



*Cartographie quantitative*  
*de la ressource en eau souterraine*  
*Carte à 1/50 000 PLABENNEC-EST*  
*(Finistère Nord)*

Etude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 98-G-420

Mai 1999  
R 40519



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



Secrétariat  
d'Etat à l'Industrie



*Penn-ar-Bed*



agence  
de l'eau  
loire ~  
bretagne



*Cartographie quantitative*  
*de la ressource en eau souterraine*  
*Carte à 1/50 000 PLABENNEC-EST*  
*(Finistère Nord)*

Etude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 98-G-420

Mai 1999  
R 40519



**Mots clés :** Hydrogéologie, milieu fissuré, socle cristallin, Massif armoricain, altération, arène granitique, Résonance Magnétique Protonique.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Cartographie quantitative de la ressource en eau souterraine – Carte à 1/50 000 PLABENNEC-EST (Finistère Nord) – Rapport BRGM R40519, 23 p., 1 tab., 10 planches, 7 figures.

© BRGM, 1999. Ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM

## **Résumé**

Une cartographie des volumes d'eau stockée dans les réservoirs de subsurface, en contexte de socle cristallin altéré, a été réalisée sur la moitié est de la carte à 1/50 000 Plabennec (Finistère).

La méthodologie développée repose sur la modélisation géométrique des épaisseurs des horizons poreux et fissurés situés en zone saturée, et sur la détermination de la teneur en eau de chaque horizon par la méthode de Résonance Magnétique Protonique (RMP).

Les cartes réalisées permettent de visualiser la répartition spatiale des volumes d'eau souterraine contenue dans les réservoirs de subsurface (0 à 100 m de profondeur). Elles constituent un type nouveau de données utilisables d'une part dans les politiques de protection des eaux souterraines et de surface, et d'autre part pour l'exploration des eaux souterraines en vue de leur exploitation par forage.

## Sommaire

Résumé .....	3
Sommaire .....	4
Liste des figures.....	5
Liste des Tableaux et liste des planches hors-texte .....	6
<b>1. Introduction .....</b>	<b>7</b>
1.1. Contexte et objectif de l'étude .....	7
1.2. Conditions de réalisation .....	7
<b>2. Contexte géologique .....</b>	<b>8</b>
2.1. Géologie du substratum.....	8
2.2. Géomorphologie et formations superficielles.....	8
2.3. Modèle conceptuel de repartition des porosités en contexte de socle altéré .....	9
<b>3. Détermination des teneurs en eau .....</b>	<b>13</b>
3.1. introduction.....	13
3.2. interprétation des resultats RMP.....	13
<b>4. Géométrie des interfaces.....</b>	<b>16</b>
4.1. Introduction.....	16
4.2. Simulation de la surface piézométrique .....	16
4.3. Surface de base des altérites et épaisseur des altérites en place .....	18
4.4. Surface de base de l'horizon fissuré supérieur et inférieur .....	18
4.5. Détermination de l'extension et de l'épaisseur de la partie mouillée de chaque horizon.....	19
<b>5. Calcul des volumes d'eau stockée .....</b>	<b>20</b>
5.1. Eau contenue dans les altérites .....	20
5.2. Eau contenue dans l'horizon fissuré.....	20
5.3. Volume d'eau total.....	20
<b>6. Recommandations et conclusions .....</b>	<b>21</b>
6.1. Introduction.....	21
6.2. Incertitudes et calibrations.....	21
6.3. Utilisation pour la recherche des eaux souterraines en vue de leur exploitation.....	22
6.4. Utilisation pour la protection des eaux souterraines et des eaux de surface .....	22
6.5. Conclusion et perspectives .....	22

## Liste des figures

Figure 1 – Emplacement de la zone d'étude

Figure 2 - Modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine granitique (Wyns, inédit)

Figure 3 – Partie supérieure de l'horizon fissuré dans le granite de Kernilis (carrière de Tréverroc-Bihan) et estimation visuelle de la porosité

Figure 4 – Exemple du résultat d'inversion d'un sondage RMP et interprétation géologique

Figure 5 – Corrélation entre la teneur en eau et le temps de décroissance pour chaque formation géologique. (*alt* : altérites ; *sup* : horizon fissuré supérieur ; *inf* : horizon fissuré inférieur).

Figure 6 - Principe de la simulation de la surface piézométrique.

Figure 7 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface de base des thalwegs

## Liste des Tableaux

Tableau 1 – Teneurs en eau moyennes (en %) et écarts-types calculés à partir des résultats d'inversion de sondages RMP (Nb = nombre de données utilisées)

## Liste des planches hors-texte

Planche 1 – Géologie et implantation des sondages RMP

Planche 2 – Altitude simulée de la surface piézométrique

Planche 3 – Altitude de la surface de base des altérites

Planche 4 – Epaisseur des altérites en place

Planche 5 – Profondeur par rapport au sol de la base de l'horizon fissuré inférieur

Planche 6 – Extension et épaisseur de la partie mouillée des altérites et de l'horizon fissuré supérieur

Planche 7 – Volumes d'eau stockés dans les altérites (en m<sup>3</sup> par 2500 m<sup>2</sup>)

Planche 8 – Volumes d'eau stockés dans l'horizon fissuré supérieur (en m<sup>3</sup> par 2500 m<sup>2</sup>)

Planche 9 - Volumes d'eau stockés dans l'horizon fissuré inférieur (en m<sup>3</sup> par 2500 m<sup>2</sup>)

Planche 10 – Volume total d'eau stockée dans les réservoirs de subsurface (altérites + horizons fissurés supérieur et inférieur)

# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE

La présente étude, réalisée dans le cadre de la mission de Service Public du BRGM, s'inscrit dans la première phase du projet commun BRGM - Université de Rennes 1 : « Ressources du sous-sol et environnement en Bretagne : reconnaissance du sous-sol et cartographie appliquée à une gestion durable des ressources en eau souterraine dans les départements du Finistère et du Morbihan ».

*Son objectif est d'établir un modèle statique de la répartition spatiale des quantités d'eau présentes dans le sous-sol entre 0 et 100 m de profondeur.*

## 1.2. CONDITIONS DE REALISATION

La zone étudiée, située dans le Finistère nord (figure 1), correspond à la moitié est de la carte géologique à 1/50 000 de Plabennec. Le lever géologique de ce secteur a été réalisé en 1997/1998 par Erich Thomas et Jean-Marie Outin de 3<sup>o</sup> cycle de l'Université de Rennes 1. En 1998, le BRGM a réalisé une compilation des données de sondages détenues dans la banque de données du sous-sol, ainsi que des mesures de teneur en eau du sous-sol par Résonance Magnétique Protonique (Rapport BRGM R 40419).

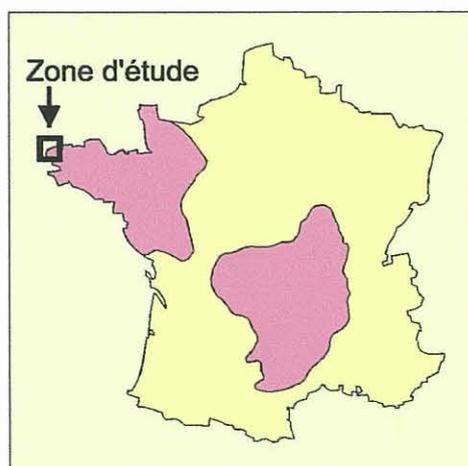


Figure 1 – Emplacement de la zone d'étude

Le présent rapport constitue la synthèse de ces premiers travaux. La modélisation spatiale des porosités, de la piézométrie et des volumes d'eau stockés a été réalisée dans l'environnement ArcView d'ESRI complété par les modules Spatial Analyst et SynArc pour ArcView, sur station de travail NT 4.0.

Compte tenu d'impératifs de temps, liés à la présence imprévue de bruit électromagnétique entraînant une augmentation importante de la durée des mesures RMP, toutes les formations géologiques présentes n'ont pas pu faire l'objet de mesures RMP. Néanmoins 67 % de la zone d'étude a été couverte, soit 181 km<sup>2</sup> pour une

superficie totale de 270 km<sup>2</sup>. Des mesures complémentaires seront réalisées en 1999 dans le cadre d'un projet de Recherche et Développement du BRGM.

Le modèle de données est présenté sous forme de cartes.

## 2. Contexte géologique

### 2.1. GEOLOGIE DU SUBSTRATUM

Les formations géologiques constituant le substratum sont formées de roches plutoniques et métamorphiques mises en places au cours du Paléozoïque, antérieurement à 300 millions d'années. La carte géologique du substratum de la zone d'étude est présentée sur la planche 1.

Les formations plutoniques comprennent des granites (granites de Kernilis, de Kersaint, de Saint-Renan), et des diorites (diorite de Ploudaniel).

Les formations métamorphiques comprennent des amphibolites (amphibolite de Lannilis), des schistes et des gneiss d'origine sédimentaire (schistes et gneiss de Lesneven, schistes briovériens, gneiss du Folgoët, gneiss de Brest, micaschistes du Conquet), et des gneiss d'origine éruptive (gneiss ocellé de Lesneven).

Un certain nombre de failles parcourent la zone d'étude, certaines étant jalonnées par des filons de quartz.

### 2.2. GEOMORPHOLOGIE ET FORMATIONS SUPERFICIELLES

La région étudiée est constituée d'un plateau incliné en pente douce vers le nord. Le point culminant (+ 130 m) est situé dans l'angle sud-est. Une ligne de crête orientée est-ouest, située dans la partie sud à la latitude de Gouesnou, sépare les eaux s'écoulant vers le sud en direction de la Rade de Brest, de celles s'écoulant vers le nord en direction de l'Aber Benoît et de l'Aber Vrac'h.

Ce plateau est recouvert d'un manteau de formations meubles d'épaisseur variable. L'essentiel de ces formations meubles correspond à des altérites qui ont été formées aux dépens des roches du substratum lors de longues périodes continentales sous climat de type tropical humide, principalement au cours de l'ère tertiaire (entre 65 et 40 Ma). Ces altérites sont comparables aux latérites actuelles ; leur épaisseur initiale était de plusieurs dizaines de mètres. Le sommet de ces paléoprofils d'altération, constitué par des cuirasses ferrugineuses dans les latérites actuelles, a été décapé par l'érosion sur la région étudiée, de sorte que ne subsiste que la partie inférieure de ces profils. Ceux-ci sont constitués de roches poreuses (isaltérites) dont les pores correspondent aux vides laissés par la dissolution des minéraux les plus solubles de la roche initiale. La porosité efficace dépend de la richesse en quartz et de la taille moyenne des grains de quartz présents dans la roche parente : ainsi les arènes granitiques, résultant de l'altération des granites, présentent une porosité d'autant plus forte que le grain de la roche initiale était

grossier (granite de Kersaint grossier par exemple), tandis que les altérites de schistes ou de gneiss fins (schistes de Lesneven) sont constituées d'argiles silteuses à faible porosité efficace.

Les autres formations superficielles comprennent les limons des plateaux, d'une épaisseur ne dépassant généralement pas 2 m, et qui ne contiennent pas de ressource en eau souterraine car ils sont situés au dessus du niveau piézométrique, et les alluvions qui ne dépassent pas quelques mètres d'épaisseur et qui sont limitées aux fonds de vallées. Compte tenu de leur faible développement sur la zone étudiée, leurs ressources en eau souterraines sont négligeables en regard de celles des altérites.

### **2.3. MODELE CONCEPTUEL DE REPARTITION DES POROSITES EN CONTEXTE DE SOCLE ALTERE**

Dans les socles anciens comme le Massif armoricain ou le Massif central, les roches, généralement métamorphiques ou intrusives, sont massives et imperméables. La présence éventuelle d'eau souterraine dépend des modifications physiques subies par ces massifs rocheux postérieurement à leur formation, et notamment de la fracturation et de l'altération.

La fracturation d'origine tectonique favorise la circulation des eaux lorsque ces fractures sont ouvertes. C'est le cas des couloirs de fracturation souvent subverticaux, dont le degré d'ouverture est lié d'une part à leur mécanisme de formation, et d'autre part à leur orientation par rapport au champ de contraintes actuel.

L'altération météorique a eu pour effet de développer une couverture meuble plus ou moins poreuse en fonction de la minéralogie de la roche mère, et, sous cette couverture meuble, une fissuration intense permettant le drainage des formations meubles sus-jacentes.

Les zones où préexistaient des réseaux de fracture d'origine tectonique permettant la circulation de l'eau ont constitué, par la multiplication des surfaces de contact entre eau et roche, des lieux privilégiés où l'action de l'altération a été décuplée. Cette addition de phénomènes (fracturation tectonique, altération et fissuration) a particulièrement fragilisé les lieux où elle s'appliquait, conduisant à la formation de couloirs fracturés et fissurés où l'altération a pénétré plus profondément. Ces couloirs constituent des drains privilégiés pour l'eau souterraine, alimentés par les horizons altérés et fissurés plus superficiels. Comme ils constituent des zones de faiblesse, ils ont été fréquemment empruntés par l'érosion lors du creusement des vallées, et se présentent dans le paysage actuel sous la forme de dépressions allongées gouvernant souvent les écoulements visibles en surface (thalwegs, vallées).

Dans cette étude, seules l'altération et la fissuration qui en découle ont été prises en compte : elles concernent globalement des surfaces et des volumes incomparablement plus importants que les couloirs fracturés qui sont, eux, des systèmes locaux, dont chacun peut être un cas particulier et dont l'étude relève de méthodes différentes.

Il est clair que les cartes de répartition des volumes d'eau dans les aquifères de subsurface (planche 10) ne prennent pas en compte les cas particuliers que sont les couloirs fracturés, dont la cartographie devra leur être superposée pour qu'ils soient complets et opérationnels pour des recherches d'eau souterraine avec des débits et des ressources économiquement intéressants.

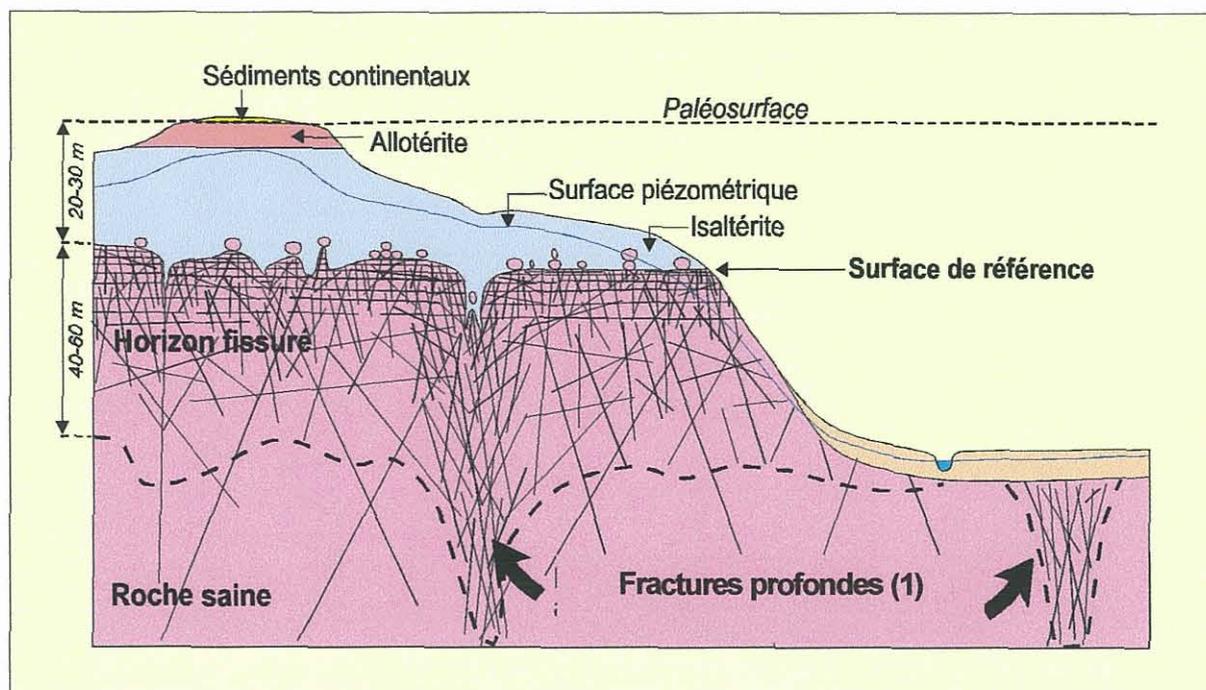
Les manteaux d'altération épais (plusieurs dizaines de mètres) ont été élaborés lors de longues périodes d'émersion sous des climats chauds et humides analogues aux climats de la zone intertropicale actuelle. Les périodes les plus favorables ont été le Crétacé inférieur ainsi que le début du Tertiaire (Paléocène à Eocène supérieur), d'une durée de 20 à 35 millions d'années chacune. La période récente (Miocène à Quaternaire) n'a donné que des altérations d'épaisseur négligeable par rapport aux altérations antérieures : en référence aux données acquises en Anjou et dans la région nantaise, on peut estimer que celles-ci ne dépassent pas quelques décimètres à quelques mètres, car la surface d'érosion qui supporte les dépôts marins miocènes et pliocènes de ces régions n'est pas altérée.

L'élaboration des manteaux d'altération suppose lors de leur formation un paysage aplani et en relief, de façon à ce que l'érosion soit incapable d'évacuer les altérites au fur et à mesure de leur formation (pente faible), et que le front d'altération puisse progresser rapidement vers le bas (écart altimétrique entre sol et niveau de base). A l'échelle régionale, pour une lithologie homogène donnée, la base des altérites est globalement parallèle à l'ancienne surface topographique. Dans le détail cependant (échelle hectométrique), cette surface de base peut s'approfondir de manière considérable le long de certains couloirs de fracturation tectonique jouant le rôle de drains préférentiels (augmentation locale de la vitesse d'altération), ou bien se réduire fortement en fonction des hétérogénéités lithologiques.

Le modèle conceptuel des propriétés physiques des altérites en contexte de socle latéritisé a été notablement amélioré ces dernières années, en particulier grâce aux résultats obtenus dans le cadre du projet de recherche et développement PRD 210 ("Carte probabiliste") du BRGM en 1997. Il est représenté de manière schématique sur la figure 2.

Un profil d'altération type comprend ainsi, de haut en bas, sous les sédiments continentaux pénécontemporains de l'altération, les horizons suivants :

- cuirasse latéritique (0 à quelques m) : rarement préservée, par suite de la troncature du profil par l'érosion ou de sa destruction par évolution vers un latosol (non représentée sur la figure 2) ;
- allotérites (quelques mètres à une dizaine de mètres) : altérite caractérisée par une réduction de volume par rapport à la roche mère initiale ; la texture de la roche mère n'est pas préservée. En contexte schisteux il s'agit d'une argile imperméable ; en contexte granitique, il s'agit d'une arène argileuse à faible perméabilité et faible porosité efficace. Dans le secteur d'étude, les allotérites ne semblent préservées qu'exceptionnellement, du fait de l'érosion miocène à quaternaire.

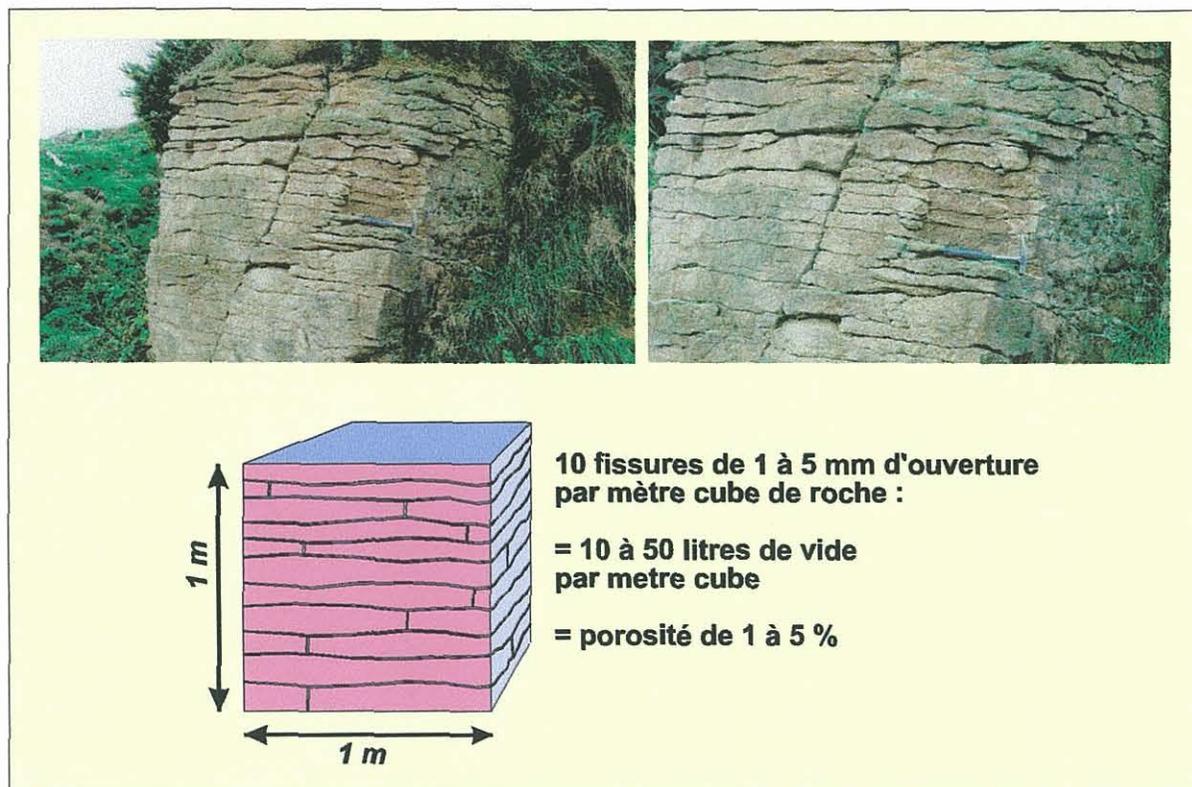


**Figure 2 - Modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine granitique (Wyns, inédit)**

- Isaltérites (plusieurs dizaines de mètres) : altérite isovolumique où la texture de la roche initiale est préservée. Les éléments chimiques évacués par dissolution sont remplacés par des vides. Il en résulte une porosité importante, permettant à cet horizon de jouer un rôle capacitif vis à vis des eaux d'infiltration. En contexte schisteux, cet horizon, à dominante silto-argileuse, est faiblement perméable bien que très poreux. En contexte granitique, il correspond à une arène sableuse beaucoup plus perméable. A la base des isaltérites se rencontrent fréquemment des boules granitiques résiduelles, de diamètre souvent plurimétrique. Lorsqu'elles sont en place, elles sont en général isolées dans leur matrice d'arène. Lorsque les arènes ont été évacuées par l'érosion, les boules deviennent affleurantes et peuvent être plus ou moins remaniées sur les versants par gravité.

- Zone fissurée (40 à 50 m) : cet horizon, situé dans la partie supérieure du substratum, est caractérisé par une très forte fissuration (figure 3) dont l'intensité décroît vers le bas. Cette fissuration résulte de l'éclatement de la roche sous l'effet des contraintes générées par les changements de phase minéralogique, principalement l'hydratation des minéraux ferro-magnésiens (biotite, chlorite) qui évoluent vers des minéraux argileux avec augmentation de volume, ainsi que l'oxydation des sulfures présents dans la roche. Dans les 10 premiers mètres, la distance moyenne entre fissures est décimétrique et celles-ci sont ouvertes. L'espacement entre fissures (et donc leur probabilité d'interconnexion) diminue au fur et à mesure que l'on descend dans le profil.

<sup>1</sup> Les fractures profondes, générées par les contraintes tectoniques et développées par les processus d'altération liés aux circulations d'eau, sont en général des drains privilégiés. Les forages qui y sont implantés peuvent souvent produire des débits importants; les ressources ainsi mobilisables dépendent cependant étroitement des relations et connexions entre ces réseaux profonds, conducteurs, et les altérites, capacitives. Dans le schéma ci-dessus, le réseau des fractures profondes symbolisé à droite ne peut mobiliser que des ressources limitées, à moins que, plus à l'amont, il soit relié à un ensemble capacitif.



**Figure 3 – Partie supérieure de l'horizon fissuré dans le granite de Kernilis (carrière de Tréverroc-Bihan) et estimation visuelle de la porosité**

La partie supérieure de cet horizon fissuré constitue un aquifère à perméabilité importante, alimenté par les isaltérites sus-jacentes lorsqu'elles sont conservées. Dans le Massif armoricain, la majorité des puits fermiers sont alimentés par cet aquifère ; une partie des sources de versant se situe également dans cet horizon.

Lorsque la roche-mère est isotrope (cas des granites), cet horizon est caractérisé par une fissuration horizontale caractéristique (figure 3). Cette orientation préférentielle résulte des caractéristiques du déviateur de contraintes généré par l'altération : la dilatation étant impossible dans le sens horizontal, les 2 composantes principales du tenseur ( $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ ) seront horizontales, tandis que la composante minimale ( $\sigma_3$ ) sera verticale ; dans un tel système de contraintes on ouvre principalement des fentes horizontales. Le même phénomène s'applique à la base des arènes, qui présentent un feuilletage horizontal caractéristique : ce feuilletage traduit un resserrement centimétrique à millimétrique entre joints ; cet espacement étant du même ordre de grandeur que celui du grain de la roche, tous les grains sont atteints par l'altération : il s'agit du début de l'arénisation.

**Remarque :** Dans l'ensemble de ce rapport, nous réserverons le terme de « *fissures* » pour les ouvertures de la roche générées par les processus d'altération, et le terme de « *fractures* » pour les ouvertures d'origine tectonique. Le terme « *milieu fissuré* », lorsqu'il s'agit d'eau souterraine, désigne un milieu discontinu rendu perméable par un

réseau de discontinuités de directions diverses et en partie interconnectées, quelle que soit l'origine de ces discontinuités (fissures ou fractures).

### 3. Détermination des teneurs en eau

#### 3.1. INTRODUCTION

Les teneurs en eau ont été déterminées par sondages RMP (Résonance Magnétique Protonique) avec le dispositif NUMIS d'Iris Instruments. Cette méthode permet d'obtenir, par mesure depuis la surface, un profil vertical de la teneur en eau moyenne du sous-sol jusqu'à une profondeur de 50 à 100 m. Une quinzaine de sondages RMP ont fourni des résultats interprétables. Ces résultats sont présentés dans le rapport BRGM R 40419, auquel on se référera également pour le principe de la méthode. La position des sondages RMP utilisés est donnée sur la planche 1.

#### 3.2. INTERPRETATION DES RESULTATS RMP

Dans le contexte géologique étudié, le profil vertical habituel des teneurs en eau obtenu par inversion des données RMP montre (figure 4) :

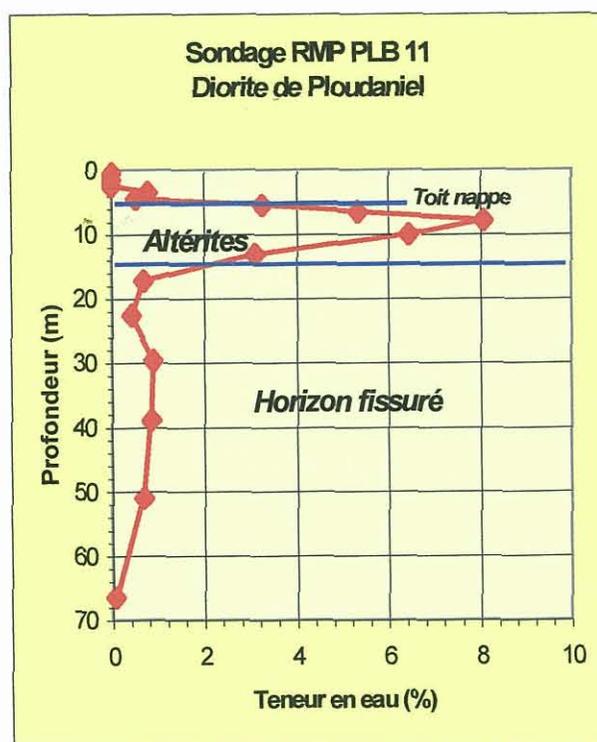


Figure 4 – Exemple du résultat d'inversion d'un sondage RMP et interprétation géologique

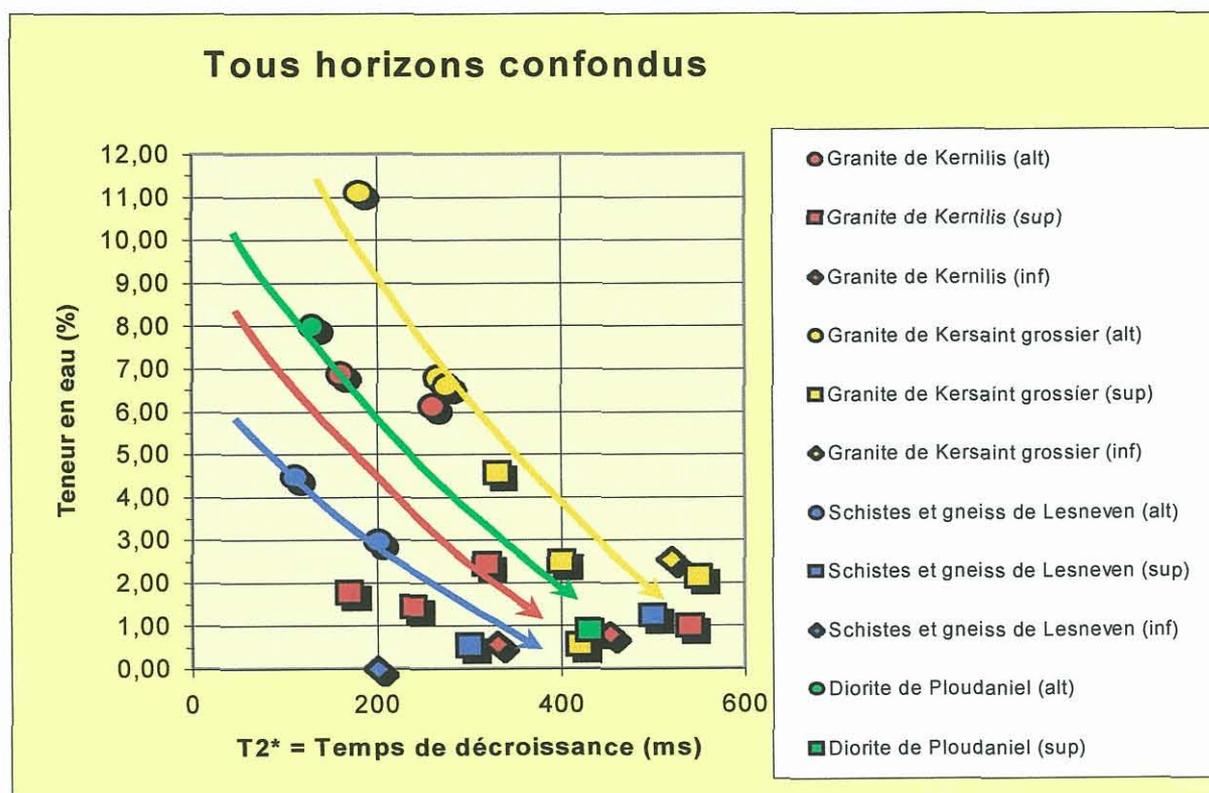
- au sommet, une zone à teneur en eau nulle, correspondant à la tranche de terrains située au-dessus du niveau piézométrique ;

- un premier pic assez intense correspondant à la teneur en eau des altérites meubles ;
- un second pic de faible intensité sur une épaisseur de 20 à 40 m, correspondant à la teneur en eau de l'horizon fissuré ; ce pic est généralement dissymétrique, la teneur en eau décroissant vers le bas ;
- une zone profonde à teneur en eau faible ou nulle, correspondant à la roche saine située en dessous de l'horizon fissuré.

Le report sur un diagramme binaire des teneurs en eau en fonction du temps de décroissance  $T_2^*$  calculés après inversion (figure 5) montre une nette différenciation de ces paramètres en fonction de la lithologie. Au sein d'une même formation géologique, on observe par ailleurs une corrélation négative de ces deux variables : le temps de décroissance augmente lorsque la teneur en eau diminue. Si l'on différencie les points en fonction de l'horizon d'altération, on peut observer que les points à forte teneur en eau et faible temps de décroissance correspondent aux altérites meubles, tandis que les points à faible teneur en eau et fort temps de décroissance correspondent à la partie profonde de l'horizon fissuré.

Sachant que le temps de décroissance  $T_2^*$  est proportionnel à la taille des pores et que dans ce type de milieu les pores sont connectés,  $T_2^*$  est donc un reflet partiel de la perméabilité. Les courbes de tendance de la figure 5 traduisent donc le changement de type de porosité du haut en bas du profil d'altération :

- le sommet des profils (altérites meubles) est dominé par une porosité de pores, avec teneur en eau importante mais perméabilité faible ;
- la base des profils (horizon fissuré) est dominée par une porosité de fracture, avec une teneur en eau faible mais une perméabilité plus importante.



**Figure 5 – Corrélation entre la teneur en eau et le temps de décroissance pour chaque formation géologique.**

*(alt : altérites ; sup : horizon fissuré supérieur ; inf : horizon fissuré inférieur).*

On notera par ailleurs que les roches à gros grain (granite de Kersaint grossier par exemple) présentent des valeurs du couple teneur en eau -  $T_2^*$  les plus fortes, alors que les roches à grain fin (schistes et gneiss de Lesneven) présentent pour ce même couple les valeurs les plus faibles. On peut s'attendre en conséquence à ce que, pour les formations géologiques étudiées, les aquifères de subsurface situés dans le granite de Kersaint grossier présentent les valeurs de transmissivité les plus élevées.

Les teneurs en eau pour chaque horizon de chaque formation géologique ont été obtenues en calculant la moyenne des teneurs en eau maximales de chaque pic. Le tableau 1 ci-après présente les résultats de ces calculs.

	Altérites			Zone fissurée sup.			Zone fissurée inf.		
	% eau	Ec. type	Nb	% eau	Ec. type	Nb	% eau	Ec. type	Nb
Granite de Kersaint grossier	8,13	2,08	3	2,13	1,59	4	1,05	1,15	4
Granite de Kersaint fin				0,25		1	0,00		1
Granite de Kernilis	6,07	2,79	2	1,55	1,07	5	0,68	0,79	4
Diorite de Ploudaniel	8,00		1	0,89		1	0,60		1
Schistes et gneiss de Lesneven	3,04	1,41	3	1,10	0,34	4	0,36	0,45	3

**Tableau 1 – Teneurs en eau moyennes (en %) et écarts-types calculés à partir des résultats d'inversion de sondages RMP (Nb = nombre de données utilisées)**

## 4. Géométrie des interfaces

### 4.1. INTRODUCTION

La détermination des volumes d'eau contenus dans des réservoirs superposés nécessite de connaître la géométrie des interfaces limitant ces réservoirs ainsi que celle de la surface piézométrique, le croisement de ces différentes surfaces permettant de déterminer les volumes mouillés, c'est à dire situés dans la zone saturée.

### 4.2. SIMULATION DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE

En l'absence de carte régionale de la surface piézométrique, il a été nécessaire de simuler celle-ci à partir du MNT et de mesures ponctuelles en forage.

La surface piézométrique peut être considérée comme affleurante dans les thalwegs à cours d'eau permanents, qui constituent les exutoires de la nappe. La surface piézométrique remonte sous les plateaux, de sorte qu'elle est toujours comprise dans l'intervalle limité vers le haut par la surface topographique, et vers le bas par la surface-enveloppe de la base des thalwegs (figure 6).

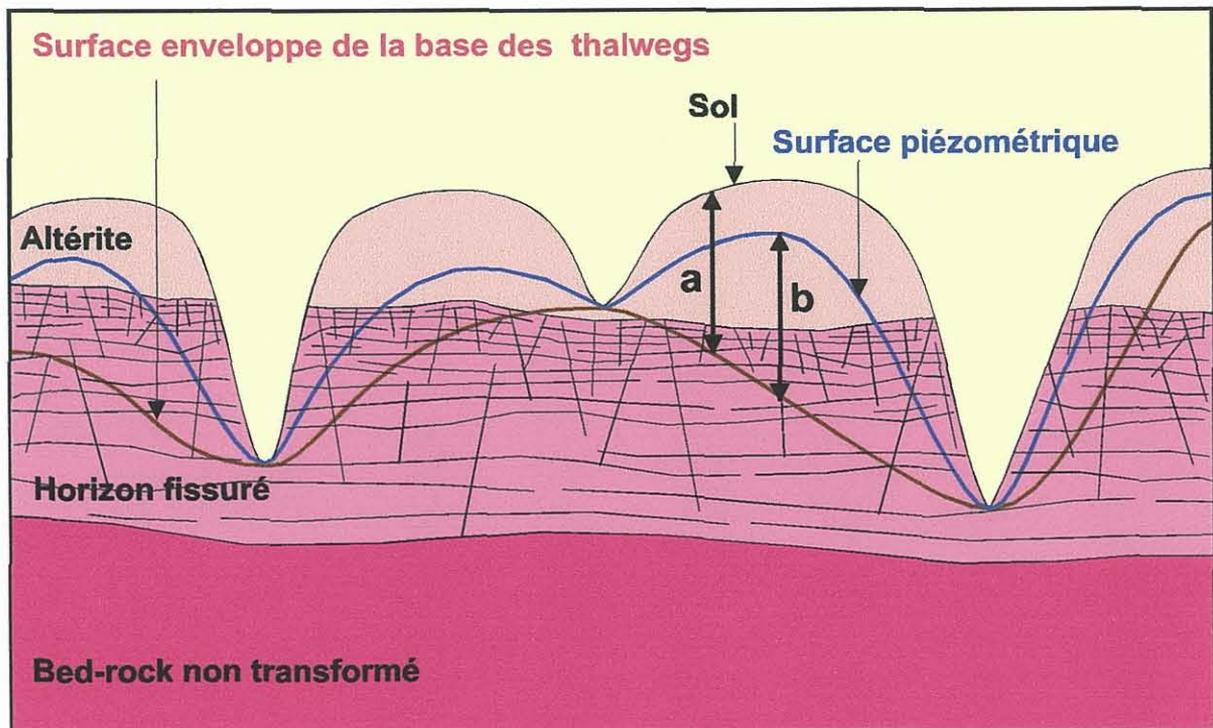


Figure 6 - Principe de la simulation de la surface piézométrique.

La surface topographique nous est donnée par le MNT. La surface-enveloppe de la base des thalwegs a été construite de la manière suivante :

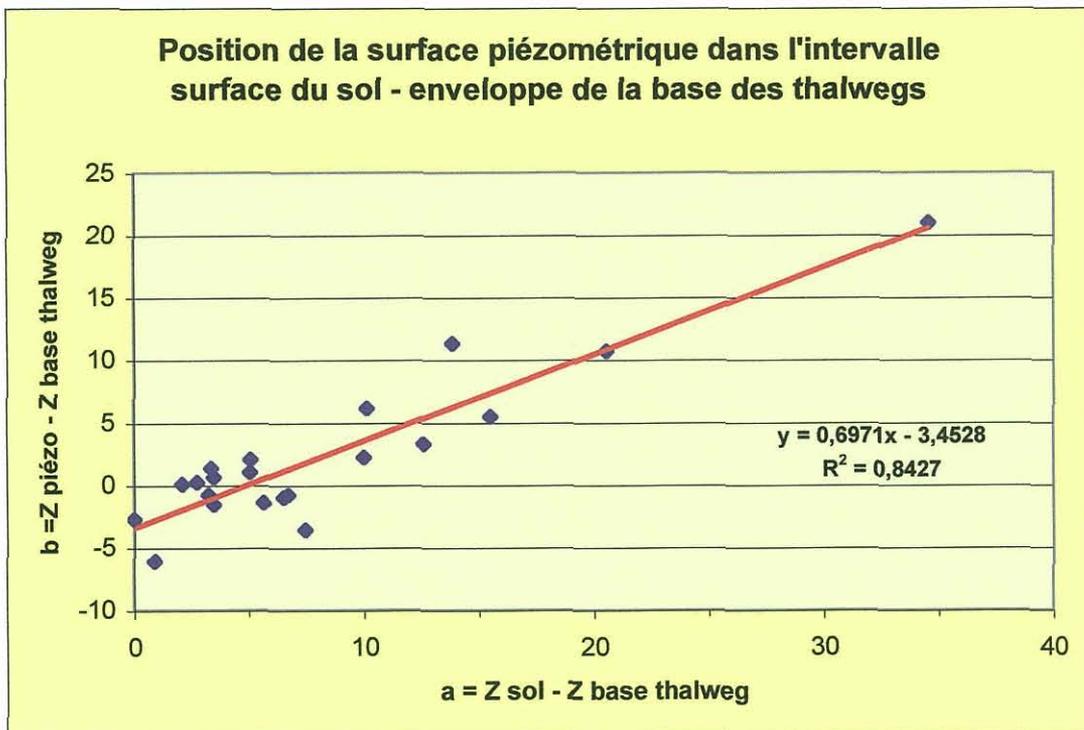
- extraction automatique du réseau de drainage à partir du MNT,
- transformation du réseau de drainage en semis de points,
- valorisation de l'altitude pour chaque point du semis précédent
- krigeage simple avec variogramme selon un modèle sphérique.

Sur la zone d'étude, une vingtaine de points de mesures piézométriques étaient disponibles. Pour chaque point ont été valorisés l'altitude du sol et l'altitude de la surface-enveloppe de la base des thalwegs. Dans un diagramme binaire (figure 7) a été représentée, pour chaque point mesuré, la dénivellation entre la surface piézométrique et la surface de base des thalwegs (**b** sur la figure 6) en fonction de la dénivellation entre la surface topographique et la surface de base des thalwegs (**a** sur la figure 6).

Les points expérimentaux s'alignent (figure 7) selon une droite de régression d'équation :

$$y = -3.4528 + 0.6971 * x$$

avec  $R^2 = 0.8427$



**Figure 7 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface de base des thalwegs**

Cette équation permet de calculer directement l'altitude de la surface piézométrique à partir du MNT et de l'altitude de la surface-enveloppe de la base des thalwegs. A 80 % environ d'intervalle de confiance, l'erreur sur l'altitude est de  $\pm 2,5$  m, ce qui est acceptable s'agissant d'une simulation à cette échelle. L'ordonnée à l'origine négative (-3,45 m), signifiant que le niveau piézométrique est statistiquement situé sous le niveau du fond des thalweg, est dûe au fait que les thalwegs ayant été extraits automatiquement à partir du MNT, ceux-ci comprennent aussi bien des thalwegs à cours d'eau permanent que des thalwegs secs.

La carte de l'altitude simulée de la surface piézométrie est présentée sur la planche 2 hors-texte.

### **4.3. SURFACE DE BASE DES ALTERITES ET EPAISSEUR DES ALTERITES EN PLACE**

La géométrie de la surface de base des altérites meubles a été obtenue par krigeage avec variogramme à partir des données de 225 forages (archivés à la banque des données du sous-sol : BSS) répartis sur la zone d'étude, complétées par 91 données d'affleurement. L'altitude de cette surface est présentée sur la planche 3 hors-texte. Cette carte montre globalement une inclinaison de la surface en direction du nord, avec un certain nombre de cuvettes (notamment dans les vallées des Abers, ainsi qu'au sud de Guipavas, où la base des altérites est effondrée entre deux failles orientées N. 80° E). La planche 3 donne également l'emplacement des forages et des points d'observation ayant servi à obtenir cette carte.

La carte de l'extension et de l'épaisseur des altérites en place (planche 4) a été réalisée par différence entre l'altitude du sol et l'altitude de la base des altérites. Elle montre que globalement les altérites sont d'épaisseur relativement faible (de l'ordre d'une dizaine de mètres en moyenne), avec des valeurs maximales (plus de 35 m) à l'ouest de Gouesnou et au sud de Guipavas.

### **4.4. SURFACE DE BASE DE L'HORIZON FISSURE SUPERIEUR ET INFERIEUR**

Pour tenir compte de la décroissance vers le bas de la teneur en eau de l'horizon fissuré, celui-ci a été partagé en deux parties de 20 m d'épaisseur chacune, appelées horizon fissuré supérieur et inférieur, cette épaisseur ayant été estimée globalement à partir des résultats d'inversion RMP. La surface de base de chacune de ces parties a été obtenue en diminuant respectivement de 20 m et 40 m l'altitude de la surface de base des altérites (toit de l'horizon fissuré).

La planche 5 présente la profondeur par rapport au sol de la base de l'horizon fissuré inférieur, qui permet d'avoir un aperçu de la profondeur minimale à atteindre pour traverser l'ensemble de l'aquifère de subsurface (altérites + horizons fissurés supérieur et inférieur).

#### **4.5. DETERMINATION DE L'EXTENSION ET DE L'ÉPAISSEUR DE LA PARTIE MOUILLÉE DE CHAQUE HORIZON**

L'extension et l'épaisseur de la partie mouillée de chacun des 3 horizons (altérites, horizon fissuré supérieur et horizon fissuré inférieur) ont été obtenus par croisement des différentes interfaces avec la surface piézométrique. Les épaisseurs de la partie mouillée (= située en zone saturée) des altérites et de l'horizon fissuré supérieur sont représentées sur la planche 6. Cette carte montre qu'une faible tranche d'altérite est située en zone saturée, hormis dans la partie sud-ouest de la zone d'étude. La partie inférieure de l'horizon fissuré est située presque entièrement en zone saturée et n'a pas été représentée.

## **5. Calcul des volumes d'eau stockée**

### **5.1. EAU CONTENUE DANS LES ALTERITES**

La carte des volumes d'eau contenue dans les altérites est présentée sur la planche 7. Elle a été obtenue en multipliant, pour chaque formation géologique, l'épaisseur d'altérites en zone saturée par la surface de la maille (50 x50 m, soit 2500 m<sup>2</sup>) et par la teneur en eau des altérites de la formation considérée, donnée par le tableau 1. Les valeurs sont donc données en m<sup>3</sup>/2500 m<sup>2</sup>. Les valeurs maximales sont comprises entre 3000 et 4500 m<sup>3</sup>/2500 m<sup>2</sup>, mais sont de faible extension, car l'épaisseur d'altérites située en zone saturée est généralement faible.

### **5.2. EAU CONTENUE DANS L'HORIZON FISSURE**

Les cartes des volumes d'eau contenue dans l'horizon fissuré supérieur et inférieur, établies selon le même principe, sont présentées respectivement sur les planches 8 et 9. Les valeurs maximales décroissent en descendant vers la base de l'horizon (respectivement 1000 et 650 m<sup>3</sup>/2500 m<sup>2</sup>), car la densité de fissuration diminue vers le bas ; par contre la superficie de ces zones à valeurs maximales est importante, car l'essentiel de l'horizon fissuré est situé en zone saturée.

### **5.3. VOLUME D'EAU TOTAL**

La planche 10 présente les volumes d'eau contenue dans l'ensemble des horizons d'altération (altérites et horizon fissuré supérieur et inférieur). Elle a été réalisée en additionnant les valeurs des trois cartes précédentes (planches 7, 8 et 9). La comparaison de cette carte avec la géologie du substratum (planche 1) montre que, parmi les formations étudiées, c'est le granite de Kersaint grossier qui présente les réserves en eau maximales.

## 6. Recommandations et conclusions

### 6.1. INTRODUCTION

Cette étude avait pour objet de démontrer la faisabilité d'une cartographie directe des volumes de la ressource en eau souterraine des horizons d'altération en contexte de socle altéré. Cette approche nouvelle a été rendue possible par l'utilisation de la technologie récente de la Résonance Magnétique Protonique, qui permet la mesure depuis la surface du profil des teneurs en eau du sous-sol. Elle a en outre bénéficié d'un renouveau conceptuel de la connaissance et du fonctionnement hydrogéologique des horizons d'altération du socle, acquis dans le cadre d'un projet de Recherche du BRGM, qui a permis leur modélisation géométrique.

### 6.2. INCERTITUDES ET CALIBRATIONS

Les cartes finales des volumes d'eau contenue dans les différents horizons sont entachées d'un certain nombre d'incertitudes, dont nous listons ci-dessous les principales composantes :

- En l'absence d'un réseau de mesures piézométriques dense, l'altitude de la nappe a dû être simulée à partir d'une vingtaine de mesures seulement. C'est probablement l'une des composantes principales de l'incertitude sur le résultat final.
- Les teneurs en eau ont été déterminées par lecture des valeurs maximales des pics sur les courbes des résultats d'inversion RMP pour chaque horizon. Chaque point de mesure correspondant à l'intégration des valeurs moyennes des teneurs en eau sur une fenêtre glissante d'épaisseur de plus en plus grande vers le bas, la détermination exacte de ces teneurs en eau est difficile, et devrait faire l'objet, pour une estimation plus précise, de calibration en forage.
- La précision de la géométrie des différentes interfaces géologiques dépend principalement du nombre de points d'observations, soit depuis la surface, soit en forage. La fiabilité de cette géométrie est donc moins bonne dans les secteurs à faible densité d'information, et peut influencer également de manière importante sur le résultat final.
- Enfin, le nombre de sondages RMP pour chaque formation géologique reste relativement limité, ce qui entraîne des écarts types relativement importants sur les moyennes des teneurs en eau par formation (voir tableau 1). Un plus grand nombre de sondages RMP, complétés par une calibration sur forages, permettrait d'améliorer sensiblement la représentativité des mesures, et donc la qualité du résultat final.

Compte tenu de ces réserves, les valeurs absolues des volumes d'eau présentées sur les cartes finales sont à considérer comme des ordres de grandeur. Par contre la position géographique des réserves d'eau semble mieux établie, à condition toutefois que l'erreur sur l'altitude de la surface piézométrique soit faible.

### **6.3. UTILISATION POUR LA RECHERCHE DES EAUX SOUTERRAINES EN VUE DE LEUR EXPLOITATION**

Les cartes finales présentent les volumes d'eau libre (porosité utile) située dans les réservoirs de subsurface, sans préjuger des perméabilités qui pour l'instant ne peuvent être estimées qu'en forage. Il serait donc déraisonnable d'utiliser directement ces cartes pour implanter, sans autre étude, des forages de recherche d'eau. Dans ce type de contexte géologique, les débits importants ( $> 10 \text{ m}^3/\text{h}$ ) sont obtenus dans des fractures drainantes d'origine tectonique, alimentées et mises en charge par les réservoirs de subsurface étudiés ici.

*La recherche d'eau souterraine passe donc par l'identification de ces fractures drainantes par les moyens appropriés (photo-interprétation, émanométrie radon, reconnaissance géophysique). Les meilleurs débits devraient être obtenus dans des fractures ouvertes traversant les zones de ressource en eau maximale.*

### **6.4. UTILISATION POUR LA PROTECTION DES EAUX SOUTERRAINES ET DES EAUX DE SURFACE**

Les cartes réalisées donnent une vision probablement correcte de la répartition spatiale des ressources en eau souterraine. Elles peuvent donc constituer un atout important dans la mise en œuvre d'une politique de protection de ces ressources, dans la mesure où elle permettent un zonage du territoire.

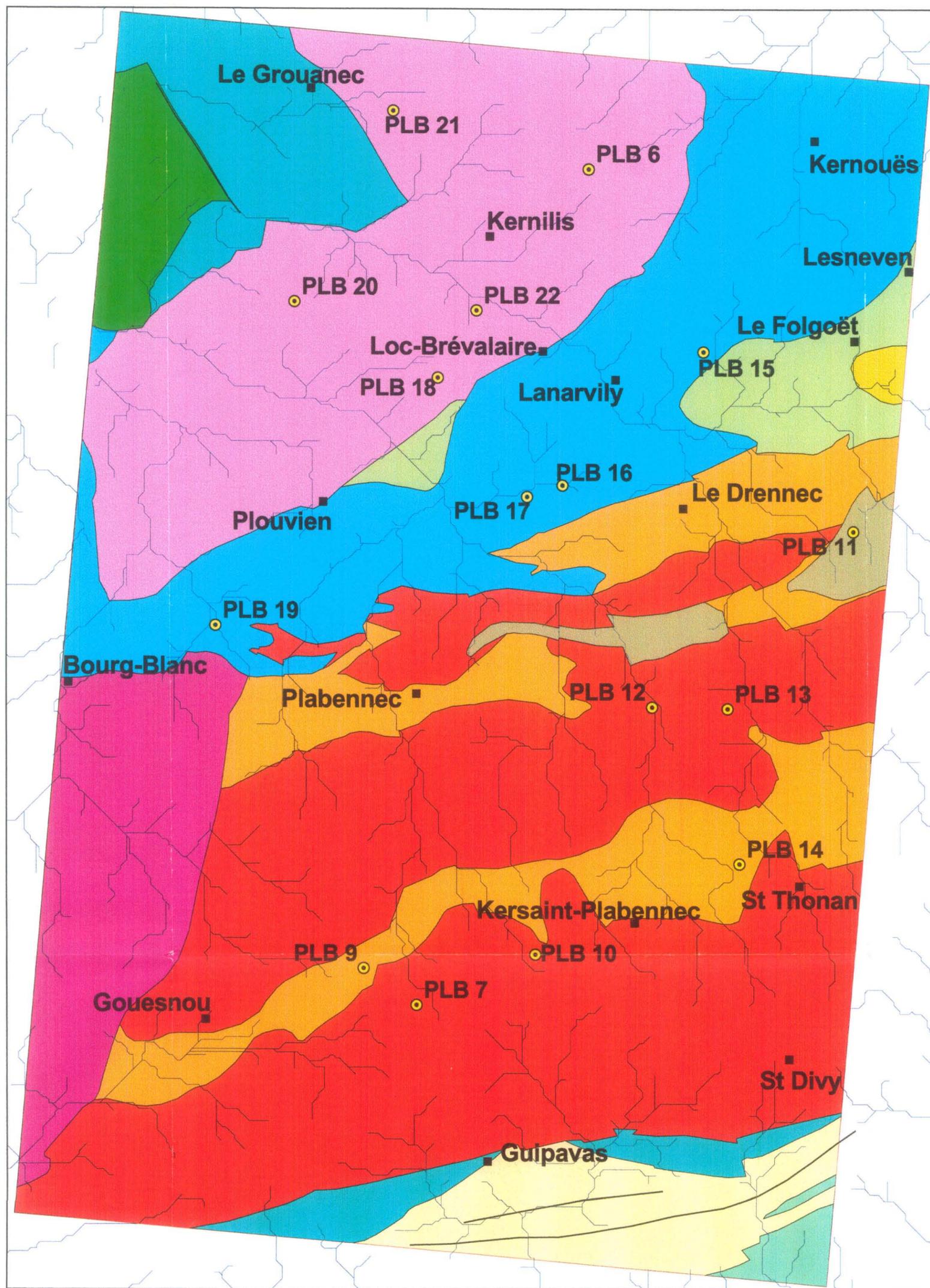
Sachant que le débit d'étiage des rivières est fourni par l'écoulement de la nappe contenue dans les réservoirs de subsurface, la connaissance de la répartition spatiale des volumes d'eau stockée dans ces réservoirs constitue également un progrès notable dans la compréhension des relations spatiales nappe – rivières, notamment en vue de l'amélioration de la qualité des eaux des rivières et des estuaires : la lecture de la carte de la planche 10 permet de déduire de manière immédiate que, parmi les formations géologiques étudiées ici, c'est le granite de Kersaint grossier, situé dans la moitié sud de la zone d'étude, qui contribue le plus aux débits d'étiage de l'Aber Vrac'h et de l'Aber Benoît.

### **6.5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

La connaissance de la répartition spatiale des eaux souterraines acquises dans le cadre de cette étude, même si elle est imparfaite, peut être considérée comme un document d'orientation pour la gestion et la protection des eaux souterraines et des eaux de surface en contexte de socle ancien.

En étendant les données acquises à l'ensemble d'un bassin-versant, il devient en effet possible de modéliser de manière quantitative le fonctionnement hydrologique de ce bassin-versant en déterminant de façon relativement détaillée quelles sont les zones qui contribuent le plus au débit d'étiage des rivières. Une telle étude intégrée serait la meilleure validation de la méthodologie développée ici.

La cartographie de la répartition spatiale des ressources en eau souterraine peut constituer un atout majeur d'une politique de protection de la qualité des nappes et des eaux de rivières. Elle peut en outre contribuer notablement à orienter l'exploration des eaux souterraines en vue de leur exploitation dans les meilleures conditions de préservation de la qualité de la ressource.



RESSOURCES DU SOUS-SOL ET ENVIRONNEMENT EN BRETAGNE

RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE  
DE LA CARTE PLABENNEC-EST  
(FINISTERE)

PLANCHE 1

Géologie et implantation des sondages RMP



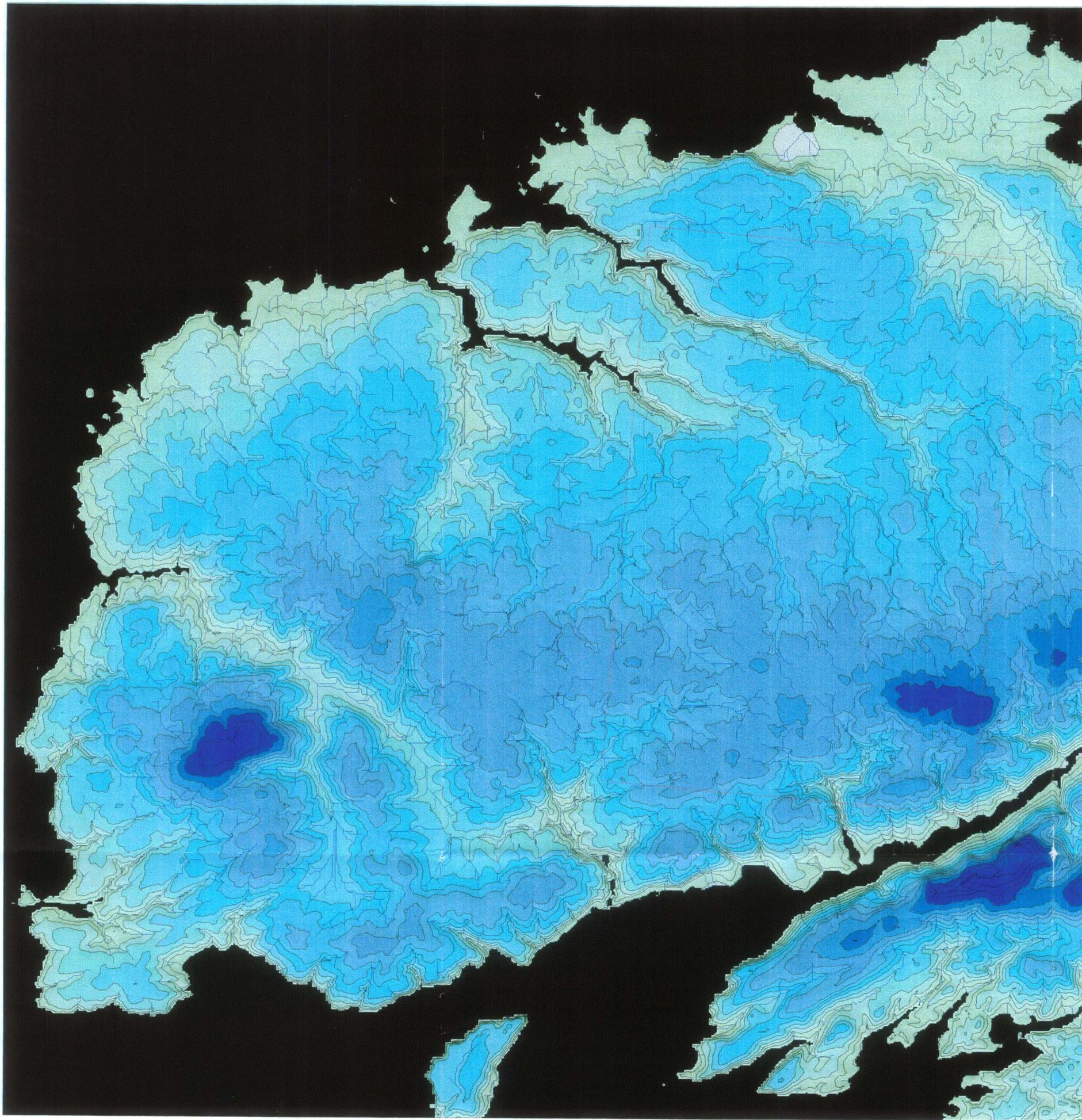
Rapport BRGM R 40519

mars 1999

- Villes.shp
- Plabennec est
- Sondage RMP
- ~ Réseau de thalwegs
- ~ Failles
- Géologie.shp
- Amphibolite de Lannilis
- Briovérien
- Diorite de Ploudaniel
- Gneiss de Brest
- Gneiss de Lesneven
- Gneiss du Folgoët
- Gneiss oillé de Lesneven
- Granite de Kernilis
- Granite de Kersaint fin
- Granite de Kersaint grossier
- Granite de Saint Renan
- Micaschiste du Conquet



0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Kilomètres



RESSOURCES DU SOUS-SOL ET ENVIRONNEMENT EN BRETAGNE

RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE  
DE LA CARTE PLABENNEC-EST  
(FINISTERE)

**PLANCHE 2**

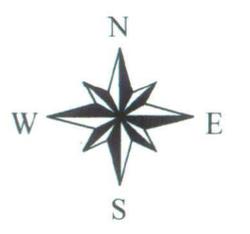
**Altitude simulée de la surface piézométrique  
dans le Finistère nord**

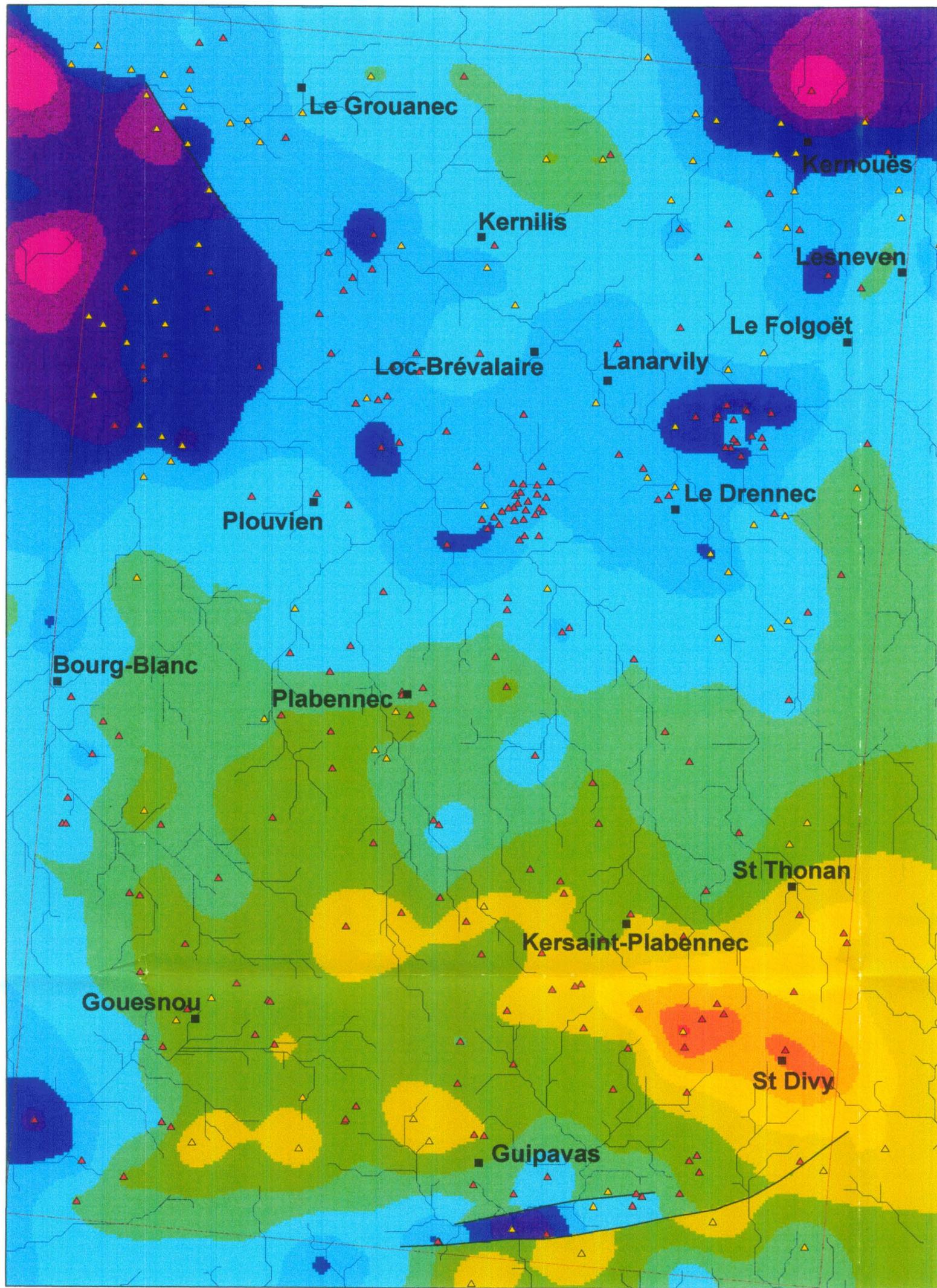


Rapport BRGM R 40519

mars 1999

- Plabennec est
- Réseau de thalwegs
- Piezoct.shp
- Altitude de la surface piézométrique (m)
- 0 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 110
- 110 - 120
- 120 - 130
- 130 - 140
- 140 - 150
- Pas de données





RESSOURCES DU SOUS-SOL ET ENVIRONNEMENT EN BRETAGNE

RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE  
DE LA CARTE PLABENNEC-EST  
(FINISTÈRE)

**PLANCHE 3**

**Altitude de la surface de base des altérites**

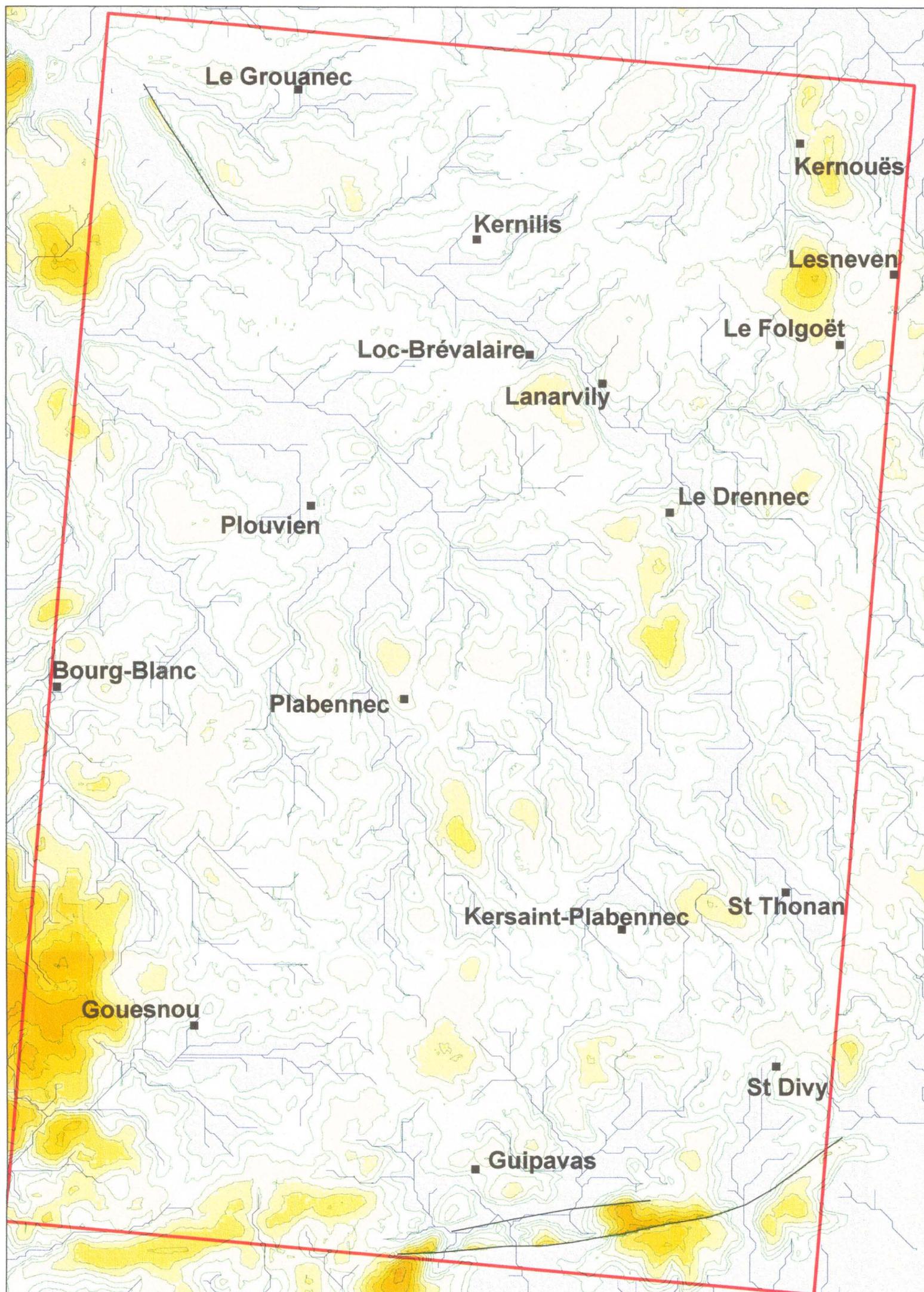


Rapport BRGM R 40519

mars 1999

- Villes.shp
  - Plabennec est
  - ▲ Affleurement
  - ▲ Forage
  - Réseau de thalwegs
  - Failles
- Altitude de la base des altérites
- 0 - 10
  - 10 - 20
  - 20 - 30
  - 30 - 40
  - 40 - 50
  - 50 - 60
  - 60 - 70
  - 70 - 80
  - 80 - 90
  - 90 - 100
  - 100 - 110
  - 110 - 120
  - 120 - 130
  - Pas de données





RESSOURCES DU SOUS-SOL ET ENVIRONNEMENT EN BRETAGNE

RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE  
DE LA CARTE PLABENNEC-EST  
(FINISTERE)

**PLANCHE 4**

**Epaisseur des altérites en place**

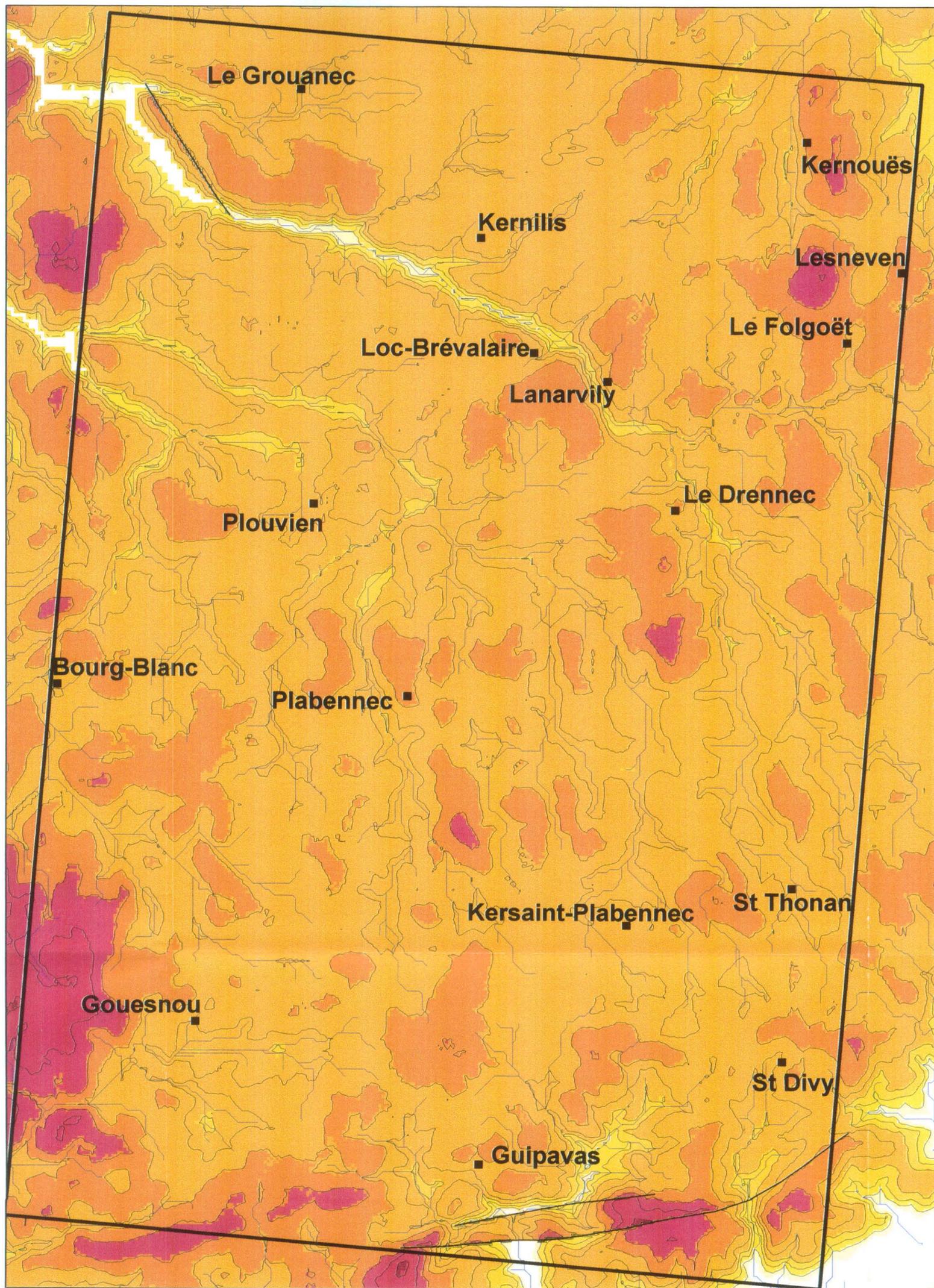


Rapport BRGM R 40519

mars 1999

- Courbes isovaleurs (équidistance 5 m)
- Villes.shp
- Plabennec est
- Réseau de thalwegs
- base altérites.shp
- Failles
- Epaisseur des altérites**
- 0 - 5
- 5 - 10
- 10 - 15
- 15 - 20
- 20 - 25
- 25 - 30
- 30 - 35
- 35 - 40
- 40 - 45
- Absence d'altérites





RESSOURCES DU SOUS-SOL ET ENVIRONNEMENT EN BRETAGNE

RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE  
DE LA CARTE PLABENNEC-EST  
(FINISTERE)

**PLANCHE 5**

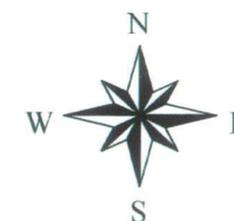
**Profondeur par rapport au sol  
de la base de l'horizon fissuré inférieur**



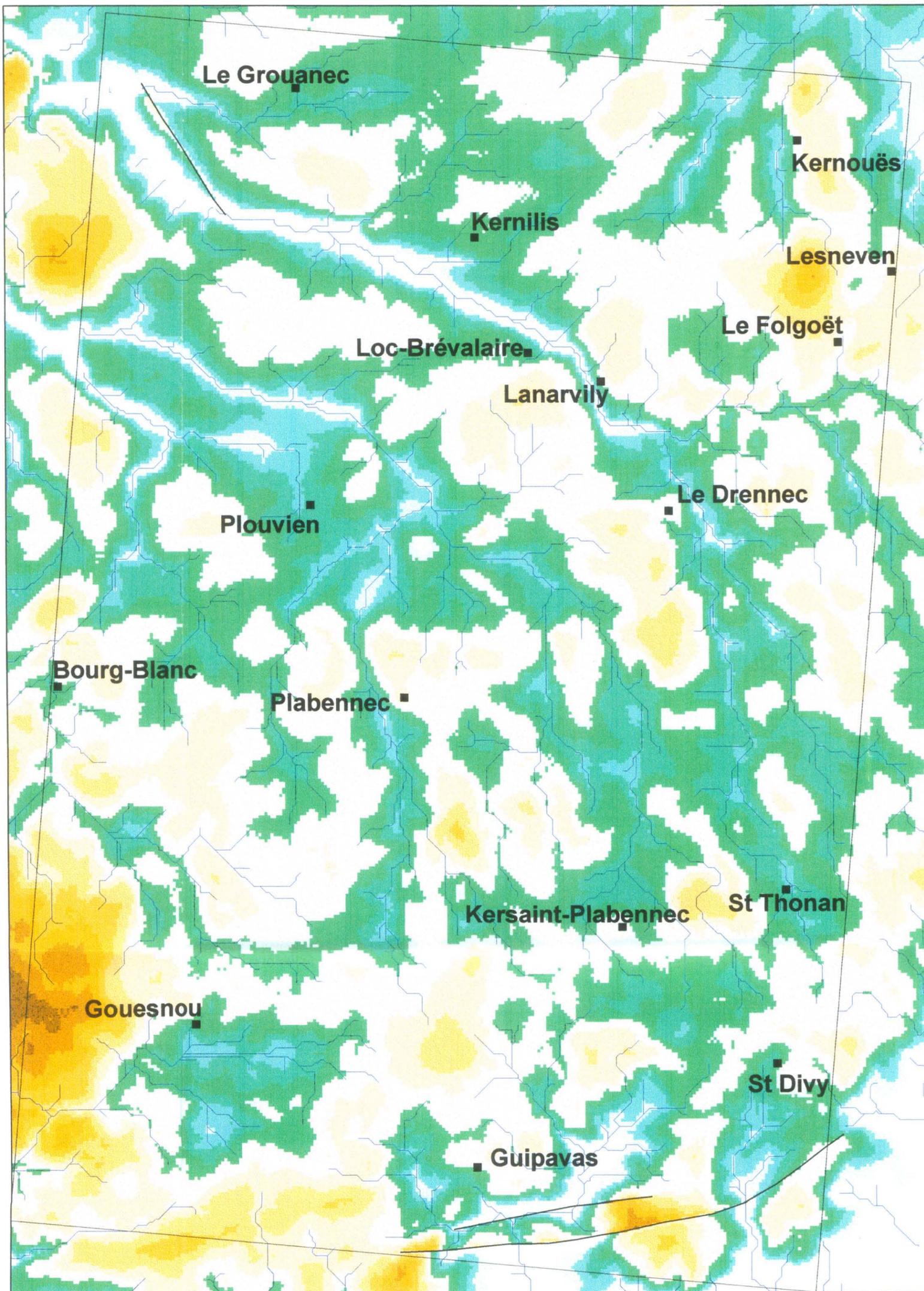
Rapport BRGM R 40519

mars 1999

- Courbes isovalues (équidistance 10 m)
- Villes.shp
- Plabennec est
- Réseau de thalwegs
- Failles
- Profondeur de la base de l'horizon fissuré
  - 0 - 10
  - 10 - 20
  - 20 - 30
  - 30 - 40
  - 40 - 50
  - 50 - 60
  - 60 - 70
  - 70 - 80
  - 80 - 85
  - Pas de données



0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Kilomètres



RESSOURCES DU SOUS-SOL ET ENVIRONNEMENT EN BRETAGNE

RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE  
DE LA CARTE PLABENNEC-EST  
(FINISTERE)

PLANCHE 6

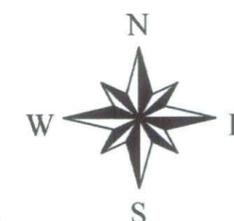
Extension et épaisseur de la partie mouillée  
des altérites et de l'horizon fissuré supérieur

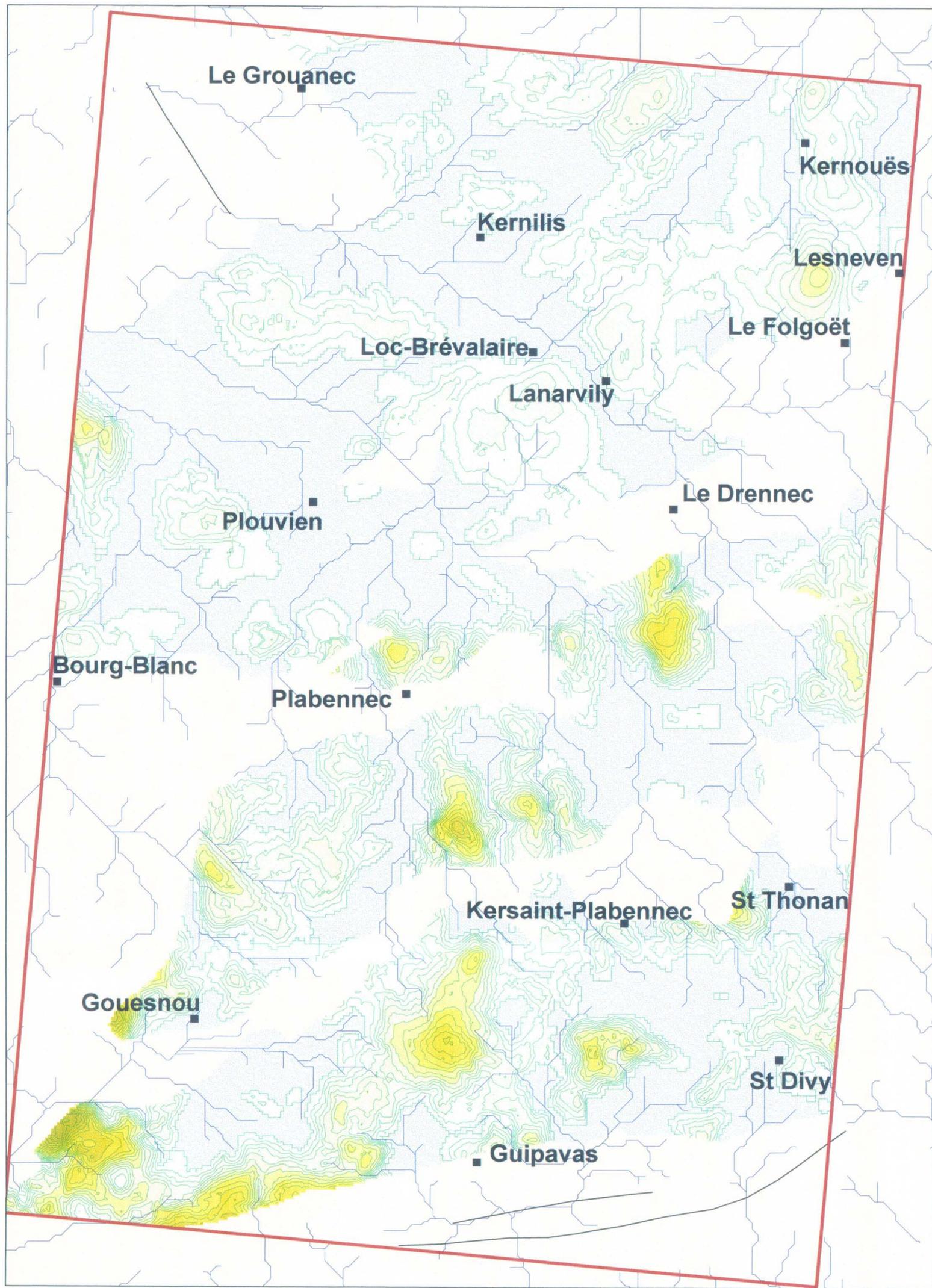


Rapport BRGM R 40519

mars 1999

- Villes.shp
- Plabennec est
- ~ Réseau de thalwegs
- ∧ Failles
- Épaisseur de la partie mouillée des altérites
- 0 - 5
- 5 - 10
- 10 - 15
- 15 - 20
- 20 - 25
- 25 - 30
- 30 - 34
- Pas de données
- Épaisseur de la partie mouillée de l'horizon fissuré supérieur
- 0 - 5
- 5 - 10
- 10 - 15
- 15 - 20
- Pas de données





RESSOURCES DU SOUS-SOL ET ENVIRONNEMENT EN BRETAGNE

RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE  
DE LA CARTE PLABENNEC-EST  
(FINISTÈRE)

**PLANCHE 7**

**Volumes d'eau stockés dans les altérites**

(en m<sup>3</sup> par 2500 m<sup>2</sup>)



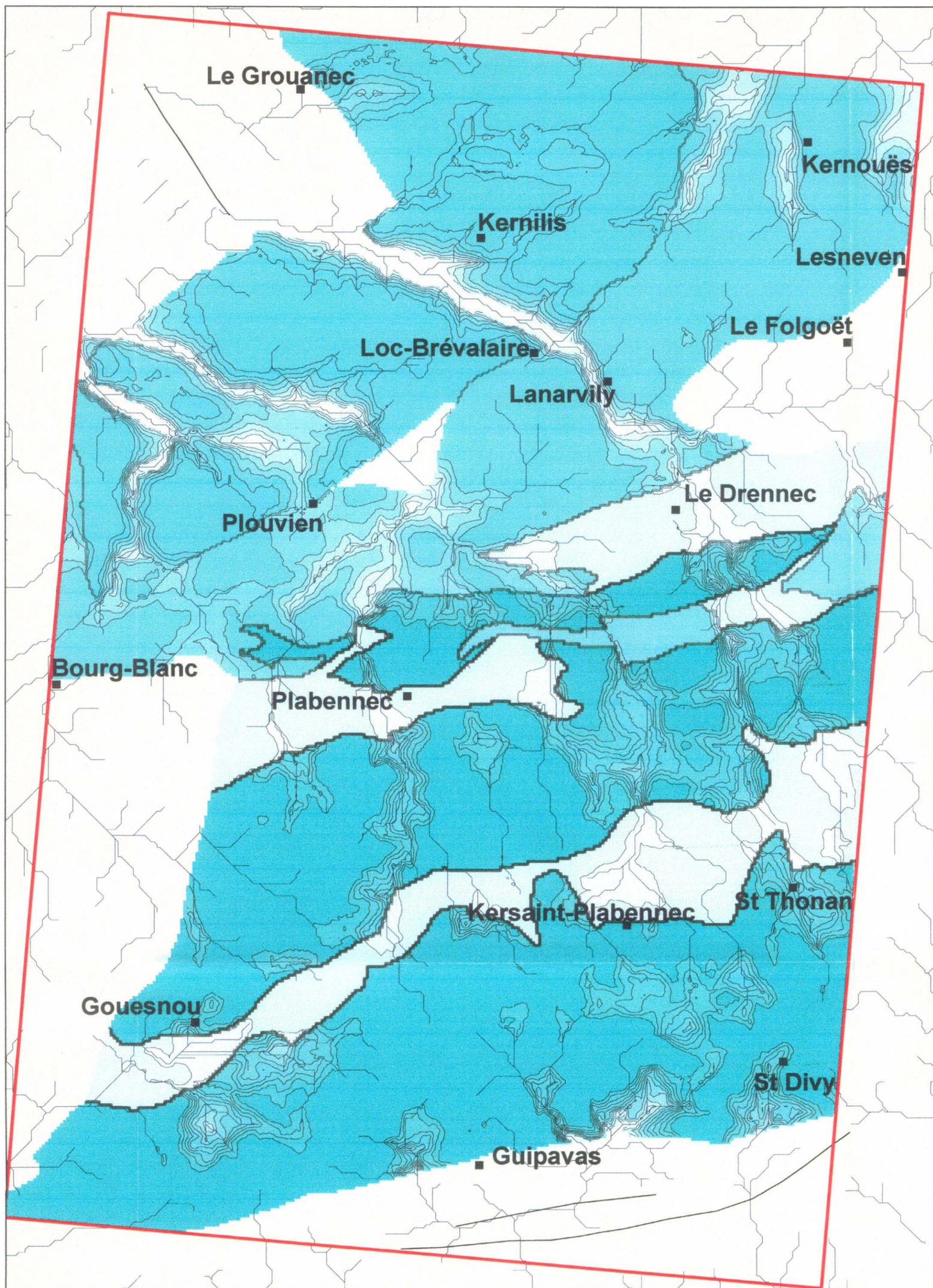
Rapport BRGM R 40519

mars 1999

- Villes.shp
- ▭ Plabennec est
- ∧ Réseau de thalwegs
- ∧ Failles
- ∧ Courbes isovaleurs (équidistance 250 m<sup>3</sup>)
- Volumes d'eau dans les altérites (m<sup>3</sup> par 2500 m<sup>2</sup>)
- 0
- 0 - 500
- 500 - 1000
- 1000 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 2500
- 2500 - 3000
- 3000 - 3500
- 3500 - 4000
- 4000 - 4700
- Pas de données



0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Kilomètres



RESSOURCES DU SOUS-SOL ET ENVIRONNEMENT EN BRETAGNE

RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE  
DE LA CARTE PLABENNEC-EST  
(FINISTERE)

**PLANCHE 8**

**Volumes d'eau stockés  
dans l'horizon fissuré supérieur  
(en m3 par 2500 m²)**

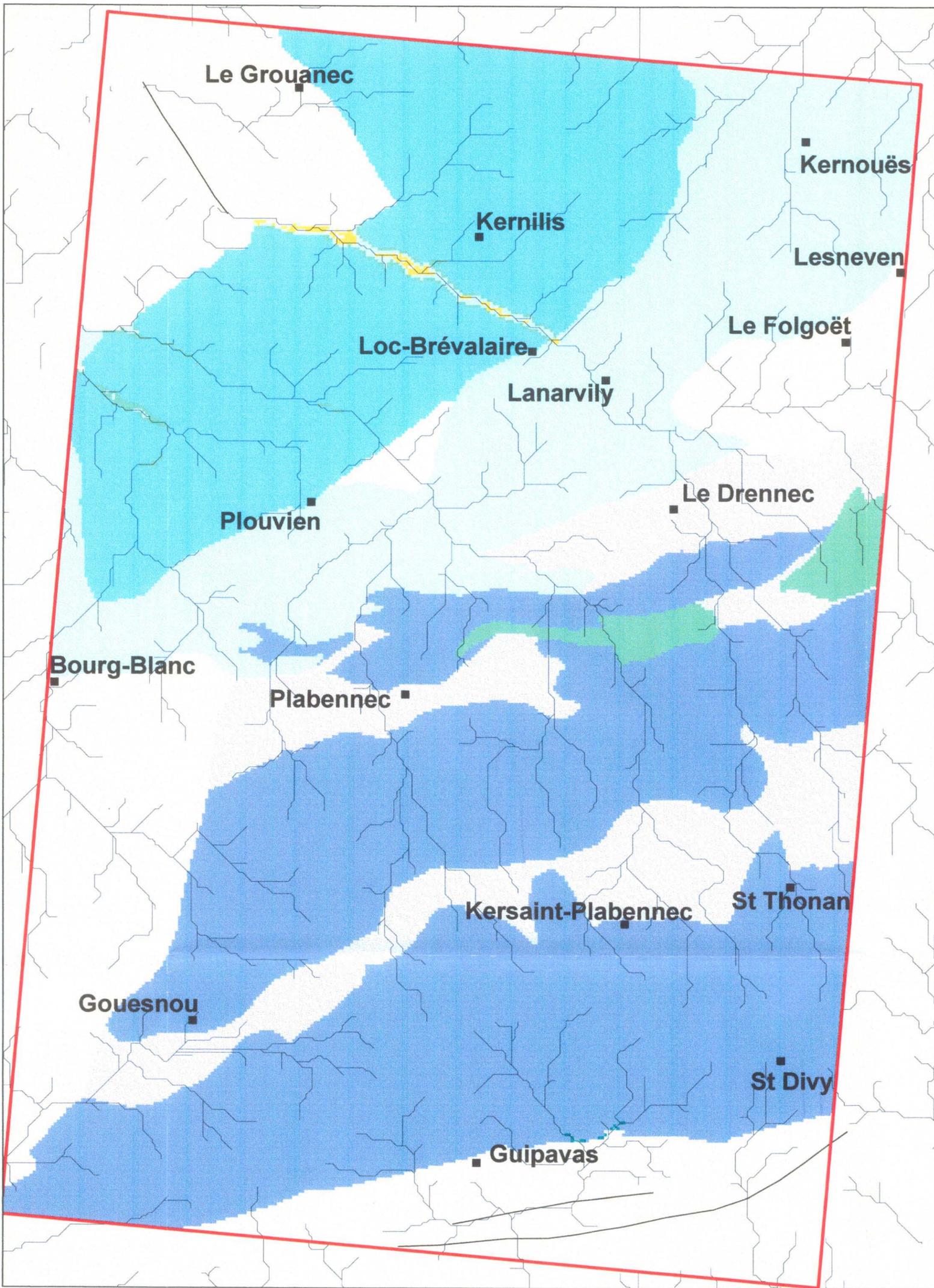


Rapport BRGM R 40519

mars 1999

- Villes.shp
- ▭ Plabennec est
- ~ Réseau de thalwegs
- ~ Failles
- ~ Courbes isovaleurs (équidistance 100 m3)
- ▲ Volumes d'eau dans l'horizon fissuré sup. (m3 par 2500 m²)
- 0
- 0 - 100
- 100 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1066
- Pas de données





RESSOURCES DU SOUS-SOL ET ENVIRONNEMENT EN BRETAGNE

RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE  
DE LA CARTE PLABENNEC-EST  
(FINISTERE)

**PLANCHE 9**

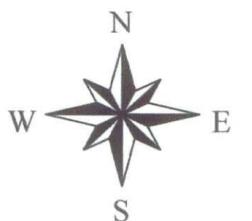
**Volumes d'eau stockés  
dans l'horizon fissuré inférieur  
(en m<sup>3</sup> par 2500 m<sup>2</sup>)**



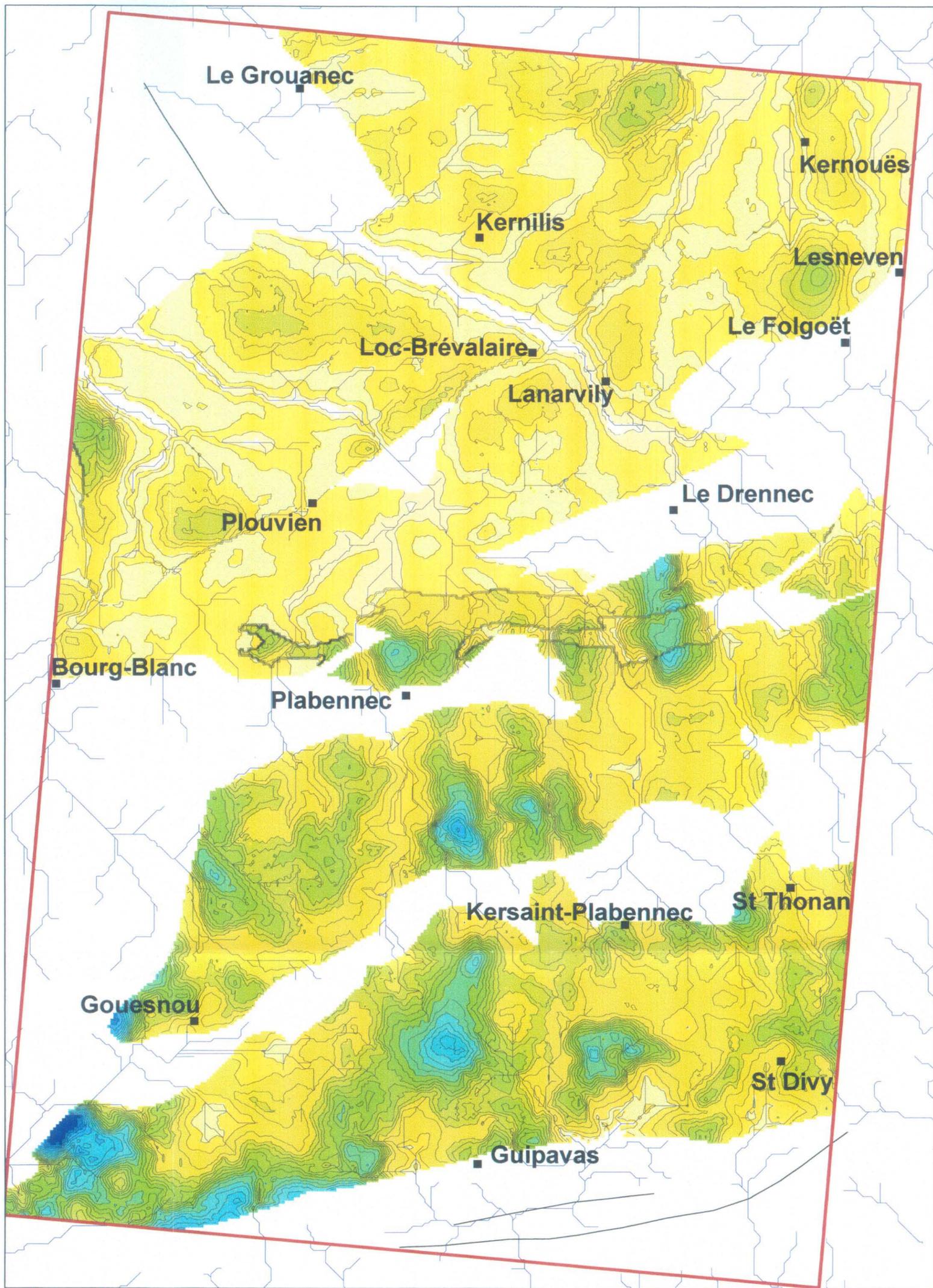
Rapport BRGM R 40519

mars 1999

- Villes.shp
- Plabennec est
- ~ Réseau de thalwegs
- ~ Failles
- Volumes d'eau dans l'horizon fissuré inférieur (m<sup>3</sup> par 2500 m<sup>2</sup>)
- 0
- 0 - 100
- 100 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 525
- Pas de données



0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Kilomètres



RESSOURCES DU SOUS-SOL ET ENVIRONNEMENT EN BRETAGNE

RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE  
DE LA CARTE PLABENNEC-EST  
(FINISTERE)

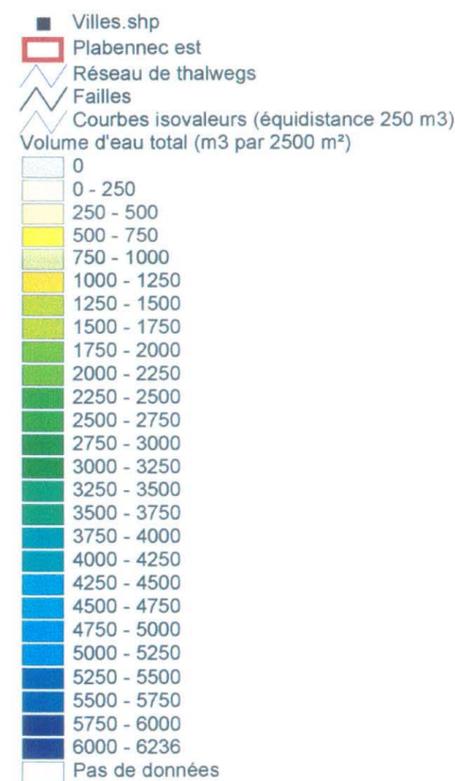
PLANCHE 10

Volume total d'eau stockée  
dans les aquifères superficiels  
(altérites + horizons fissurés supérieur et inférieur)



Rapport BRGM R 40519

mars 1999



BRGM  
Service Géologique  
Régional Bretagne  
4 rue du Bignon  
35000 RENNES  
Tél. 02.99.86.00.30 - Fax. 02.99.86.00.18

**BRGM**  
**Service Géologique Régional Bretagne**  
4 rue du Bignon - 35000 RENNES  
Tél. 02.99.86.00.30.- Fax. 02.99.86.00.18.