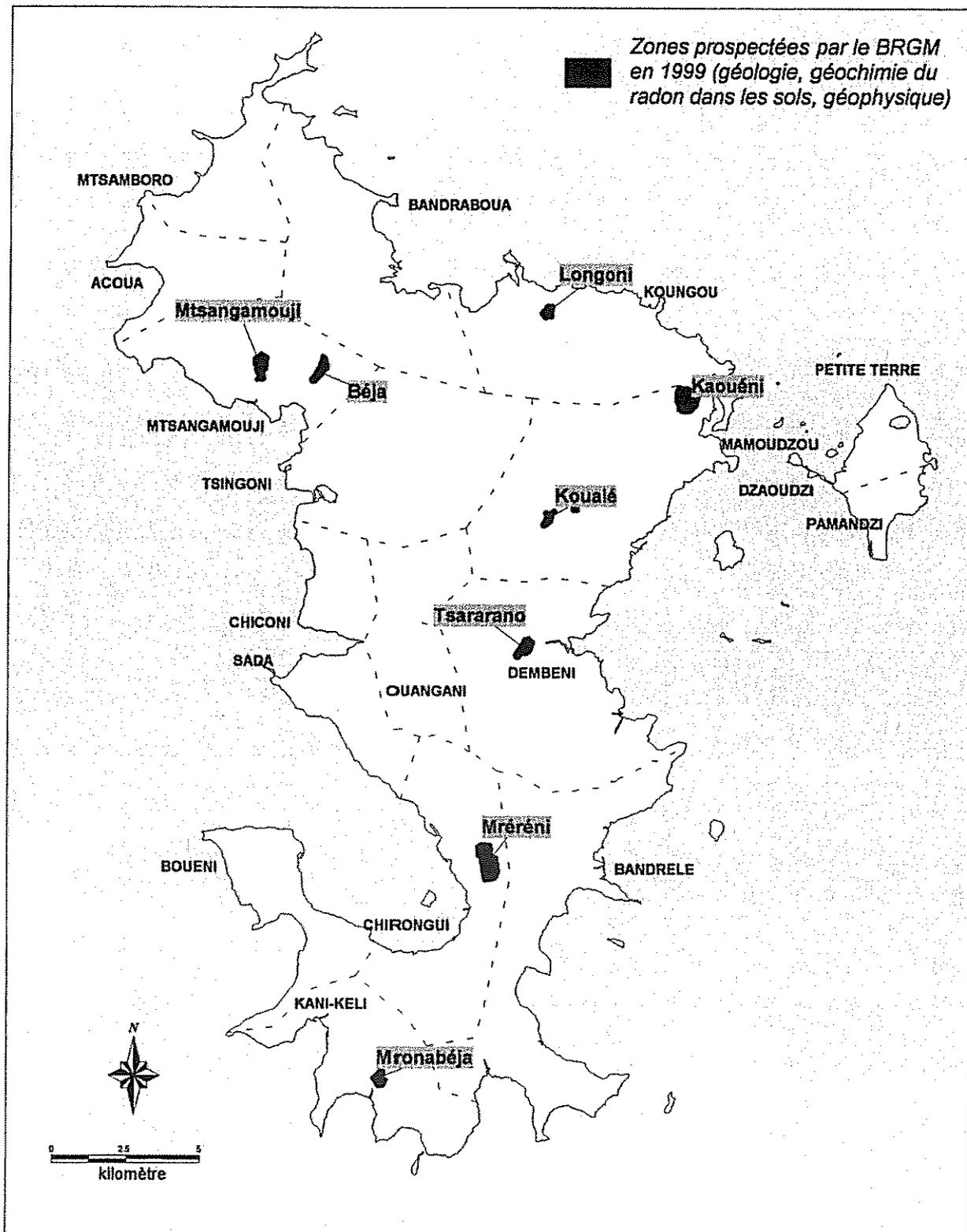


Figure 1 : Situation des zones et des sites présélectionnés pour la réalisation de la campagne de forage 1999 - 2000

2. Méthodologie de la prospection

Dans le cadre du projet, de nouvelles études et investigations de terrain ont été conduites par le BRGM :

- synthèse bibliographique des informations géologiques et hydrogéologiques susceptibles de concerner Mayotte, étendue à l'hydrogéologie des autres îles volcaniques de l'océan Indien et du Pacifique (Annexe 1) ;
- analyse stéréoscopique linéaire sur photographies aériennes IGN (photographies de la campagne « Comores 1969 » - échelle 1/20 000 environ) ;
- reconnaissances géologiques et hydrogéologiques de terrain ;
- campagne de prospection radon (Annexe 2) ;
- campagne de prospection géophysique par sondages électriques intégrant, pour les sites déjà prospectés en 1987, une réinterprétation des sondages réalisés à l'époque [BRGM, 2000]¹ (Annexe 3).

La méthodologie mise en oeuvre a consisté à croiser les différentes informations disponibles pour sélectionner des sites d'implantation optimale sur le plan hydrogéologique. Les schémas conceptuels actuels du fonctionnement des aquifères du type de ceux rencontrés à Mayotte (aquifères volcaniques pour l'essentiel, site de Kaouéni mis à part) ont été pris en compte pour y parvenir.

Les implantations retenues *in fine* ont été définies en concertation avec la DAF, afin de tenir compte des contraintes d'accès et de foncier, mais aussi de l'intérêt de la ressource potentielle, en fonction des infrastructures d'adduction existantes et des besoins en eau existants.

Ces implantations ont pu, le cas échéant, être revues en concertation avec le maître d'ouvrage, suivant les résultats obtenus au cours de l'avancement du chantier de forage, valorisant ainsi les données de foration.

¹ BRGM (2000).- Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte. Reconnaissance géophysique.- Rapport BRGM/R 40750 – 2000 SGR/MAY 24.

D'une manière générale, la démarche mise en œuvre a consisté à rechercher des formations géologiques :

- 1) présentant des propriétés hydrodynamiques favorables, permettant d'assurer un débit instantané significatif dans les forages. Au sein des formations volcaniques, il s'est agi d'identifier des unités lithologiques dotées d'une perméabilité originelle importante (perméabilité d'interstices ou de fissures) et/ou d'une perméabilité secondaire (perméabilité de fractures). A cet effet, les reconnaissances géologiques de terrain et la géophysique permettent de tenter d'identifier la lithologie des formations qui seront recoupées par forage ; la prospection radon et la photo-interprétation sont destinées à localiser d'éventuelles zones fracturées ;
- 2) situées dans un contexte morphologique permettant, d'une part, la saturation en eau d'un réservoir d'eau souterraine (niveau piézométrique relativement proche de la surface du sol) et autorisant d'autre part, en particulier en contexte littoral, une bonne alimentation de l'aquifère et sa protection vis à vis du biseau salé (lithologie favorisant la recharge de l'aquifère, bassin versant d'alimentation de taille suffisante, etc.). Les observations hydrogéologiques de terrain ainsi que la géophysique doivent apporter des éléments d'information en ce sens.

Les critères environnementaux (vulnérabilité aux pollutions, aux risques naturels) et d'accessibilité des sites aux engins de forage ont été également pris en considération dans la sélection qui a été faite des sites d'implantation.

3. Proposition d'implantation des forages d'exploration

3.1. SITE DE KAOUENI

Le programme prévisionnel des travaux avait prévu la réalisation de 2 sondages de reconnaissance d'une profondeur prévisionnelle de 40 m et de deux forages d'exploitation.

Le secteur de Kaouéni (cf. figure 2, extrait du fond topographique IGN au 1/25 000) constitue le seul site de la campagne pour lequel des formations de nature sédimentaire constituaient la cible principale des forages. Des résultats encourageants dans l'identification de ressources en eau souterraine pourraient conduire à rechercher des structures similaires dans d'autres secteurs de l'île. Ces formations sédimentaires sont déjà exploitées par forage pour l'AEP dans la partie Sud du site sélectionné (deux ouvrages pompés à un débit de l'ordre de 10 m³/h chacun).

Les formations volcaniques constituant le substratum des formations sédimentaires ont fait l'objet d'une reconnaissance à Kaouéni. Une prospection radon complémentaire à la campagne géophysique a donc été mise en œuvre dans la partie amont du site (vallée de la rivière Kaouénilajoli).

3.1.1. Reconnaissance des formations sédimentaires

Dans le contexte sédimentaire qui prévaut à Kaouéni, trois critères ont été pris en considération pour proposer les sites d'implantation de nouveaux ouvrages de reconnaissance :

- propriétés hydrodynamiques (perméabilité et épaisseur), géométrie (extension latérale en particulier) et recharge potentielle des formations aquifères ;
- éloignement du biseau salé ;
- éloignement du site de captage actuel, afin de limiter les interférences avec les ouvrages exploités.

Figure 2 : Le site de Kaouéni



— Limite de bassin versant

∨ Cours d'eau principaux



Zone de prospection



Forage de reconnaissance antérieur à 1999 (N° BSS)

a) Propriétés hydrodynamiques

La géométrie, ainsi que les propriétés de perméabilité du corps sédimentaire peuvent être recherchées à partir de l'histoire géologique du secteur et, plus particulièrement, en tentant de reconstituer les variations du niveau marin. En effet, celles-ci constituent, dans un tel contexte littoral, un des facteurs primordiaux vis à vis de la géométrie et des propriétés des corps sédimentaires. Les autres éléments disponibles (en particulier cote du mur des sédiments) tels qu'ils peuvent être déduits des informations géophysiques et des données des sondages existants, ont également été pris en considération.

L'histoire géologique de la région de Kaouéni a été vraisemblablement marquée par les grands événements suivants, des plus anciens aux plus récents :

1. mise en place des formations volcaniques sous-jacentes aux pyroclastites de Kaouéni ;
2. édification du cratère d'explosion (« maar ») de Kaouéni, « entre 500 000 ans et l'actuel » [Stieltjes et al., 1988] ou « very recent » [Nougier et al., 1986] ; aucune datation absolue de cet événement (ou relative : cartographie géologique détaillée du secteur) n'est néanmoins disponible à ce jour. La gamme temporelle concernée est vaste, il ne peut donc être exclu que les formations pyroclastiques résultant de cette activité volcanique explosive se soient mises en place au cours ou après les dernières variations eustatiques importantes (cf. ci-dessous) ;
3. poursuite (avant et après les formations volcaniques) de la phase de subsidence de l'île qui expliquerait son ennoisement actuel et la création de la barrière récifale ;
4. incision (ravinement et érosion par les cours d'eau et, en particulier sur ce site, par la rivière Kaouénilajoli) lors du bas niveau marin lié à la glaciation Würm (-18000 à -15000 ans BP² environ). A cette époque, les cours d'eau ont pu surcreuser significativement leur vallée, celle-ci se situant alors à des altitudes beaucoup plus basses que le niveau marin actuel ;
5. remontée du niveau marin, entraînant une nouvelle érosion (moins importante), liée à l'action de la dynamique littorale, et surtout un comblement des incisions créées antérieurement. Ce comblement se localise essentiellement au niveau de la limite continent/mer, là où les cours d'eau perdent leur pouvoir de transport. L'accumulation des sédiments entraîne un déplacement progressif de la limite terre/mer (progradation) qui tend à combler progressivement l'incision antérieurement créée. Les formations de comblement comportent généralement des argiles marines à la base, des sables littoraux - de plage - au milieu et des formations continentales au toit - mangrove, alluvions avec conglomérats et limons.
Cette transgression est probablement remontée quelques mètres au-dessus du niveau 0 marin actuel. Dans un tel contexte, les sables de plage, très souvent propres, présentent en général les meilleures propriétés de perméabilité. Les formations

² BP : « Before Present » : datation considérée par rapport à l'actuel (1950).

alluviales continentales montrent habituellement des propriétés plus médiocres, tandis que les argiles marines peuvent être considérées comme un imperméable ;

6. incision récente (les limons de surface sont partout incisés de plusieurs mètres dans l'île ; ici, la rivière Kaouénilajoli coule entre deux berges d'environ 4 m de profondeur) qui pourrait traduire une phase récente de recreusement (surrection d'origine tectonique ou volcano-tectonique ?).

Les coupes géologiques des sondages disponibles suggèrent la présence :

- de limons superficiels qui contiennent logiquement des passées à blocs (conglomérats) et d'alluvions grossières, dans lesquelles s'intercalent des passées limoneuses ; ces terrains pourraient correspondre aux formations continentales du toit du comblement. Les limons semblent particulièrement développés dans les sondages 12307X0013 et 14 (respectivement à 19 et 25 m de profondeur) où ils pourraient également présenter une composante colluviale significative ;
- de sables (à partir de -17 m NGM en 12307X0011, -15 m NGM en 12307X0012 ; -12 m NGM en 12307X0013 ; -11 ou -17 m en 12307X0014) qui pourraient correspondre à un faciès marin ; cet interface à -16 m NGM environ dans ce secteur pourrait donc correspondre au transitionnel marin - continental ; le substratum volcanique devrait donc se trouver encore plus profondément dans ce secteur. Il ne semble avoir été rencontré qu'en 12307X0014, à -22 m NGM ;

A noter que les éventuelles argiles marines « de base » n'ont été recoupées par aucun sondage.

L'interprétation des sondages électriques (cf. figure A3-1, annexe 3) a été basée sur ce schéma :

- résistivité à 8-12 Ω .m : limons ;
- résistivité à 21 Ω .m : alluvions ;
- résistivité à 50 Ω .m : substratum.

L'horizon à 21 Ω .m pourrait donc correspondre aux alluvions, mais aussi aux sables marins sous-jacents. Les argiles marines seraient absentes ou ne présenteraient pas une épaisseur suffisante pour pouvoir être mises en évidence par les sondages électriques. Par ailleurs, cette interprétation repose sur les données des coupes géologiques qui considèrent les sables comme « marins » et non comme des matériaux pyroclastiques.

L'analyse du profil en long actuel de la rivière Kaouénilajoli suggère qu'il soit « en équilibre ». Il présente, en effet, une forme de type exponentiel depuis le zéro marin

(mangrove) jusqu'à la cote 100 m NGM environ (limite amont de l'incision vraisemblablement arrêtée sur un verrou lithologique – coulée de lave).

Le remplissage sédimentaire (incision comblée) ne s'étend pas au-delà des affleurements de lave identifiés sur le terrain, dans le lit de la Kaouénilajoli, à une altitude d'environ 25-30 m NGM. Sur la base de l'interprétation des données géophysiques proposée ci-dessus, la base de cette incision se trouve, en ce qui concerne les sondages électriques SE1 à SE3, entre -20 et -30 m NGM de l'amont vers l'aval. Si l'on raccorde ces valeurs avec l'affleurement cité ci-dessus, la limite inférieure de l'incision correspondant à la phase de transgression marine postérieure au bas niveau Würm (érosion de remontée) peut être reconstituée dans l'axe de la rivière Kaouénilajoli, ainsi que sur l'ensemble du site.

Cette construction suggère l'existence d'une double incision. Les forages actuels se situeraient au sein de l'incision Sud qui correspond au débouché des bassins versants des deux cours d'eau convergeant vers le village de Kaouéni. Cette reconstitution suggère également que les épaisseurs maximales de sédiments, dans l'incision Nord, ne se situent pas entre les SE4 et SE7, mais plutôt entre les SE 3 et SE4. Par mesure de sécurité, il conviendrait cependant de ne pas trop éloigner l'implantation d'un forage du SE3 afin de ne pas risquer de forer sur un éventuel interfluve qui se situerait entre SE3 et SE4. La présence de cet interfluve semble cependant peu probable compte tenu de l'absence de bassin versant développé à l'arrière de cette zone.

Par ailleurs, les observations de terrain suggèrent que l'avancée topographique située sous le « champ de tir » consiste en alluvions « anciennes », datant peut être de la période transgressive maximale, et non en formations volcaniques primaires. La paléovallée de la rivière Kaouénilajoli doit donc s'étendre entre les deux lignes de sondages électriques (SE1-SE3 et SE6 - SE4).

b) Biseau salé

Les sondages électriques SE3 et SE4 se situent à une distance similaire du littoral par rapport aux forages exploités actuellement dans la partie Sud du site de Kaouéni. Par analogie, des forages aux caractéristiques identiques, implantés au Nord, devraient pouvoir être exploités de la même manière. Le site Nord, situé au débouché du bassin versant de la rivière Kaouénilajoli, devrait, en outre, bénéficier d'une meilleure recharge par ce cours d'eau qui devrait concourir à mieux repousser une éventuelle intrusion saline.

L'horizon à 8 Ω .m identifié au droit du SE3 ne semble pas correspondre avec une forte probabilité, à l'interface eau douce/eau salée. Ce même horizon présente en effet, en SE5 et SE7, une pente parallèle à celle des horizons géo-électriques sus-jacents. En tout état de cause, seule une reconnaissance au moyen de sondages profonds permettrait de lever cette hypothèse. Ces ouvrages, implantés en aval du site, à proximité de la route nationale par exemple, et équipés en piézomètres, permettraient en outre un éventuel

suivi de la dynamique du biseau salé sous l'effet de l'exploitation future du champ captant.

c) Champ captant actuel

La mise en exploitation de nouveaux ouvrages au sein du système Nord minimise le risque d'interférences avec le champ captant actuellement exploité.

d) Synthèse des données

Compte tenu des éléments présentés ci-dessus et dans l'optique du captage d'eaux souterraines dans les formations sédimentaires, il semble souhaitable de privilégier une implantation « aval » plutôt qu'amont car l'extension de l'aquifère alluvial, tant verticale que latérale, doit diminuer de l'Est vers l'Ouest. Elle doit être limitée au droit de SE1. **Le site du sondage électrique SE3, ou une zone située légèrement au Sud ou au Sud-Est de SE3 (dans la direction de SE4), pourrait constituer un emplacement intéressant pour un premier sondage de reconnaissance (cf. figure 3).**

Si de nouveaux forages devaient être mis en exploitation sur ce site, il conviendrait d'envisager sérieusement une quantification précise de la ressource exploitable au sein de cet aquifère, en prenant, en particulier, en considération la dynamique du biseau salé. La mise en œuvre d'une modélisation mathématique permettrait de répondre à cette problématique.

3.1.2. Reconnaissance des formations volcaniques

a) observations géologiques de terrain

Les observations géologiques de terrain dans la vallée de la Kaouénilajoli montrent la présence :

- d'un placage d'alluvions récentes, d'épaisseur métrique, en surface ;
- des formations pyroclastiques (écoulements, retombées) de Kaouéni (granulométrie fine -limon à sable avec rares blocs- non granoclassées, faciès de type aérien) sous les alluvions;
- des coulées de lave, dans lesquelles les figures de flux sont limitées aux contacts, intercalées dans les pyroclastites.

Ces coulées de lave interstratifiées et/ou correspondant au substratum des pyroclastites ont été observées en rive droite de la vallée à la cote 25 m NGM, approximativement au niveau de la limite communale. Elles affleurent également dans le lit de la ravine à 150 m environ en aval du point coté 26 m NGM. Les basaltes anciens altérés n'ont pas été rencontrés dans ce secteur de la vallée.

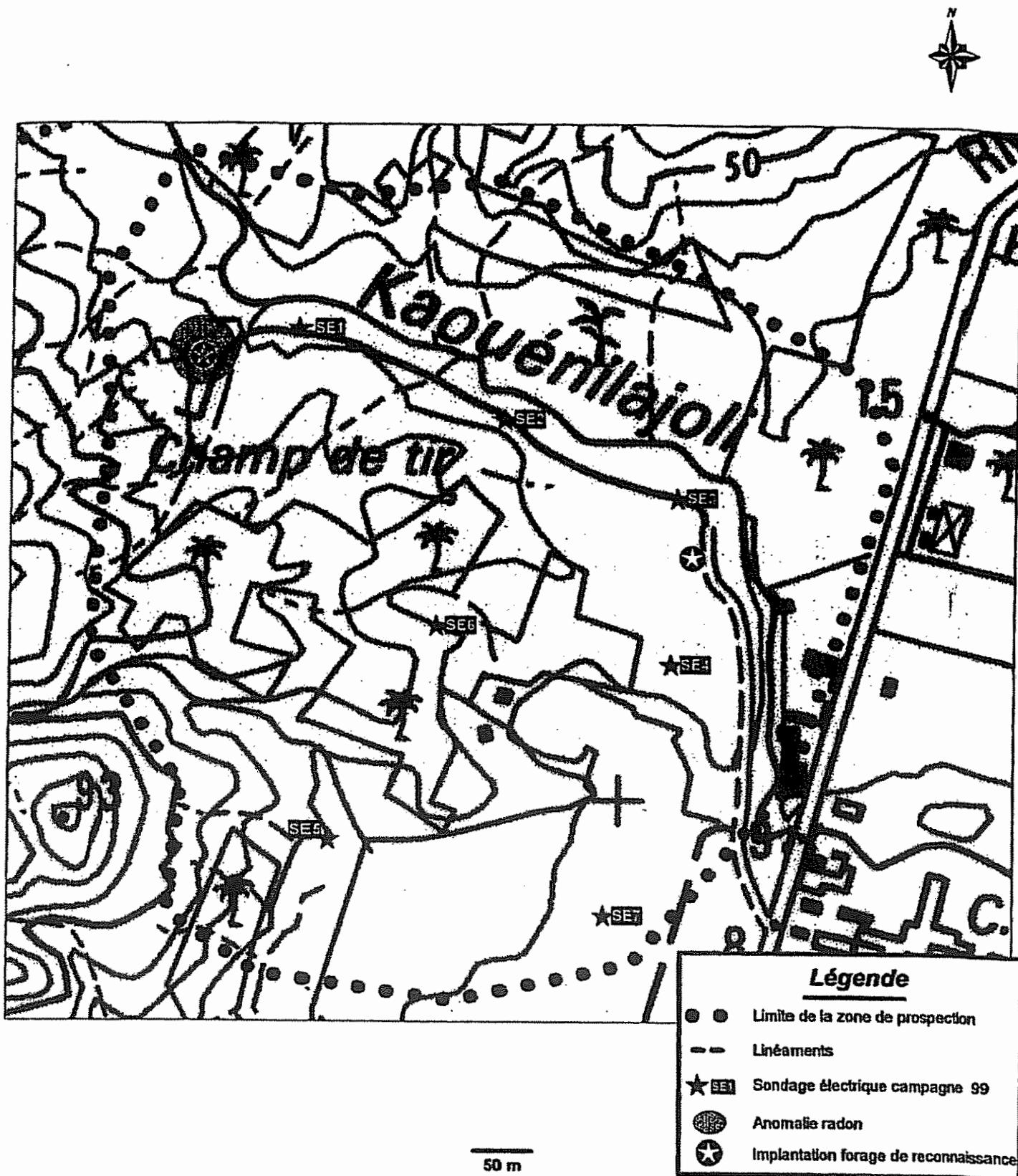


Figure 3 : Site de Kaouéni. Carte d'implantation des forages de reconnaissance

Dans la carrière de Majikavo Lamir, les pyroclastites de Kaouéni reposent sur une coulée de lave, d'une épaisseur de l'ordre de 20 à 30 m et dont le toit se situe à une altitude de 50 m NGM environ. La coulée montre une fissuration subhorizontale généralisée (figures de flux générant un débit de la roche en lauzes d'épaisseur comprise entre moins de 5 cm et 20 à 30 cm). La coulée présente également, à son toit, un niveau scoriacé de 3 à 5 m d'épaisseur (qui semble contemporain et associé à sa mise en place). Elle ne montre pas d'indices de fracturation d'origine tectonique et aucune altération d'origine climatique à son toit. Elle repose (contact non visible mais estimé à une altitude de 20 m NGM) sur les basaltes « anciens » argilisés dans la masse (affleurement situé derrière le réservoir d'eau). L'ensemble présente un pendage général vers l'ENE (littoral).

Sur le site de Kaouéni, les pyroclastites, qui pourraient présenter une bonne perméabilité d'interstices si elles ne sont pas soudées, ne semblent donc pas présenter une extension importante en profondeur.

b) Prospection radon

Une prospection radon a été mise en œuvre en amont du sondage électrique SE1 (annexe 2.1), afin d'identifier d'éventuelles zones fracturées au sein du substratum lavique. Elle a permis de localiser une anomalie radon relativement forte et bien structurée (orientation N-S à NE-SW). Cette anomalie coïncide avec un méandre accusé de la rivière Kaouénilajoli.

c) Prospection géo-électrique

Au droit de ce site, les données géophysiques (cf. figure A3-1, annexe 3) suggèrent la présence des formations volcaniques sous un recouvrement sédimentaire d'une quarantaine de mètres d'épaisseur. Compte tenu des éléments présentés plus haut (cf. a) observations géologiques de terrain), il est probable que l'épaisseur de ces formations superficielles soit surestimée.

d) Implantation proposée

Le second sondage de reconnaissance pourrait donc être implanté au droit de cette anomalie radon (figure 3), à quelques mètres au Nord de la station n°25, afin de tenir compte de la dissymétrie de l'anomalie radon. Une profondeur de 50 m devrait lui permettre de reconnaître les formations volcaniques sous un éventuel recouvrement alluvial et colluvial.

Par ailleurs, les propriétés hydrogéologiques des formations volcaniques pourront ainsi être reconnues.

En cas de succès de la reconnaissance, les forages d'exploitation pourraient être réalisés à proximité des deux sondages de reconnaissance, ou alors ces derniers pourraient être alésés.

3.2. SITE DE KOUALE - LEGION

Le programme prévisionnel des travaux prévoyait la réalisation de 2 sondages de reconnaissance d'une profondeur prévisionnelle de 70 m dont un (sur la base d'une probabilité de succès de 50 %) serait alésé pour être transformé en forage d'exploitation.

Les sites retenus pour les prospections à Koualé se situent à l'amont de l'implantation de la Légion Etrangère, à plus de 2,5 km du littoral (figure 4). Ils se trouvent au sein de l'un des bassins versants les plus intéressants de Mayotte, tant en raison de sa superficie et de la pluviométrie qui le caractérise que de son caractère encore très peu développé, malgré sa proximité de l'agglomération de Mamoudzou. L'existence d'une infrastructure d'adduction (conduite issue de la prise d'eau située à la cote 100 m NGM) permet d'envisager de prospector l'ensemble de la vallée située à l'aval de celle-ci.

a) observations géologiques de terrain

Les observations géologiques de terrain le long de la rivière Koualé montrent que des colluvions et alluvions assurent le remplissage des zones situées entre les verrous constitués par les coulées de lave. Les alluvions contiennent des blocs de taille atteignant le décimètre et sont dotées d'une matrice argileuse en général abondante. Elles forment des placages qui semblent généralement de faible épaisseur (épaisseur observée inférieure ou égale à 5 m). Les « émergences » de la nappe d'accompagnement du cours d'eau sont souvent soulignées par des floculats (algaux ou bactériens qui pourraient traduire la présence de fer ferreux au sein de l'eau).

Les grands ensembles volcaniques figurés sur la carte géologique à 1/50 000 de l'île sont identifiables sur le terrain.

L'ensemble $\beta\pi\sigma$ (basaltes ankaramitiques associés au « bouclier ancien méridional », [Stieltjes et al., 1988]) est constitué d'une alternance de coulées d'épaisseur métrique à décimétrique et de scories et pyroclastites d'épaisseur décimétrique à métrique.

Les niveaux de scories basaltiques sont relativement bien développés en amont immédiat de Koualé-Légion. Ils présentent à l'affleurement une (faible) porosité (vides de taille millimétrique) ainsi qu'une fraction fine relativement abondante. Ces niveaux peuvent donc être dotés de propriétés hydrogéologiques médiocres à bonnes.

Au sein de cette formation ont été observés des flancs de paléovallées qui suggèrent leur mise en place dans ce type de structure. La vallée actuelle est sécante par rapport à ces anciennes vallées au sein desquelles les directions d'écoulement sont probablement orientées vers le NE ou l'ENE. Cet ensemble présente, à l'affleurement, une fissuration peu développée et fermée. Il ne montre pas, toujours à l'affleurement, de fracturation significative.

L'ensemble β s (basaltes à néphéline et néphélinites formant la base de la série méridionale, [Stieltjes et al., 1988]) est marqué, à l'affleurement, par une forte dominance de coulées de lave au sein desquelles tous les termes des profils d'altération sont recoupés par le cours d'eau actuel. Cet ensemble est affecté par des fractures d'origine probablement tectonique, particulièrement développées entre les cotes 80 et 55 m NGM.

Deux principales familles de fractures ont été observées sur le terrain (joints, zones broyées d'épaisseur décimétrique) :

- NS (N150 à N000°E) ;
- EW (N090 à N125°E).

Il est notable que ces directions structurales coïncident avec la direction de la rivière Koualé dans ces secteurs. Ces deux directions, qui correspondent à de grandes structures connues sur l'île, sont bien marquées sur les photographies aériennes. Sur ces dernières, des structures N070°E et N030°E sont également nettement visibles.

b) Prospection radon

La prospection radon (Annexe 2.2.) a été mise en œuvre sur deux sites appartenant respectivement à chacune des deux formations géologiques présentées plus haut.

Sur le **site n°1 de Koualé-Légion** (basaltes β ps), les mesures qui ont été faites permettent clairement d'identifier une structure anormale d'orientation N115°E à N135°E, qui prend en écharpe le site prospecté, en traversant la rivière une première fois au niveau du gué et une seconde fois en aval de son virage à angle droit. Cette anomalie est nettement identifiée en rive gauche du cours d'eau. Des indices significatifs suggèrent qu'elle se prolonge en rive droite de part et d'autre de cette zone centrale. Cette anomalie présente une orientation générale similaire à celle d'un linéament identifié à proximité immédiate. Ces éléments, ainsi que la stabilité du signal émanométrique dans le temps aux points d'anomalie, concourent à accorder un crédit très significatif à cette anomalie.

Les mesures réalisées sur le **site n°2 de Koualé-Légion** (basaltes β s) ont permis d'identifier deux anomalies radon. Ce site de prospection encadre la zone sur laquelle des indices de fracturation ont été notés sur le terrain.

L'anomalie située en partie médiane du secteur prospecté paraît la plus significative ; elle est entourée de plusieurs stations proches du seuil anormal ou le dépassant. Elle se situe à proximité d'un linéament NW-SE et dans le prolongement vers le nord d'un linéament méridien. Il est également notable que la seconde anomalie se situe dans le prolongement de ce même linéament méridien ainsi que d'un autre linéament N070°E.

c) Implantation proposée

Compte tenu des éléments présentés ci-dessus, **il a été proposé d'implanter un sondage de reconnaissance sur chacune des deux principales anomalies radon identifiées respectivement dans chacun des deux ensembles géologiques de la région de Koualé (figures 5 et 6).**

La profondeur prévisionnelle des sondages (70 m) semble bien adaptée à chacun de ces deux sites (site 1 et site 2). Si nécessaire, cette profondeur prévisionnelle pourrait être légèrement réduite.

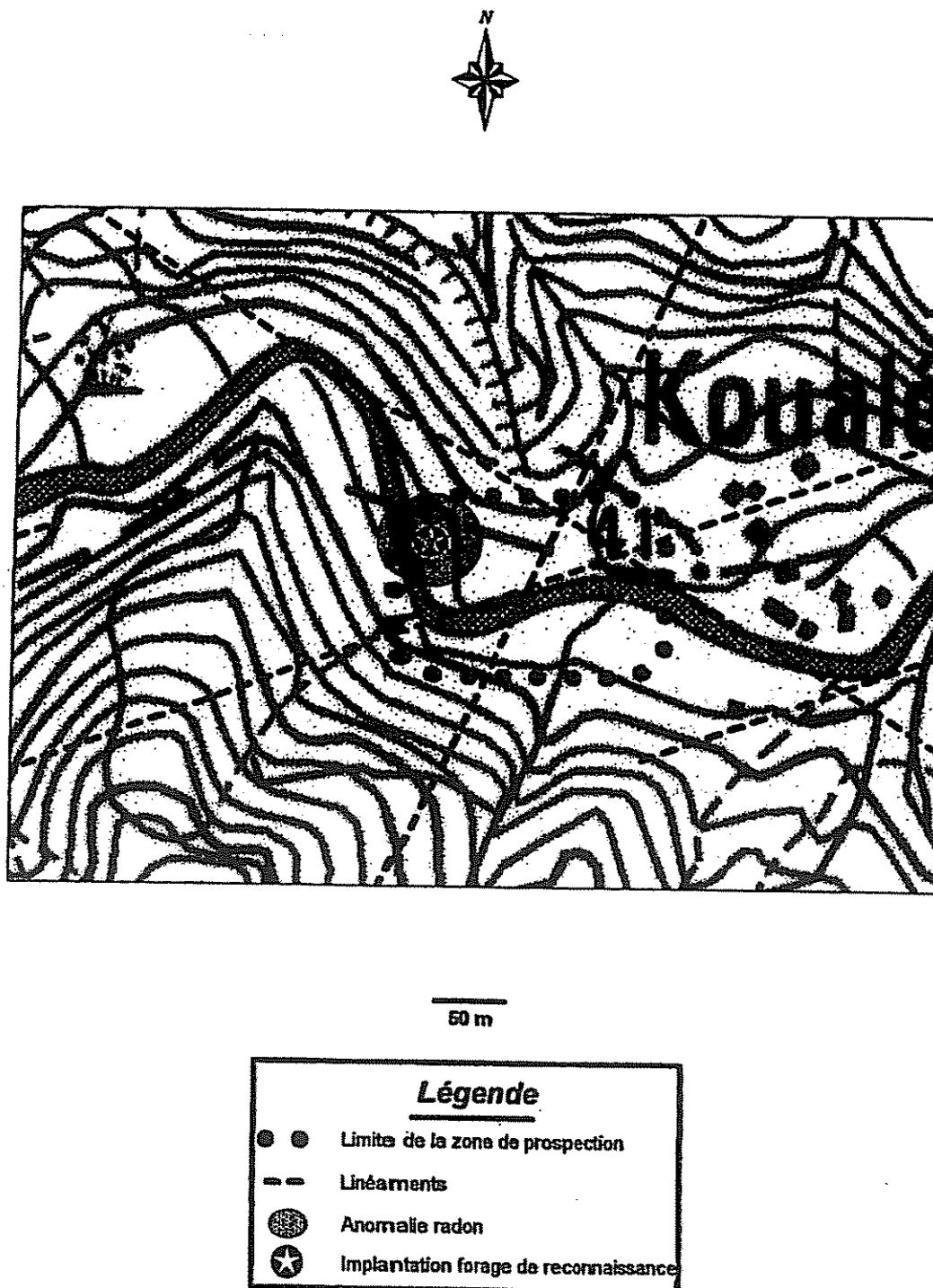
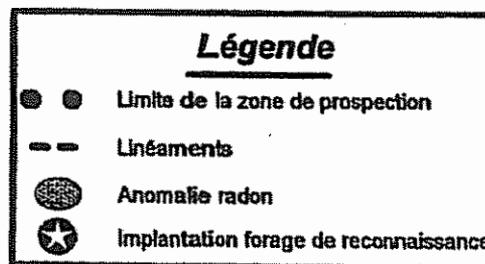
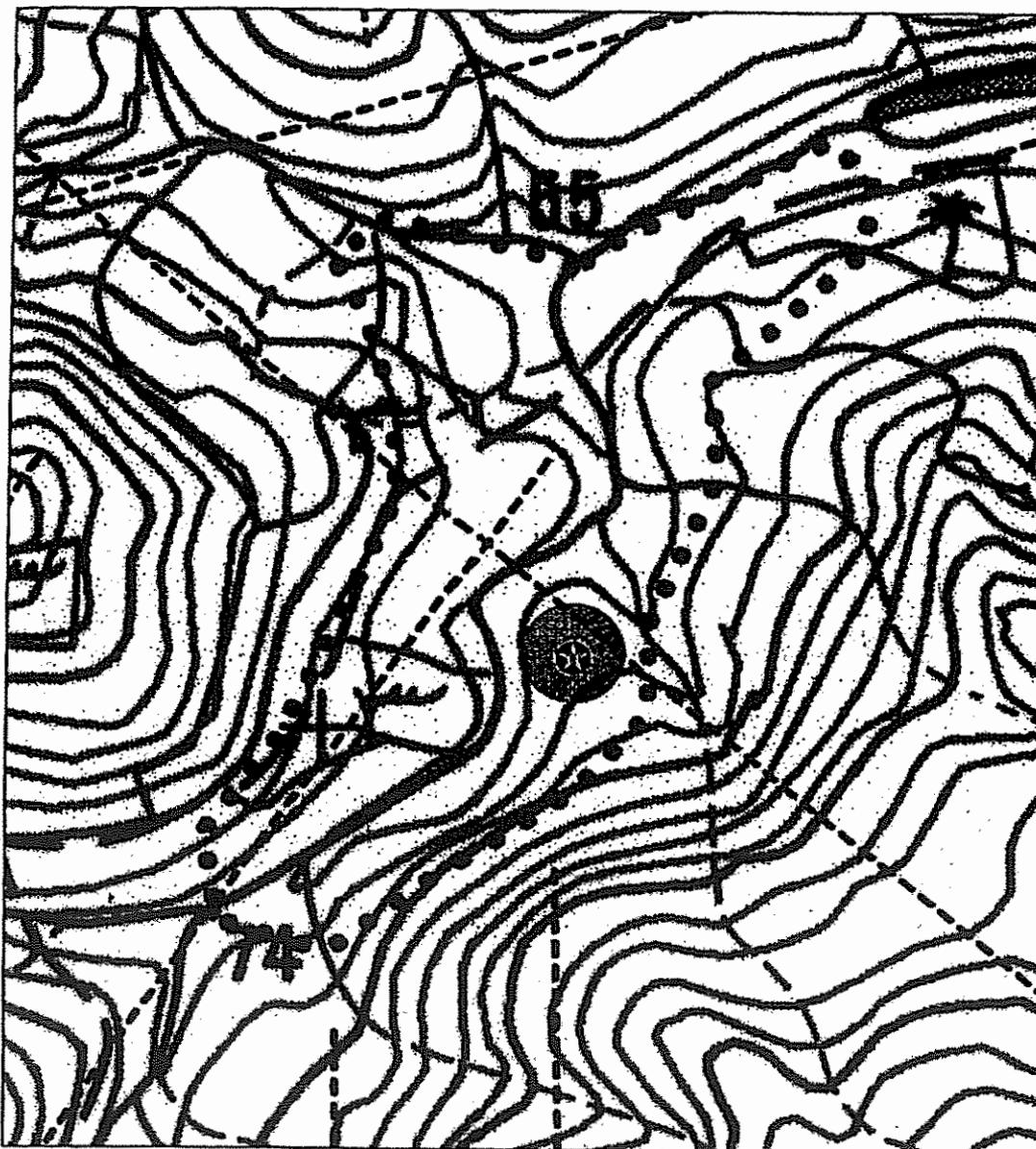


Figure 5: Site de Koualé-Légion. Carte d'implantation du forage de reconnaissance



50 m

Figure 6: Site de Koualé-Légion amont. Carte d'implantation du forage de reconnaissance

3.3. SITE DE MTSANGAMOUJI

Le programme prévisionnel des travaux prévoyait la réalisation de 2 sondages de reconnaissance d'une profondeur prévisionnelle de 70 m dont un (sur la base d'une probabilité de succès de 50 %) serait alésé pour être transformé en forage d'exploitation.

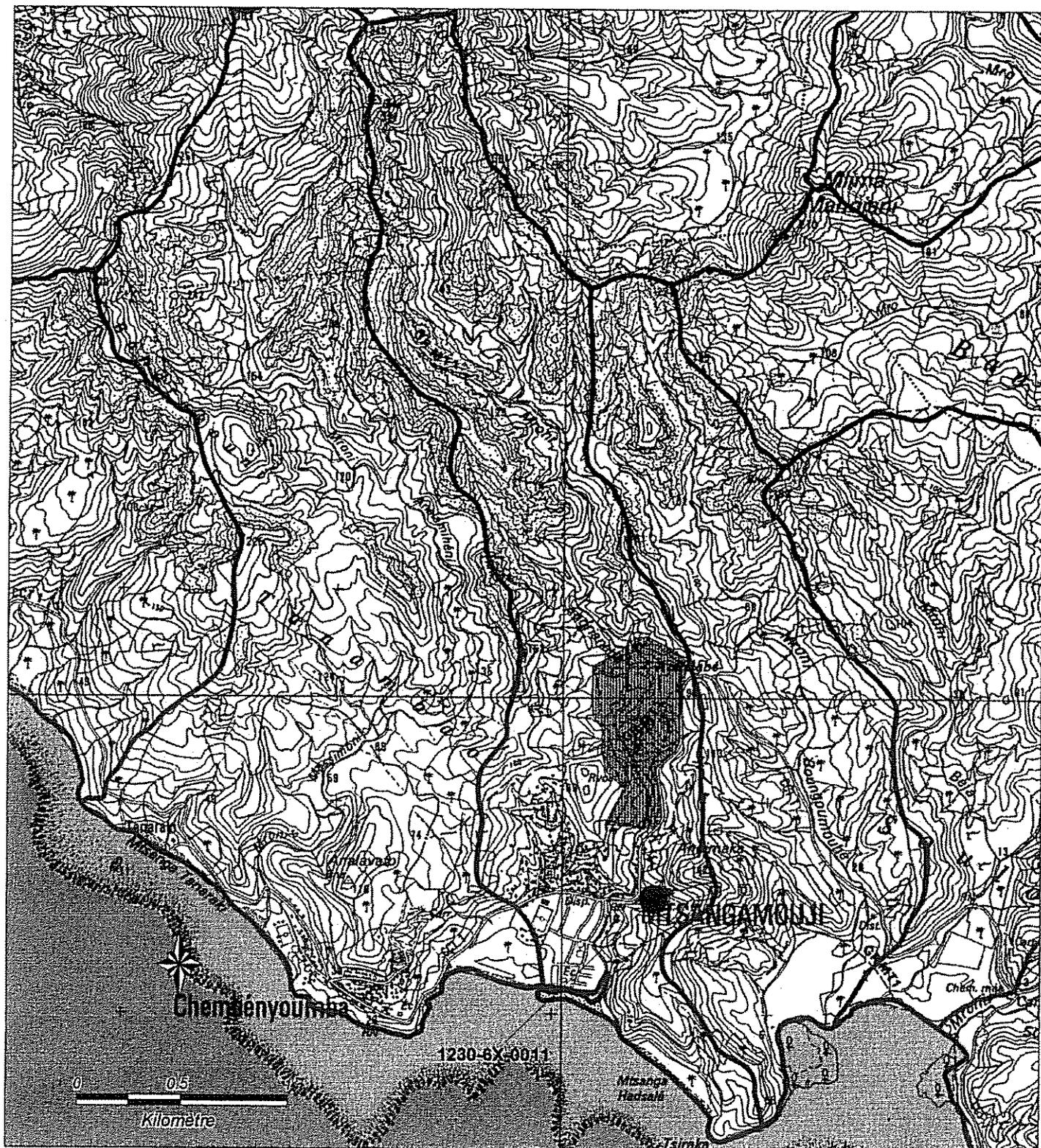
a) Observations géologiques de terrain

Les observations géologiques de terrain le long du Mro Angrianabe (figure 7) montrent que la **série basaltique** recoupée par le forage 1230-6X-0011 (empilement de coulées de lave d'épaisseur métrique, fracturées et altérées, semble-t-il, au niveau de leur toit) est surmontée :

- entre 42 et 65 m NGM environ, par une **séquence volcano-détritique** à dominante de matériaux très fins (lapilli, cendres litées, silts, argiles), déposée majoritairement en milieu de sédimentation calme de type lacustre. Le sommet de cette séquence, d'une épaisseur de 20 à 25 m environ, montre des faciès à blocs sains, présentant néanmoins toujours une matrice argileuse abondante, et des coulées de lave interstratifiées de faible épaisseur (1 m environ) montrant localement des faciès autobréchiques (synonymes d'une mise en place en contexte aquatique) ;
- entre 65 m NGM et plus de 135 m NGM, un **ensemble de coulées de lave superposées**, d'épaisseur unitaire métrique à décamétrique, ne montrant pas d'intercalation d'autres matériaux. Cette superposition de coulées de lave semble constituer l'ensemble des reliefs proches. Elle présenterait donc une épaisseur d'une centaine de mètres au moins. Sur les reliefs encadrant la vallée, cette formation est profondément affectée par l'altération (avec développement de padzas). Les faciès sont cependant quasi systématiquement sains en fond de ravine (pas d'altération au sein de l'ensemble, mais une altération globale ultérieure). Aucun indice franc de fracturation d'origine tectonique n'a été noté sur ces affleurements.

Le même ensemble est observé à l'Est, au sein de la vallée du Mro Bounoumouhé ; le contact coulées/cendres apparaît, au droit de la ravine, à une altitude de 68 m NGM environ. Des laves (interstratifiées ?) affleurent à 35 et 20 m NGM environ. Ces observations suggèrent que les formations cendreuses sont subhorizontales et présentent une épaisseur voisine dans ces deux vallées (voir également chapitre 3.4 concernant la vallée du Mroni Béja).

Figure 7 : Le site de Mtsangamouji



— Limite de bassin versant



Zone de prospection

∩ Cours d'eau principaux



Forage de reconnaissance antérieur à 1999 (N° BSS)

b) Prospection géo-électrique

Les observations géologiques s'accordent globalement bien avec l'interprétation des données géophysiques (figure A3-2, annexe 3) :

- la succession géo-électrique observée en SE1 pourrait correspondre aux coulées de lave superficielles (76 Ω .m) reposant sur les cendres (9 Ω .m) identifiées lors des reconnaissances géologiques de terrain ;
- en SE3, les cendres pourraient être directement présentes sous le recouvrement de formations superficielles conductrices ;
- en SE4, les cendres, ainsi que l'éventuelle couverture d'altération des formations volcaniques sous-jacentes (non observées à l'affleurement), se situeraient à une profondeur de 35 m environ ;
- les données du SE2 suggèrent une réduction vers l'aval de l'épaisseur des formations cendreuses (par érosion ou du fait que le dépôt -centre des formations cendreuses lacustres- se situerait plutôt vers l'amont, au droit des sondages électriques SE1 et SE4).

Les cendres pourraient constituer, à l'image des altérites en contexte d'aquifères de socle granitique, un compartiment capacitif. Il serait intéressant de drainer ce dernier par l'intermédiaire des fissures ou fractures des formations volcaniques sous-jacentes qui, ainsi, joueraient un rôle transmissif. Sur le site du forage existant (12306X0011), les formations identifiées à 35 Ω .m au moyen de la géophysique sont décrites comme un empilement de coulées d'épaisseur métrique, fracturées et altérées.

En bordure du littoral, le promontoire situé à l'Ouest de Mtsangamouji pourrait correspondre aux formations rencontrées en forage. Cet ensemble présente, semble-t-il, un faible pendage orienté globalement vers le sud-est.

c) Prospection radon

La prospection radon (Annexe 2.3) a mis en évidence deux anomalies émanométriques accessibles aux engins de forage.

La plus significative des deux semble constituée de deux anomalies coalescentes (stations n° 50 et 53 séparées par des activités légèrement plus faibles). Elle coïncide en outre avec un linéament d'orientation NW-SE.

La deuxième anomalie (station n°38) se situe à l'amont immédiat d'un linéament d'orientation WSW-ENE. Ces linéaments présentent des orientations favorables à une rétention des eaux souterraines compte tenu des orientations respectives de la vallée et du littoral.

d) Implantation proposée

Il a été proposé d'implanter les deux sondages de reconnaissance au droit de chacune des deux anomalies radon (figure 8).

Sur l'anomalie Sud, le choix de l'emplacement de la station n°53 permet de se placer à proximité immédiate du linéament NW-SE, dans un secteur où les formations argileuses (cendres) sont potentiellement moins puissantes qu'au niveau de la station n°50.

Le site de la station anormale n°38 présente une configuration géo-électrique similaire, avec une épaisseur de cendres potentiellement plus importante.

En cas de succès en terme de débit instantané sur chacun des deux sites, la réalisation des pompages d'essai de longue durée permettrait d'apprécier la capacité des cendres à soutenir le débit à long terme des forages, et de choisir, en conséquence, l'implantation d'un forage d'exploitation dans la configuration la plus favorable.

Sur la base de la coupe géo-électrique, des sondages de 70 m de profondeur tels que prévus permettront de recouper les formations de résistivité 35 Ω .m, respectivement sur une épaisseur d'environ 50 et 40 m sur chacun des deux sites de sondage de reconnaissance. Si nécessaire, cette profondeur prévisionnelle pourrait être légèrement réduite.

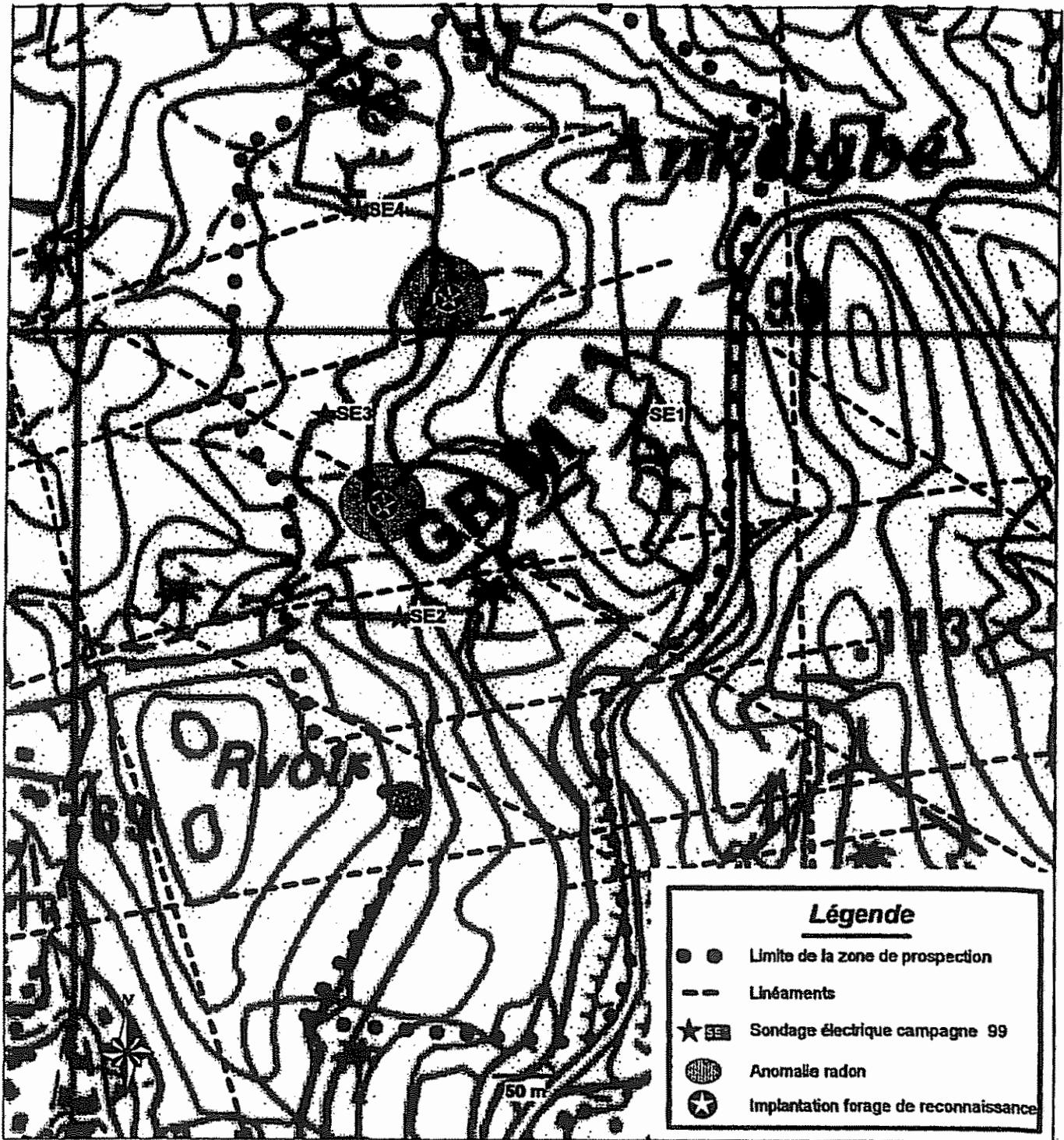


Figure 8 : Site de Mtsangamouji. Carte d'implantation des forages de reconnaissance

3.4. SITE DE BEJA

Le programme prévisionnel des travaux prévoyait la réalisation de 2 sondages de reconnaissance d'une profondeur prévisionnelle de 70 m dont l'un (sur la base d'une probabilité de succès de 50 %) serait alésé pour être transformé en forage d'exploitation.

a) Observations géologiques de terrain

Le site de Béja (figure 9) se trouve dans un contexte morphologique relativement favorable : la vallée présente une topographie peu accusée, bien qu'elle se situe entre 1 et 2 km à l'intérieur des terres. Elle est située néanmoins à une altitude significative (entre 20 et 30 m), ce qui laisse présager des conditions favorables vis à vis de la contrainte d'interface eau douce / eau salée.

Très peu d'affleurements ont été rencontrés lors des reconnaissances géologiques de terrain dans la vallée constituant l'affluent rive gauche du Mroni Béja, au sein de laquelle ont été réalisés sondages électriques et prospection radon.

Sur le site de Béja, les formations volcaniques altérées, bien préservées en apparence, semblent donc avoir été peu affectées par l'érosion. Elles pourraient même être surmontées d'un remplissage sédimentaire ou colluvial dont les variations d'épaisseur pourraient être conditionnées par des structures morphologiques et/ou tectoniques. Il est donc possible que des paléosurfaces d'altération aient été préservées dans ce secteur.

b) Prospection géo-électrique

Les données géophysiques (figure A3-3, annexe 3) suggèrent la présence quasi généralisée de formations conductrices ($9 \Omega.m$), donc à dominante argileuse. Il peut s'agir de **formations cendreuses** similaires à celles observées à Mtsangamouji (en aval immédiat du SE2, au droit du resserrement rive gauche de la vallée, des cendres à blocs centimétriques à décimétriques - taille maximale 0,2 m environ - ont été observées dans la ravine où elles constituent un seuil de 3 à 4 m environ de dénivelée) et/ou de **formations d'altération du substratum volcanique**. Toujours à proximité du SE2, le relief de la rive gauche de la vallée, très abrupt, montre de nombreux blocs centimétriques à décimétriques de lave saine.

c) Prospection radon

Lors de la prospection radon (Annexe 2.4) a été mise en évidence une station significativement anormale, isolée, mais dont la stabilité temporelle a néanmoins été démontrée. Cette anomalie coïncide avec un **linéament** d'orientation WNW-ESE (N105°E). Elle se situe entre les sondages électriques SE5 et SE6 qui suggèrent la présence du substratum volcanique potentiellement fissuré (35 Ω .m) respectivement à 57 et 35 m de profondeur (figure A3-3, annexe 3). La coupe géo-électrique pourrait également être interprétée en faisant passer entre les sondages SE5 et SE6 une discontinuité (faille ?) qui décalerait d'une vingtaine de mètres l'interface entre les horizons à 9 et 35 Ω .m. Dans ce cas, les informations linéamentaires, et les données du radon et de la géophysique seraient concordantes.

d) Implantation proposée

Il a donc été proposé d'implanter un premier sondage de reconnaissance au droit de cette anomalie radon (figure 10 et Annexe 2.4), en se plaçant hors d'atteinte des crues de la ravine, affluent du Mroni Béja. Le linéaire prévisionnel de sondage de 70 m est bien adapté à la profondeur prévisionnelle du substratum volcanique, peu ou pas altéré. Les formations géologiques interprétées en géophysique comme dépôts alluvionnaires (55 et 130 Ω .m respectivement en SE5 et SE6) pourraient constituer une cible secondaire du forage de reconnaissance. Cette dernière formation est très probablement saturée en eau dans la mesure où, même en saison sèche, l'axe de la vallée montre toujours des indices d'humidité.

Au vu de l'interprétation actuelle des données géophysiques, ce premier site de sondage de reconnaissance constitue le seul endroit de la vallée où les formations à 35 Ω .m pourraient être reconnues par des forages d'une profondeur inférieure à 70 m. Il ne semble donc pas envisageable de les reconnaître ailleurs que dans cette zone de la vallée. Un sondage dans cette zone permettra également de définir la nature des formations à 9 Ω .m qui ne sont pas forcément à considérer de manière totalement négative (cf. § 3.7).

Dans la mesure où ce site n'a fait l'objet d'aucune reconnaissance par forage jusqu'à présent, les informations qui seront recueillies lors de la réalisation de ce premier sondage seront d'une grande importance. Elles devront être valorisées, en particulier pour réinterpréter, le cas échéant, la coupe géo-électrique proposée.

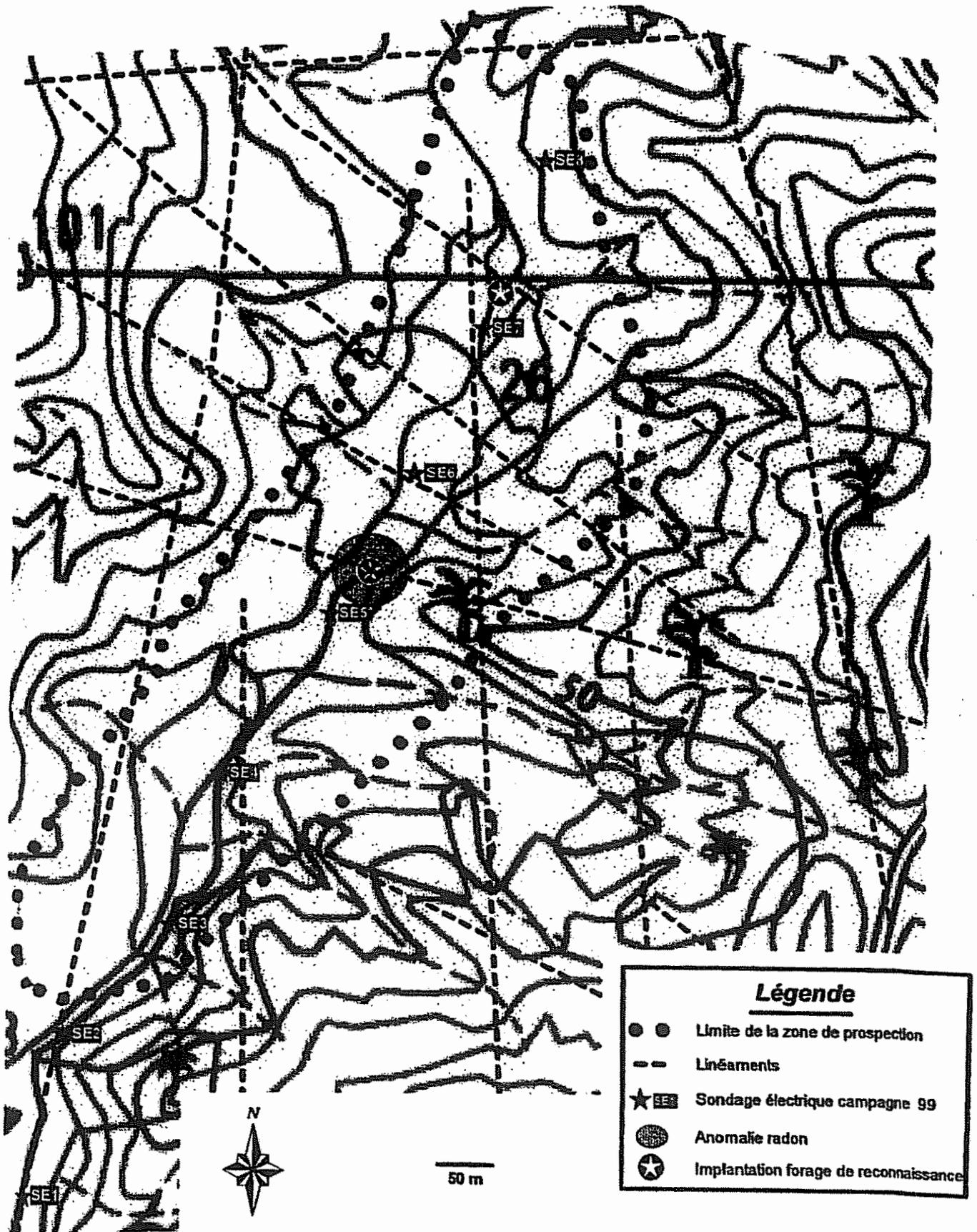


Figure 10 : Site de Béja. Carte d'implantation des forages de reconnaissance

- *Dans le cas où l'interprétation géophysique ne serait pas significativement remise en cause (Hypothèse 1) et où le potentiel aquifère des formations supposées alluviales (résistivité 55 - 130 Ω .m en SE5 et SE6) serait jugé prometteur à l'issue du premier forage :*

Ces formations pourraient constituer la cible principale du second sondage de reconnaissance qui pourrait alors être implanté dans le secteur des SE7 et SE8 où elles semblent présenter une épaisseur maximale. Compte tenu de la résistivité élevée des formations à reconnaître et de la morphologie de surface (les formations alluviales éventuelles pourraient s'interrompre immédiatement à l'aval de SE7), il ne peut être exclu que dans cette zone, les formations soient constituées de laves peu à pas altérées.

Dans l'état actuel des connaissances (en l'absence d'argument déterminant en faveur du site SE8 plutôt que SE7), **il est proposé d'implanter le second sondage de reconnaissance à proximité du SE7**, en favorisant, de ce fait, le critère de facilité d'accès au site. L'emplacement proposé se situe à 35 m environ au NNE du SE7, sur un site qui se trouve dans l'axe d'une petite ravine non pérenne et à proximité immédiate, mais néanmoins hors de la zone de débordement de la ravine, affluent du Mroni Béja.

Les données géophysiques suggèrent une profondeur de sondage inférieure à 70 m (50 à 55 m). Sur le site de Béja, il ne faudra donc pas hésiter à prolonger de quelques mètres le sondage de reconnaissance n°1, si les résultats obtenus au sein de la formation à 35 Ω .m semblent prometteurs.

- *Dans le cas où l'interprétation géophysique serait significativement remise en cause par les résultats du premier sondage (Hypothèse 2) et aboutirait, en particulier, à considérer le potentiel aquifère des formations supposées alluviales (résistivité 55 - 130 Ω .m en SE5 et SE6), comme étant faible :*

La cible principale du second sondage de reconnaissance pourrait être réorientée à proximité des formations à 35 Ω .m dans le secteur du SE6, où elles pourraient, éventuellement, compte tenu de leur proximité de la surface topographique, être recoupées sur une plus grande épaisseur qu'entre SE5 et SE6.

Afin de lever plusieurs indéterminations, il serait intéressant de réaliser *a posteriori* un sondage électrique complémentaire au droit du premier sondage de reconnaissance. Ce sondage électrique aurait, en particulier, pour objectif de déterminer la résistivité du second horizon électrique (affinité 50 ou 130 Ω .m), afin de définir avec plus de précision si les terrains, qui seront recoupés par le forage, sont plutôt représentatifs des formations identifiées en SE5 ou en SE6.

Compte tenu de ces éléments, il a été proposé :

- **qu'en cas d'indices favorables, le premier ouvrage de reconnaissance soit foré jusqu'à une profondeur de 80 à 85 m, tandis qu'une profondeur de 55 à 60 m pourrait être suffisante pour le second sondage ;**
- **que les résultats du premier sondage de reconnaissance puissent servir à une réinterprétation des données recueillies (géophysique, en particulier), à partir de laquelle l'implantation du second sondage de reconnaissance pourra être précisée.**

3.5. SITE DE TSARARANO

Le programme prévisionnel des travaux prévoyait la réalisation de 2 sondages de reconnaissance d'une profondeur prévisionnelle de 50 m dont l'un (sur la base d'une probabilité de succès de 50 %) serait alésé pour être transformé en forage d'exploitation.

Le site retenu pour les prospections à Tsararano a été choisi dans la partie amont de la plaine, des indices de salinité excessive des eaux souterraines (campagne de sondages électriques de 1987 et profils de conductivité électrique réalisés dans les piézomètres par la DAF) ayant été mis en évidence dans sa partie aval.

Le site présente, d'une manière générale, un contexte morphologique relativement favorable, au débouché d'un bassin versant assez développé (Mro Oua Dembeni) (cf. figure 11).

a) Prospection géo-électrique

Les reconnaissances géophysiques permettent de distinguer deux secteurs présentant des caractéristiques électriques nettement distinctes (figure A3-4, annexe3) :

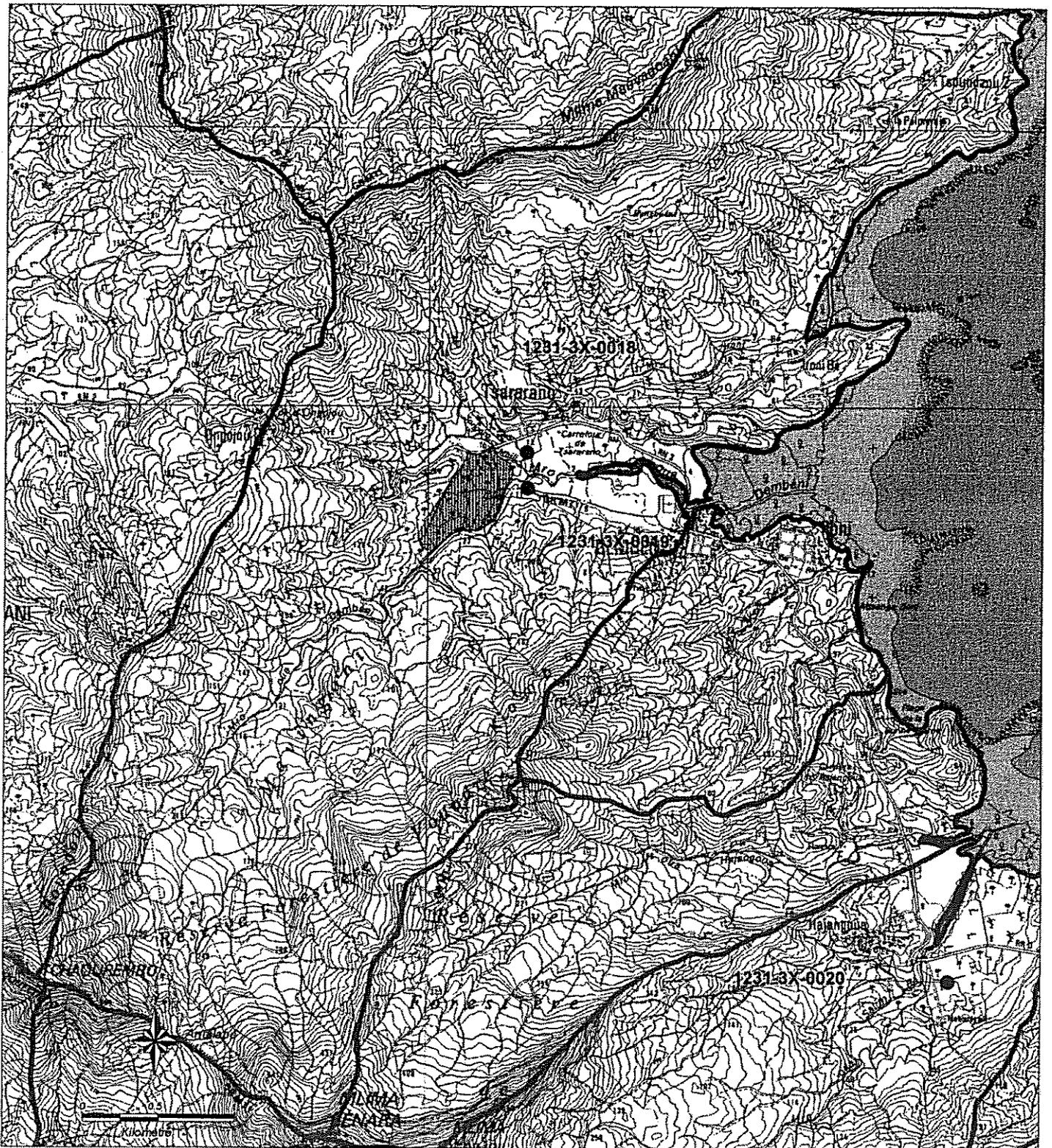
- le secteur *Nord-Est*, situé en aval du gué sur le Mro Oua Dembeni, montre la présence d'un horizon de résistivité 35 Ω .m, d'une épaisseur de 25 à 80 m, situé sous un recouvrement d'épaisseur comprise entre 15 et 35 m (horizon sablo-limoneux et altérites argileuses peu développées). Cet horizon électrique repose sur des formations très résistantes ;
- le secteur *Sud-Ouest*, situé en amont du gué, montre la présence d'horizons relativement résistants (100 à 105 Ω .m), d'une épaisseur de l'ordre de 30 m et situés sous un faible recouvrement (moins de 10 m). Ces horizons résistants surmontent une forte épaisseur de formations très conductrices (9 Ω .m).

Cette distinction semble valable aussi bien en rive gauche qu'en rive droite de la vallée.

La limite entre ces deux secteurs coïncide relativement bien avec le contact géologique (sensiblement nord-sud) séparant les deux formations distinguées au sein du « bouclier ancien méridional » sur la carte géologique à 1/50 000 [Stieltjes et al., 1988] :

- basaltes ankaramitiques ($\beta\pi N$) : coulées de fond de vallée en inversion de relief ;
- basaltes à néphéline formant la base de la série méridionale (βs), antérieurs aux basaltes ankaramitiques et décrits comme étant souvent altérés.

Figure 11 : Le site de Tsararano



— Limite de bassin versant



Zone de prospection

∨ Cours d'eau principaux



Forage de reconnaissance antérieur à 1999 (N° BSS)

Les formations à 100 Ω.m du compartiment Sud-Ouest pourraient donc être attribuées soit à des coulées de basalte à néphéline peu altérées, soit à des formations alluviales qui se seraient accumulées en amont du ressaut morphologique provoqué par les basaltes ankaramitiques. Le gué, bien que constitué uniquement de blocs de lave à l'affleurement, constituerait ainsi un seuil naturel induit par la présence en profondeur de formations géologiques plus résistantes.

Les formations à 35 et 300 Ω.m du compartiment Nord-Est pourraient alors être attribuées au remplissage d'une paléovallée par les basaltes ankaramitiques sommitaux. Ces formations seraient peu affectées par l'altération.

b) Observations géologiques de terrain

Les observations géologiques de terrain le long du Mro Oua Dembeni montrent la présence de blocs de lave cyclopéens (taille allant jusqu'à plus de 10 m³) dès la cote d'environ 30 m NGM, c'est à dire nettement en amont de la limite géologique et géophysique décrite ci-dessus. Ces blocs semblent provenir du démantèlement d'une coulée massive ; la surface structurale de la cote 70 à 90 m NGM pourrait correspondre au toit de cette coulée ; dans ce secteur, celle-ci ne montre pas une couverture d'altération significative. Cette surface structurale semble se poursuivre vers l'Est, jusqu'au-dessus du village de Dembeni. Les coulées massives ont été observées à l'amont du captage sur le Mro Oua Dembeni (80 m NGM environ).

En partie aval et en rive gauche du Mro Oua Dembeni une surface plane se développe entre les cotes 12 et 25 m NGM environ. Elle montre des blocs basaltiques décimétriques noirs et sains abondants (surfaces de coulée ou alluvions grossières ?).

c) Prospection radon

La prospection radon (Annexe 2.5) a été mise en œuvre dans la partie Est du compartiment géologique Sud-Ouest du secteur étudié. Elle a permis de mettre en évidence deux stations qui pourraient, malgré leur relativement faible activité en valeur absolue (505 et 411 Bq/m³/100), être anormales. Ces anomalies se situent, en effet, toutes deux à proximité de l'intersection de **linéaments** : le linéament qui leur est commun présente une orientation WNW-ESE (N115°E). Elles sont aussi entourées de stations d'activité significativement supérieures au seuil de bruit de fond. En revanche, les stations radon situées à proximité du contact entre les deux formations géologiques (basaltes ankaramitiques / basaltes à néphéline) ne montrent pas d'activités radon significatives.

d) Implantation proposée

Il est proposé d'implanter un sondage de reconnaissance dans chacun des deux compartiments identifiés au cours de la prospection géophysique (figure 12 et annexe 2.5).

Au sein du secteur Sud-Ouest, situé en amont du gué, un sondage de reconnaissance pourrait être réalisé au droit de l'une des anomalies radon. Il pourrait être implanté à mi-distance entre la station radon anormale et la limite du lit mineur du Mro Oua Dembeni (ces deux points sont séparés d'environ 20 m, l'axe du cours d'eau se situant à une dizaine de mètres de distance et 2 m en contrebas environ).

Le site de l'anomalie radon située immédiatement en rive droite du Mro Oua Dembeni offre l'intérêt de se situer à proximité immédiate du cours d'eau et d'une piste, le long de laquelle chemine la conduite d'adduction provenant de la prise d'eau. Il se trouve environ à mi-distance entre les sondages électriques SE2 et SE4, ce qui permet de reconnaître les formations relativement résistantes (100 à 105 Ω .m). Celles-ci correspondent, très vraisemblablement, à des laves peu altérées. En effet, des laves présentant une altération en boules, affleurent en rive gauche du lit mineur du Mro Oua Dembeni, à une trentaine de mètres à l'aval de l'implantation proposée pour le sondage de reconnaissance.

La profondeur prévisionnelle de ce sondage est évaluée à 45 m environ.

Aucun linéament n'a été identifié au sein du *secteur Nord-Est*, situé en aval du gué. **Il est proposé d'implanter un deuxième sondage de reconnaissance entre les sondages électriques SE5 et SE6.** Cette implantation permet de se placer à une distance modérée de la rivière tout en limitant l'épaisseur supposée du recouvrement d'altération (en SE5, il pourrait correspondre à l'altération des flancs de la paléovallée au sein de laquelle se seraient mis en place les basaltes ankaramitiques). Le site envisagé se situe à une trentaine de mètres au Sud de SE6 et à une dizaine de mètres du chemin menant au gué. Un sondage d'une profondeur prévisionnelle de 40 à 50 m devrait permettre de recouper les formations à 35 Ω .m sur une épaisseur significative.

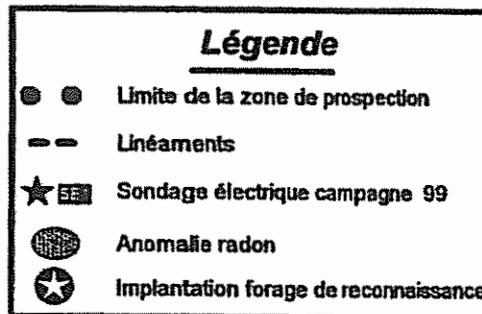
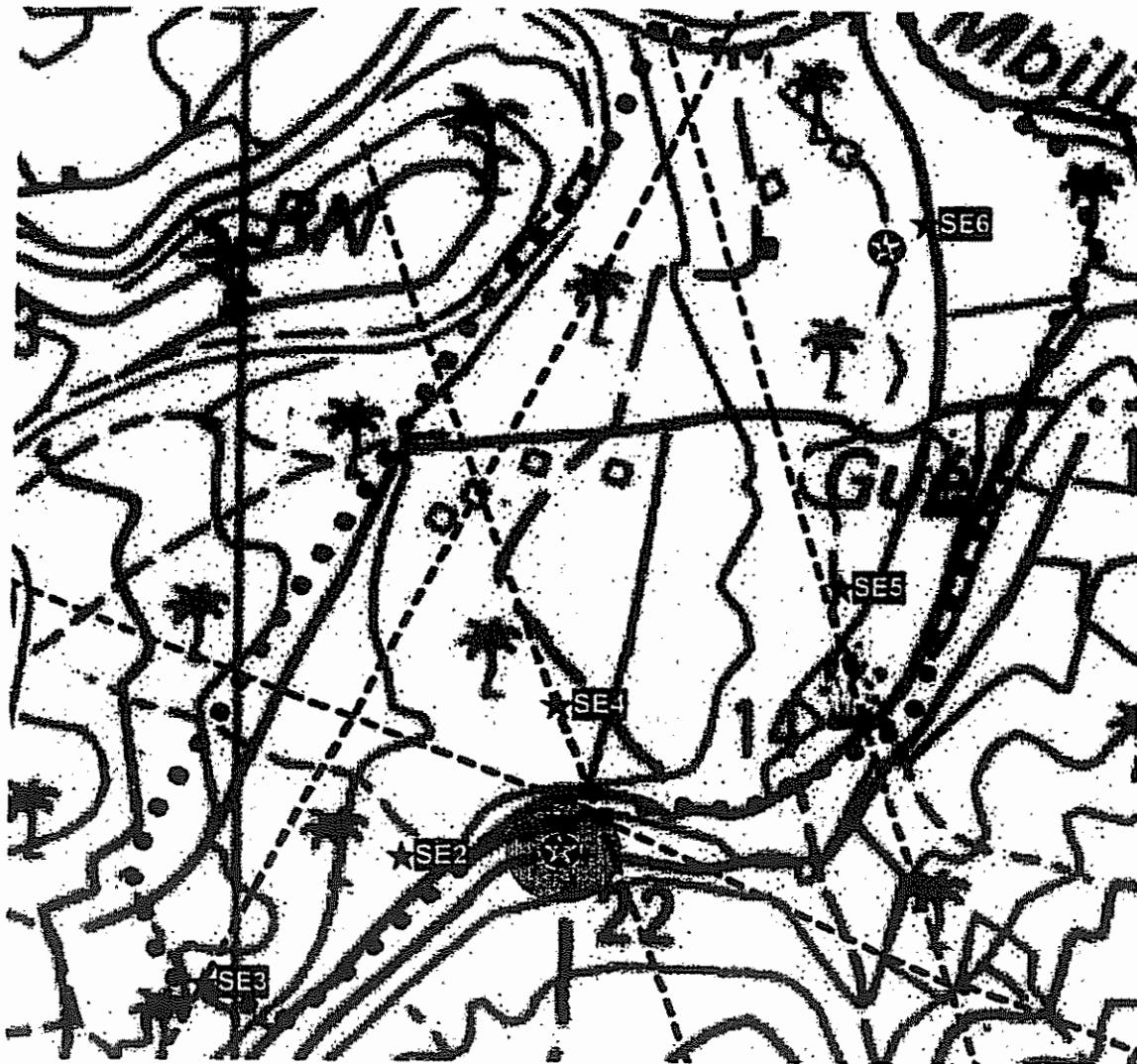


Figure 12 : Site de Tsararano. Carte d'implantation des forages de reconnaissance

3.6. SITE DE MRONABEJA

Le programme prévisionnel des travaux prévoyait la réalisation d'un sondage de reconnaissance d'une profondeur prévisionnelle de 50 m. Il est prévu de le transformer en forage d'exploitation par alésage (sur la base d'une probabilité de succès de 50 %).

Le site de Mronabéja se situe dans un contexte général moins favorable du point de vue de la ressource en eau souterraine que les sites étudiés jusqu'à présent dans la partie Nord de l'île (bassin versant de taille relativement réduite dans un environnement aux précipitations efficaces probablement modérées). Les résultats obtenus au sondage de reconnaissance réalisé en 1992 (1231-6X-0031; figure 13) sont néanmoins encourageants, en particulier du point de vue de la qualité des eaux souterraines (405 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et de la charge hydraulique (forage légèrement artésien, nettement en charge sous les limons et altérites). En outre, même si le Mroni Antananana ne montre pas un écoulement pérenne, des trous d'eau y subsistent en saison sèche.

a) Observations géologiques de terrain

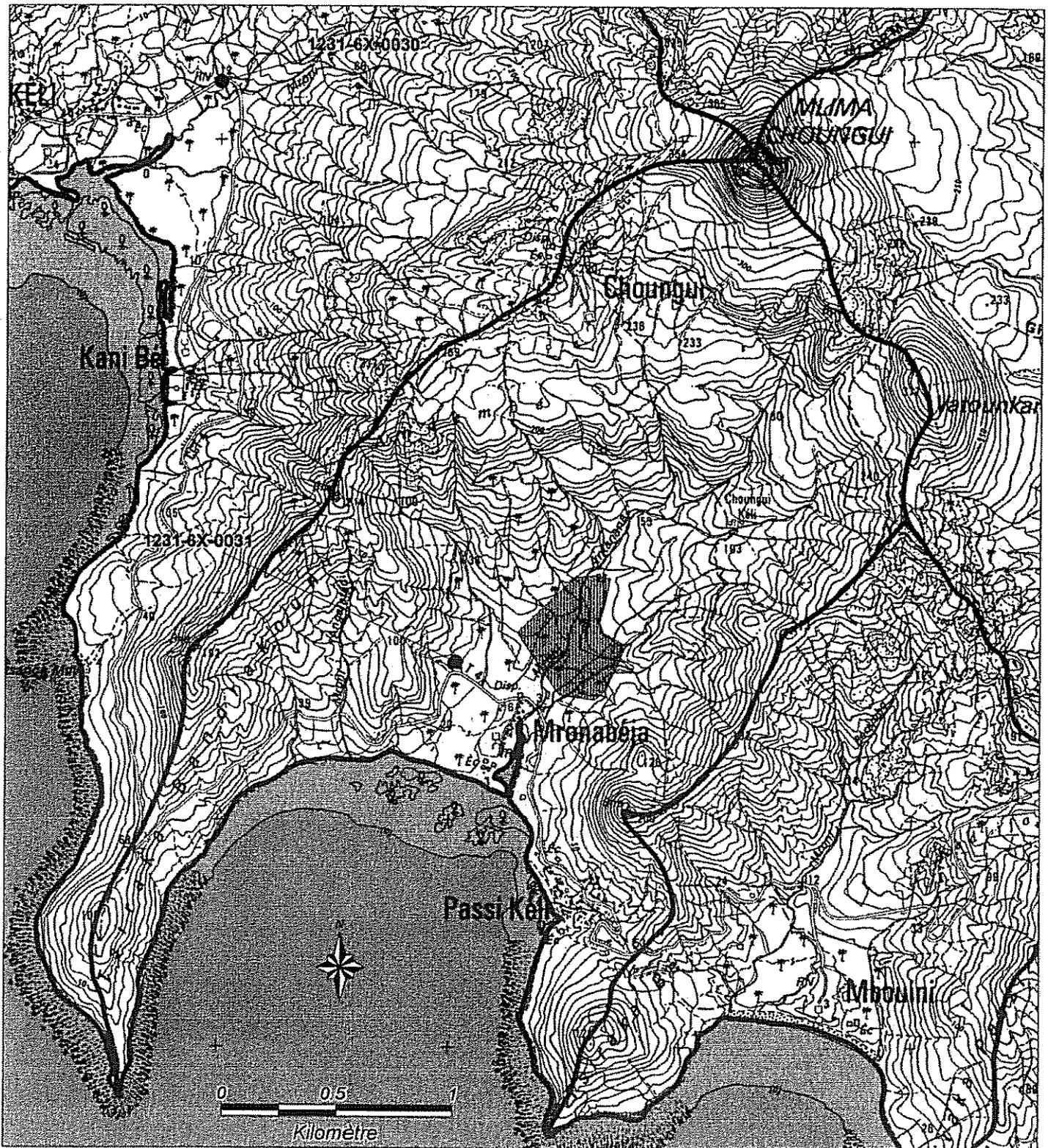
Les reconnaissances géologiques de terrain ont permis d'observer deux ensembles volcaniques distincts sur le bassin versant du site.

Le Mro ne montre, en dessous de 100 m NGM environ, que de très rares affleurements de lave (55 m NGM, 65 m NGM). Le cours d'eau ne recoupe que des formations de pente grossières (blocs décimétriques à métriques). Dans cette zone, il ne montre pas, en fin de saison humide (début juin 1999), de diminution notable de son débit de l'aval vers l'amont (à l'amont de la prise d'eau). En dehors du lit des ravines, affleurent des formations colluviales et d'altération.

Au-delà de 100 m NGM environ, les formations volcaniques affleurent de manière quasi continue au sein du cours d'eau, qui présente en outre un profil en long très redressé. Elles sont constituées d'une alternance de coulées de lave d'épaisseur plurimétrique et de niveaux scoriacés de degré d'altération variable (altération vraisemblablement contemporaine de la mise en place). Localement, les coulées de lave affleurent même en dehors des ravines. Elles montrent une direction de mise en place sud-est.

Le forage existant (1231-6X-0031) recoupe l'ensemble volcanique inférieur (ou les formations qui lui sont sous-jacentes) qui présente, sous sa couverture d'altération et de limons et colluvions, des faciès sains intercalés avec des niveaux plus altérés.

Figure 13 : Le site de Mronabéja



— Limite de bassin versant



Zone de prospection

∨ Cours d'eau principaux



● Forage de reconnaissance antérieur à 1999 (N° BSS)

b) Prospection radon

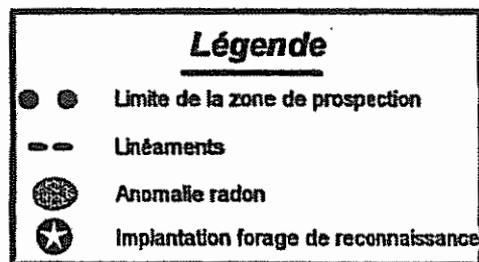
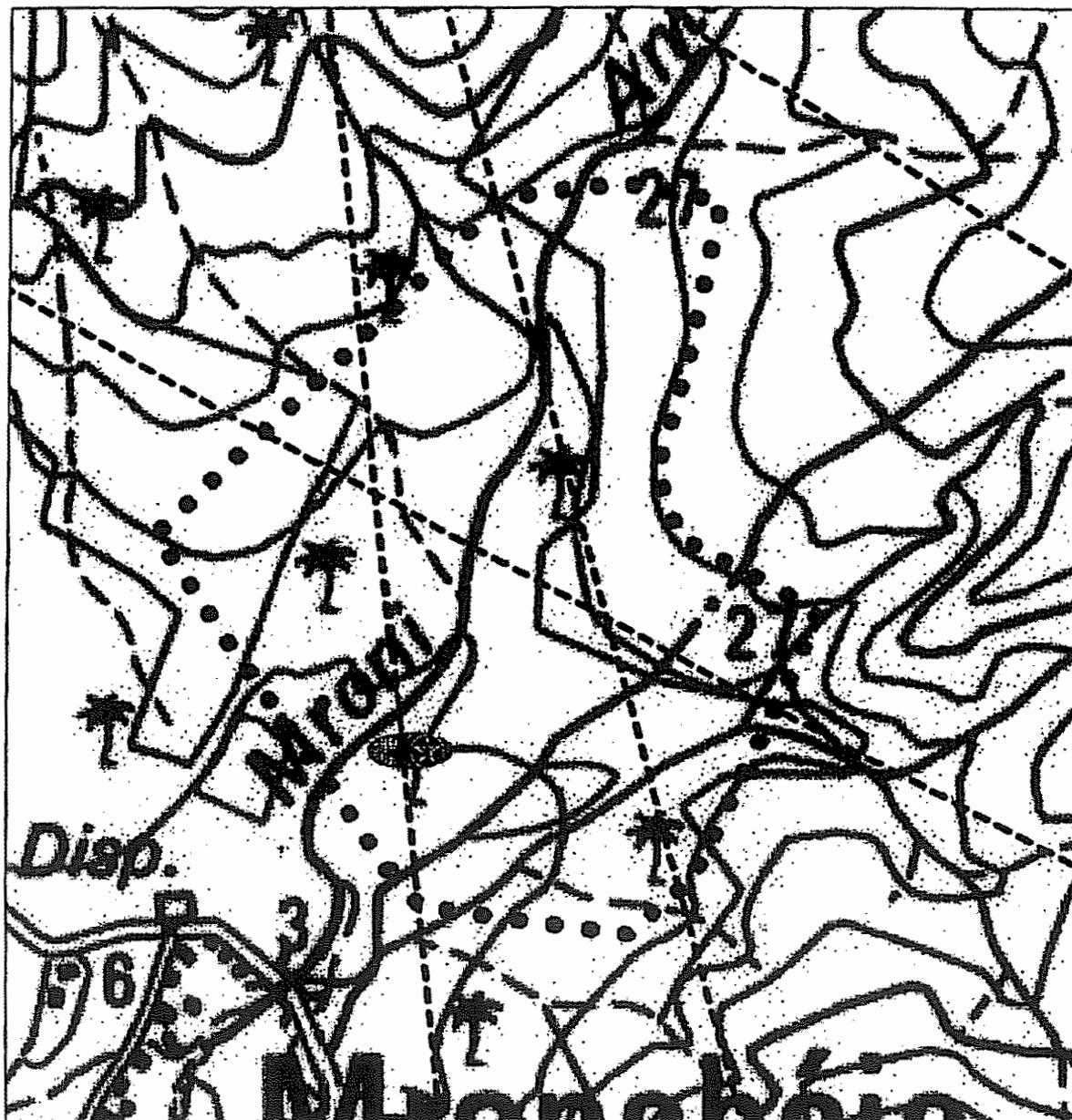
La prospection radon (Annexe 2.6) a permis d'identifier une zone anormale qui coïncide relativement bien avec un accident subméridien (stations à 427, 546, 407 et 480 Bq/m³/100). Il est notable que les deux anomalies radon identifiées comme les plus significatives sur ce site se situent toutes deux sur deux **linéaments** d'orientation subméridienne.

c) Implantation proposée

Il est proposé d'implanter le sondage de reconnaissance sur cette anomalie radon, à proximité de la station n°17 (462 Bq/m³/100) (figure 14). Cette station présente l'intérêt de montrer des activités radon relativement stables et de se situer dans le même compartiment géologique que le forage existant (par rapport au linéament subméridien). La profondeur prévisionnelle des formations volcaniques non altérées et du niveau piézométrique devrait donc être similaire. En outre, bien qu'orienté globalement vers le littoral, le linéament concerné ne semble pas susceptible de pouvoir constituer une zone d'apports préférentiels d'eau de mer (son prolongement vient recouper le relief de la rive gauche de la vallée). Dans l'hypothèse où les activités radon reflètent bien des variations de la fracturation, la station n°17 pourrait se trouver en bordure ou sur un accident satellite à la fracture subméridienne supposée d'après la photo-interprétation. Cette implantation est privilégiée par rapport à la station n°2 qui, bien que montrant une activité radon stable et légèrement plus élevée, se situe peut être au sein d'un compartiment géologique plus « aval ».

Compte tenu de la décroissance des activités radon à l'Est de la station n°17, il est proposé d'implanter le sondage à mi-distance entre les stations n°72 et 17.

Un sondage d'une profondeur prévisionnelle de 40 à 50 m devrait permettre de recouper les formations volcaniques présentes sous les limons et altérites sur une épaisseur significative (20 à 30 m) et d'y reconnaître d'éventuelles zones fissurées ou fracturées.



50 m

Figure 14 : Site de Mronabéja. Carte d'implantation du forage de reconnaissance

3.7. SITE DE MRERENI

Le programme prévisionnel des travaux prévoyait la réalisation de 2 sondages de reconnaissance d'une profondeur prévisionnelle de 50 m. Il était également prévu de réaliser un forage d'exploitation et de transformer un sondage de reconnaissance en forage d'exploitation par alésage (sur la base d'une probabilité de succès de 50 %).

A l'image du site de Mronabéja, le site de Mréréni se situe dans un contexte général moins favorable du point de vue de la ressource en eau souterraine que les sites étudiés dans la partie Nord de l'île (bassin versant de taille relativement réduite dans un environnement aux précipitations efficaces probablement modérées). Les résultats obtenus à partir du sondage de reconnaissance réalisé en 1992 (1231-2X-0033 ; figure 15) sont néanmoins encourageants, en particulier du point de vue de la qualité des eaux souterraines (135 $\mu\text{S}/\text{cm}$), de la charge hydraulique (niveau piézométrique élevé) et du débit obtenu (2 l/s pour 3 m de rabattement). En outre, la zone prospectée se situe à plus d'un kilomètre du littoral, ce qui permet de s'affranchir de l'intrusion saline.

a) Observations géologiques de terrain

Les reconnaissances géologiques de terrain suggèrent l'existence d'une **puissante couverture altéritique** qui matérialise probablement une paléosurface basse (glacis descendant en pente douce vers le littoral) semblant peu affectée par l'érosion.

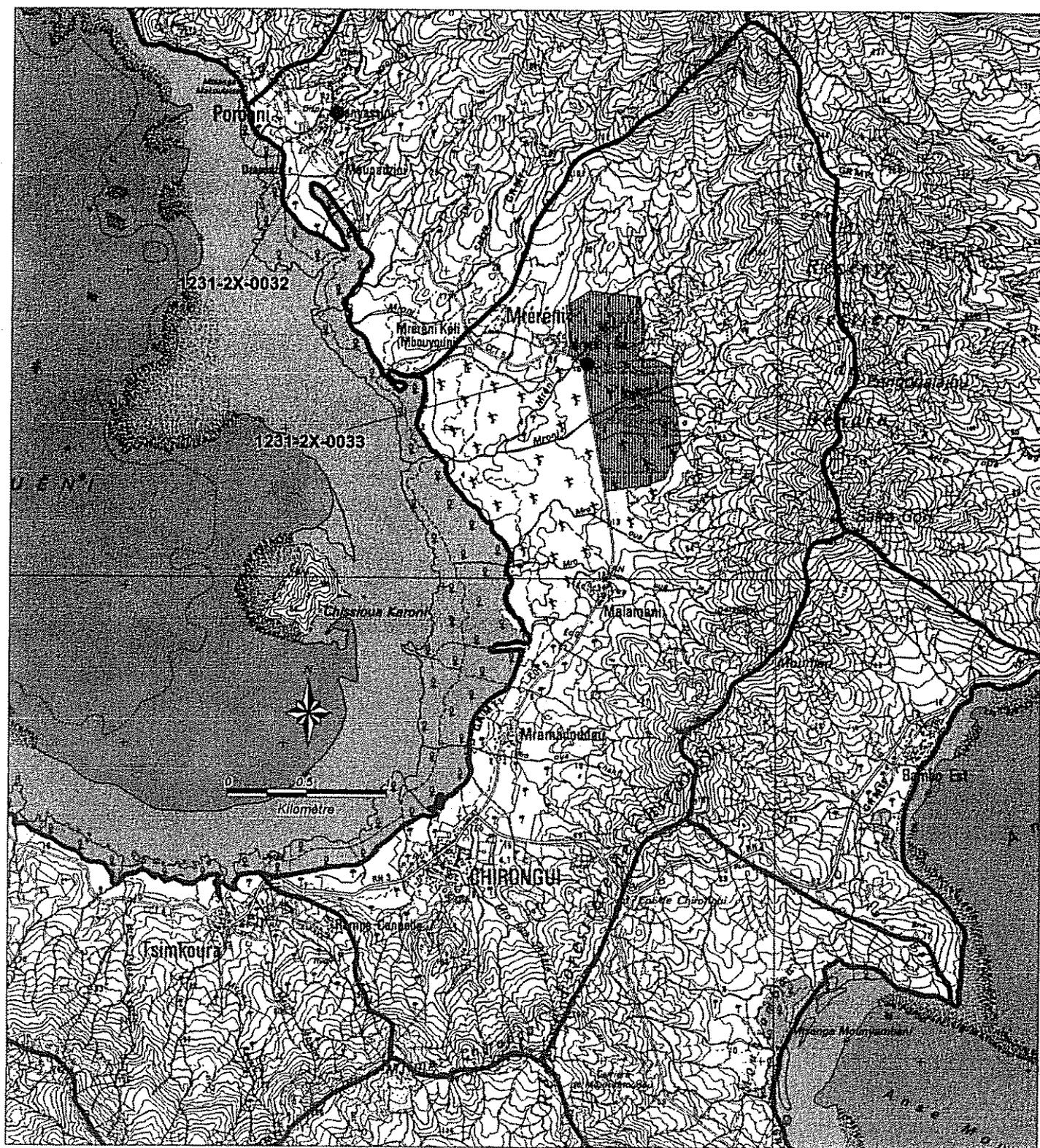
b) Prospection géo-électrique

Les résultats de la campagne géophysique semblent confirmer cette interprétation (figure A3-5, annexe 3). Les formations conductrices (deux horizons respectivement à 4 et 9 $\Omega\cdot\text{m}$) sont très développées. Leur épaisseur croît très significativement de l'amont vers l'aval, de 30 m environ au SE8 à plus de 120 m en SE1 et SE2(1987). Le toit de ces formations conductrices semble grossièrement suivre la pente topographique. Il se situe à faible profondeur (de quelques mètres à 15 m environ), sous un terrain de surface dont la résistivité varie probablement en fonction de sa saturation en eau.

Ces formations conductrices pourraient correspondre à des altérites bien préservées.

Dans le contexte du site de Mréréni, à proximité duquel des indices d'hydrothermalisme ont été observés (Chirongui en particulier), la présence de ces terrains conducteurs peut aussi résulter du développement d'une altération de type hydrothermal. Ceci pourrait expliquer l'épaisseur importante (ou l'enracinement) des formations conductrices, en particulier au niveau du SE2(1987). Dans un tel contexte, il ne peut être exclu que les anomalies radon se localisent au droit de certains de ces secteurs hydrothermalisés. Le premier sondage de reconnaissance devra permettre de lever cette hypothèse.

Figure 15 : Le site de Mréréni



— Limite de bassin versant



Zone de prospection

∩ Cours d'eau principaux



● Forage de reconnaissance antérieur à 1999 (N° BSS)

Les informations du sondage de reconnaissance de 1992 (1231-2X-0033), sur le site duquel a été réalisé le sondage électrique SE1, suggèrent néanmoins que ces formations conductrices ne sont pas intégralement argilisées. L'horizon à 4 $\Omega.m$ pourrait y être attribué aux altérites (avec éventuellement des intercalations de formations sédimentaires fluviomarines) au sein desquelles des éléments durs ont été notés lors de la foration (blocs de basalte ?). L'horizon à 9 $\Omega.m$ semble constitué de formations volcaniques alternativement massives, fissurées et/ou fracturées, ou altérées, qui ont fourni un débit significatif (2 l/s pour un rabattement de l'ordre de 3 m). *La reconnaissance par forage de cet objectif géo-électrique semble donc envisageable.*

La relativement faible résistivité électrique de l'ensemble de ces formations pourrait éventuellement être expliquée par la présence conjointe de niveaux subhorizontaux argilisés (tels qu'observés au sein du sondage de reconnaissance existant) et de fractures subverticales hydrothermalisées. Ces dernières formeraient un réseau conducteur du point de vue électrique, sans pour autant que la formation soit complètement argilisée dans la masse et donc que sa perméabilité soit très faible.

Au droit des sondages électriques SE5 et SE8, cet horizon à 9 $\Omega.m$ est surmonté d'un niveau plus résistant (15 à 18 $\Omega.m$). Il ne peut être exclu, en particulier en SE8, que ce niveau corresponde aux formations de surface. Sa continuité entre SE5 et SE8 n'est donc pas assurée. En SE5, il pourrait également correspondre à un ensemble volcanique moins argilisé que celui rencontré au niveau des autres sondages électriques. Cet ensemble volcanique pourrait constituer les reliefs dans ce secteur ou le remplissage d'une paléovallée.

c) Prospection radon

La prospection radon (Annexe 2.7) a permis d'identifier une zone anormale relativement vaste, constituée en fait de deux plages, de valeurs supérieures au seuil anormal, séparées par une zone de plus faibles valeurs. Cette anomalie se situe à l'Est du forage existant qui est implanté dans une zone non anormale. A petite échelle, cette zone anormale semble se trouver au droit d'une structure située à l'intersection de trois familles de **linéaments** (subméridienne, NE-SW et WNW-ESE). A plus grande échelle (Annexe 2.7), l'anomalie radon ne coïncide pas exactement avec les linéaments, tant en ce qui concerne sa géométrie que sa localisation. Elle semble encadrée au Sud et au Nord par deux linéaments NE-SW et à l'est par le linéament subméridien. Il est notable que les deux stations (n°51 et 61) d'activité la plus forte se situent toutes deux à une distance similaire de ce dernier linéament.

d) Implantation proposée

Il est proposé d'implanter le premier sondage de reconnaissance sur l'anomalie radon, à proximité de la station anormale n°61 qui constitue l'un des deux points, avec la station n°52, présentant les activités radon les plus élevées (figure 16). La station n°61 présente l'intérêt de se situer à une altitude légèrement plus basse que la

station n°52 et, de ce fait, plus près du Mroni Kaféni. Située entre les sondages électriques SE1 et SE6, elle présente, en outre, une coupe lithologique similaire à celle rencontrée dans le sondage de reconnaissance de 1992. Il est proposé d'implanter le sondage au droit de la station n°61. Ceci permet de recouper un éventuel linéament satellite de la structure N-S qui serait également à l'origine de l'anomalie de la station n°52.

□ *En cas d'échec sur ce premier site (Hypothèse 1) :*

Un forage d'exploitation pourrait être réalisé et testé à proximité immédiate (5 – 10 m de distance) du sondage de reconnaissance de 1992 qui avait suggéré des propriétés intéressantes dans ce secteur. Il pourrait être implanté au Nord de cet ouvrage afin de se rapprocher du linéament SW-NE proche.

Dans ce cas, le second sondage pourrait être orienté vers la reconnaissance de l'horizon à 15 Ω .m identifié au droit du sondage électrique SE5.

□ *En cas de succès sur le premier site (Hypothèse 2), et après alésage pour transformation du sondage en forage d'exploitation :*

Le second sondage de reconnaissance pourrait être tenté à proximité de la seconde zone anormale de la station n°52. Compte tenu de la morphologie de l'anomalie, le sondage pourrait être implanté à une dizaine de mètres au SSW de cette station. En fonction des résultats obtenus, il pourra alors être décidé de réaliser le forage d'exploitation sur ce site ou bien à proximité du sondage de reconnaissance réalisé en 1992 (cf. ci-dessus).

Compte tenu de l'épaisseur potentiellement importante des formations d'altération (si l'on se réfère au forage réalisé en 1992), il serait souhaitable de pouvoir disposer d'un linéaire de sondage plus important que celui initialement prévu (70 m environ pour les sondages implantés sur les anomalies radon et à proximité du piézomètre existant et 45 à 50 m pour la reconnaissance du site du sondage électrique SE5).

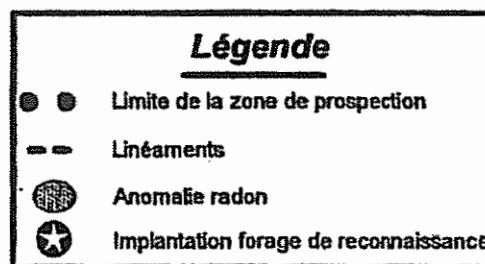
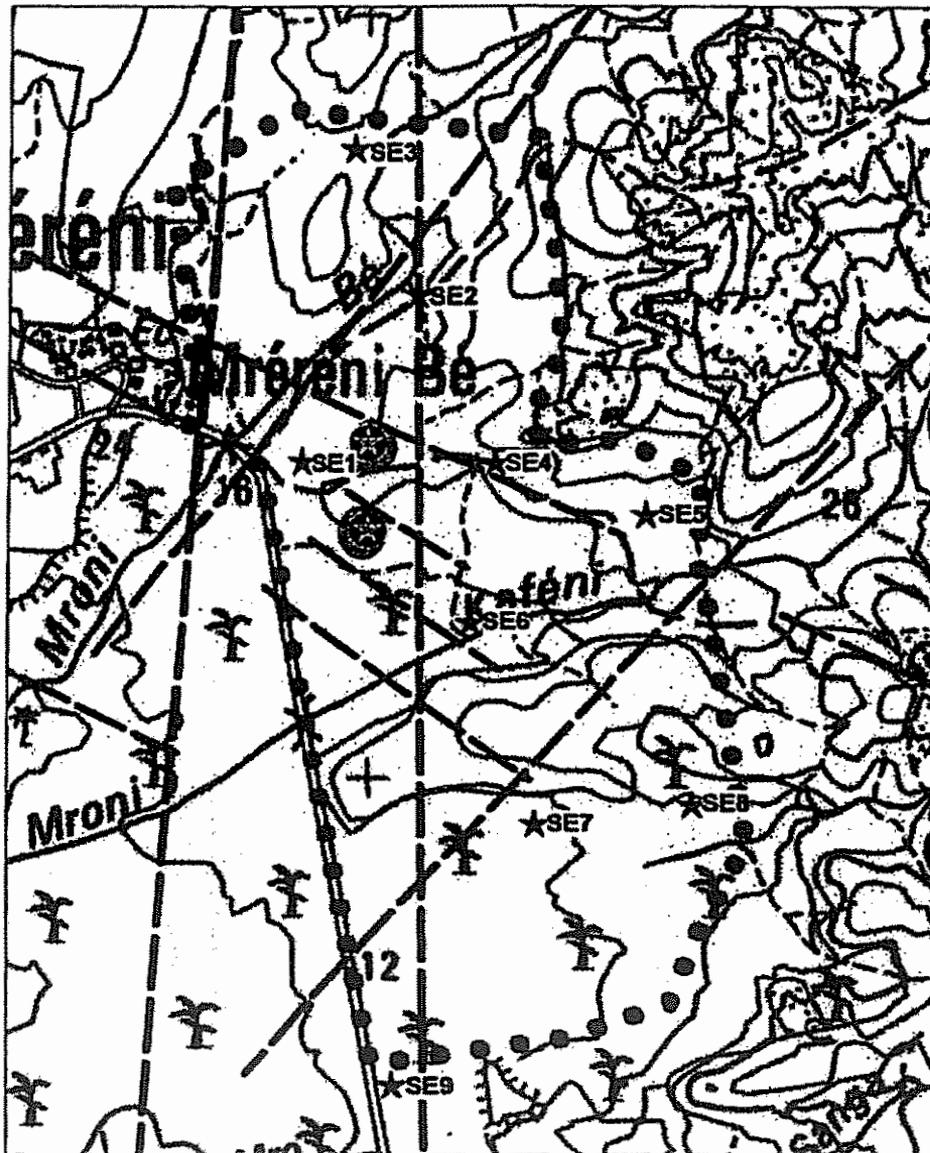
Ceci conduirait à un linéaire prévisionnel de :

- *Hypothèse 1* : reconnaissance 115 à 120 m, exploitation 70 m, alésage 0 ou 45-50 m ;
- *Hypothèse 2* : reconnaissance 140 m, exploitation 70 m, alésage 70 m ;

pour des quantités initialement prévues de :

- reconnaissance 100 m ;
- exploitation 50 m ;
- alésage 25 m.

Il conviendra donc peut être de prévoir une réduction du nombre total d'ouvrages prévu sur ce site.



100 m

Figure 16 : Site de Mréréni. Carte d'implantation des forages de reconnaissance

3.8. SITE DE LONGONI

Le programme prévisionnel des travaux prévoyait la réalisation de deux sondages de reconnaissance d'une profondeur prévisionnelle de 50 m. Il a été prévu d'en transformer un en forage d'exploitation par alésage (sur la base d'une probabilité de succès de 50 %).

Le site de Longoni (vallée de Miangani) se situe entre 500 et 1000 m environ de la limite de la mangrove (figure 17). Il concerne les vallées du Mro oua Mgombani et de l'un de ses affluents rive gauche (au bassin versant très peu développé) à leur débouché dans la plaine alluviale.

a) Observations géologiques de terrain

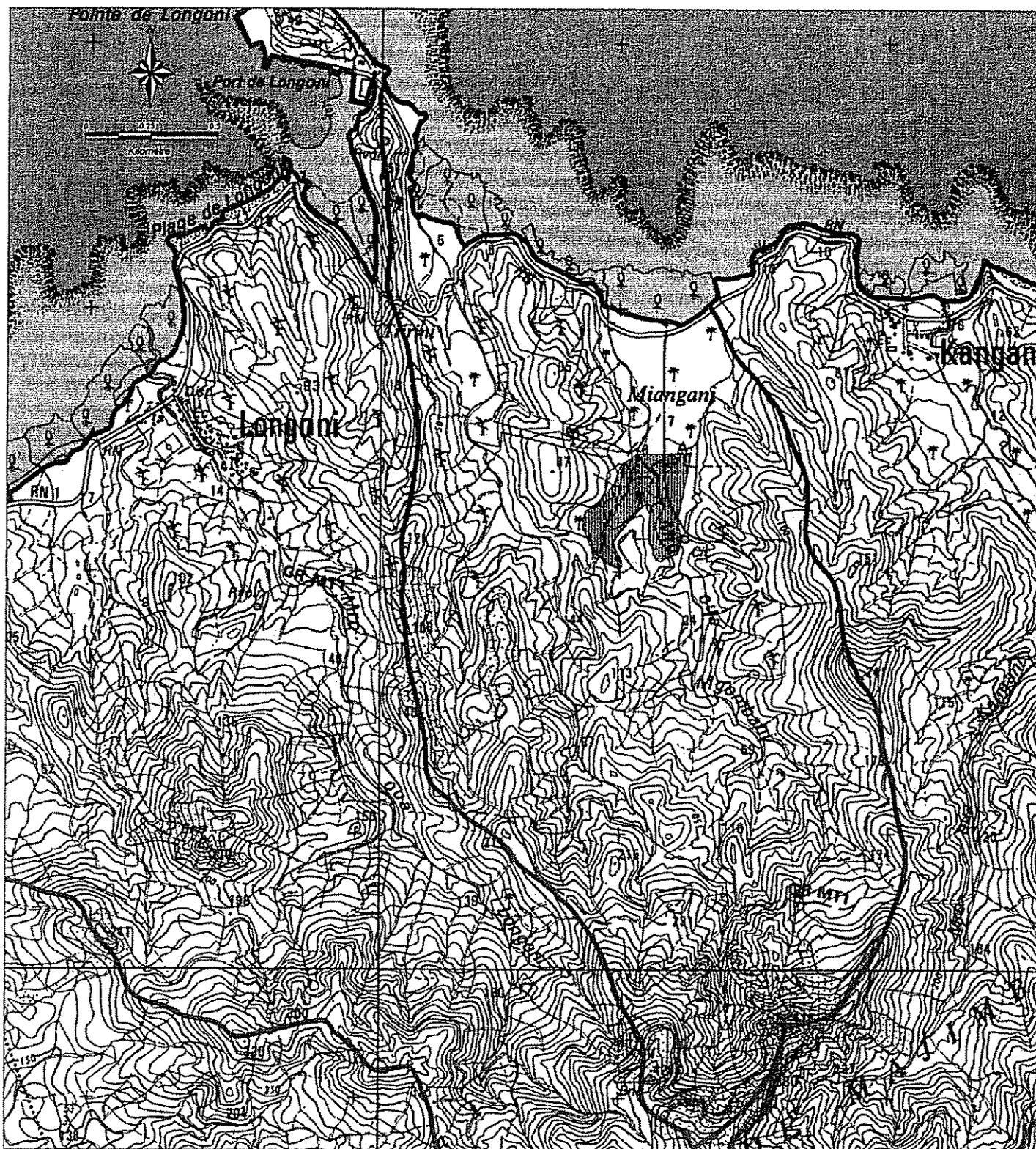
Les reconnaissances géologiques de terrain ont montré que le Mro oua Mgombani coule sur des laves en partie altérées (formation rocheuse montrant une altération en boules et une fissuration relativement développées) à partir de la cote 15 à 17 m NGM environ. Ces formations présentent un pendage apparent d'une dizaine de degrés vers le nord-est.

Elles sont surmontées, à partir de la cote 35 m NGM environ, par un conglomérat à blocs de taille métrique à plurimétrique à matrice d'argile, de galets et graviers peu abondante. Les blocs sont majoritairement composés de phonolite, mais comportent également des éléments bréchiques. Ces formations se sont mises en place au sein d'une structure de type paléovallée dont la rive gauche a été observée vers 65 et 85 m NGM, en bordure du Mro oua Mgombani. Cette paléovallée pourrait présenter une orientation SE-NW.

En aval de la cote 15 m NGM, la rivière est encaissée de plusieurs mètres au sein de limons bruns.

Les deux caps qui encadrent la vallée sont formés d'un empilement de coulées de lave d'épaisseur métrique dont les termes sommitaux sont majoritairement transformés en altérites (altération intercoulees). Une altération dans la masse (faciès gris, d'origine hydrothermale ?) concerne plus particulièrement l'éperon situé à l'Ouest de la vallée. Sur le flanc Ouest du cap Est affleurent, au niveau de la plage, des laves saines qui surmontent un niveau scoriacé d'épaisseur métrique, à blocs centimétriques, peu à pas altéré.

Figure 17 : Le site de Longoni



— Limite de bassin versant



Zone de prospection

∨ Cours d'eau principaux

b) Prospection géo-électrique

La campagne de reconnaissance géophysique (figure A3-6, annexe 3) suggère un schéma géo-électrique similaire dans les deux vallées, qui serait, de haut en bas :

- un terrain de surface sablo-limoneux, plus conducteur (argileux ou humide) dans la vallée Ouest que dans celle du Mro principal ;
- 30 à 40 m de formations plus résistantes (20 à 40 Ω .m) présentant un pendage apparent de l'ordre de 7 à 8 % vers le nord. Cette formation peut être interprétée comme des sédiments fins [BRGM, 2000³]. Elle pourrait aussi être assimilée aux laves observées dans la ravine entre 15 et 35 m NGM, qui présentent un pendage du même ordre de grandeur ;
- des formations dont la résistivité décroît avec la profondeur (9 - 10, puis 4 - 6 Ω .m) et qui pourraient, de ce fait, être altérées et/ou le siège d'une intrusion saline. La morphologie apparente de l'interface entre les horizons à 9 et 4-6 Ω .m, pentée vers le nord, donc vers le littoral, ne milite néanmoins pas en faveur de cette dernière hypothèse. En outre, par analogie avec les formations de résistivité similaire identifiées par géophysique et sondage de reconnaissance de 1992 à Mréréni (cf. § 3.7), il ne peut être exclu que les terrains à 9 - 10 Ω .m présentent des potentialités aquifères. Enfin, il convient aussi de conserver à l'esprit que des phénomènes d'hydrothermalisme ont affecté la Pointe de Longoni.

c) Implantation proposée

Il semble donc raisonnable de reconnaître, au moyen des sondages de reconnaissance, l'horizon à 20 - 40 Ω .m ainsi que son substratum à 9 Ω .m. Il serait alors souhaitable de préciser l'implantation des ouvrages par une campagne de prospection radon à mettre en œuvre dans les environs des sondages électriques SE2, SE3, SE4 et SE5, le site des sondages SE4 et SE5 étant *a priori* le plus favorable, compte tenu de potentialités de recharge de l'aquifère par le Mro oua Mgombani plus importantes que dans la vallée de son affluent. Les failles N110°E indiquées sur la carte géologique pourraient alors constituer des structures favorables. Elles appartiennent à la famille de **linéaments** la plus souvent associée aux anomalies radon et présentent une orientation intéressante vis à vis de la problématique intrusion saline (parallèle au littoral).

³ BRGM (2000).- Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte. Reconnaissance géophysique.- Rapport BRGM/R 40750 – 2000 SGR/MAY 24.

En l'absence d'informations apportées par le radon, **un forage d'une cinquantaine de mètres de profondeur en SE5 permettrait de reconnaître l'horizon à 25 Ω .m, ainsi que son substratum à 9 Ω .m dans la vallée principale.** Le choix du site du second sondage de reconnaissance pourrait être arrêté en fonction de ces premiers résultats :

- dans un secteur (SE4, SE3) où les formations à 20 - 40 Ω .m sont les plus développées, s'il s'avère que ce sont elles qui sont productives ;
- ou dans une zone (SE2) où les formations à 9 - 10 Ω .m sont accessibles, si ce sont elles qui présentent les potentialités les plus intéressantes.

4. Récapitulatif

14 forages de reconnaissance sont à réaliser pour un linéaire total de 840 ml

Il est prévu de réaliser 9 puits (forages d'exploitation) par transformation des sondages en forage d'exploitation, ou par nouvelle foration.

Site	Numéro Forage	Localisation	Profondeur
Kaouéni	1	sur sondage électrique SE3	50 m
	2	sur anomalie radon à proximité de la station n° 25	50 m
Koualé	1	sur anomalie radon aval	70 m
	2	sur anomalie radon amont	70 m
Mtsangamouji	1	sur anomalie radon station n° 53	70 m
	2	sur anomalie radon n° 38	70 m
Béja	1	sur anomalie radon aval	85 m
	2	sur sondage électrique SE7	55 m
Tsararano	1	sur anomalie radon près du Mro oua Dembeni	50 m
	2	Entre les sondages électriques SE5 et SE6	50 m
Mronabéja	1	sur anomalie radon à mi-distance entre les stations 72 et 17	50 m
Mréréni	1	sur anomalie radon n° 61	70 m
Longoni	1	à proximité du sondage électrique SE5	50 m
	2	à proximité du sondage électrique SE2	50 m

Tableau 1 : Profondeurs prévisionnelles des sondages de reconnaissance et localisation proposée (à la lumière des données géologiques, géophysiques et radon).

5. Références bibliographiques

BRGM, (2000) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte. Reconnaissance géophysique. Rapport BRGM n° R 40750 – 2000 SGR/MAY 24.

Daesslé, M., Cruchet M. (1999) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte. Réalisation des travaux de forage. Dossier de Consultation des Entreprises. Note BRGM n° SGR/OI 03-99.

Daesslé, M., Verrez P. (1987) - Mise en valeur du potentiel en eau souterraine dans le Sud de l'île de Mayotte. Reconnaissance géophysique et hydrogéologique. Rapport BRGM n° 87 REU 11.

Mauroux, B. (1992) - Programme des forages de reconnaissance des eaux souterraines à Mayotte. Rapport BRGM n° R35165 – REU 4S 92.

Nougier, J., Cantagrel J.M., Karche J.P. (1986) - The Comores archipelago in the western Indian Ocean: volcanology, geochronology and geodynamic setting.- *Journal of African Earth Sciences*, vol. 5-2, pp. 135-145.

Salesse, E., Mauroux B., Weber O. (1991) - Alimentation en eau potable de Mamoudzou. Réalisation des forages F1 (1230-7X-0013) et F2 (1230-7X-0014) - Z.I. de Kaweni. Rapport BRGM n° 91 REU 14.

Stieltjes, L., Cantagrel J.M., Nougier J., Vatin-Perignon N., Watelet P. (1988) - Carte géologique de Mayotte (Archipel des Comores). Echelle : 1/50 000, Collectivité Territoriale de Mayotte. BRGM, Orléans.

Annexe 1

Programme de prospection d'eau souterraine à Mayotte - Synthèse bibliographique

Programme de prospection d'eau souterraine à Mayotte - Synthèse bibliographique

P. LACHASSAGNE DR/LGH - 08/99

1. Objectifs

Dans le cadre du projet de prospection et de reconnaissance par forage de la ressource en eau souterraine de Mayotte, une recherche bibliographique a été mise en œuvre.

L'objectif de ce travail est de recueillir des informations destinées à compléter les documents d'ores et déjà disponibles au BRGM Océan Indien (rapports de travaux antérieurs, carte géologique) et à intégrer l'expérience que pourraient avoir acquis d'autres auteurs.

Les principaux thèmes explorés sont les suivants :

- géologie de Mayotte et des Comores,
- hydrogéologie de Mayotte, des Comores ainsi que d'autres îles volcaniques à formations géologiques similaires.

2. Méthodologie mise en œuvre - Documents recueillis

Les informations bibliographiques ont été recherchées principalement par interrogation de la base de données GéoRef, sur la période d'édition 1975 - actuel (Mme ROGUE, Bibliothèque du BRGM, Orléans). Cette base de données contient essentiellement des publications scientifiques (articles de revues, congrès, etc.). Des rapports scientifiques ou d'ingénierie y figurent également (US Geological Survey pour l'essentiel), il est cependant quasiment impossible de se les procurer. Il s'agit en outre souvent de rapports d'études et non de documents de synthèse.

La recherche bibliographique sur les thèmes « géologie », « Comoro » et « comoro islands » a permis d'identifier 46 références parmi lesquelles 6, jugées intéressantes ou non déjà accessibles, ont été commandées et analysées.

La recherche sur les thèmes « hydrogéologie » et « Mayotte » a permis d'identifier 2 références. La recherche a donc été étendue aux autres îles de l'Océan Indien et du Pacifique. Aucune référence n'a été trouvée qui concerne les îles d'Anjouan, de Mohéli ou de la Grande Comore. Les informations recueillies (353 références) concernent pour l'essentiel la Polynésie et plus particulièrement Hawaï. L'analyse de celles-ci (titre, résumé) a permis de sélectionner et de commander une dizaine de références accessibles.

3. Synthèse bibliographique

3.1. GEOLOGIE DE MAYOTTE ET DES COMORES

Les références recueillies sont dans leur majorité antérieures à l'édition de la carte géologique [Stieltjes, 1988b; Stieltjes et al., 1988a]. Elles ont donc dû, pour la plupart, avoir été analysées par les auteurs de celle-ci.

Des informations complémentaires ont néanmoins été recueillies.

L'article rapportant les résultats des travaux de géophysique de type AMT mis en œuvre en 1984 dans le cadre d'une mission CORDET a été recueilli [Ballestracci et al., 1985]. Les informations qu'il contient pourront être valorisées dans le cadre de la campagne géophysique prévue dans les semaines à venir.

Nougier et al. [Nougier et al., 1979] considèrent que la structure de Mayotte est caractérisée par un bouclier primitif basaltique sur lequel se sont édifiés, dans le Nord, des massifs différenciés alcalins le long d'un rift Hawaïen et, dans le Sud, des alignements phonolitiques convergeants, le long de grands accidents (linéaments du Choungui et du Bénara), vers le centre géométrique supposé du bouclier. Ils situent celui-ci en mer, à l'Ouest immédiat de l'île, à 10 km environ du littoral, à la latitude de Tsingoni.

Ces auteurs considèrent que les alignements phonolitiques du Bénara et du Choungui reposent sur une semelle téphritique en lambeaux très altérés, traversée par les extrusions phonolitiques. Les téphrites apparaissent comme les témoins de paléovallées dégagées par inversion de relief.

Ils indiquent également les orientations de fractures identifiées par photo-interprétation.

Montagionni et al. [Montagionni and Nougier, 1981] reprennent l'idée de l'existence, dans la partie nord de Mayotte, d'un rift de type hawaïen, d'orientation grossièrement Ouest-Nord-Ouest - Sud-Sud-Est.

Nougier et al. [Nougier et al., 1986] apportent de nouvelles données géochronologiques sur Mayotte. Ils ne tranchent pas entre deux interprétations structurales majeures : un vaste volcan bouclier dont le centre, maintenant effondré, se situe à l'ouest de l'île, ou une possible chaîne de plus petits volcans coalescents.

Ils considèrent que Mayotte est le résultat d'une évolution volcanologique en 4 phases principales :

- 1) un bouclier primitif, dont les coulées de base subaériennes sont datées aux environs de 8 Ma. L'âge du volcanisme initial (basanites et basaltes à néphéline, augite, olivine) est estimé entre 10 et 15 Ma. Les dernières éruptions de cette phase consistent en coulées plus différenciées (néphélinites) mises en place au sein de paléovallées (3,25 Ma),
- 2) depuis cette époque, des laves différenciées se sont mises en place. Ce sont essentiellement des dômes et écoulements phonolitiques dans le centre et le sud de l'île, entre 3,3 et 2,5 Ma, avec une dernière récurrence vers 1,5 Ma,
- 3) le volcanisme basaltique et basanitique du nord-ouest est daté aux alentours de 2 Ma. Il est relié à une zone de rift distensive de direction N175 (la seule de l'île),
- 4) une phase trachytique et basaltique très récente avec des structures de type maar bien préservées. Mayotte a été affectée depuis 1 Ma (?) par une subsidence de l'ordre de 70 m qui explique la présence du récif frangeant.

Ces travaux permettent aux auteurs de contester l'hypothèse de l'existence d'un point chaud au-dessus duquel aurait défilé la plaque somalienne et qui expliquerait un volcanisme de plus en plus récent, de l'est vers l'ouest des Comores. Ils considèrent plutôt que le volcanisme est lié à l'existence d'anciennes fractures lithosphériques, périodiquement réactivées au tertiaire.

Ben Youssouf [Ben Youssouf, 1992] propose, sur la base d'arguments géomorphologiques et des éléments géologiques disponibles, la chronologie suivante :

Il scinde en trois parties la phase volcanique la plus ancienne :

- 1) Le Choungui I, empilement de grandes coulées basaltiques réduit par l'érosion, est considéré comme constitué de lambeaux de planèzes aux versants ravinés, planèzes plus ou moins déformées par la tectonique. Ces laves auraient été soumises à une érosion intense dès la plus ancienne phase de repos connue par l'activité volcanique. Les basaltes du Choungui II reposent en effet sur d'épaisses altérites argileuses ou sur des formations de versant remaniant ces altérites. L'auteur attribue à un changement climatique daté autour de 3,5 Ma (passage de conditions biostatiques sous climat équatorial à un climat tropical à deux saisons du type actuel, plus agressif) le passage de conditions d'altération à une érosion prédominante,
- 2) Mises en place dans des paléovallées développées aux dépens des formations du Choungui I (altérites), les laves du Choungui II présentent actuellement une morphologie en inversion de relief (mesas aux versants empâtés de colluvions),
- 3) Les laves récentes montrent une grande variété d'édifices volcaniques élémentaires dont la morphologie est à relier à leur structure. Selon l'auteur, il n'existe qu'un seul cylindre de protrusion, le Mont Choungui. La majorité des phonolites sont des dômes endogènes en forme de coupole, plus rarement des dômes coulées (débit magmatique plus fort ou lave plus fluide). Quelques dômes exogènes se signalent par leur forme en cloche (Ochoungui, Mont Combani). L'auteur rattache en outre à des cirques d'érosion les dépressions circulaires qui entament les laves anciennes (hors cônes de scories ou maars).

Du point de vue structural, l'auteur suggère que le fait que les épanchements de la phase Choungui II se soient limités au Sud de l'île est à rapprocher de l'existence, dans ce secteur, d'un compartiment préalablement affaissé du « socle ».

L'accident responsable aurait rejoué, lors d'une deuxième phase de déformation, sous forme d'un décrochement dextre qui, au Nord de la dépression de Dombéni, aurait déplacé vers l'est la grande coulée d'Ironi Bé. Cette seconde phase serait également responsable de l'effondrement de la partie occidentale de l'édifice primitif et aurait aussi affecté le nord de la Grande Terre.

La troisième phase se serait traduite par des déplacements de grande ampleur, à la fois verticaux et horizontaux, entraînant la surrection du Nord-Ouest au-delà d'un accident à caractère de décrochement qui le sépare du centre.

Nous allons tenter de nous procurer un exemplaire de cette thèse qui renferme peut-être des informations géologiques et structurales valorisables à l'échelle des sites de prospection hydrogéologique.

3.2. HYDROGEOLOGIE

Synthèse :

La plupart des travaux reportés concernent des contextes plus proches de celui de la Réunion (volcans boucliers récents avec forte perméabilité des laves) que de celui de Mayotte. Parmi les îles volcaniques de type basaltique, les plus récentes présentent en effet de bien meilleures potentialités hydrogéologiques que celles qui ont été longuement affectées par l'altération [Peterson, 1992].

Ces dernières, plus ingrates sur le plan de la ressource en eau souterraine, n'ont semble-t-il fait l'objet que de peu de travaux de prospection hydrogéologique, d'où le caractère limité des résultats de cette première recherche bibliographique.

Des îles « anciennes » telles que Rodrigues ou certains atolls du pacifique, qui présentent encore un cœur volcanique émergé, montrent des similarités avec Mayotte. Le recensement d'éventuels travaux hydrogéologiques d'importance les concernant (littérature grise) mériterait donc d'être poussé plus avant.

3.2.1. Mayotte

Stieltjes [Stieltjes, 1988a] propose une synthèse hydrogéologique de Mayotte. Celle-ci étant antérieure aux travaux de reconnaissance hydrogéologique menés au sein des formations volcaniques [Mauroux, 1992], elle repose essentiellement sur l'analyse des données de la campagne géophysique préalable [Daesslé and Verrez, 1987] et son interprétation à la lumière du modèle hydrogéologique disponible, à l'époque, pour l'île de la Réunion.

Eberschweiler [Eberschweiler, 1986] propose un bilan hydrologique. Il évalue ainsi à 11% (200 mm) la part moyenne annuelle de l'infiltration et à 33% (600 mm) celle du ruissellement. Il propose également une étude géochimique, limitée cependant, en l'absence de forages au sein des formations volcaniques, aux sources et aux nappes alluviales exploitées par des puits traditionnels. Les résultats de celle-ci pourraient néanmoins servir de référentiel pour l'interprétation des données qui pourraient être recueillies sur les forages déjà réalisés ou à venir.

3.2.2. Rodrigues

La comparaison de Rodrigues avec Mayotte est intéressante dans la mesure où ces deux îles semblent avoir eu une évolution volcanologique proche (volcanisme ancien, altération importante).

Une campagne de 8 forages (profondeur comprise entre 25 et 50 m, foration 9'', équipement 8'') réalisés en 1994 [Simonot, 1995] présente des résultats contrastés (Tableau ci-dessous), déterminés à partir de pompages d'essai air-lift de 4 heures avec observation de la remontée sur une demi-heure.

Nombre de forages	T ($10^{-4} \cdot m^2/s$)	débits (m ³ /h)
2	5 - 15	4 et 20
3	0,5 - 1,5	2 - 5
3	sec - 0,23 - 0,35	0 - 1

Selon l'auteur, ces résultats sont comparables à ceux qui avaient été obtenus lors d'une campagne de forages antérieure (1978) précédée de géophysique (il n'est pas indiqué si celle de 1994 a fait l'objet d'investigations préliminaires).

Les venues d'eau principales proviennent généralement de basaltes gris noirs fissurés et sont situées le plus souvent entre 20 et 30 m de profondeur. L'auteur remarque cependant que ce ne sont pas les niveaux en apparence les plus fissurés (il n'indique cependant pas les critères utilisés pour l'appréciation de la fissuration : observations sur affleurements, avancement du forage ?) qui sont les plus productifs.

Les coupes de forage montrent également l'existence de basaltes très altérés interstratifiés aux formations plus saines. L'auteur suggère que la présence de ces niveaux peut localement limiter ou interdire la recharge des aquifères sous-jacents, mais aussi permettre l'existence d'aquifères « perchés ». Il explique ainsi des résultats positifs obtenus en altitude et la présence d'émergences interprétées comme des sources de débordement.

3.2.3. Maurice

Maurice semble présenter des caractéristiques plus proches de celles de la Réunion que de Mayotte. Le débit moyen des forages exploités est en effet de l'ordre de plus de 100 m³/h [Jawaheer and Proag, 1988].

L'évolution volcanologique de l'île montre [Jawaheer and Proag, 1988] :

- une première phase avec des basaltes à olivine interstratifiés de fines couches de tufs consolidés et d'agglomérats et recoupés de dykes qui construisent un volcan bouclier sous-marin, puis aérien (1 - 5 Ma),
- une phase intermédiaire avec des laves basaltiques, souvent altérées (3,5 - 1,5 Ma), mises en place après érosion et effondrement en caldeira du premier édifice,
- les laves de la dernière phase (0,7 - 0,2 Ma), moins altérées.

Jawaheer et Proag [Jawaheer and Proag, 1988] proposent une synthèse hydrogéologique de Maurice. Ils considèrent que :

- les laves de la première phase constituent le substratum imperméable des aquifères de Maurice,
- les roches émises au cours de la deuxième phase, bien que souvent vésiculées, présentent une faible perméabilité en raison de leur altération. Elles sont localement perméables lorsque les basaltes doléritiques sont sains. L'eau circule alors dans les fissures de la lave et entre les différentes coulées,
- les laves de la dernière phase sont généralement encore plus perméables en raison de leur encore moindre altération. Elles sont même à l'origine de pertes locales des cours d'eau.

Ils relient également l'altération, donc la perméabilité des formations, à des facteurs climatiques (altitude, exposition aux vents dominants) et hydrogéologiques (fort gradient hydraulique permettant l'évacuation des fines).

3.2.4. Océan Pacifique

Tabasaki et Mink [Tabasaki and Mink, 1983] montrent que les zones de rift des volcans boucliers hawaïens, caractérisées par la présence de nombreux dykes, présentent des niveaux piézométriques très élevés, jusqu'à plusieurs centaines de mètres au-dessus du niveau de la mer ; les dykes jouant un rôle de barrages souterrains. Du fait de leur résistance relative, ces secteurs fortement injectés se situent en outre souvent en altitude, dans des zones les plus arrosées des îles.

Ces formations sont exploitées au moyen de forages inclinés ou de tunnels recoupant les dykes. Dans certains cas, des puits sont forés dans les compartiments délimités par les dykes.

Ce type de structure a été reconnu par géophysique électrique [Shettigar, 1984] qui confirme en partie un fort compartimentage par des structures de type dyke (niveau piézométrique passant de plus de 100 m à moins de 10 m d'altitude sur quelques centaines de mètres de distance). Cet article ne fournit cependant qu'une valeur de résistivité qui puisse être utilisée à Mayotte à titre de comparaison (300 ohm.m : zone fortement résistive).

Jackson et Lénat [Jackson and Lenat, 1989] interprètent le même type de phénomènes (niveaux piézométriques en altitude) sur les volcans actifs du Kilauea et de la Fournaise à partir de sondages électriques et d'un forage. Les différences de résistivité observées au niveau de la zone saturée 10 ohm.m au Kilauea et 200 ohm.m à la Fournaise sont reliées à la position du système géothermal, plus profond au Kilauea et qui mobiliserait de ce fait des eaux marines.

Ce modèle est mis en défaut à Tahiti [Guillen, 1984]. Les sources de débordement observées dans les hauts de l'île sont associées à des aquifères perchés sur des interlits imperméables au sein desquels les dykes ne joueraient pas un rôle significatif. Des zones non saturées sont observées sous ces nappes perchées. Ce même type de modèle conceptuel est proposé à la Réunion [Stieltjes et al., 1988b].

Ceci est lié au fait que, contrairement à ce qui est observé à Ohahu où les dykes ont une orientation générale perpendiculaire aux cours d'eau, dans ce secteur de Tahiti, les dykes sont parallèles à la direction de drainage. Plus près du rivage, les laves, plus altérées, confinent des aquifères de type captif à forte productivité (10 l/s/cm de rabattement).

Note : en tout état de cause, ce type de configuration (dykes) semble surtout intéressant dans les îles de type « Réunion » où le facteur limitant l'exploitation des eaux souterraines est la trop bonne perméabilité du milieu et où il faut rechercher des contextes qui permettent de retenir les eaux souterraines au sein de l'aquifère.

Enfin, un article [Anonyme, 1984] signale des taux de succès significatifs pour des campagnes de forages réalisés aux Samoa Occidentales. Il ne présente cependant aucune information technique (lithologie, débit des ouvrages, etc.).

A l'opposé, un auteur [Johanet, 1983] ayant travaillé sur la ressource en eau des formations sableuses associées à la barrière récifale de Bora Bora indique que les campagnes de forage menées sur la partie volcanique de l'île se sont avérées peu productives. Il ne mentionne cependant pas les critères qui ont présidé à l'implantation de ces ouvrages ni leurs caractéristiques (profondeur en particulier).

Bien que plus arrosée (de 4000 à 9000 mm/an), l'île de Pohnpei, 340 km², située à l'Ouest de la Micronésie, semble présenter des caractéristiques proches de celle de Mayotte [Peterson, 1992] : laves anciennes (8 Ma), couverture d'altérites, subsidence, etc.. Les ressources en eau souterraine, modestes (5 à 25 m³/h) par rapport à celles d'Hawaii, sont exploitées au sein des laves supérieures peu altérées et de la zone altérée qui les surmonte.

Pouchan et al. [Pouchan et al., 1988] rapportent que sur un bassin versant de l'île haute de Moorea, des apports de la nappe au cours d'eau sont notés dans la partie haute du bassin versant (en amont de la cote + 50 m), tandis que c'est l'inverse qui se produit dans sa partie basse (en dessous de 20 m). Ils suggèrent ainsi la contribution d'aquifères perchés, par l'intermédiaire d'émergences « discrètes ».

4. Références

Anonyme (1984).- Western Samoa. Scientific research and technology development activities in the field of water resources development and assessment, in C.S.C. workshop on water resources of small islands, June 27-July 9, 1984.-vol. 154, Commonwealth Science Council Technical Publication, pp. 229-233, Suva, Fiji.

Ballestracci, R., Nougier J., Benderitter Y. (1985).- Intermediate tectonic pattern and hydrodynamic process deduced from audiomagnetotelluric investigations on the volcanic island of Mayotte (Comores Archipelago).- Tectonophysics, vol. 11545-60.

Ben Youssouf, A.A. (1992).- L'évolution géomorphologique des édifices volcaniques de Mayotte (Archipel des Comores, Océan Indien), in Rythmes morphogéniques en domaine volcanique. Exemples du Massif Central français et de quelques régions volcaniques de comparaison, edited by T.J.-C. Lageat Yannick, pp. 181-190, CERAMAC (Clermont-Ferrand), Colloque AGF, Clermont Ferrand.

Daessle, M., Verrez P. (1987).- Mise en valeur du potentiel en eau souterraine dans le Sud de l'île de Mayotte. Reconnaissance géophysique et hydrogéologique.- Rapport BRGM n° 87 REU 11.

Eberschweiler, C. (1986).- Etude hydrologique, hydrochimique et géochimique isotopique d'une île volcanique sous climat tropical humide : Mayotte.- Ph-D thesis, Laboratoire de Géochimie Isotopique, Paris XI, Orsay.

Guillen, J.A. (1984).- Hydrogeological facts about dike aquifers and underground water circulation in Tahiti, in C.S.C. workshop on water resources of small islands, June 27-July 9, 1984.-vol. 154, Commonwealth Science Council Technical Publication, pp. 455-472, Suva, Fiji.

Jackson, D.B., Lenat J.F. (1989).- High-level water tables on hawaiian type volcanoes and intermediate depth geoelectric structures, Kilauea Volcano, Hawaii and Piton de la Fournaise Volcano, Isle de la Réunion.- Bulletin - New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, vol. 142.

Jawaheer, K., Proag V. (1988).- Groundwater aquifers of Mauritius.- Hydrogéologie, vol. 2, pp. 125-134.

Johanet, P. (1983).- De l'eau douce à Bora-Bora.- L'Eau, l'Industrie, les Nuisances, vol. 78124-127.

Mauroux, B. (1992).- Programme des forages de reconnaissance des eaux souterraines à Mayotte.- Rapport BRGM n° R35165 REU 4S 92.

Montagioni, L., Nougier J. (1981).- Les enclaves de roches détritiques dans les volcans d'Anjouan (archipel des Comores). Origine et interprétation dans le cadre de l'évolution du canal de Mozambique.- Bull. Soc. géol. France, vol. XXIII,6, pp. 595-601.

Nougier, J., Cantagrel J.M., Karche J.P. (1986).- The Comores archipelago in the western Indian Ocean: volcanology, geochronology and geodynamic setting.- Jnal of African Earth Sciences, vol. 5,2, pp. 135-145.

Nougier, J., Vatin-Perignon N., Cantagrel J.M., Cheminée J.L. (1979).- Volcanisme et structure de l'île Mayotte (archipel des Comores).- C.R. Ac. Sc., vol. 288,D, pp. 211-214.

Peterson, F.L. (1992).- Hydrogeology of volcanic oceanic islands, in 29th International Geological Congress (I.G.C.)-vol. 4, Selected papers on Environmental Hydrogeology, edited by Sakura-Yasuo, pp. 163-171, Verlag Heinz Heise, Hanover, RFA, Kyoto, Japan.

Pouchan, P., Faissolle F., Pelissier-Hermitte G. (1988).- Aspects de l'hydrogéologie en Polynésie française.- Hydrogéologie, vol. ,2, pp. 169-182.

Shettigar, K.V. (1984).- Electrical resistivity investigation on the Schofield high level water body, Oahu, Hawaii, in Geosciences in the development of natural resources.-vol. 12, edited by R.A. Binns, pp. 479-481, Geological Society of Australia, Sydney, Sydney, N.S.W., Australia.

Simonot, M. (1995).- Projet TCP/MAR/4451. Evaluation et mise en valeur des ressources en eau de l'île de Rodrigues. Consultation d'hydrogéologie. Rapport de la mission effectuée du 17 février au 9 mars 1995.- Rapport Marc Simonot. Consultant Hydrogéologue n°

Späth, A., Le Roex A.P., Duncan R.A. (1996).- The geochemistry of lavas from the Comores archipelago, Western Indian Ocean: petrogenesis and mantle source region characteristics.- Journal of Petrology, vol. 37,4, pp. 961-991.

Stieltjes, L. (1988a).- Hydrogéologie de l'île volcanique océanique de Mayotte (archipel des Comores, océan Indien occidental).- Hydrogéologie, vol. ,2, pp. 135-151.

Stieltjes, L. (1988b).- Mayotte, volcan bouclier du plancher de l'Océan Indien occidental.- Géologie de la France, vol. à compléter.

Stieltjes, L., Cantagrel J.M., Nougier J., Vatin-Perignon N., Watelet P. (1988a).- Carte géologique de la France. Mayotte (Archipel des Comores). Echelle : 1/50 000, Collectivité Territoriale de Mayotte. BRGM, Orléans.

Stieltjes, L., Gourgand B., Steenhoudt M. (1988b).- Modes de circulation et de gisement de l'eau souterraine dans un volcan bouclier basaltique. Exemple de l'île de la Réunion, milieu océanique tropical.- Hydrogéologie, vol. ,2, pp. 83-94.

Tabasaki, K.J., Mink J.F. (1983).- Volcano feeder dikes impound large reservoirs of ground water in the Hawaiian islands, in International conference on groundwater and man.-vol. 3, Groudwater and development, pp. 309-318, Australian Water Resources Council, Canberra, ACT, Australia, Sydney.

Annexe 2

Prospection émanométrique : principes, mise en œuvre et méthode d'interprétation

Résultats de la campagne de prospection radon

Prospection émanométrique : principes, mise en œuvre et méthode d'interprétation

D'après P. LACHASSAGNE
(Rapport BRGM R 38284 DR/HYT 95)

1. Intégration de la méthode de prospection par émanométrie dans le déroulement d'une campagne de recherche d'eau souterraine

La mise en œuvre d'une campagne émanométrique constitue l'un des maillons d'une opération de recherche d'eau souterraine en milieu fracturé.

La méthodologie classiquement retenue pour la mise en évidence des ressources en eau souterraine en milieu fracturé consiste dans un premier temps à identifier les roches potentiellement aquifères qui, fissurées, peuvent jouer un rôle transmissif et/ou capacitif, à l'opposé des formations peu perméables ou imperméables. Il s'agira ensuite, dans un second temps, de caractériser et de localiser précisément, au sein de ces roches aquifères, les secteurs fracturés qui, du fait de leurs propriétés transmissives, constitueront des cibles privilégiées pour l'implantation de forages productifs. Les investigations sont en règle générale menées chronologiquement à des échelles de taille croissante, du général vers le détail.

La structure géologique du secteur étudié est donc analysée tout d'abord à partir des informations déduites des cartes géologiques disponibles, des données de sondages ou d'études déjà réalisées dans le secteur, à partir de l'examen des photographies aériennes de l'I.G.N., puis au moyen de levés de terrain. La connaissance de la structure géologique peut être complétée dans la troisième dimension par une campagne de prospection géophysique (sondages électriques, sismique réflexion, etc.). Des informations d'ordre hydrogéologique (localisation et caractérisation des sources et points d'eau) sont recueillies conjointement sur le terrain. Elles fournissent des indications sur la nature des circulations d'eau souterraine et le cas échéant sur la qualité de l'eau.

L'identification, la caractérisation et la localisation des secteurs fracturés sont menées en plusieurs étapes et à différentes échelles :

- à l'échelle de l'ensemble du secteur étudié, l'analyse des photographies aériennes de l'I.G.N. (à des échelles classiquement comprises entre le 1/50.000 et le 1/20.000), ou l'étude d'images satellite permettent d'identifier et de localiser les linéaments (alignements susceptibles de refléter l'existence de discontinuités d'origine structurale),
- à l'échelle de l'affleurement, des mesures de direction et pendage des indicateurs de fracturation (plans de faille, de diaclases, etc.) permettent de valider et compléter les données de direction et pendage des linéaments mis en évidence sur photographies aériennes,
- les orientations des fractures supposées ainsi mises en évidence, sont comparées au champ de contraintes caractérisant la région étudiée afin de déterminer si elles présentent une géométrie propre à l'ouverture et sont susceptibles d'être réactivées régulièrement, ce qui limite les risques de colmatage.

La synthèse des investigations d'ordre géologique, hydrogéologique, géophysique et d'analyse de la fracturation permet de sélectionner des secteurs favorables conjuguant la présence de roches potentiellement aquifères et d'indices d'existence d'une fracturation dont l'orientation est favorable à la circulation des eaux souterraines.

La prospection émanométrique permet, à ce stade d'avancement des études, de sélectionner et de localiser précisément, au sein de ces secteurs jugés favorables, les fractures ou secteurs de fractures hydrauliquement actifs au sein desquels pourront être implantés des sondages de reconnaissance.

En milieu de socle (granites, roches métamorphiques), cette méthode s'intègre, comme c'est souvent le cas en hydrogéologie, dans une démarche cohérente de changement d'échelle (downscaling). Cette démarche permet de sélectionner, au moyen de méthodes de plus en plus précises, mais aussi de plus en plus coûteuses (en terme de coût rapporté à la superficie traitée), des sites de prospection de superficie décroissante au fur et à mesure de l'avancement des travaux. La démarche intégrant la prospection radon comprend ainsi les étapes successives suivantes :

- (i) sélection de site(s) de prospection, d'une superficie de un à quelques kilomètres carrés, sur la base d'une analyse multicritères, réalisée au moyen d'un Système d'Information Géographique. Cette analyse permet de combiner les informations suivantes : lithologie et propriétés hydrogéologiques du substratum, nature et épaisseur des altérites, pentes, réseaux de fractures et contraintes tectoniques actuelles, paramètres socio-économiques, etc.;
- (ii) mise en œuvre de la prospection radon, à l'échelle de chaque site, afin de localiser les anomalies radon, de manière exhaustive, et de caractériser leur morphologie. Elles présentent souvent une forme allongée : 200 à 300 m de long pour 50 à 100 m de large;
- (iii) prospection géophysique (sondages puis traînés ou panneaux électriques en général) focalisée sur les anomalies radon afin d'implanter le forage avec une précision de l'ordre de quelques mètres.

2. Le radon au sein des sols

Toutes les roches qui composent le sous-sol de notre planète renferment, en proportions variables selon leur composition minéralogique, des quantités plus ou moins fortes d'uranium et de thorium.

Le groupe du radon (^{86}Rn) est constitué de trois isotopes : le radon (sensu-stricto) ^{222}Rn , le thoron ^{220}Rn et l'actinon ^{219}Rn . Ces trois isotopes appartiennent respectivement aux familles radioactives naturelles de l'uranium 238, du thorium 232 et de l'uranium 235. Ils sont produits par désintégration Alpha du radium (Ra) et sont eux-mêmes émetteurs de particules Alpha lors de leur désintégration en polonium (Po).

Une de leur caractéristiques essentielles est d'être pratiquement les seuls gaz radioactifs naturels. L'utilisation du radon-222 en tant que traceur des structures géologiques est liée à ses propriétés physico-chimiques et à une période de demi-vie de courte durée ($T_{1/2} = 3,825$ jours) mais suffisamment longue pour être exploitable. Compte tenu de leur très courte période de demi-vie d'une part (respectivement de 54,2 et 3,92 s pour le thoron et l'actinon) et de la faible abondance de l'uranium 235 d'autre part, l'influence de l'actinon et du thoron sont en général négligeables.

Le radon est donc un émetteur très énergétique de rayonnement Alpha. Ces propriétés de radioactivité conduisent à des méthodes d'analyse très sensibles qui permettent de l'identifier même si les éléments qui lui donnent naissance ne sont présents qu'à de très faibles teneurs (quelques parties pour million) au sein de la roche. Gaz rare, mais de période de vie relativement courte, il ne doit sa grande mobilité, dans la nature, qu'à celle des fluides qui le transportent. La présence de fractures hydrauliquement actives facilite donc sa migration vers la surface où il pourra être détecté. Il s'agit donc d'un indicateur efficace de l'émergence des fractures perméables sous les terrains de couverture, fractures au sein desquelles a cheminé le radon collecté par l'eau au sein de la masse rocheuse. Sa brève durée de vie est suffisamment longue pour lui permettre d'atteindre la surface, mais assez courte pour qu'il ne puisse pas s'accumuler, ce qui permet de ne le détecter qu'à proximité de l'émergence de fractures conductrices.

La prospection radon peut-être complétée par le dosage d'autres émanations :

- gaz carbonique (CO_2). Les sources potentielles d'anomalies en CO_2 dans les gaz du sol peuvent être d'origine superficielle ou profonde : activité biogénique bactérienne (combustion biologique et chimique de la matière organique dans les premiers décimètres du sol ; la présence de bactéries sulphato-réductrices peut également donner lieu à des anomalies ponctuelles), oxydation du monoxyde de carbone et du méthane, particulièrement dans les environnements où l'altération météorique est importante, l'oxydation de produits sulfurés et l'attaque acide des carbonates mais également le gaz carbonique d'origine magmatique,
- hélium (He). Il est fréquemment associé à une double origine, crustale et radiogénique.

3. Méthodologie de la prospection

3.1. TECHNIQUE DE PRELEVEMENT ET DE DOSAGE DES GAZ

Les gaz des sols sont prélevés au moyen de cannes de prélèvement qui sont constituées d'un tube de 0,65 m de long et de 1,5 cm de diamètre au sein duquel est glissé une tige pleine de 0,8 m de long. Le principe de la méthode de prélèvement est le suivant :

- mise en place de la canne de prélèvement, enfoncée au moyen d'une masse jusqu'à 0,75 m de profondeur,
- extraction de la tige pleine centrale qui, retirée, laisse un trou de 0,75 m de profondeur, tubé sur 0,60 m et en découvert sur les 15 derniers centimètres,
- raccordement à la canne d'un flacon de prélèvement spécialement conçu pour le dosage du radon et d'une pompe à vide manuelle qui, actionnée, aspire plusieurs fois le volume de la fiole et des tuyaux, piège les gaz du sol au sein du récipient et assure la purge des gaz qui y étaient contenus antérieurement,
- par le biais d'une "vanne 3 voies" raccordée aux tuyauteries de prélèvement, dosage in situ du pourcentage de CO₂ au moyen d'un tube réactif de marque Draeger relié à une pompe volumétrique (pompe "Accuro" de marque Draeger).

Le prélèvement effectué, la localisation ainsi que l'heure précise de l'opération de prélèvement sont consignés.

3.2. SCHEMA D'ECHANTILLONNAGE

Le radon mesuré dans les gaz du sol présente une très forte variabilité spatiale. Les études géostatistiques effectués sur des sites pilotes montrent que d'une manière générale, les plans d'échantillonnage totalement aléatoires, influencés par les facilités d'accès ou fortement orientés suivant une direction préférentielle, sont à éviter.

Les points de prélèvement doivent donc être implantés, dans la mesure du possible compte tenu des conditions d'accès, selon un maillage le plus régulier possible n'introduisant pas d'anisotropie (maillage régulier carré ou maillage stratifié aléatoire par exemple). Ce premier ensemble de sites de prélèvement constitue les "mesures de base" de la campagne de prospection. Les prélèvements sont en général densifiés, dans un second temps, dans les secteurs anomaux, afin de préciser l'intensité et la géométrie des anomalies mises en évidence pour in fine implanter au mieux les forages de reconnaissance puis d'exploitation.

Certains paramètres atmosphériques, pression, pluie, humidité du sol... peuvent modifier les teneurs en gaz des sols. Pour faire abstraction de ces variations éventuelles au cours d'une campagne de mesure, certains des points de base font l'objet de contrôles répétés de leur activité radon.

3.3. METHODE DE MESURE

La mesure des activités radon est réalisée, de retour au laboratoire, au moyen d'une chambre à scintillation. Le principe de la mesure repose sur les propriétés scintillantes du sulfure de zinc dopé à l'argent : une particule Alpha rencontrant le scintillateur y induit une luminescence que l'on mesure à l'aide d'un photomultiplicateur. Les fioles en verre utilisées ont un fond transparent qui permet leur couplage optique direct avec la photocathode de l'appareil.

Le comptage de l'activité des fioles contenant le gaz échantillonné est réalisé au moins trois heures après le prélèvement. Les concentrations sont calculées en tenant compte de la désintégration du radon entre le moment du prélèvement et celui de la mesure.

Bien que l'unité de mesure des concentrations en radon-222 soit le Bq/m³, les résultats sont présentés au sein de ce travail en pCi/l (1 picocurie par litre = 10⁻¹² Ci/l = 3,7 · 10⁻² becquerel par litre = 37 Bq/m³ = 17,6 ²²²Rn atome/cm³ ; 1 Bq = 1 dés./s ≅ 30 pCi/l), unité traditionnellement utilisée dans la communauté hydrogéologique.

Le dosage du pourcentage de CO₂ est réalisé sur le terrain, par lecture directe, sur tube colorimétrique. Le réactif utilisé par le fabricant (Draeger), constitué de violet cristallin et d'hydrazine, vire vers le bleu violet. Les tubes utilisés lors de la prospection sont des "tubes réactif Draeger Anhydride carbonique 0,5%/a (CH 31401) dont le domaine de mesure standard est compris entre 0,5 et 10 %. Le fabricant estime la déviation standard

relative sur les mesures à 10 à 5 %¹. Il signale que "les autres gaz et vapeurs n'ont aucune influence sur l'indication".

Des mesures au spectromètre gamma de terrain ont également été mises en œuvre afin de caractériser les anomalies radon associées aux valeurs anormales du rayonnement gamma de subsurface. Le matériel utilisé est un scintillomètre de type SPP-2-NF, SAPHYMO STEL, Système CEA, série 24, n° 3445. Mesurant un rayonnement gamma global, il ne permet pas la discrimination des concentrations respectives en U, Th et K. Le rayonnement mesuré est exprimé en nombre de coups par seconde (C/s).

4. Dépouillement et interprétation des mesures

La sélection de la composante anormale est réalisée pour chaque site prospecté en déterminant deux limites caractéristiques au sein de l'échantillon que constituent les mesures de base :

- le seuil anormal, correspondant à la limite séparant 10 % des valeurs les plus fortes, de l'ensemble de l'échantillon,
- le seuil de bruit de fond, correspondant à la moyenne des points inférieurs au seuil anormal.

Pour déterminer ces seuils, l'ensemble de la campagne de prélèvements n'est pas retenue car l'augmentation de la densité de l'échantillonnage dans les secteurs reconnus comme anormaux à la suite de la première série de mesures introduirait un biais sur ces valeurs caractéristiques.

Ces limites permettent de sélectionner, sur l'ensemble des mesures réalisées, trois types de données :

- les stations d'activité inférieure au seuil de bruit de fond : le résidu,
- les stations d'activité comprise entre le seuil de bruit de fond et le seuil anormal : la zone indéterminée ou zone de fluctuation,
- les stations d'activité supérieure au seuil anormal : l'anomalie.

Les activités radon font ensuite l'objet d'un report cartographique avec interpolation, par la méthode du krigeage, afin de visualiser dans l'espace la localisation et la géométrie des zones anormales.

5. Bibliographie sommaire

DAVID A. (1992).- Influence des paramètres hydroclimatologiques sur les déplacements verticaux du radon-222 en zone non saturée.- Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, spécialité Hydrogéologie - Sciences de l'eau.

GUERIN F. (1991).- Production et mécanismes de migration du radon-222 dans les milieux fissurés : application à la recherche des discontinuités perméables du socle cristallin.- Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, spécialité Hydrogéologie - Sciences de l'eau.- *Mém. Sc. Terre Univ. Curie, Paris n°91-07.*

¹ LEICHNITZ K. (1989).- Livre de poche concernant les tubes réactifs. Analyse de l'air et analyse technique des gaz à l'aide des tubes réactifs Dräger.- Edition interne Dräger.

Résultats de la campagne de prospection radon

ANNEXE 2.1 : SITE DE KAWENI

• Déroulement des mesures

La campagne de prospection a été réalisée le 27 septembre et le 5 octobre 1999.

Les précipitations ont été faibles au cours de cette période.

La zone prospectée, d'une surface de plus de 7 ha, se situe sur la partie amont de la zone de prospection, sur la rive droite de la Kaouénilajolie.

L'échantillonnage a été mené selon un maillage le plus régulier possible, avec un espacement initial des stations de mesure de 50 mètres.

• Résultats obtenus

Un total de 28 prélèvements a été réalisé sur 26 stations différentes (tableau).

Deux stations ont été retenues pour mesurer la stabilité du signal émanométrique. Il s'agit des stations 17 et 19.

	Lun 27-9	Mar 5-10	Moy	Ecart type
PB 17	294 & 374		334	57
PB 19	476	689	583	151

Globalement la stabilité du signal est bonne.

Pour l'interprétation, nous prendrons la moyenne pour chaque point de base.

La sélection statistique de la composante anormale des activités radon a été réalisée sur les résultats des 18 stations jugées représentatives.

De même, les stations 67 à 74 ne sont pas retenues car elles ont été implantées pour resserrer les anomalies (maillage à 25 m).

- Le seuil anomal est de l'ordre de $350 \text{ (Bq/m}^3\text{)}/100$
- Le seuil de bruit de fond est voisin de $270 \text{ (Bq/m}^3\text{)}/100$

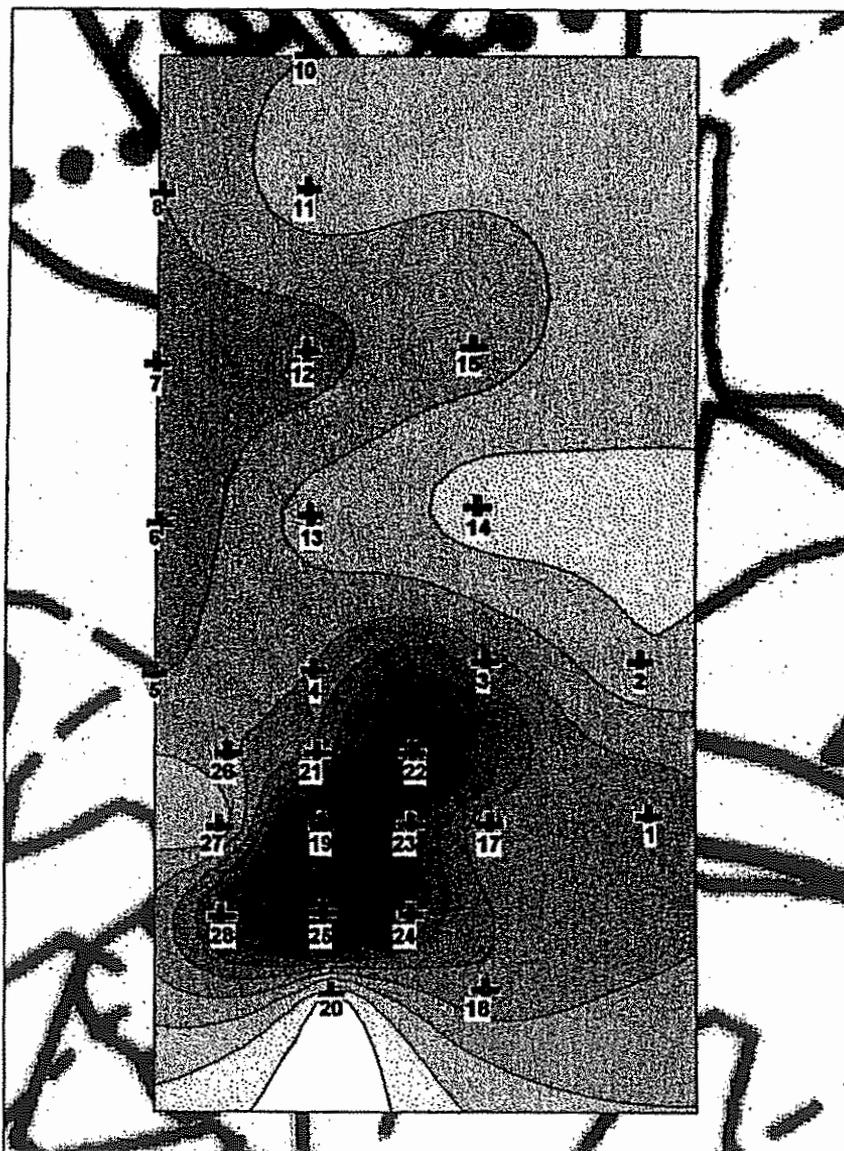
• Interprétation des résultats

Un seul pic d'activité ressort nettement, il est composé de trois stations 22, 19 et 25 ayant respectivement les valeurs 702, 583, 850 $\text{(Bq/m}^3\text{)}/100$ (figure A2-1a et A2-1b). Cette anomalie a une orientation NE-SW, dans l'alignement du virage de la Kaouénilajolie.

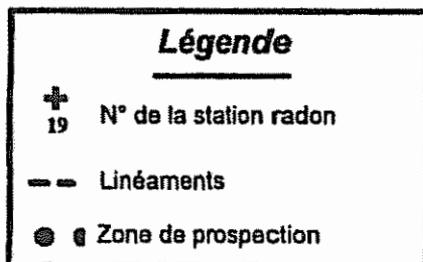
Figure A2-1a

Site de Kaweni

Localisation des stations radon (n° des stations)



27 septembre et 5 octobre 1999



25 m

Figure A2-1b

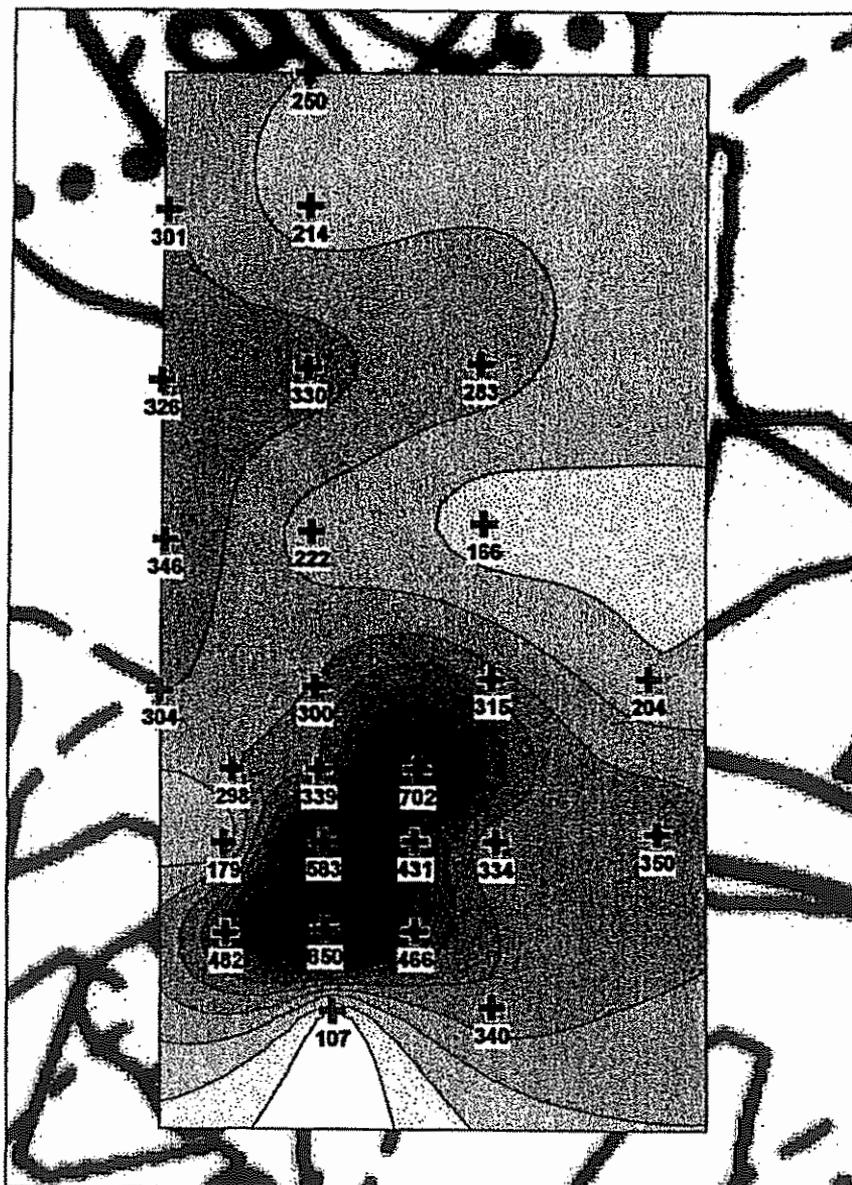
Site de Kaweni

Activité radon (Bq/m³/100)



Interpolation par krigeage

(les valeurs inférieures à 100 Bq/m³/100 ne sont pas pris en considération)



27 septembre et 5 octobre 1999

Légende

-  Activité radon en (Bq/m³)/100
-  Linéaments
-  Zone de prospection

25 m

ANNEXE 2.2 : SITE DE KOUALE LEGION

A2.2.1 Koualé 1

• Déroulement des mesures

La campagne de prospection a été réalisée du 6 au 11 septembre 1999.

Aucune précipitation n'a été relevée au pluviographe de Koualé au cours de cette période.

La zone prospectée d'une surface de 2.6 ha se situe à l'ouest immédiat du village de Koualé-Légion.

L'échantillonnage a été mené selon un maillage le plus régulier possible, avec un espacement initial des stations de mesure de 50 mètres (figures A2-2.1a et A2-2.1b).

• Résultats obtenus

Un total de 32 prélèvements a été réalisé sur 28 stations différentes.

La station 21 n'a pas été prise en compte pour l'interprétation. Sa très faible activité radon (60 (Bq/m³)/100 en moyenne) suggère une contamination du prélèvement par l'air atmosphérique à cause de la faible perméabilité locale du sol.

Quatre stations (6, 21, 22, 23) ont fait l'objet de deux prélèvements, afin de s'assurer de la stabilité du signal émanométrique.

Outre les points de base (PB) n°6 et n°21 qui ont dû subir une contamination atmosphérique, la stabilité du signal sur les autres points est relativement bonne.

	Lun 6-9	Mar 7-9	Moy.	Ecart type
PB 6	288	3	146	202
PB 21	32	88	60	40
PB 22	498	512	505	10
PB 23	248	256	252	6

Pour l'interprétation nous procéderons comme suit:

- PB 6: seul sera pris en compte la valeur du lundi
- PB 21: contamination atmosphérique, aucune valeur prise en compte
- PB 22 et PB 23: nous prenons en compte la moyenne

La sélection statistique de la composante anomal des activités radon a été réalisée sur les mesures des 25 stations jugées représentatives.

Les stations 27 et 28 ne sont pas retenues pour l'analyse car elles ont été implantées suite à une première réflexion.

- Le seuil anomal est de l'ordre de 320 (Bq/m³)/100
- Le seuil de bruit de fond est voisin de 210 (Bq/m³)/100

• Interprétation des résultats

La cartographie de l'activité du radon au sein des gaz du sol, avec interpolation par krigeage, montre une bonne cohérence sur l'ensemble du secteur prospecté: opposition entre zones de fortes activités radon, bien individualisées en général et confirmées par les mesures complémentaires, et secteurs sans signal significatif.

La valeur moyenne des activités radon semble relativement stable dans l'espace à l'échelle du secteur prospecté.

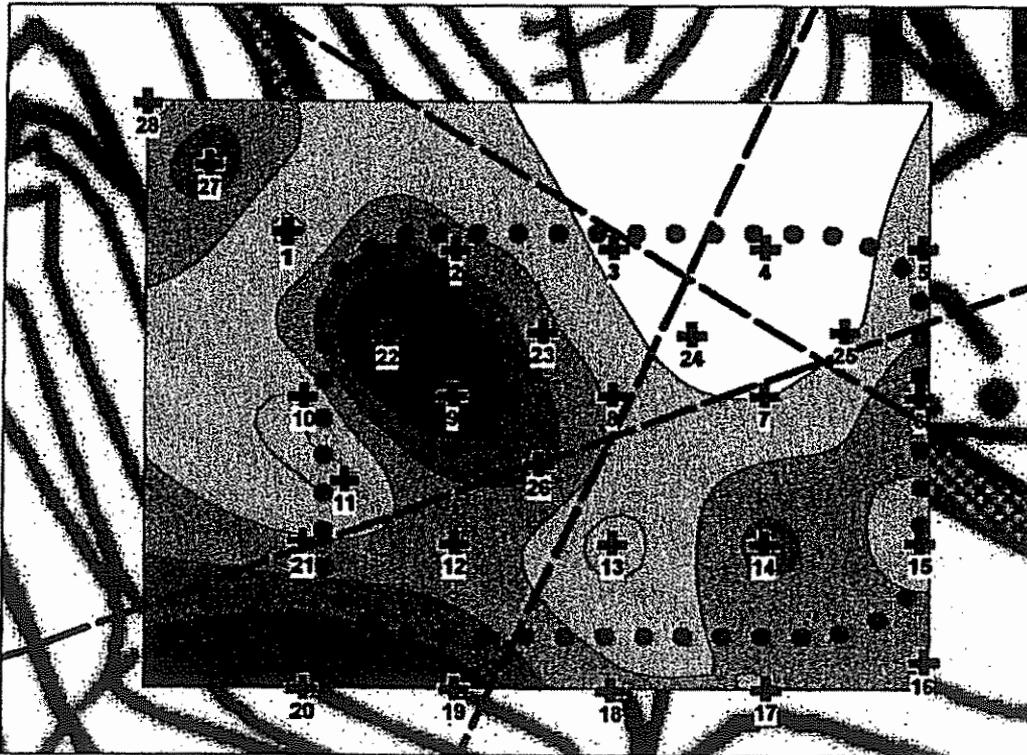
Un axe NW-SE se dessine clairement au niveau du guet.

Les points 19 et 20 situés à l'extrême sud-est de la zone possèdent aussi des valeurs anormales du même ordre.

Ces deux points étant situés sur le flanc du relief et donc inaccessible par des machines, il était inopportun de vouloir y affiner les recherches.

Figure A2-2.1a **Site de Koualé - Légion 1**

**Localisation des stations radon
(n° des stations)**



Du 6 au 11 septembre 1999

Légende

	N° de la station radon
	Linéaments
	Zone de prospection

25 m

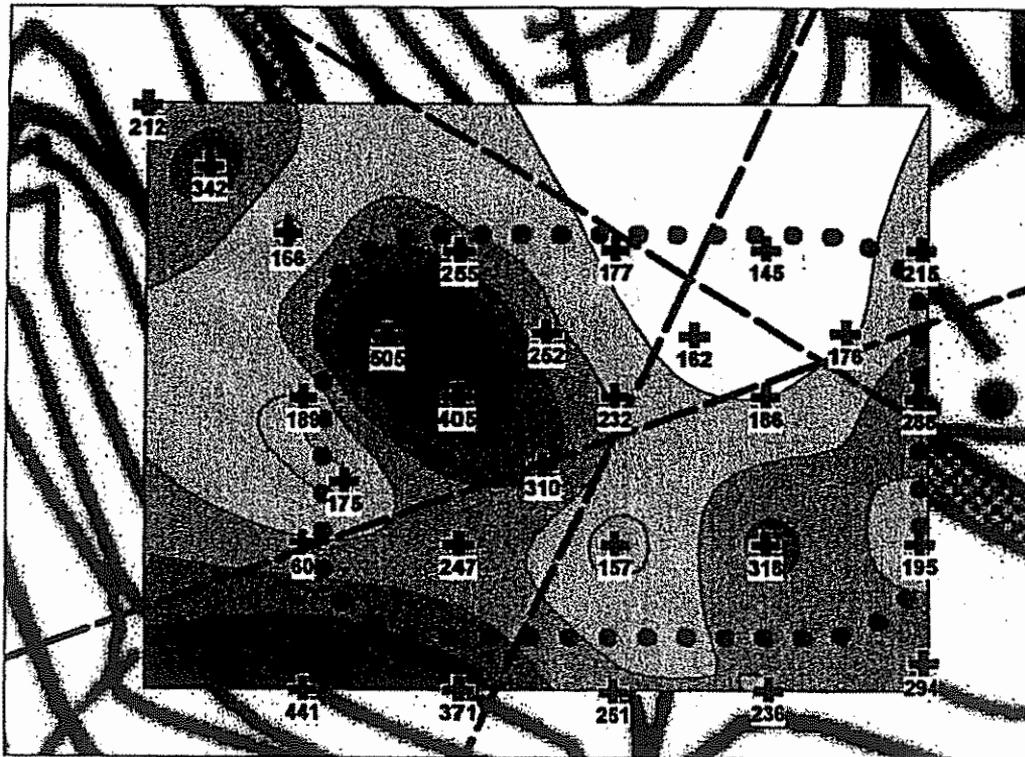
Figure A2-2.1b

Site de Koualé - Légion 1

Activité radon (Bq/m³/100)

Interpolation par krigeage

(les valeurs inférieures à 100 Bq/m³/100 ne sont pas pris en considération)



Du 6 au 11 septembre 1999

Légende

- 450 Activité radon en (Bq/m³)/100
- Linéaments
- Zone de prospection

25 m

ANNEXE 2.2 : SITE DE KOUALE LEGION

A 2.2.2 Koualé 2

• Déroulement des mesures

La campagne de prospection a été réalisée du 7 au 11 septembre 1999.

Aucune précipitation n'a été relevée au pluviographe de Koualé au cours de cette période.

La zone prospectée, d'une surface de plus de 11 ha s'étend de part et d'autre de la vallée de la Kwalé, en amont du second gué.

L'échantillonnage a été mené selon un maillage le plus régulier possible, avec un espacement initial des stations de mesure de 50 mètres (figures A2-2.2a et A2-2.2b).

• Résultats obtenus

Un total de 82 prélèvements a été réalisé sur 67 stations différentes.

Cinq stations ont été retenues pour mesurer la stabilité du signal émanométrique. Il s'agit des stations 19, 32, 40, 43, 49.

Les PB 40 et 43 ont subi des contaminations atmosphériques.

La stabilité au PB 49 n'est pas très bonne, mais étant à proximité des PB 40 et 43, on peut soupçonner une contamination atmosphérique.

La stabilité du signal est acceptable sur les PB 19 et 32.

	Mar 7-9	Mér 8-9	Jeu 9-9	Ven 10-10	Sam 11-10	Moy.	Ecart type
PB 12			664	421		543	172
PB 19	252	330	265	277	289	283	30
PB 32	391	378				385	9
PB 40	14	21	35	224		74	101
PB 43	2	22	281	8		78	135
PB 49	405	223	169	246		261	101

Pour l'interprétation, concernant les points de base, nous procéderons comme suit:

- PB 40 et 43 : seule la valeur la plus forte sera prise en compte
- PB 12, 19, 32 et 49 : la moyenne sera considérée

La sélection statistique de la composante anormale des activités radon a été réalisée sur les résultats des 67 stations jugées représentatives.

Les stations 11, 27, 42, 16 et 46 ne sont pas retenues pour l'analyse car leur activité est inférieure à 100 (Bq/m³)/100. De même, les stations 57 à 72 ne sont pas retenues car elles ont été implantées pour préciser la forme des anomalies (maillage à 25 m).

- Le seuil anormal est de l'ordre de 375 (Bq/m³)/100
- Le seuil de bruit de fond est voisin de 250 (Bq/m³)/100

• Interprétation des résultats

La cartographie de l'activité du radon au sein des gaz du sol, avec interpolation par krigeage, montre une bonne cohérence sur l'ensemble du secteur prospecté. La valeur moyenne des activités radon semble relativement stable dans l'espace.

Deux principales anomalies radon sont identifiées. La plus nette, située au centre de la zone prospectée (929 Bq/m³/100) est entourée de points supérieurs au seuil anormal.

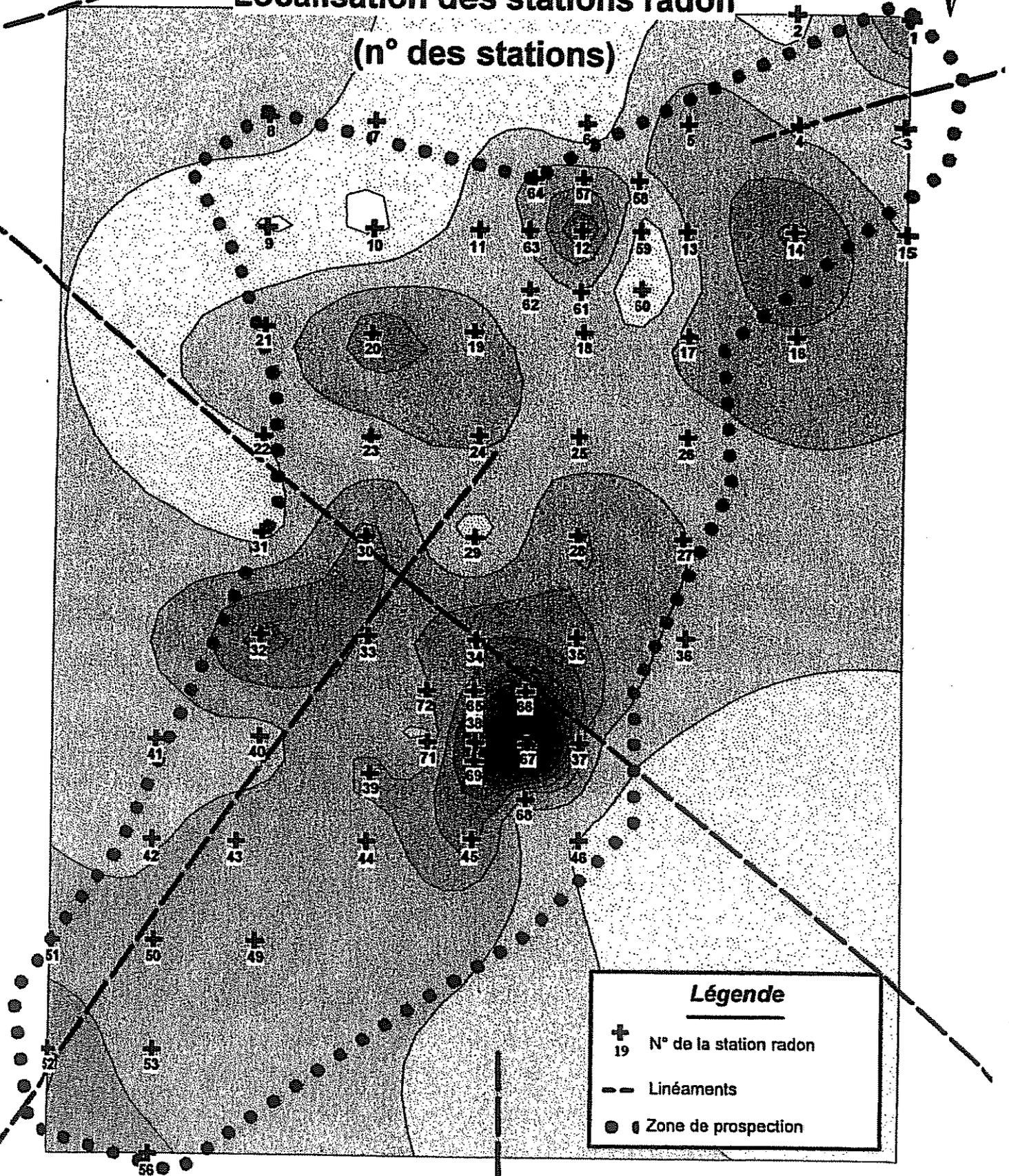
La deuxième anomalie, située au Nord de la zone d'étude, ne possède qu'une seule station anormale et une stabilité médiocre du signal émanométrique.

Figure A2-2.2a

Site de Koualé - Légion 2

Localisation des stations radon

(n° des stations)



Du 7 au 11 septembre 1999

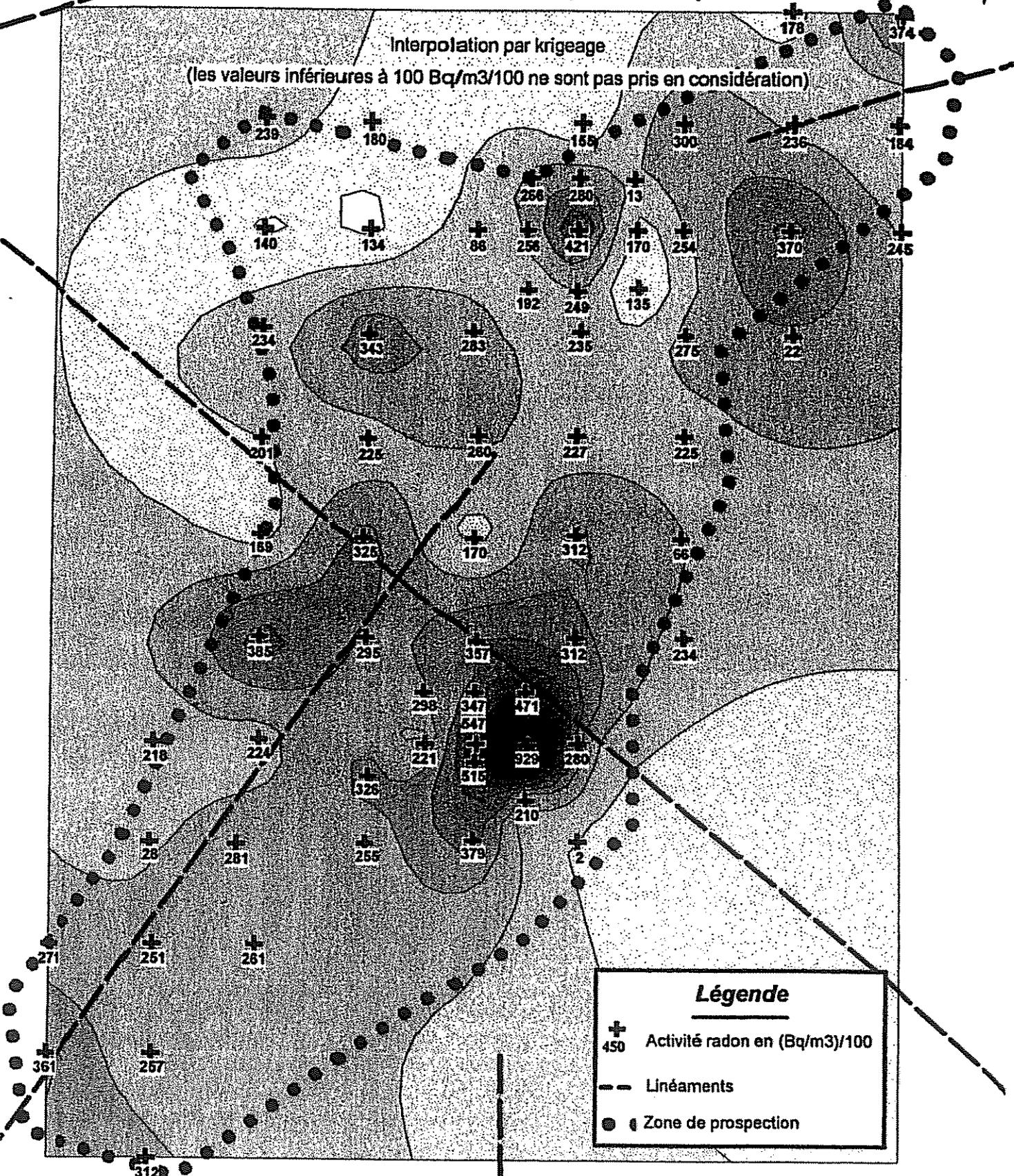
25 m

Figure A2-2.2b

Site de Koualé - Légion 2



Activité radon (Bq/m3/100)



Du 7 au 11 septembre 1999

25 m

ANNEXE 2.3. : SITE DE M'TSANGAMOUJI

• Déroulement des mesures

La campagne de prospection s'est déroulée du 22 septembre au 6 octobre 1999.

Les précipitations relevées au pluviographe de Mtsangamouji au cours de cette période sont réparties sur 5 jours. Les maxima ont été atteints les 24 et 28 avec respectivement 16,5, et 15,5 mm. Les 3 autres événements pluvieux sont de l'ordre de 4 mm.

La zone prospectée, d'une surface de près de 28 ha s'étend de part et d'autre de la vallée, en amont du village de Mtsangamouji.

L'échantillonnage a été mené selon un maillage le plus régulier possible, avec un espacement initial des stations de mesure de 50 mètres (figures A2-3a et A2-3b).

• Résultats obtenus

Un total de 63 prélèvements a été réalisé sur 56 stations différentes.

Sept stations ont été retenues pour mesurer la stabilité du signal émanométrique. Il s'agit des stations 8, 21, 25, 26, 33, 34, 35.

	Mer 22	Ven 24	Mardi 28	Mer 6/10	Moy	Ecart type
PB 8	324		289		307	25
PB 25		187	211		199	17
PB 21		197		422	310	159
PB 26			230	156	193	52
PB 33			440	243	342	139
PB 34			345	340	343	4
PB 35			414	284	349	92

Notons que mis à part les stations 21, 33 et 35, la stabilité du signal est relativement bonne malgré l'importance des précipitations.

Pour l'interprétation, nous prendrons la moyenne pour chaque point de base.

La sélection statistique de la composante anormale des activités radon a été réalisée sur les résultats des 37 stations jugées représentatives.

Les stations 39 à 56 n'ont pas été retenues pour cette analyse car elles ont été implantées pour resserrer le maillage de prélèvements à proximité des anomalies (maillage à 25 m).

- Le seuil anomal est de l'ordre de 340 (Bq/m³)/100
- Le seuil de bruit de fond est voisin de 230 (Bq/m³)/100

• Interprétation des résultats

Quatre zones anormales ont été identifiées.

En tenant compte des paramètres d'accessibilité et de vulnérabilité, seules deux d'entre elles (stations 33 et 35) ont fait l'objet d'un resserrement du maillage à 25 m.

L'anomalie aux stations 50 et 53, qui semble en fait constitué de 2 zones anormales, semble la plus intéressante. L'anomalie de la station 38 doit être considérée avec prudence dans la mesure où elle n'a pas été confirmée par une répétition de la mesure et le resserrement du maillage de prélèvement.

Figure A2-3a

Site de M'tsangamouji

Localisation des stations radon

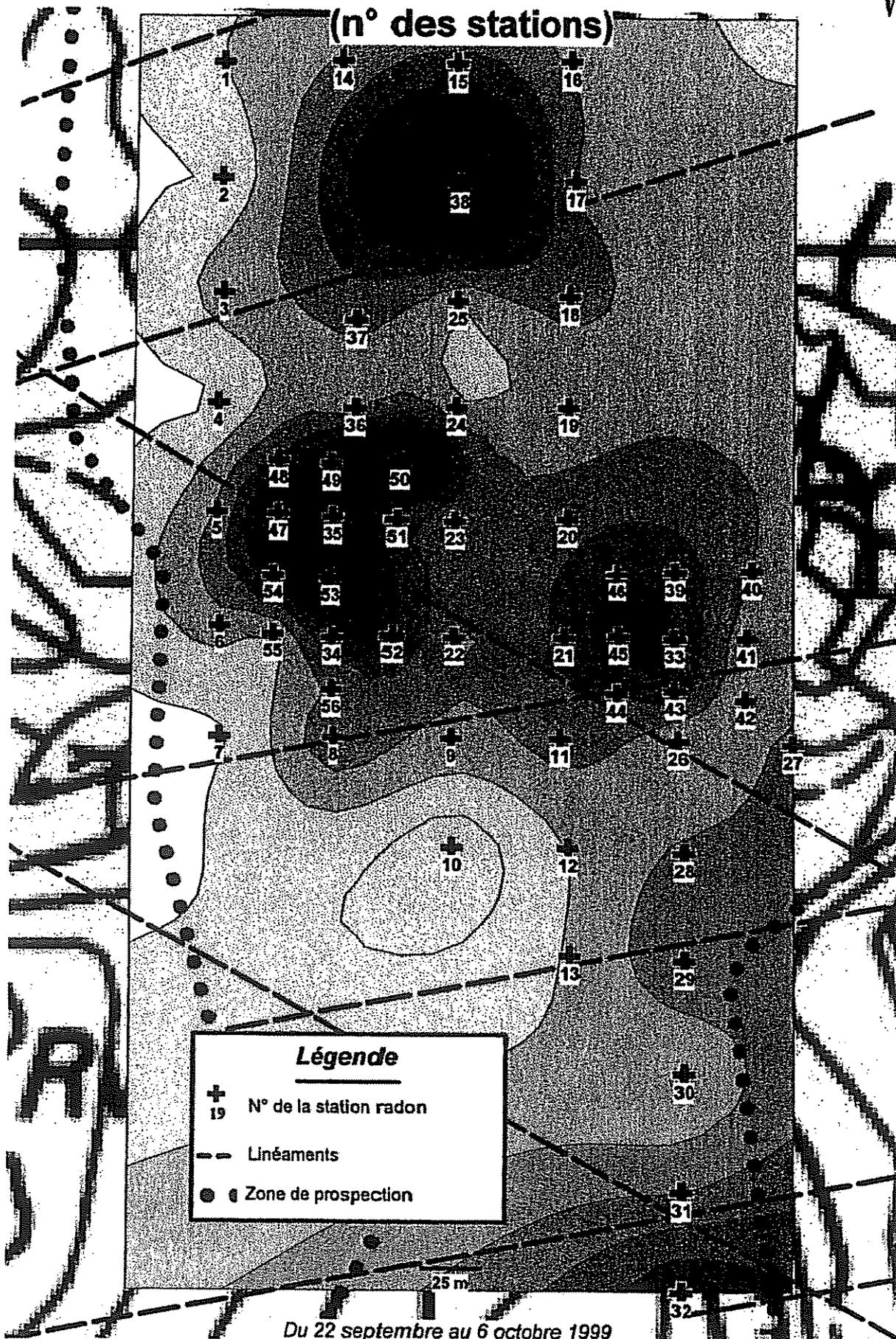
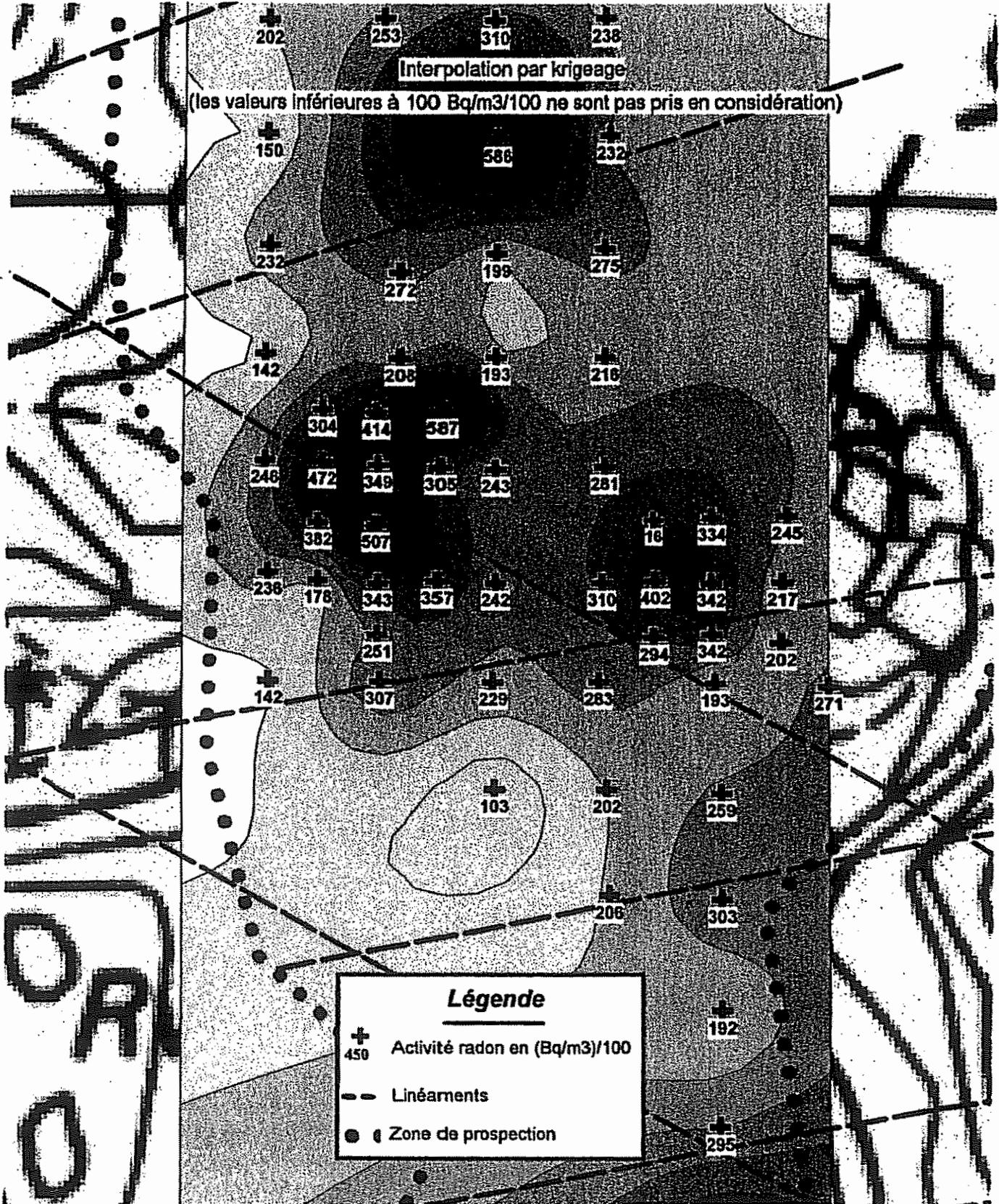


Figure A2-3b

Site de M'tsangamouji

Activité radon (Bq/m³/100)



ANNEXE 2.4 : SITE DE BEJA

• Déroulement des mesures

La campagne de prospection a été réalisée du 13 au 22 septembre 1999.

Les précipitations, relevées au pluviographe de Mtsangamouji, ont été faibles au cours de cette période. La plus grosse averse est de 5.5 mm le 20. Or les mesures les plus proches n'ont eu lieu que le 22.

La zone prospectée, d'une surface de plus de 21 ha, s'étend de part et d'autre de la vallée, en amont de la route.

L'échantillonnage a été mené selon un maillage le plus régulier possible, avec un espacement initial des stations de mesure de 50 mètres.

• Résultats obtenus

Un total de 87 prélèvements a été réalisé sur 74 stations différentes (tableau).

Six stations ont été retenues pour mesurer la stabilité du signal émanométrique. Il s'agit des stations 1, 8, 13, 50, 51, 52.

	Lun 13	Mer 15	Jeu 16	Ven 17	Mer 22	Moy	Ecart type
PB 1	412	461	432	379		421	34
PB 8	459	314	376	297	213	332	92
PB 13		347 & 379	354	309		347	29
PB 50				929	891	910	27
PB 51				490	414	452	54
PB 52				339	308	324	22

Globalement la stabilité du signal est bonne, avec néanmoins une tendance générale à une légère baisse des activités au cours du temps. Pour l'interprétation, nous prendrons la moyenne pour chaque point de base.

La stabilité du signal à la station anormale 50 est notable.

La sélection statistique de la composante anormale des activités radon a été réalisée sur les résultats des 60 stations jugées représentatives.

Les stations 14, 21, 22, 26 et 39 ne sont pas retenues pour l'analyse car leur activité est inférieure à 100 (Bq/m³)/100. On peut donc soupçonner une contamination atmosphérique des prélèvements.

De même, les stations 67 à 74 ne sont pas retenues car elles ont été implantées pour resserrer les anomalies (maillage à 25 m).

- Le seuil anormal est de l'ordre de 420 (Bq/m³)/100
- Le seuil de bruit de fond est voisin de 270 (Bq/m³)/100

• Interprétation des résultats

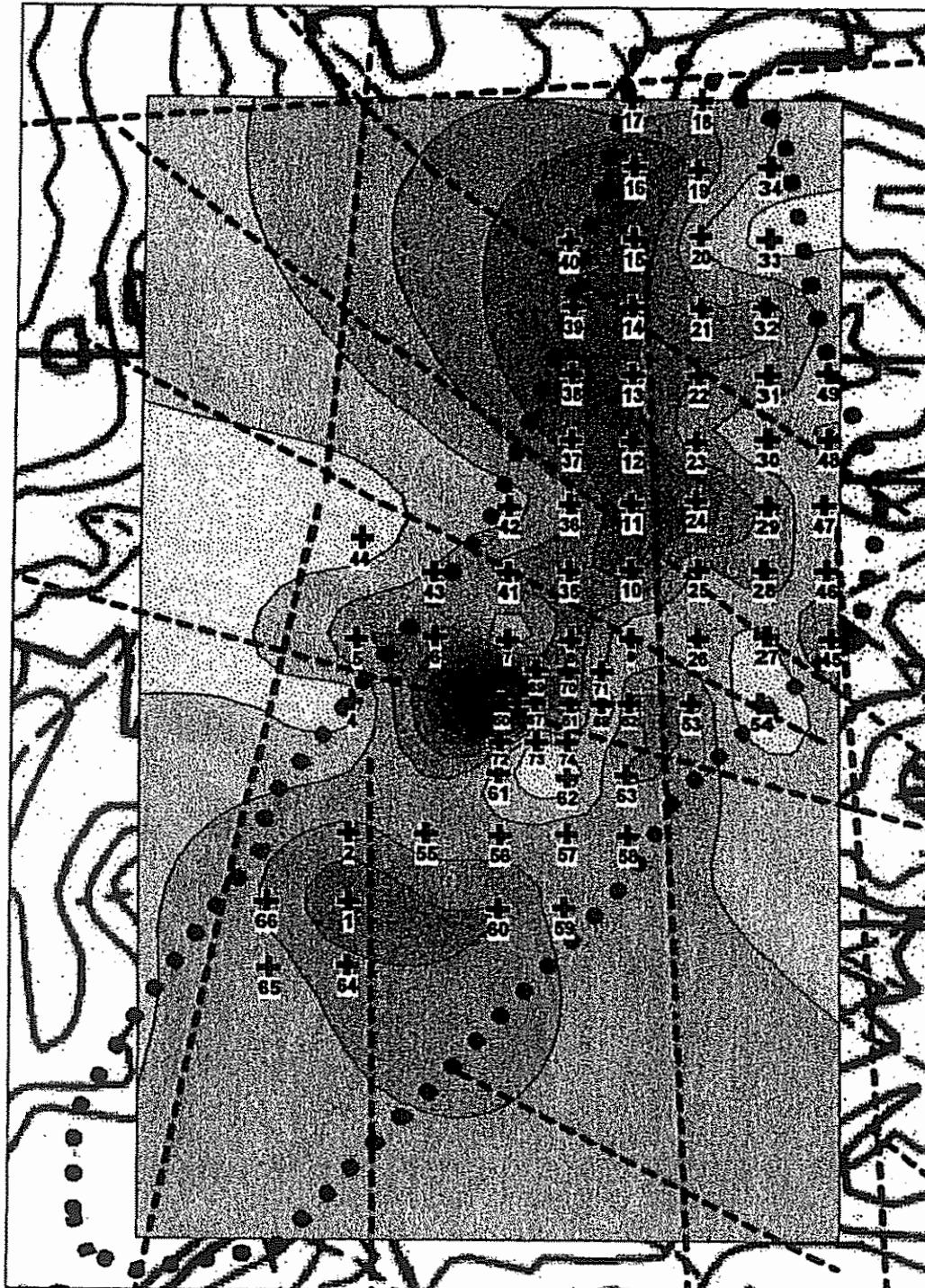
Un seul pic d'activité ressort nettement, il s'agit du point 50 avec une valeur de 910 (Bq/m³)/100 (figure A2-4a et A2-4b). Cette anomalie a été identifiée lors de la prospection réalisée avec le maillage de 50 m. Le resserrement des mesures avec un pas de 25 m n'a pas permis d'identifier d'autres valeurs élevées. Cette densification de l'échantillonnage n'a pu être menée à l'Ouest de la station 50, du fait de la proximité de la rivière.

Figure A2-4a

Site de Béja

Localisation des stations radon

(n° des stations)



50 m

Du 13 au 22 septembre 1999

Légende

-  N° de la station radon
-  Linéaments
-  Zone de prospection

Figure A2-4b

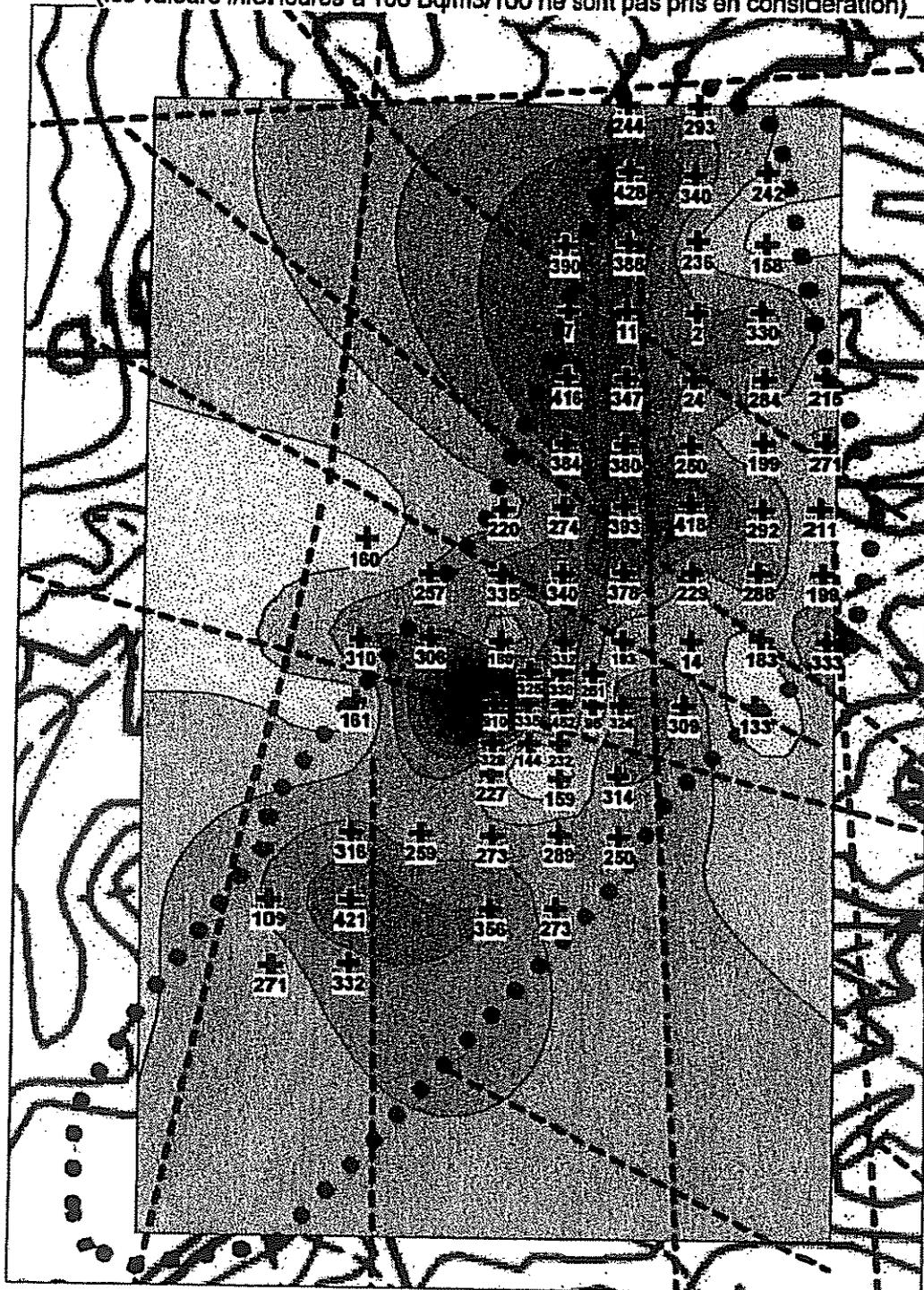
Site de Béja

Activité radon (Bq/m³/100)



Interpolation par krigeage

(les valeurs inférieures à 100 Bq/m³/100 ne sont pas pris en considération)



50 m

Du 13 au 22 septembre 1999

Légende

- 450 Activité radon en (Bq/m³)/100
- Linéaments
- Zone de prospection

ANNEXE 2.5. : SITE DE TSARARANO

• Déroulement des mesures

La campagne de prospection a été réalisée du 29 au 30 septembre 1999.

Les précipitations relevées au pluviographe de Dembéné durant les vingt jours précédant la campagne de prospection sont relativement faibles avec des valeurs journalières inférieures au millimètre. Il est toutefois tombé près de 7 mm le 23, et 1.8 mm le 28, veille des premiers prélèvements.

La zone prospectée d'une surface de 22 ha s'étend au sud-ouest du village de Tsararano, entre la RN 3 au nord et le Mro au sud.

L'échantillonnage a été mené selon un maillage le plus régulier possible, avec un espacement initial des stations de mesure de 50 mètres (figures A2-5a et A2-5b).

• Résultats obtenus

Un total de 40 prélèvements a été réalisé sur 39 stations différentes.

Une station a été retenue pour mesurer la stabilité du signal émanométrique. Il s'agit de la station n°12.

	Mer 29	Jeu 30	Moy	Ecart type
PB 12	241	316	279	53

La stabilité du signal à ce point est relativement bonne.

Pour l'interprétation, nous prendrons la moyenne des valeurs soit 279 (Bq/m³)/100.

La sélection statistique de la composante anormale des activités radon a été réalisée sur les résultats des 39 stations jugées représentatives.

- Le seuil anomal est de l'ordre de 360 (Bq/m³)/100
- Le seuil de bruit de fond est voisin de 250 (Bq/m³)/100

• Interprétation des résultats

Il apparaît nettement une anomalie au point 35 avec une activité de 505 (Bq/m³)/100.

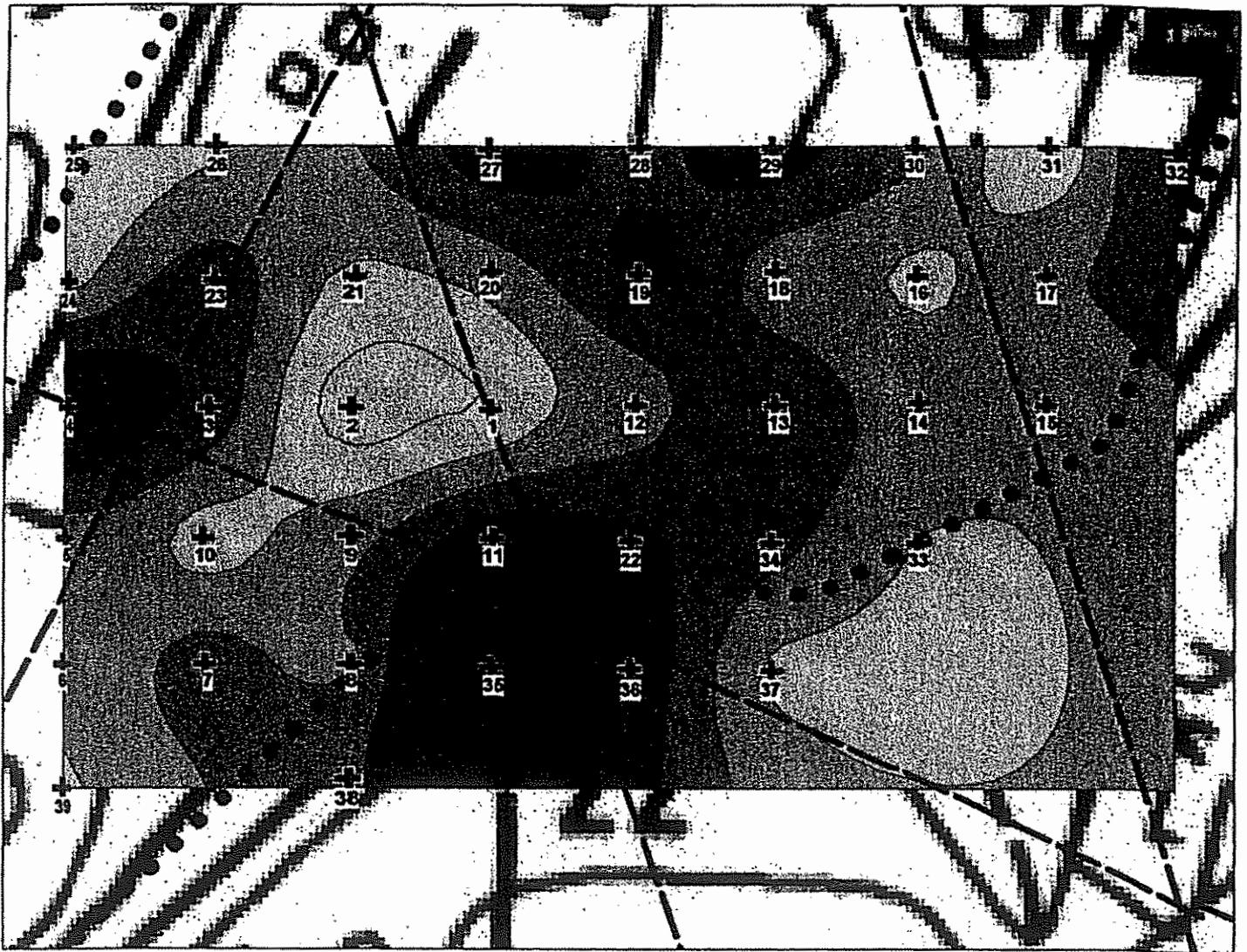
Deux stations présentent une activité supérieure à 400 Bq/m³/100.

Figure A2-5a

Site de Tsararano

Localisation des stations radon

(n° des stations)



Légende

-  N° de la station radon
-  Linéaments
-  Zone de prospection

25 m

29 et 30 septembre

Figure A2-5b

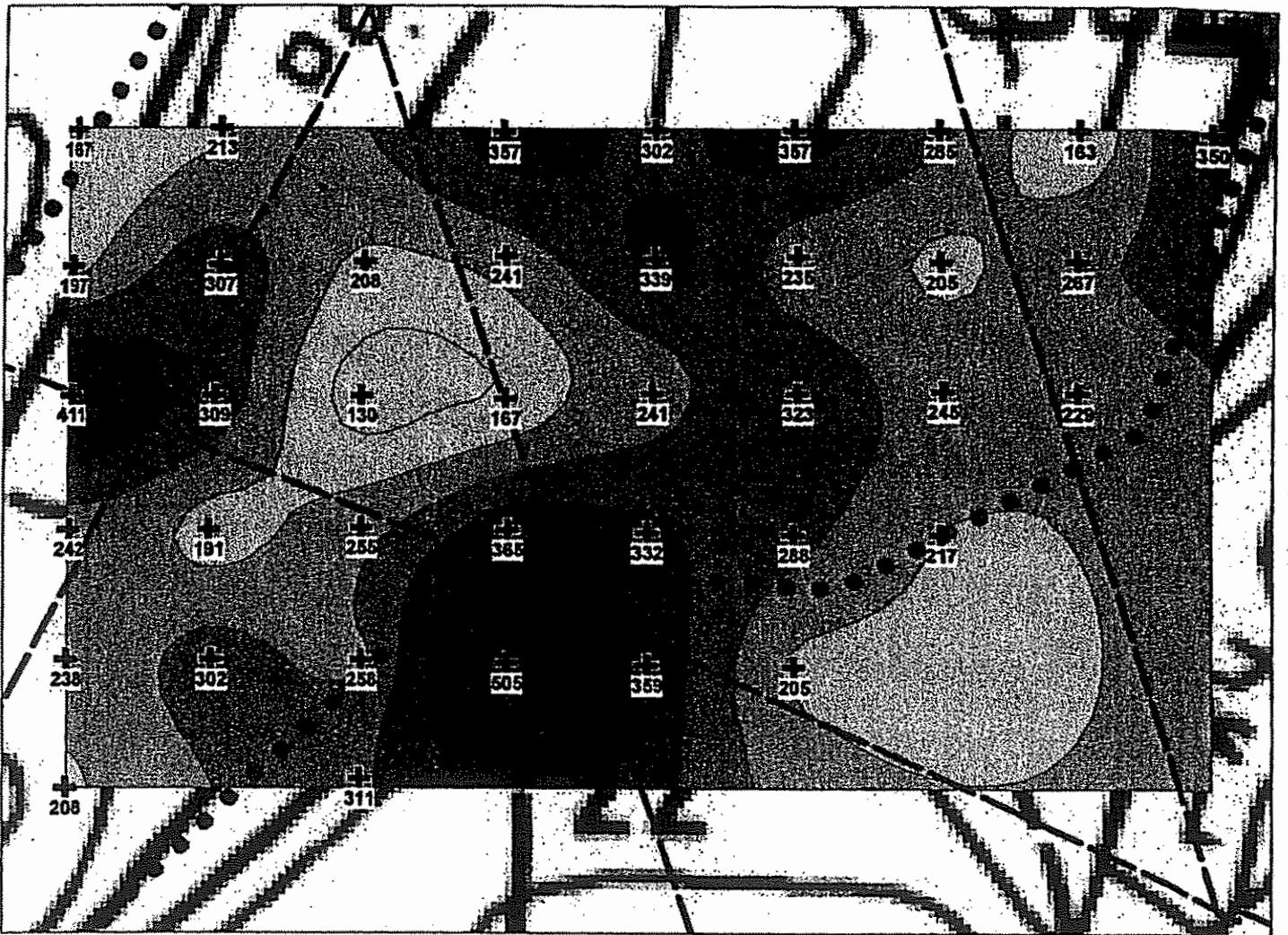
Site de Tsararano

Activité radon (Bq/m³/100)



Interpolation par krigeage

(les valeurs inférieures à 100 Bq/m³/100 ne sont pas pris en considération)



Légende

- Activité radon en (Bq/m³)/100
- Linéaments
- Zone de prospection

25 m

29 et 30 septembre 1999

ANNEXE 2.6. : SITE DE MRONABEJA

• Déroulement de la mesure

La campagne de prospection a été réalisée du 1^{er} au 7 octobre 1999.

Aucune précipitation n'a été relevée au pluviographe de M'zouazia au cours de cette période.

La zone prospectée d'une surface de 16 ha s'étend de part et d'autre du Mroni Antanana au nord du village de Mronabéja.

L'échantillonnage a été mené selon un maillage le plus régulier possible, avec un espacement initial des stations de mesure de 50 mètres (figures A2-6a et A2-6b).

• Résultats obtenus

Un total de 86 prélèvements a été réalisé sur 77 stations différentes.

Huit stations ont été retenues pour mesurer la stabilité du signal émanométrique. Il s'agit des stations 2, 12, 13, 17, 19, 32, 33, 39.

PB	Ven 1-10	Lun 4-10	Jeu 7-10	Moy	Ecart type
PB 2	508		583	546	53
PB 12	432		334	383	69
PB 13	581		304	443	196
PB 17	480		443	462	26
PB 19	457		366	412	64
PB 32	524		351	438	122
PB 33	262	330	370	321	55
PB 39		317	255	286	44

Les valeurs recueillies montrent une tendance générale à la baisse du signal émanométrique. Cette baisse est particulièrement accusée aux points de base 13 et 32 qui voient leur activité passer en dessous du seuil anomal. Le signal est beaucoup plus stable aux stations 2 et 17.

Pour l'interprétation, nous prendrons la moyenne pour chaque point de base.

La sélection statistique de la composante anormale des activités radon a été réalisée sur les résultats des 53 stations jugées représentatives.

Les stations 55, 56 et 59 ayant une activité radon inférieure à 100 (Bq/m³)/100 ont probablement subi une contamination atmosphérique et ne seront donc pas retenues pour l'analyse.

Les stations 63 à 83 ne sont pas retenues non plus, car elles ont été implantées pour resserrer les anomalies (maillage à 25 m).

- Le seuil anomal est de l'ordre de 440 (Bq/m³)/100
- Le seuil de bruit de fond est voisin de 290 (Bq/m³)/100

• Interprétation des résultats

Deux principales zones anormales sont identifiées sur le site :

- Celle qui présente la plus forte activité radon (685 Bq/m³/100), station 26, se situe en bordure Nord de la zone d'étude dans un secteur peu accessible. Elle n'a pas fait l'objet de mesures complémentaires,
- Celle qui se situe dans la partie centrale de la zone d'étude. Les activités radon, bien que moins élevées (activités maximales comprises entre 480 et 550 Bq/m³/100), sont néanmoins confirmées par les mesures complémentaires. Cette zone anormale semble composée de 3 anomalies coalescentes. La valeur absolue du signal et sa stabilité semble maximale au droit de l'anomalie centrale (station 2) qui coïncide en outre avec un linéament subméridien.

Site de Mronabéja

Figure A2-6a

Localisation des stations radon



(n° des stations)

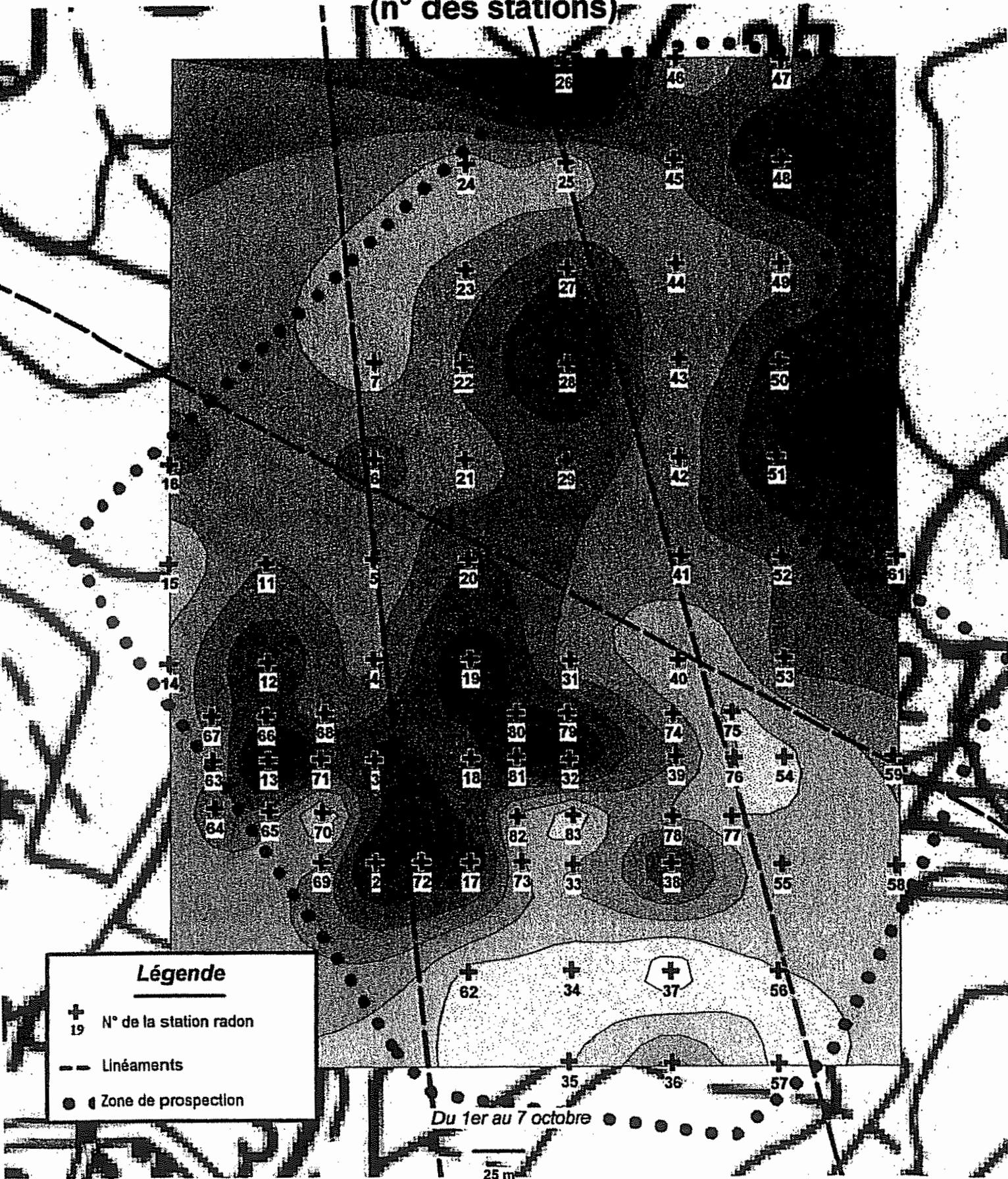


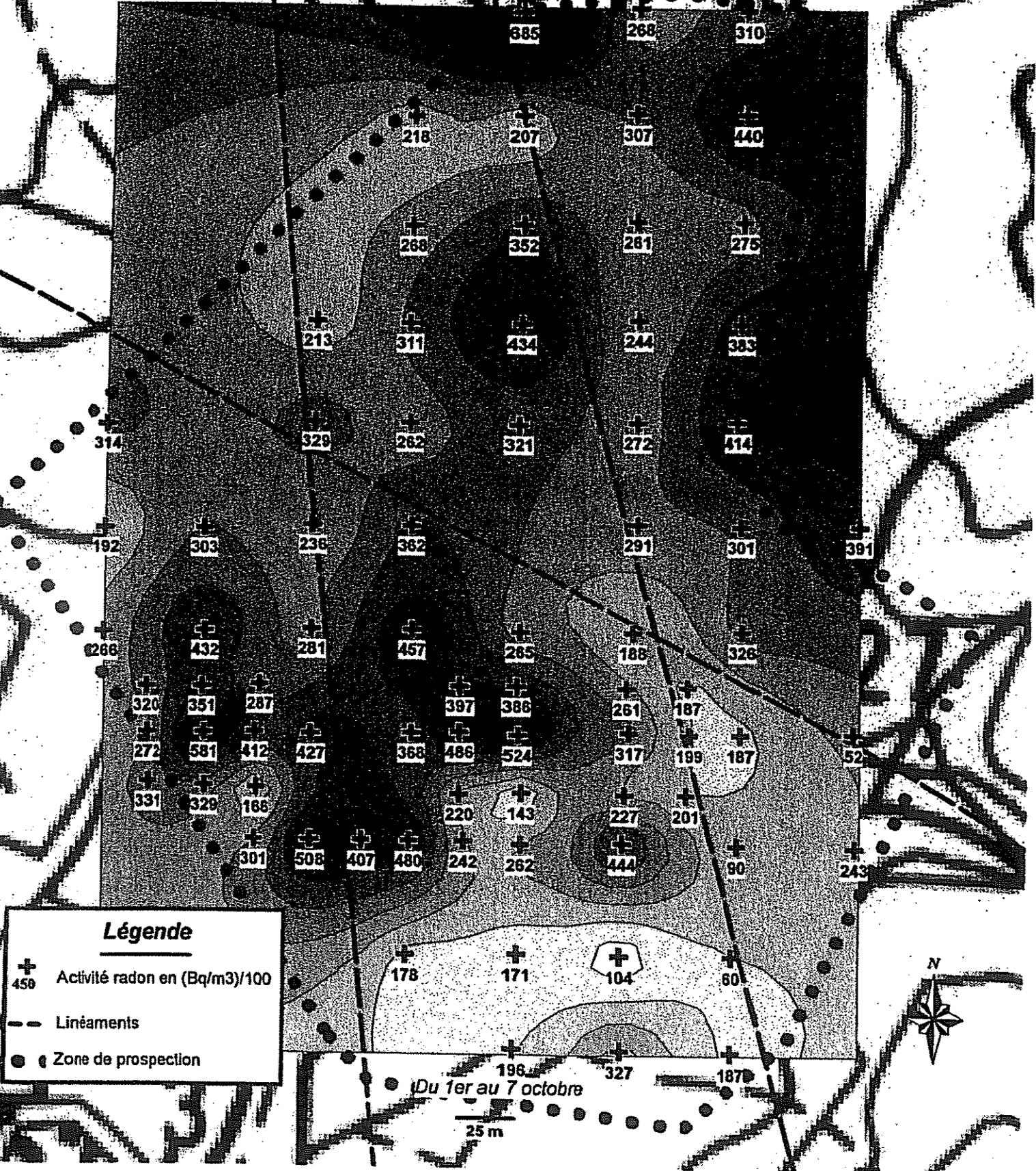
Figure A2-6b

Site de Mronabéja

Activité radon (Bq/m³/100)

Interpolation par krigeage

(les valeurs inférieures à 100 Bq/m³/100 ne sont pas pris en considération)



ANNEXE 2.7. : SITE DE MRERENI

• Déroulement des mesures

La campagne de prospection a été réalisée du 8 au 14 octobre 1999.

Les précipitations relevées au pluviographe de Poroani au cours de cette période sont faibles : un seul épisode pluvieux le 10 avec 0.5 mm.

La zone prospectée d'une surface de 60 ha s'étend du Nord du Mroni Bé au Sud du Mroni Kaféni, et ce à l'Est du CCT 5.

L'échantillonnage a été mené selon un maillage le plus régulier possible, avec un espacement initial des stations de mesure de 50 mètres. (figures A2-7a et A2-7b)

• Résultats obtenus

Un total de 74 prélèvements a été réalisé sur 67 stations différentes.

Six stations ont été retenues pour mesurer la stabilité du signal émanométrique. Il s'agit des stations 2, 3, 4, 5, 19 et 34.

PB	Ven 8-10	Lun 11-10	Mer 14-10	Moy	Ecart type
PB 2	287	280	407	325	71
PB 3	457		418	438	28
PB 4	396		58	227	239
PB 5	18		305	162	203
PB 19	10		455	233	315
PB 34		527	253	390	194

Certains prélèvements (PB4 le 14-10 et PB 5 et 19 le 8-10) présentent vraisemblablement une contamination atmosphérique. Ils n'ont pas été pris en considération lors de l'interprétation. Les activités mesurées à certains des autres points de base (PB2 et 34) ne montrent pas une stabilité exemplaire.

La sélection statistique de la composante anormale des activités radon a été réalisée sur les résultats des 47 stations jugées représentatives.

Les stations 51 à 67 ne sont pas retenues car elles ont été implantées pour resserrer les anomalies (maillage à 25 m).

- Le seuil anormal est de l'ordre de $325 \text{ (Bq/m}^3\text{)}/100$
- Le seuil de bruit de fond est voisin de $190 \text{ (Bq/m}^3\text{)}/100$

• Interprétation des résultats

Une anomalie radon relativement étendue, composée de deux plages anormales séparées par une zone transverse de plus faibles valeurs.

La relativement bonne structuration de ces deux plages (augmentation progressive des teneurs en radon, transversalement à la structure) constitue un élément d'appréciation favorable à la qualité et à la représentativité du signal radon.

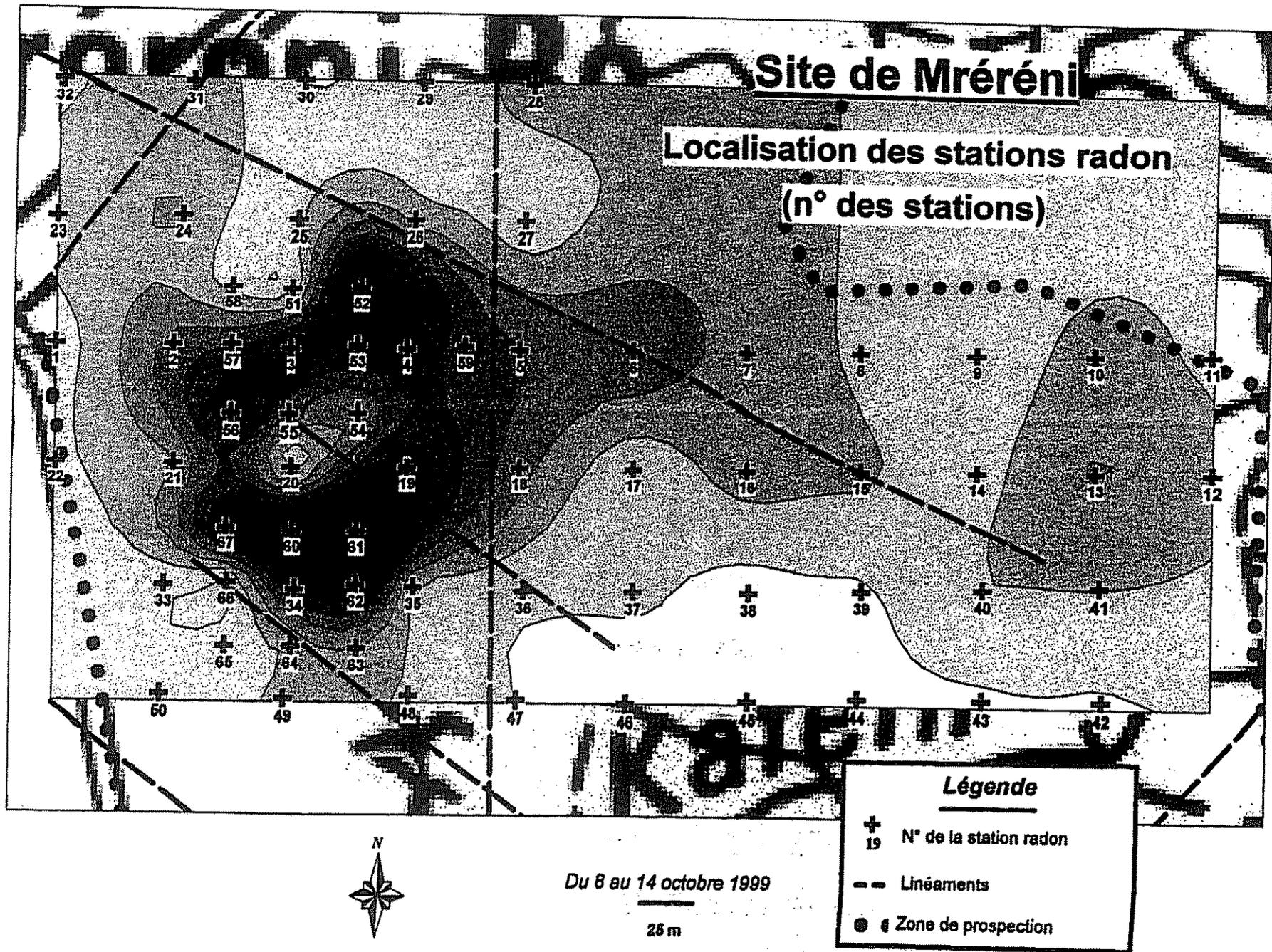
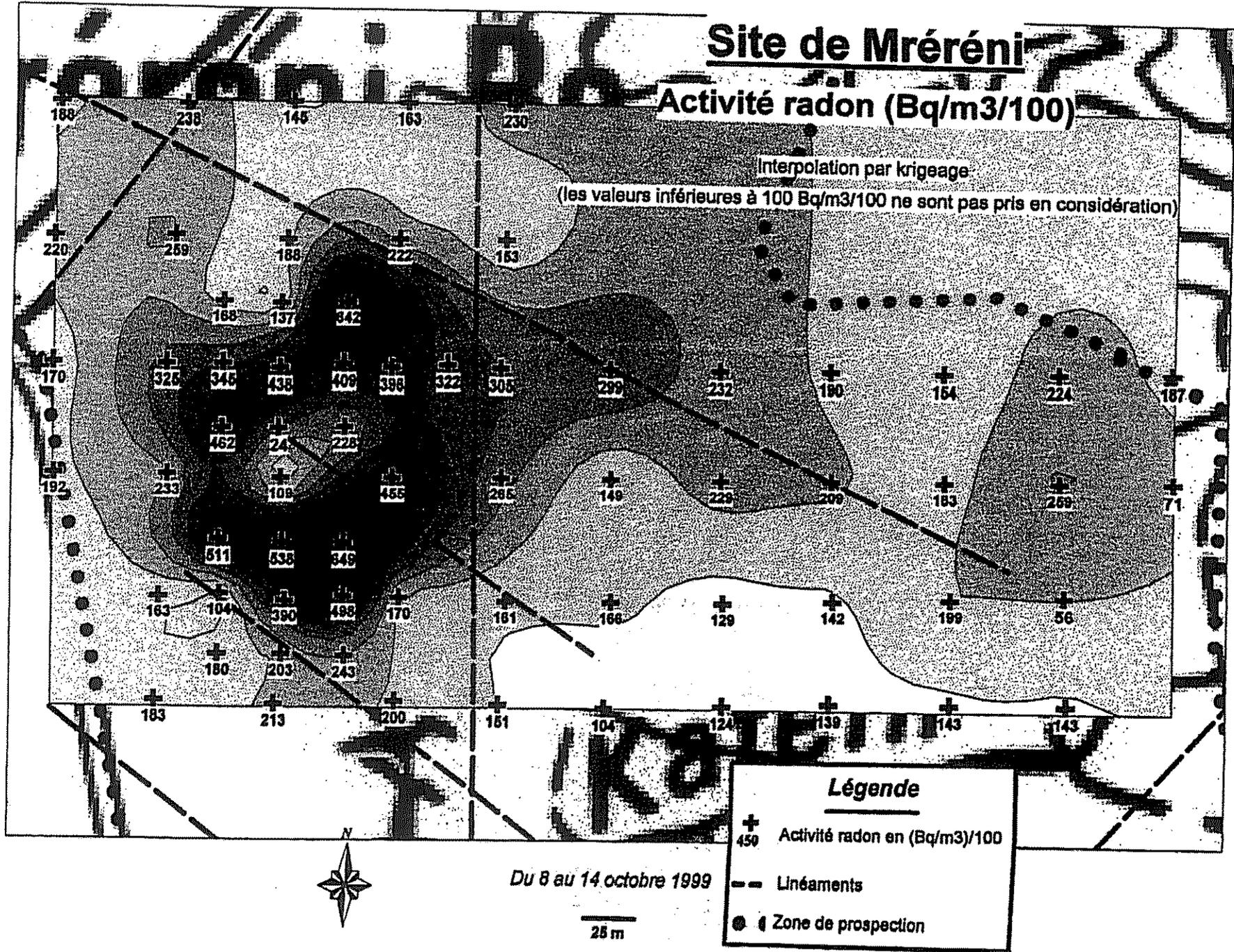


Figure A2-7a

Figure A2-7b



Annexe 3

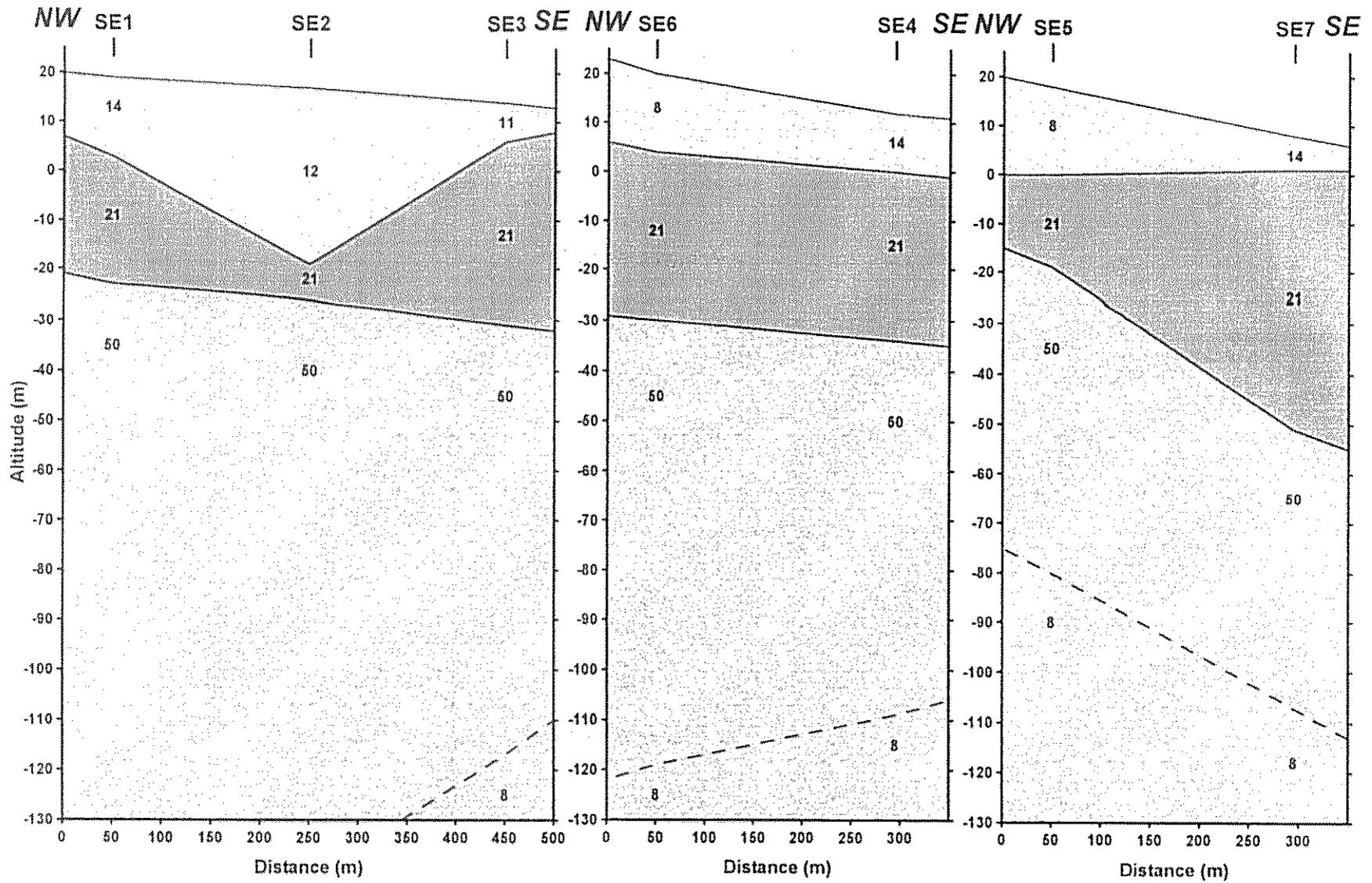
Coupes géo-électriques de référence

(extraites du rapport BRGM/R-40750 – 2000 SGR/MAY 24, juillet 2000)

Figure A3-1 : Site de Kaoueni. Coupes géoelectriques.

SITE DE KAOUENI

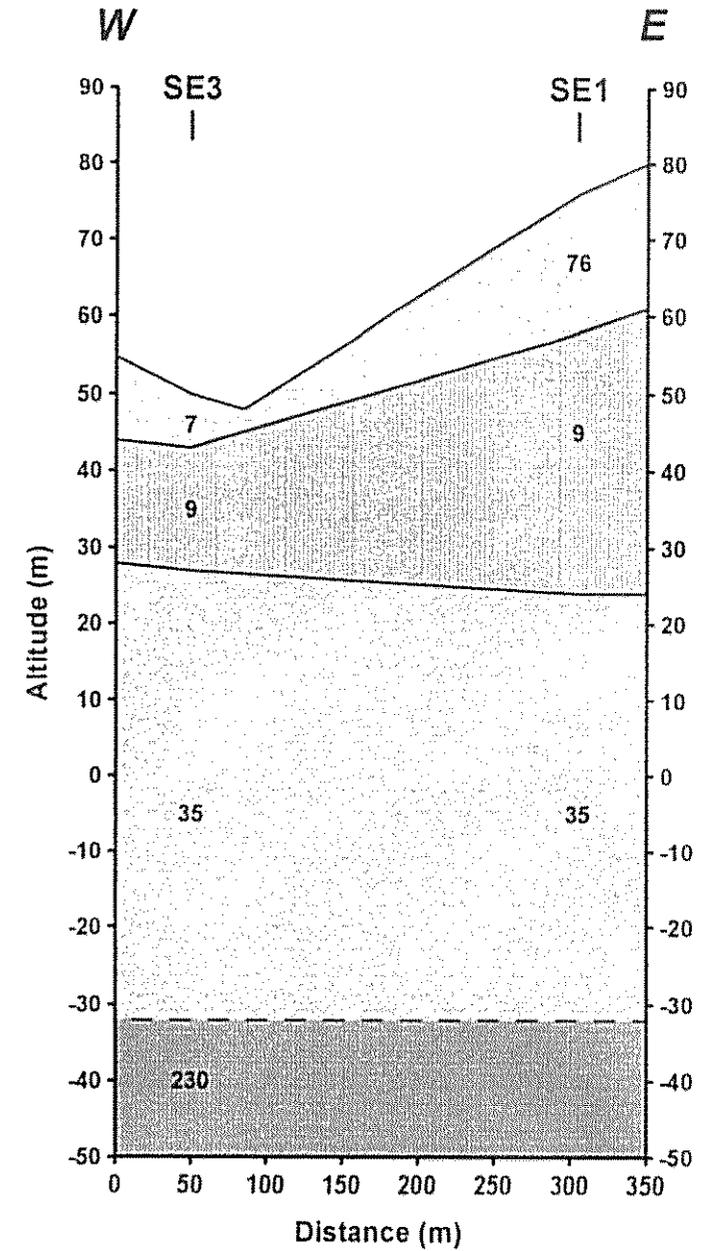
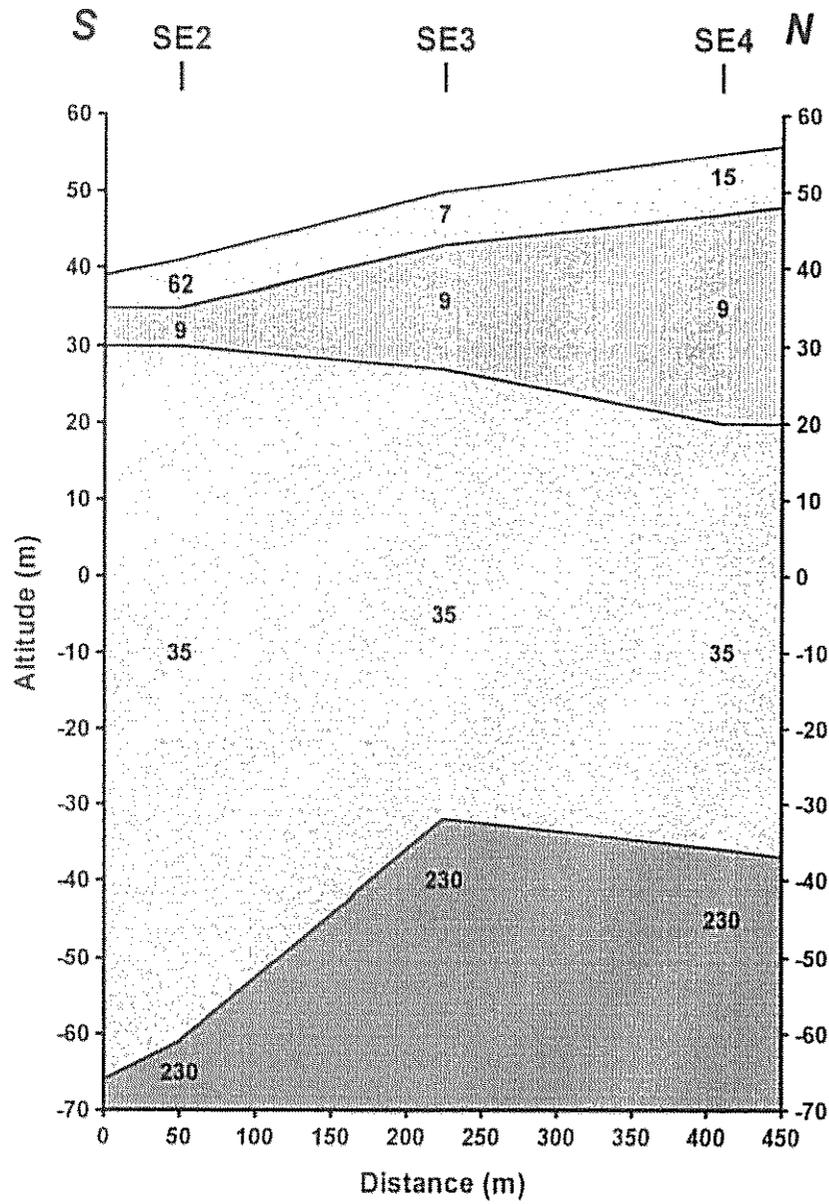
COUPES GEOELECTRIQUES



SITE DE MTSANGAMOUJI

COUPES GEOELECTRIQUES

Figure A3-2 : Site de Mtsangamouji. Coupes géoélectriques.



SITE DE BEJA

COUPE GEOELECTRIQUE

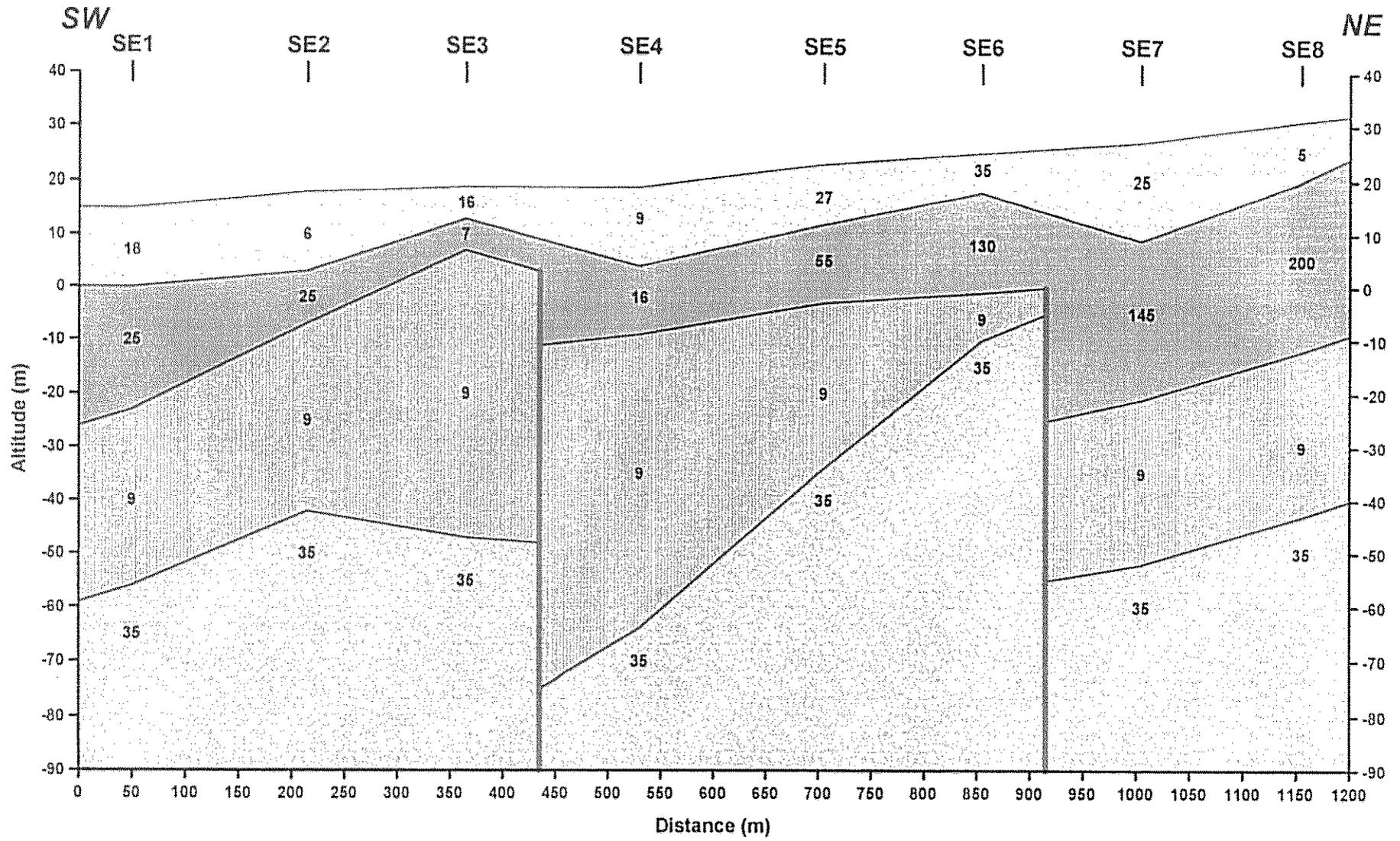


Figure A3-3 : Site de Béja. Coupe géoélectrique.

SITE DE TSARARANO

COUPE GEOELECTRIQUE

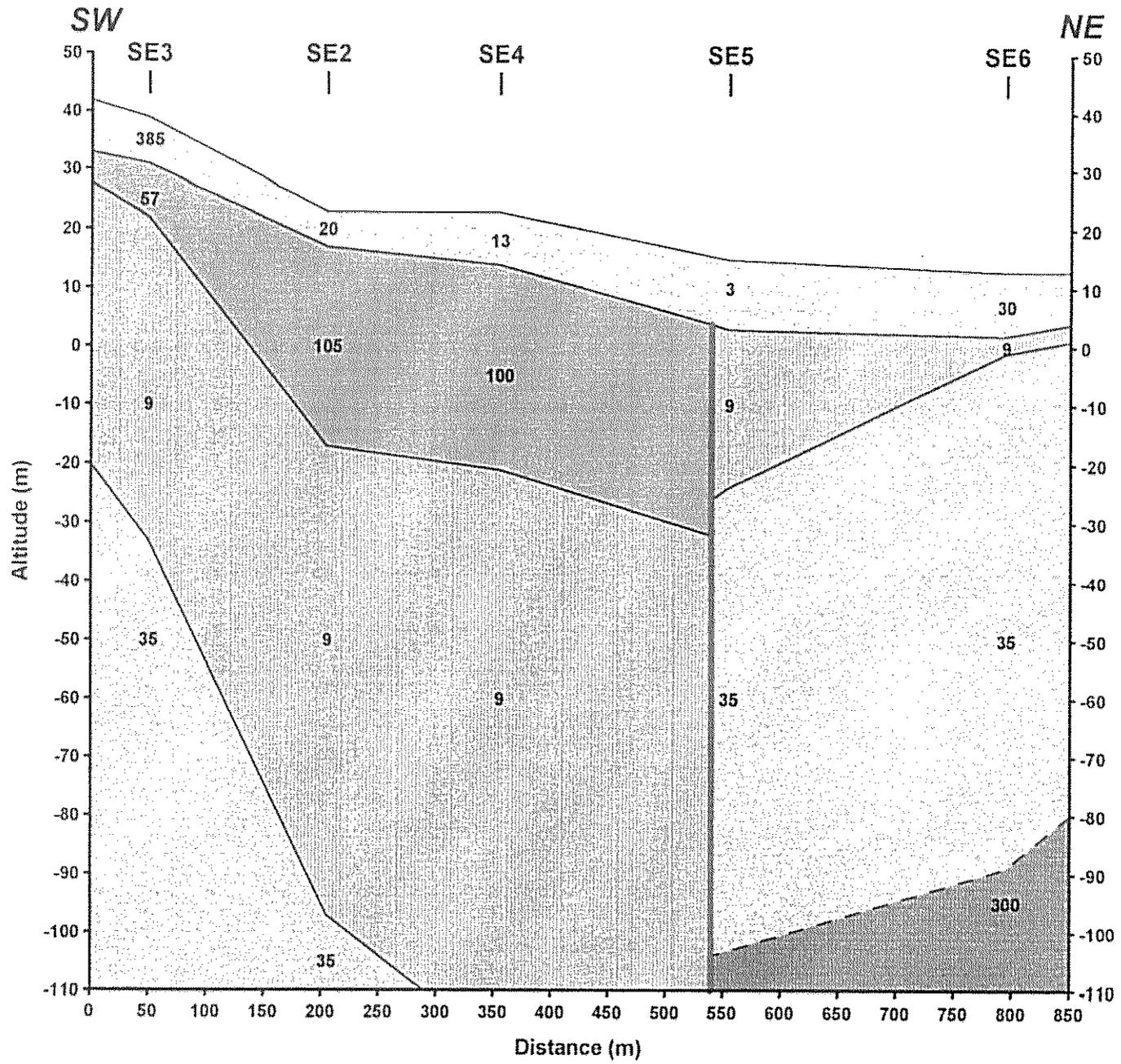


Figure A3-4a : Site de Tsararano. Coupe géoélectrique.

SITE DE TSARARANO COUPE GEOELECTRIQUE

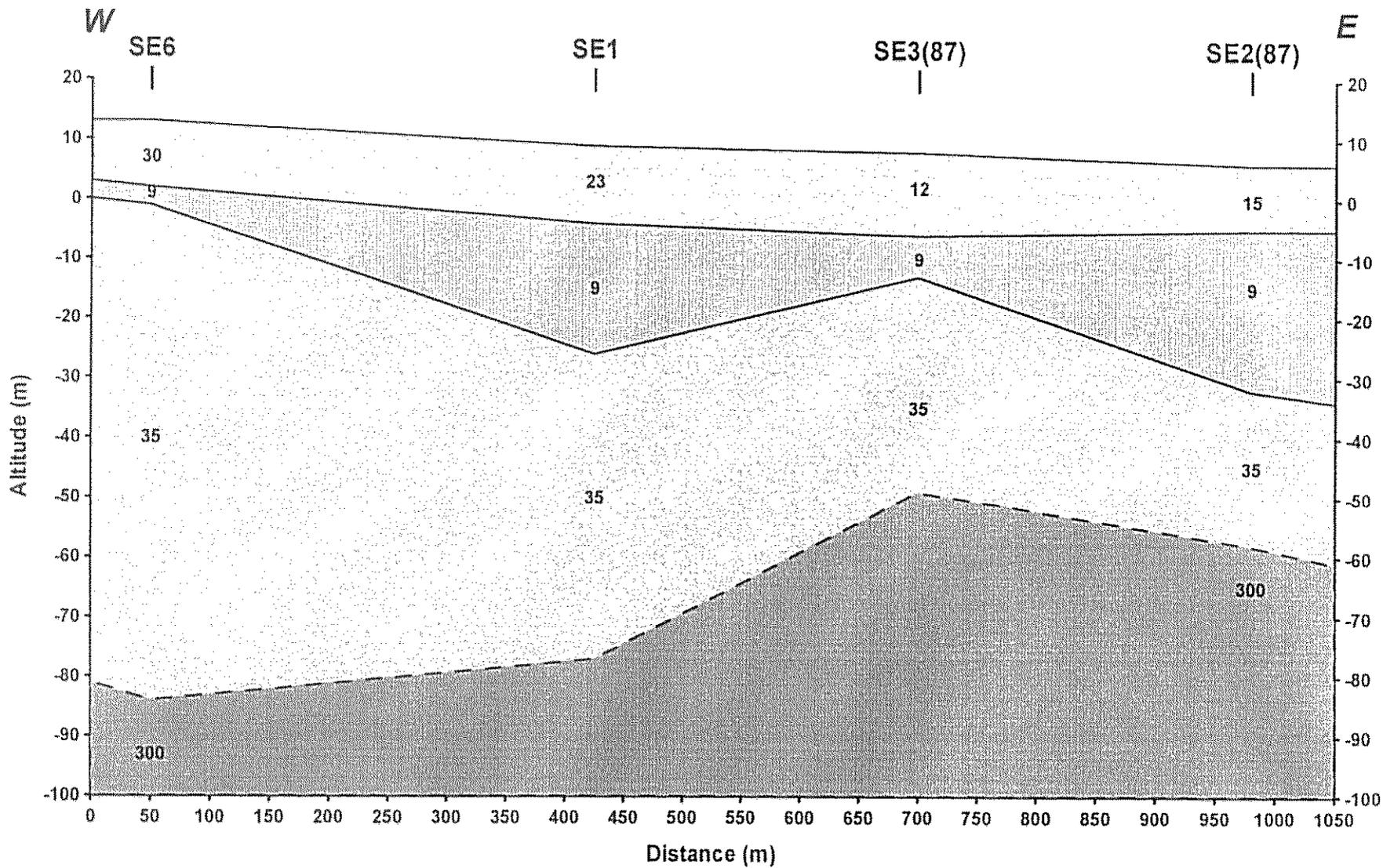
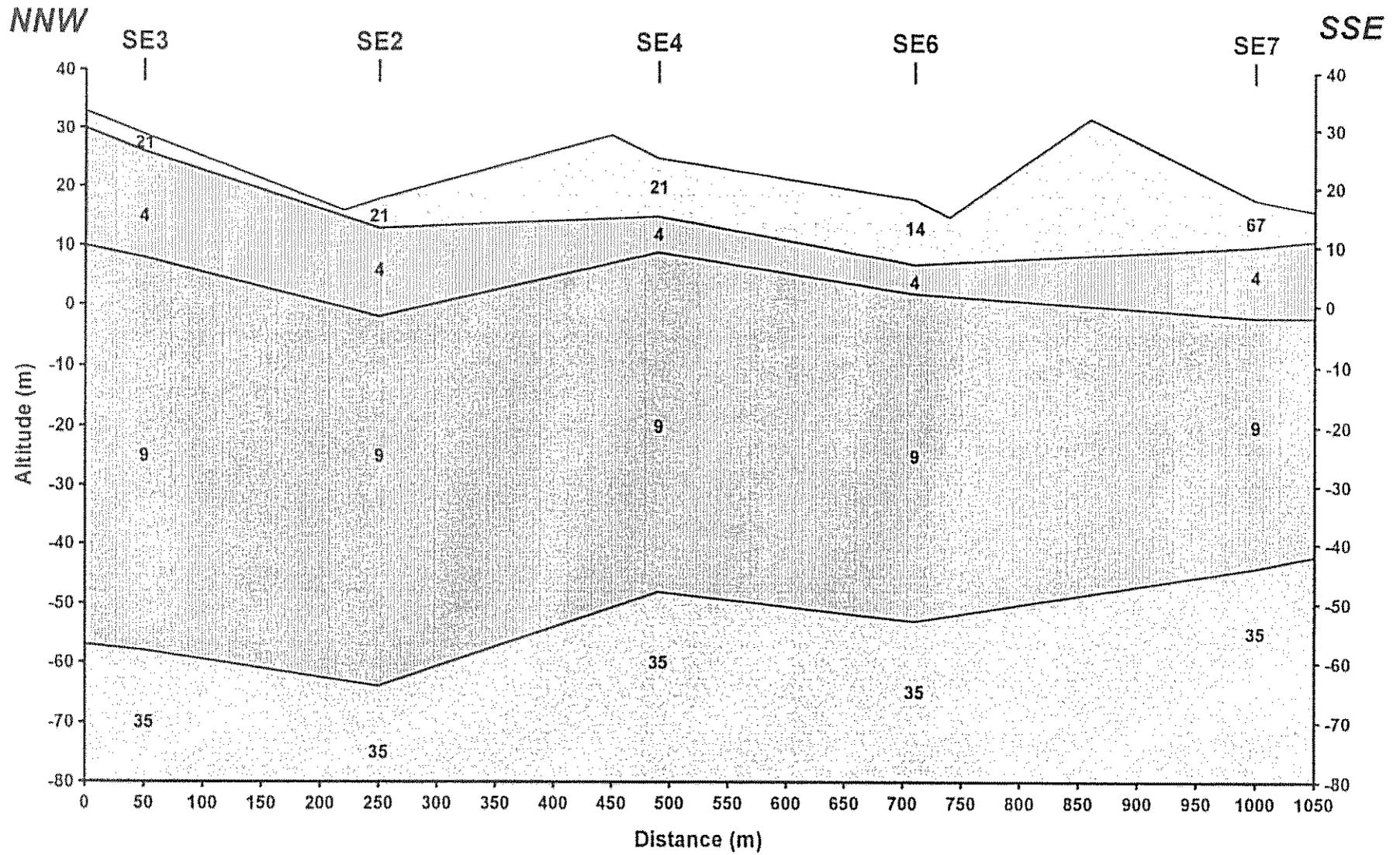


Figure A3-4b : Site de Tsararano. Coupe géoélectrique.

SITE DE MRERENI

COUPE GEOELECTRIQUE

Figure A3-5a : Site de Mréreni. Coupe géoélectrique.



SITE DE MRERENI

COUPE GEOELECTRIQUE

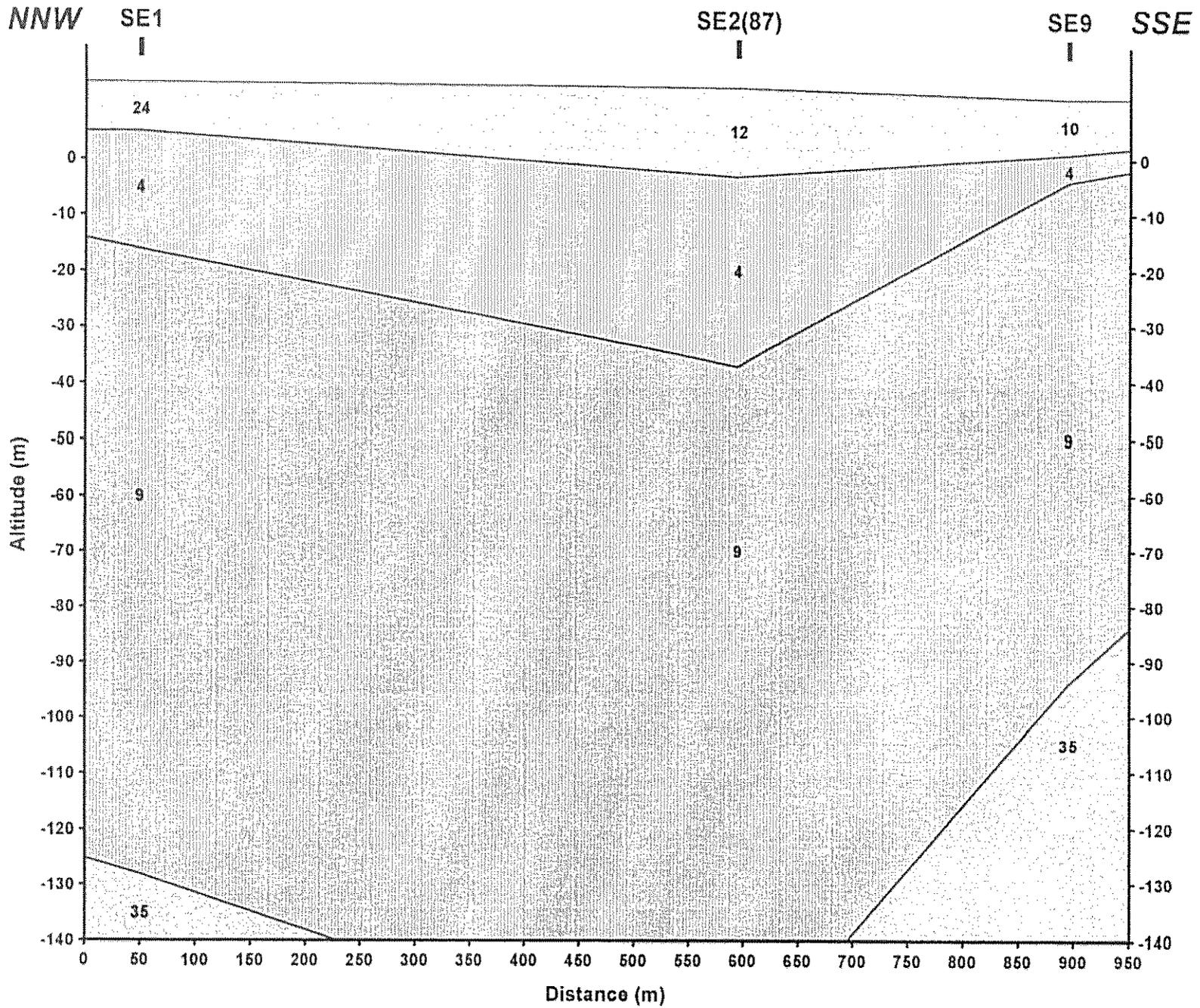
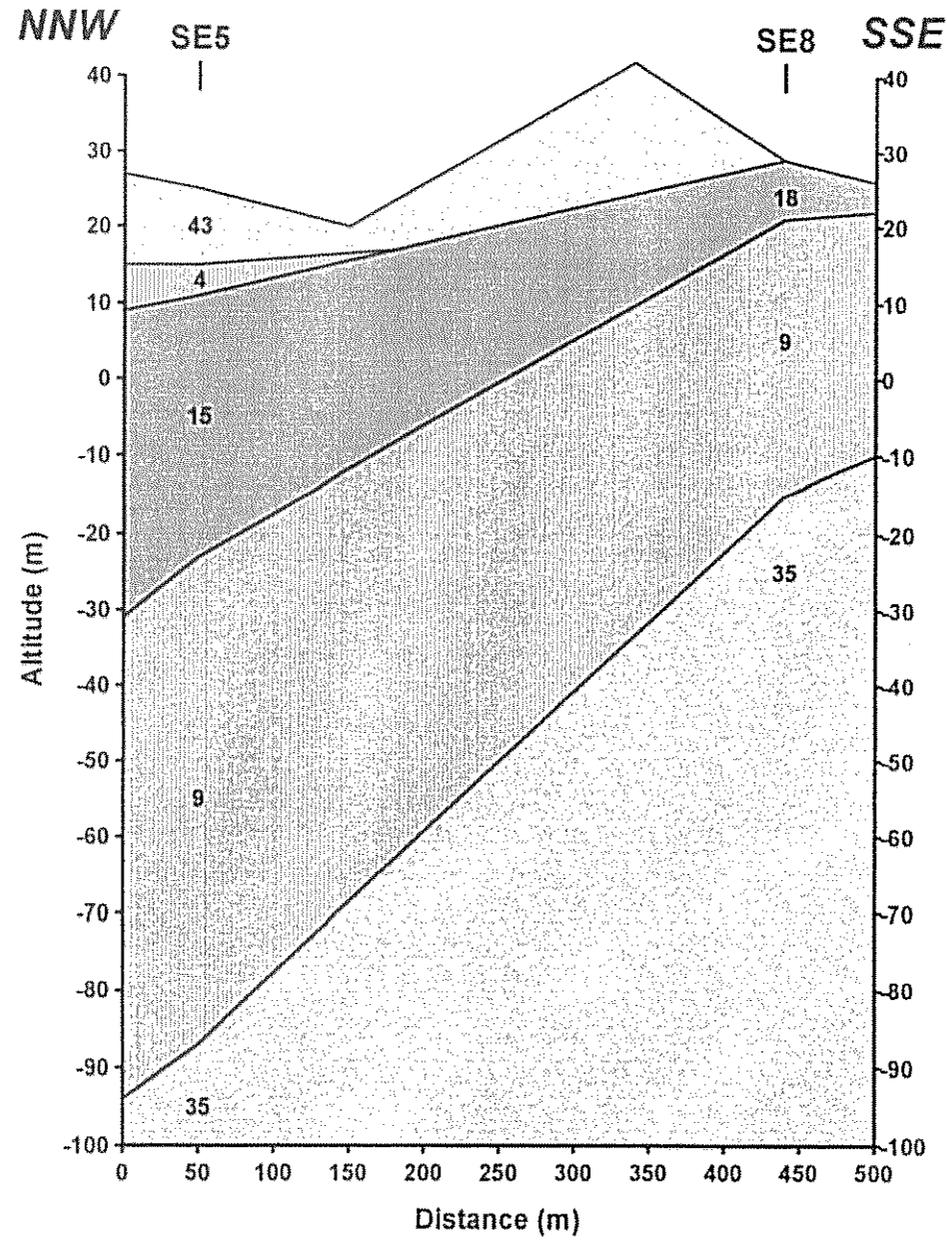


Figure A3-5b : Site de Mreréni. Coupe géoelectrique.

SITE DE MRERENI

COUPE GEOELECTRIQUE

Figure A3-5c : Site de Mréreni. Coupe géoélectrique.



SITE DE LONGONI

COUPES GEOELECTRIQUES

Figure A3-6 : Site de Longoni. Coupes géoelectriques.

