



**recherche de secteurs
à potentiel aquifère
en zone de socle
(phase II)**

**massif granitique de Huelgoat
Finistère**

**analyse multicritère
cartographie assistée (SYNERGIE)
perméabilité de fracture (méthode RADON)**

**C. LANGEVIN
F. PERNEL
T. POINTET
*et al.***

**Octobre 1989
R 30 000**

AUTEURS

Les différentes tâches couvrant la deuxième phase de l'étude sont réparties comme suit :

TRAVAUX DE TERRAIN

* *mesures de Radon dans les gaz du sol*

F. GUERIN

F. PERNEL

* *étude structurale*

P. MARTIN

C. CASTAING

INFORMATIQUE *traitement de l'informatique sous SYNERGIE*

F. PERNEL

REDACTION

C. LANGEVIN, avec la collaboration de F. PERNEL

SYNTHESE

C. LANGEVIN

SUPERVISION

T. POINTET

RESUME

Cette étude est menée dans le cadre de la Recherche Scientifique. Elle vise à identifier des secteurs à potentiel aquifère au sein du massif granitique de Huelgoat (Finistère). La technique utilisée est celle de l'analyse multicritère, et le contrôle mis en oeuvre repose sur une estimation de la perméabilité de fracture par l'analyse des émanations de gaz Radon.

L'étude a été faite en deux phases. Le présent rapport constitue la phase II de l'étude (1988). Les données de la phase I (1987) sont reprises, complétées et traitées par le logiciel SYNERGIE, en termes d'analyses multicritère ; le résultat est une carte des potentialités aquifères du massif, réunissant les critères les plus déterminants. Ce document permet d'exclure environ 2/3 du massif et de concentrer la prospection hydrogéologique sur le tiers restant.

Un contrôle du potentiel aquifère a été effectué sur sept secteurs tests, par dosage du Radon dans le sol : l'importance des émanations de Radon est liée directement au développement de la perméabilité de fracture. Les corrélations établies entre les résultats de l'analyse multicritère et le contrôle par le radon sont satisfaisantes et permettent de valider la carte des potentialités aquifères.

Un bilan de l'étude a été établi en fin de texte. L'aspect essentiel de ce bilan est la mise au point d'une procédure simplifiée pour une pré-prospection hydrogéologique assistée par SYNERGIE.

SOMMAIRE

Pages

AVANT-PROPOS

1 - PRESENTATION DU SECTEUR DE HUELGOAT	1
1.1 - CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES	2
1.1.1 - Faciès pétrographiques	2
1.1.2 - Quelques compositions modales	2
1.2 - CARACTERES STRUCTURAUX	3
1.2.1 - Le contexte structural régional	3
1.2.2 - Les éléments structuraux observés sur affleurement	3
1.3 - APERCU GEOMORPHOLOGIQUE	4
1.4 - ALTERATION	5
1.4.1 - Rappel de la classification établie en première phase des travaux	5
1.4.2 - Liaisons entre altération et faciès pétrographiques	6
1.4.3 - Intérêt des altérites sur le plan hydraulique	7
. Evolution de la porosité avec le degré d'altération	8
. Valeur aquifère des altérites du monzogranite de Huelgoat	10
2 - SELECTION DE CRITERES EN RELATION AVEC L'EXISTENCE DE RESERVOIRS EXPLOITABLES	11
2.1 - CRITERES ET DOMAINES D'ETUDE	11
2.1.1 - Critères structuraux	11
2.1.2 - Critères géomorphologiques	11
2.1.3 - Démarche d'étude	11
2.2 - CRITERES STRUCTURAUX RETENUS	12
2.3 - CRITERES GEOMORPHOLOGIQUES RETENUS	13
2.3.1 - La carte des pentes	13
2.3.2 - Les éléments d'anciennes surfaces morphologiques	13
2.3.3 - Les altérites	14
2.3.4 - La densité de drainage	14
2.3.5 - Synthèse des critères géomorphologiques	14

SOMMAIRE (suite)

	<u>Pages</u>
3 - ANALYSE MULTICRITERE TRAITEE PAR LE LOGICIEL SYNERGIE	17
3.1 - ORIGINE DES DONNEES	17
3.2 - MISE DES DONNEES SOUS SYNERGIE	18
3.2.1 - Présentation du logiciel SYNERGIE	18
3.2.2 - Organisation des données en Base Image	18
3.2.3 - Procédure des traitements cartographiques	21
3.3 - LES IMAGES INITIALES	21
3.3.1 - Présentation des images initiales	22
. Image A = carte des altitudes	22
. Image B = carte géologique	24
. Image C = carte partielle des altérites et des formations superficielles	26
. Image D = carte de densité de drainage du réseau hydrographique complet	28
. Image E = carte de densité des linéaments SPOT	30
. Image F = carte de densité des linéaments extraits sur photographies aériennes	32
. Image G = carte de densité des linéaments SPOT orientés entre N 115° et N 125°	34
. Image H = carte des densités de linéaments SPOT orientés entre N 160° et N 170°	34
. Image I = carte de densité de la fracturation portée sur la carte géologique à 1/50 000	36
. Image J = carte de densité des discontinuités gravimétriques	38
3.3.2 - Conclusion de l'analyse des images initiales	38
3.4 - LES IMAGES INTERMEDIAIRES	40
3.4.1 - Présentation des images	40
. Image A1 = carte des talwegs	40
. Image A2 = cartes des pentes classées	40
. Image A3 = carte des altitudes classées	42
. Image K = carte des éléments de surfaces morphologiques, de faible pente, classées par niveaux d'altitude	42
. Image L = carte des faciès d'altération sur les éléments de surface de faible pente	44
. Image M = carte géologique des éléments de surface, de faible pente	44
. Image N = carte des zones de forte à très forte densité de linéaments SPOT N 120° et N 165°	46

SOMMAIRE (suite)

	<u>Pages</u>
3.4.2 - Conclusions issues de l'analyse des images intermédiaires	46
3.5 - PHASE D'IDENTIFICATION DES ZONES FAVORABLES A L'EXISTENCE D'AQUIFERES	48
. Image P = carte de sélection multicritère des zones de recharge	48
. Image Q = carte des zones de fractures perméables	48
. Image R = carte des potentialités aquifères du massif d'HUELGOAT	50
3.6 - CONCLUSION	50
4 - CONTROLE DU NIVEAU POTENTIEL HYDRAULIQUE DE QUELQUES SECTEURS TEST	53
4.1 - RAPPEL DE LA METHODE DE PROSPECTION PAR MESURE DU GAZ RADON DANS LE SOL	53
4.1.1 - Fondement de la méthode	53
4.1.2 - Technique de prélèvement et de mesure	55
4.1.3 - Justification méthodologique	55
4.2 - CHOIX DES SECTEURS TESTES PAR LE RADON	56
4.2.1 - Dénomination, localisation	56
4.2.2 - Conditions ayant présidé au choix des secteurs test	57
4.2.3 - Pas d'échantillonnage - Nombre de prélèvements	59
4.3 - ANALYSE STATISTIQUE DES VALEURS CORRIGÉES	59
4.3.1 - Hypothèses statistiques prises en considération	59
4.3.2 - Application à la représentation cartographique	61
4.4 - INTERPRETATION DES CARTES D'ACTIVITE VOLUMIQUE DU RADON	62
4.4.1 - Présentation des documents	62
4.4.2 - Essai de représentativité comparée selon le pas de prélèvement adopté	62

SOMMAIRE (suite)

	<u>Pages</u>
4.4.3 - Configuration, importance des anomalies et développement de la perméabilité de fracture	63
. secteur de COATELEZ	63
. secteur de COSCATEL	63
. secteur de PLOUENEZ	63
. secteur du CRANN (phase 2)	64
. secteur de ROCHELLEC	64
. secteur du CRANN (phase 1)	64
. secteur de BERRIEN (phase 1)	65
4.5 - RECAPITULATION, CONCLUSION	65
4.5.1 - Synthèse des interprétations des cartes d'isovaleurs Radon	65
4.5.2 - Corrélation Radon/Estimation "manuelle" du niveau d'intérêt des secteurs test	82
5 - CONFRONTATION DES DEUX DEMARCHES : PROCEDURE SIMPLIFIEE POUR UNE PRE-PROSPECTION ASSISTEE PAR SYNERGIE	84
5.1 - CARACTERISATION DES SECTEURS TESTS D'APRES L'ANALYSE MULTICRITERE SOUS SYNERGIE	84
5.1.1 - "Lecture" de la carte des potentialités aquifères du massif	84
5.1.2 - "Lecture" détaillée pour chacun des secteurs tests	84
. secteur de COATELEZ	87
. secteur de PLOUENEZ	87
. secteur LE CRANN (phase 2)	87
. secteur de COSCATEL	87
. secteur de ROCHELLEC	88
. secteur LE CRANN (phase 1)	88
. secteur de BERRIEN (phase 1)	89
5.2 - CORRELATIONS (MESURES RADON/CARTE DES POTENTIALITES AQUIFERES) ET COMMENTAIRES	89
5.2.1 - Tableau des corrélations	89
5.2.2 - Commentaires du tableau	90
5.2.3 - Conclusion	90
5.3 - ELEMENTS D'UNE PRE-PROSPECTION HYDROGEOLOGIQUE ASSISTEE PAR SYNERGIE	91
5.3.1 - Paramètres à retenir pour une analyse multi-critère restreinte	92
5.3.2 - Données indispensables pour l'analyse multi-critère	92
5.3.3 - Moyens à mettre en oeuvre	93

SOMMAIRE (suite)

	<u>Pages</u>
5.4 - PROCEDURE SIMPLIFIEE POUR UNE PRE-PROSPECTION HYDROGEOLOGIQUE ASSISTEE PAR SYNERGIE	93
5.4.1 - Contraintes liées à l'analyse multicritère	93
5.4.2 - Organisation du travail	94
. phase préparatoire	94
. phase de mise en forme des données	94
. phase de traitement	94
5.4.3 - Conclusion	95
 <i>BILAN DE L'ETUDE</i>	 97
 <i>BIBLIOGRAPHIE</i>	 99

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1	- Localisation du massif granitique de Huelgoat en Bretagne centrale (Finistère)	1
FIGURE 2	- Histogramme de fréquence directionnelle pour 681 mesures de mésofractures sur le massif de Huelgoat	4
FIGURE 3	- Spectres de porosité sur un profil altéré du granite de Huelgoat	9
FIGURE 4	- Organigramme de traitement cartographique sous le logiciel SYNERGIE	19
FIGURE 5	- Image A : carte d'altitudes	23
FIGURE 6	- Histogramme des altitudes dans le secteur du massif de Huelgoat	23
FIGURE 7	- Image B : carte géologique	25
FIGURE 8	- Image C : carte de l'état d'altération	27
FIGURE 9	- Image D : carte de densité de drainage	29
FIGURE 10	- Carte vectorielle du réseau hydrographique complet	29
FIGURE 11	- Image E : carte de densité de linéaments SPOT	31
FIGURE 12	- Histogramme directionnel des linéaments SPOT	30
FIGURE 13	- Carte vectorielle des linéaments SPOT	31
FIGURE 14	- Image F : carte de densité des linéaments	33
FIGURE 15	- Carte vectorielle des linéaments observés sur photographies aériennes	33
FIGURE 16	- Image G : carte de densité de linéaments SPOT N 120°	35
FIGURE 17	- Image H : Carte de densité de linéaments SPOT N 165°	35
FIGURE 18	- Image I : carte de densité de fracturation (1/50 000)	37
FIGURE 19	- Image vectorielle de la fracturation de la carte géologique de la France au 1/50 000	37
FIGURE 20	- Image J : carte de densité des discontinuités gravimétriques	39
FIGURE 21	- Carte vectorielle des discontinuités gravimétriques	39
FIGURE 22	- Image A ₁ : carte des talwegs	41
FIGURE 23	- Image A ₂ : carte des pentes	41

FIGURE 24	- Image A ₃ : carte des altitudes classées	43
FIGURE 25	- Image K : carte des surfaces planes classées en altitude	43
FIGURE 26	- Image L : carte des faciès superficiels des zones plates	45
FIGURE 27	- Image M : carte lithologique des surfaces plates	45
FIGURE 28	- Image N : zones de grande densité de linéaments N 120° ou N 165°	47
FIGURE 29	- Image P : potentialités de recharge	49
FIGURE 30	- Image Q : potentialités de perméabilité	49
FIGURE 31	- Image R : carte des potentialités aquifères du massif	51
FIGURE 32	- Cheminements privilégiés du Radon dans le sous-sol et panaches d'émergence	54
FIGURE 33	- Position des secteurs testés par le Radon	56
FIGURE 34	- Secteur LE CRANN. Carte des teneurs en pCi/l	67
FIGURE 35	- Secteur COSCASTEL. Carte des teneurs en pCi/l	69
FIGURE 36	- Secteur BERRIEN. Carte des teneurs en pCi/l	71
FIGURE 37	- Secteur ROCHELLEC. Carte des teneurs en pCi/l	73
FIGURE 38	- Secteur PLOUENEZ. Carte des teneurs en pCi/l	75
FIGURE 39	- Secteur COATELEZ. Carte des teneurs en pCi/l	77
FIGURE 40	- Secteur LE CRANN. Carte des teneurs en pCi/l	79
FIGURE 41	- Secteurs les mieux placés sur la carte des potentialités aquifères	91

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1	- Compositions modales extrêmes des trois principaux faciès pétrographiques du massif de Huelgoat	2
TABLEAU 2	- Teneurs en uranium dans les trois principaux faciès de monzogranite du massif de Huelgoat	57
TABLEAU 3	- Tendances globale de chaque prospect par rapport aux facteurs pouvant influencer l'activité volumique en Radon dans le sol et position de ces prospects par rapport à la perméabilité de fracture	58
TABLEAU 4	- Paramètres statistiques des mesures de Radon pour les 7 prospects du massif de Huelgoat	60
TABLEAU 5	- Classes de valeurs retenues pour la cartographie	61
TABLEAU 6	- Potentialités aquifères des secteurs tests d'après analyse des cartes d'isovaleurs en activité volumique du gaz radon dans les sols	81
TABLEAU 7	- Potentiel aquifère des secteurs tests. Corrélations entre l'estimation faite au vu des critères déterminants et la tendance des mêmes secteurs, issue du contrôle Radon	82
TABLEAU 8	- Potentialité aquifère. Niveau d'intérêt	86
TABLEAU 9	- Potentialité aquifère des secteurs tests. Corrélation entre l'estimation par le Radon et l'estimation par la carte multicritère (issue de SYNERGIE)	89

AVANT-PROPOS

Ce rapport présente les travaux de la seconde phase du programme EGO4A engagés par le SGN/3E en 1987 -chef de projet T. POINTET- avec un financement du Ministère de l'Industrie.

L'objectif consiste en une identification des potentialités aquifères du massif de HUELGOAT (Finistère) grâce à une analyse cartographique multicritère réalisée par le logiciel SYNERGIE. Les résultats de l'analyse multicritère sont validés par les mesures de gaz RADON effectuées dans le sol sur plusieurs zones test : en effet, en milieu de socle fracturé, l'importance des émanations de Radon varie dans le même sens que la perméabilité de fracture.

La phase II de l'étude se déroule donc en deux temps :

- la reprise des critères analysés dans le rapport 87 SGN 720 EAU, la compilation de documents et leur traitement cartographique sous SYNERGIE ;
- une seconde campagne de mesure du Radon dans le sol sur cinq nouveaux prospects, et la cartographie des anomalies de concentration, témoignant du niveau de perméabilité.

C'est donc une corrélation aussi étroite que possible entre des zones rassemblant, d'une part, plusieurs critères favorables à l'existence d'un potentiel aquifère important, et révélant, d'autre part du Radon en quantités anormales, que la seconde phase de l'étude va chercher à mettre en évidence.

Cette étude conserve un caractère pluridisciplinaire. Le Département Géologie a participé à la documentation de base et à un repérage structural sur le terrain (C. CASTAING, P. MARTIN). Le Département Télédétection a permis le calcul de cartes de densité selon un procédé palliant le défaut de la version alors disponible du logiciel SYNERGIE (P. DUTARTRE, J.F. MALON). Le Département 3E a réalisé la saisie, les traitements graphiques, les mesures de Radon et l'interprétation des résultats (F. GUERIN, C. LANGEVIN, F. PERNEL, T. POINTET).

1 - PRESENTATION DU SECTEUR DE HUELGOAT

Le massif granitique de HUELGOAT est situé dans le département du Finistère, entre deux zones géomorphologiques majeures de Bretagne centrale : l'axe des monts d'Arrée au Nord et le bassin carbonifère de Châteaulin au Sud. HUELGOAT se trouve à 30 km au Sud de Morlaix, à 60 km de Brest et de Quimper. Le massif possède une forme grossièrement elliptique dont le grand axe est orienté Est-Ouest sur 15 km et le petit axe sur 10 km (fig. 1).

Ce terrain d'étude a été choisi pour plusieurs raisons :

- son extension (98 km²) permet tout à la fois l'investigation de l'ensemble du massif et la généralisation de la démarche à l'échelle départementale ou régionale ;
- la reconnaissance du massif a déjà fait l'objet de nombreuses études d'ordre pétrographique, structural et géophysique ;
- le contexte géomorphologique est favorable à l'analyse.

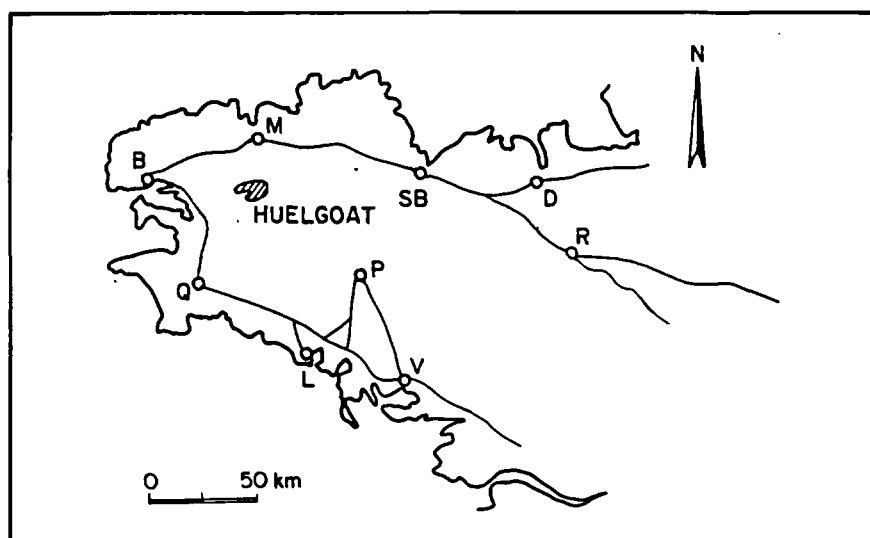


FIGURE 1 - Localisation du massif granitique de HUELGOAT en Bretagne centrale (Finistère)

1.1 - CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES DU MASSIF CRISTALLIN DE HUELGOAT

1.1.1 - Faciès pétrographiques

Le massif de HUELGOAT est constitué par trois unités concentriques distinctes par leurs caractères pétrographiques et géochimiques. Ce sont : le granite de HUELGOAT s.s., le granite de La Feuillée et le granite du Cloître (CONQUERE (F.), 1966 - GEORGET (Y.), 1986 - CASTAING (C.) et al., 1987). Les compositions modales des trois faciès sont données dans le tableau 1.

- 1) Le granite de HUELGOAT s.s. possède la composition d'un monzogranite porphyroïde à biotite et à cordiérite, une légère différenciation centrifuge et une forte hydrothermalisation dans sa partie occidentale.
- 2) Le granite de LA FEUILLEE est constitué par un monzogranite à gros grain, évoluant de façon centrifuge entre un pôle mésocrate à biotite dominante et un pôle leucocrate à muscovite. Cette formation est subdivisée en deux faciès sur la Carte Géologique de la France au 1/50000 : le faciès de LA FEUILLEE proprement dit et celui de GOASQUINTIN sur le bord Nord du massif.
- 3) Le granite du CLOITRE correspond à un monzogranite moyennement à finement grenu différencié d'Est en Ouest d'un pôle mésocrate à biotite dominante vers un pôle leucocrate à muscovite et tourmaline. Une subdivision a été adoptée sur la Carte Géologique de la France au 1/50000 avec le faciès du CLOITRE proprement dit à l'Ouest et celui de LEINTAN à l'Est.

1.1.2 - Quelques compositions modales

	HUELGOAT	LE CLOITRE	LA FEUILLEE
Quartz	22.3 - 32.6	23.0 - 31.2	26.0 - 36.6
Feldspath potassique	24.0 - 33.9	13.0 - 29.2	15.8 - 26.8
Plagioclase	24.1 - 38.1	32.1 - 45.8	30.5 - 43.5
Biotite	3.9 - 11.9	0.4 - 13.8	0.4 - 11.0
Muscovite	tr. - 2.2	tr. - 5.2	0.6 - 9.9
Cordiérite	tr. - 3.7	0.4 - 3.9	- - -
Accessoires	tr. - 0.9	tr. - 2.5	tr. - 0.4
Nombre d'échantillons	25	11	17

TABEAU 1 - Compositions modales extrêmes des trois principaux faciès pétrographiques du massif de HUELGOAT (d'après GEORGET (Y.), 1986)

1.2 - CARACTERES STRUCTURAUX

1.2.1 - Le contexte structural régional

Les relations structurales qui existent entre le massif et son encaissant métamorphisé et les formations voisines ont permis aux auteurs nommés précédemment de reconstituer l'évolution géodynamique du massif de HUELGOAT. Celui-ci est limité au Sud et au Nord par des accidents majeurs N 70° dont celui des monts d'Arrée (au Nord) qui a joué comme une structure cisailante dextre. Sur cette limite, la géométrie du cristallin et de sa couronne métamorphique mettent en évidence la nature syntectonique de l'intrusion diapirique. Une datation récente du granite fait correspondre sa mise en place avec la phase bretonne de l'orogénèse hercynienne, c'est-à-dire la limite Dévonien/Carbonifère (345 ± 10 MA, Rb/Sr, CASTAING (C.) et al., 1985).

L'extension de l'auréole métamorphique et la présence de nombreuses enclaves de cornéenne témoignent en faveur d'une surface d'érosion qui serait située dans la partie supérieure du dôme granitique.

1.2.2 - Les éléments structuraux observés sur affleurement

Une analyse de la mésofracturation (fracturation mesurée sur le terrain) a été effectuée par CASTAING (C.) et al, 1987. La mésofracturation est répartie en quatre familles directionnelles principales auxquelles s'ajoute une famille subhorizontale liée en surface à des phénomènes de décompression de la roche. L'ordre de représentation par importance des familles subverticales principales est le suivant :

- N 120°.75°N,
- N 10°.75°E,
- N 165°.90°,
- N 60°.80°S (fig. 2).

La plupart des objets mesurés sont des diaclases sur les flancs desquelles des mouvements tectoniques ont parfois laissé des stries. A l'aide de celles-ci, trois principaux épisodes cassants ont été identifiés :

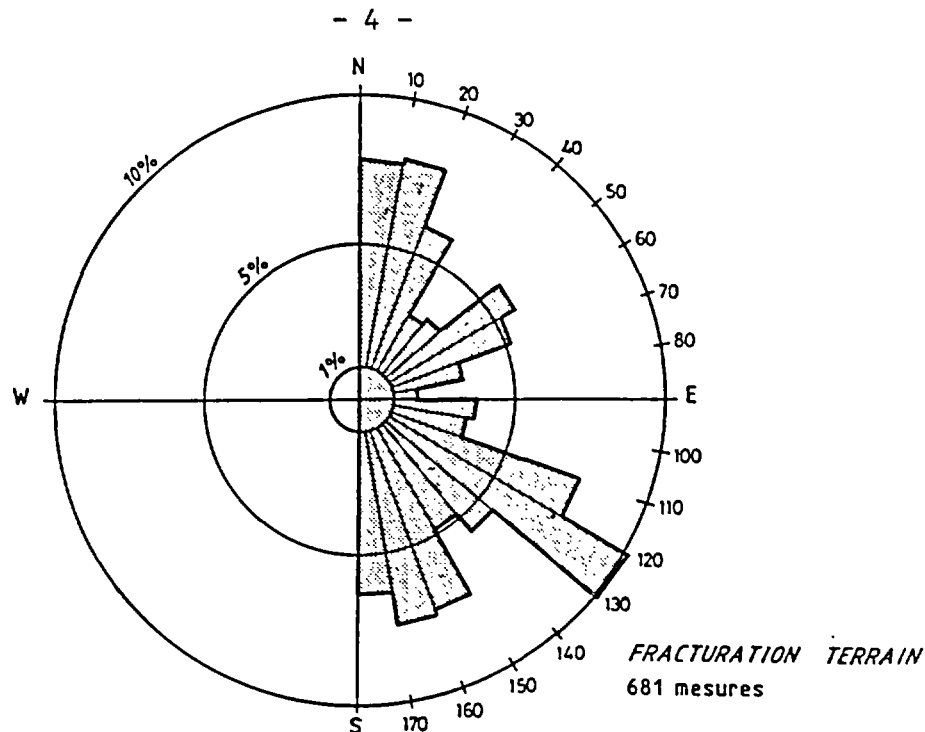


FIGURE 2 - Histogramme de fréquence directionnelle pour 681 mesures de mésofractures sur le massif de HUELGOAT (d'après CASTAING (C.) et al., 1987)

- une compression NW-SE matérialisée par l'apparition de la famille de fractures N 120° ayant fonctionné le plus souvent en décrochements senestres ou en traction avec une ouverture et la mise en place de filons de quartz et de microdiorite ; ces déformations sont datées du Dévonien Supérieur et du début du Carbonifère ;
- une compression N-S responsable de la formation et du fonctionnement en décrochements conjugués des familles de fractures N 165° (dextre) et N 10° (senestres) ; cet épisode tectonique se place à la fin du Paléozoïque ;
- une distension NE-SW faisant rejouer en failles normales les familles de fractures N 120° et N 165°, à l'Oligocène, puis du Pliocène à nos jours.

La probabilité de jeu en extension et d'ouverture des fractures par rapport à la compression actuelle NW-SE est plus grande avec les familles N 120° et N 165°. Ces deux directions prennent ainsi une importance du point de vue de la perméabilité du socle. En complément, les familles N 10° et N 60° ont plutôt fonctionné en compression et subi une fermeture.

1.3 - APERCU GEOMORPHOLOGIQUE

Le massif granitique de HUELGOAT se situe entre deux grands ensembles géomorphologiques : les monts d'Arrée au Nord et le vaste bassin de Châteaulin au Sud.

Les monts d'Arrée sont aujourd'hui le point culminant du massif armoricain (385 m). Ils le doivent à leur position structurale et morphologique guidée en particulier par l'extrême résistance à l'érosion des roches dures qui les composent (schistes, et surtout phyllades et quartzites massifs du Siluro-Dévonien).

Le bassin carbonifère de Châteaulin se situe à des altitudes bien inférieures à celles des monts d'Arrée : sur sa bordure Nord, à proximité du massif de HUELGOAT, les reliefs constitués de wackes et shales à passées gréseuses évoluent entre 200 m et 150 m.

Installé entre ces deux ensembles morphostructuraux, le massif granitique présente une déclivité générale bien naturelle depuis les monts d'Arrée vers le bassin de Châteaulin : au Nord et au Nord-Ouest, on note des altitudes supérieures à 280 m (atteignant localement 300 m) tandis qu'à l'Est et au Sud-Est elles sont inférieures à 225 m. Cependant, ce secteur Sud-Est, bien que constituant la partie basse du massif, se trouve en surélévation par rapport à l'encaissant non métamorphisé. Cette situation est clairement exprimée dans la traduction du nom breton de la ville de HUELGOAT, "La haute Forêt". Dans ce secteur, et particulièrement à l'Est et au Nord-Est de la ville, l'encaissement du réseau hydrographique conduit à la formation de chaos granitiques à blocs décamétriques.

La partie Nord et Ouest du massif possède un relief bien plus calme : le réseau hydrographique y est peu dense et de nombreux éléments de surfaces morphologiques caractérisés par des altérites (arènes dominantes) y sont conservés.

1.4 - ALTERATION

1.4.1 - Rappel de la classification établie en première phase des travaux

Les observations relatives à l'état d'altération du massif sont partielles. Une part importante du terrain reste dans l'indétermination par manque d'affleurements : pour les 98 km² du massif de HUELGOAT, l'état d'altération des roches a été examiné en 150 points seulement, soit environ 1,5 point d'observation au km²... ce qui constitue un réseau très ténu.

Dix faciès d'altération ont été recensés puis reclassés et ramenés -pour une cartographie plus lisible- à trois grandes familles :

- faciès 1 : granite sain,
- faciès 2 : granite décomprimé ($\pm$ début d'altération),
- faciès 3 : arène granitique meuble (cohérente ou remaniée).

1.4.2 - Liaisons entre altération et faciès pétrographiques

Un premier regard porté sur la carte dite des Formations Superficielles (fig. 8) conduit à visualiser 2 (ou 3) grands domaines d'altération, de part et d'autre d'une ligne NE-SW, joignant BERRIEN (au NE) et BRENNILIS (au SW) :

- au NW de cette ligne et surtout en périphérie, le faciès granite décomprimé est le mieux représenté ;
- au SE de cette ligne, en position périphérique, le granite sain domine ;
- de part et d'autre, et à proximité de cette ligne, on peut voir, en position centrale, un troisième domaine d'altération plus évoluée dans lequel les arènes occupent la première place.

Si l'on place la carte des Formations Superficielles (fig. 8) à côté de la carte lithologie (fig. 7), il apparaît que des relations directes peuvent être établies entre les deux paramètres :

- au Nord, le granite de GOASQUINTIN apparaît fortement décomprimé, avec début d'altération (localement évoluée jusqu'à la formation d'amas de kaolin, exploité en carrières à BERRIEN) ;
- au Sud et surtout à l'Est, le granite de HUELGOAT (sensus stricto) montre essentiellement des affleurements de roche saine. La bordure Est du massif a subi, il est vrai, une arénisation, mais l'évacuation partielle ou totale de l'arène par la circulation des eaux a conduit à la formation de tors et de chaos ;
- dans sa partie Ouest, le granite de HUELGOAT s.s. qui affleure peu, présente les trois états d'altération avec un développement un peu plus abondant des arènes : ceci vient tempérer l'idée d'une stricte interdépendance entre les faciès pétrographiques des différents "granites" et l'état d'altération ;
- vers le Centre du massif, le granite du CLOITRE se présente presque totalement à l'état de roche saine. Son grain fin, sa dureté sont pour partie responsables de cette bonne conservation. Le granite de LEINTAN, moins affleurant, se révèle également sain à son extrémité ouest ;

- dans la moitié septentrionale du massif, au gré d'affleurements trop peu nombreux, le granite de LA FEUILLEE apparaît tout à la fois, arénisé, décomprimé, parfois sain, avec une légère prédominance des arènes.

Dans ce dernier cas, la relation altération/faciès pétrographique n'est pas non plus clairement affirmée. Cependant, pour conclure, la tendance de cette relation peut se résumer ainsi :

- roche plutôt saine : moitié Est du granite de HUELGOAT s.s. et granite du CLOITRE (et granite de LEINTAN) ;
- roche essentiellement décomprimée : granite de GOASQUINTIN ;
- roche plutôt arénisée : moitié ouest du granite de HUELGOAT s.s. et granite de LA FEUILLEE.

1.4.3 - Intérêt des altérites sur le plan hydraulique

Les altérites peuvent constituer des réservoirs potentiels intéressants si elles affichent une porosité suffisamment élevée. C'est presque toujours le cas d'arènes évoluées ou fortement remaniées, c'est-à-dire débarrassées des minéraux argileux d'altération. Dans un tel cas, le paramètre déterminant se réduit alors à l'extension de la formation.

Lorsqu'il s'agit d'altérites moins évoluées n'ayant pas atteint le stade de l'arène, leur intérêt en tant que réservoir potentiel se pose alors véritablement en terme de niveau de porosité, soit trop faible, soit suffisant pour constituer une réserve mobilisable. Il apparaît donc important de connaître l'évolution de la porosité par rapport au degré d'altération d'un granitoïde.

Dans le but de suivre cette évolution, quelques échantillons ont été prélevés dans le secteur de KERVINAOUET HUELLA, situé à 2 km à l'Ouest de HUELGOAT.

* Evolution de la porosité avec le degré d'altération

Deux carrières ont fait l'objet de visites pour prises d'échantillons diversement altérés. En outre, dans l'une des carrières (*), la porosité a été mesurée in situ le long d'un profil sur lequel ont été observés le degré d'altération, ainsi que la minéralogie et la répartition des produits colmatant les fractures.

Les mesures au porosimètre à mercure (CNRS) ont montré une augmentation de la porosité dans la proportion de 1 à 10 entre un échantillon "sain" du granite porphyroïde de HUELGOAT et un autre, altéré, décomprimé et cohérent (fig. 3).

La géométrie du front d'altération est liée en l'occurrence à la répartition de microfissures orientées N 50° dans la carrière. Des blocs "sains", sans altération et peu microfissurés subsistent à l'intérieur d'un secteur altéré, de plusieurs hectares. Cette disposition est tout à fait comparable au concept de "panneau" d'altérite formulé par FLAGEOLLET (J.C.), 1977. Ce type d'affleurement est fréquent dans le massif où il donne lieu à l'exploitation de sablières.

La différence de porosité entre la roche "saine" (PT = 1.2 %) et l'échantillon le moins altéré (PT = 3.9 %) correspond à l'apparition de la microfissuration orientée et de l'altération hydrothermale.

Ces facteurs se manifestent par un accroissement modéré de la microporosité. Dans le troisième échantillon (PT = 12 %) la décompression de l'altérite néanmoins cohérente favorise l'ouverture de la microfissuration (phénomène observé en surface) et partant, l'augmentation de la porosité efficace. Les spectres de porosité n° 2 et n° 3 révèlent essentiellement un développement de la microporosité. Cette constatation est contradictoire avec l'ouverture de la microfissuration mais va dans le sens du processus d'arénisation dans lequel les produits argileux colmatants apparaissent de plus en plus.

(*) Carrière nord (X = 147,95 km, y : 1091,40 km)

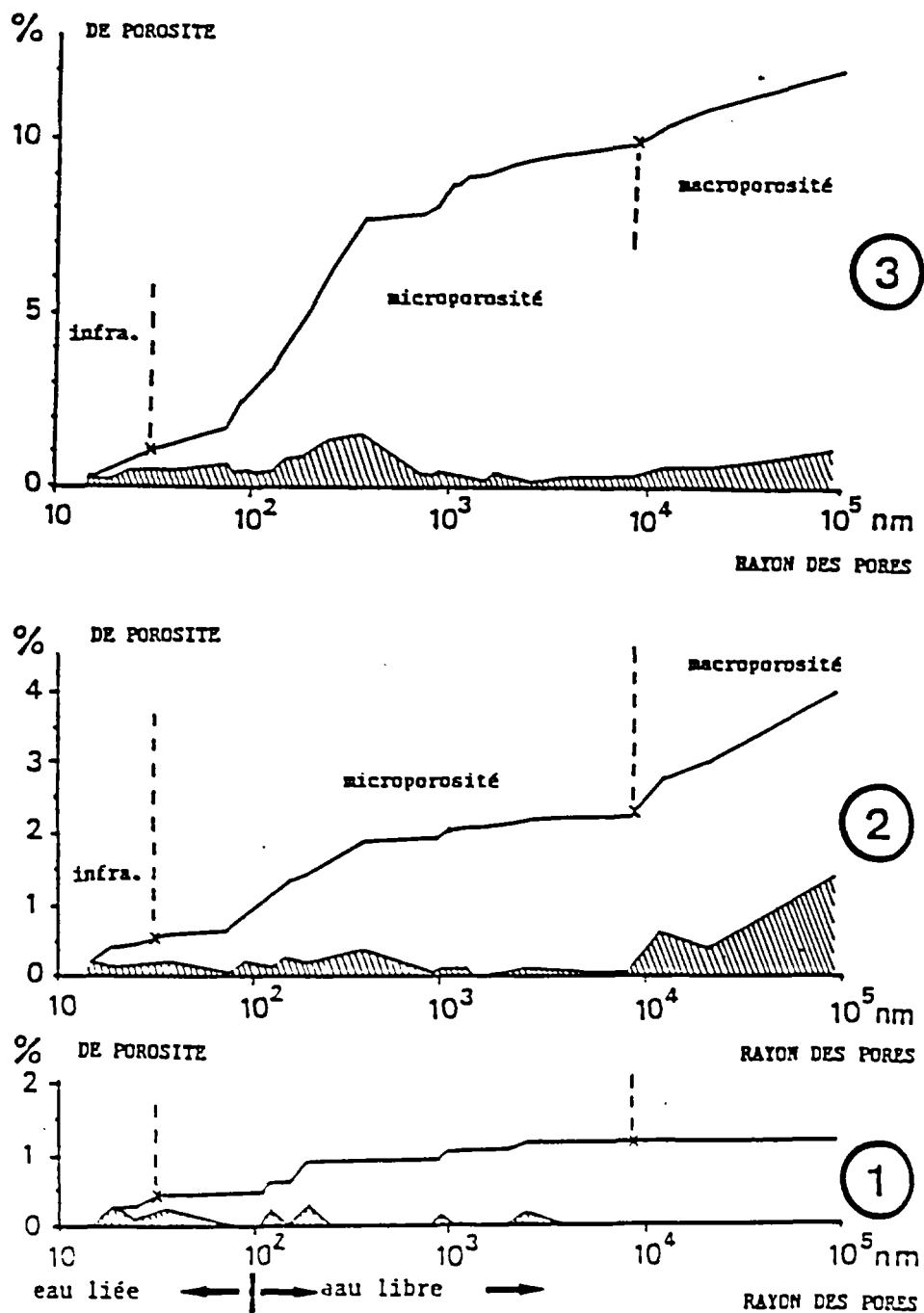


FIGURE 3 - Spectres de porosité sur un profil altéré du granite de HUELGOAT s.s.

- 1 - Faciès "sain" : PT = 1.2 %
- 2 - Faciès d'altération hydrothermale échantillonné en bordure de la zone altérée : PT = 3.9 %
- 3 - Faciès altéré, décomprimé, cohérent : PT = 12 %

La porosité augmente avec l'apparition de la microfissuration et celle de l'altération. Vers la surface, la microporosité croît proportionnellement plus vite que la macroporosité, celle-ci subissant probablement des colmatages par libération de produits argileux au cours de l'arénisation.

* Valeur aquifère des altérites du monzogranite de HUELGOAT

Les profils d'altérites observés sur le monzogranite de HUELGOAT ont subi des transformations hydrothermales modérées avec apparition d'illite et de kaolinite. Ces produits argileux colmatent partiellement la macroporosité développée à partir de l'importante fissuration de la roche mais la porosité efficace reste élevée, proche de 10 % dans des profils décimétriques. La porosité de fracture diminue par contre par argilisation des plans. La perméabilité de la formation réside dans les joints de décompression plus ouverts en surface et dans la microfissuration.

Les variations de la porosité dans les altérites sont intéressantes à deux titres :

- une forte porosité pourrait entraîner la formation d'aquifères productifs... mais ça n'est pas le cas. D'extension assez souvent limitée, malgré leur porosité, les altérites ne forment pas d'aquifères exploitables à elles seules, mais elles constituent des systèmes intéressants si elles se trouvent combinées avec des fractures perméables ;
- les variations de porosité dans les altérites auront une influence directe sur les émanations de gaz Radon observées en surface au droit de ces formations. C'est un aspect important du contrôle des potentialités aquifères par le Radon, considéré comme l'expression d'un indice de perméabilité.

2 - SELECTION DE CRITERES EN RELATION AVEC L'EXISTENCE DE RESERVOIRS EXPLOITABLES

2.1 - CRITERES ET DOMAINES D'ETUDE

Les conditions favorables à l'existence d'un réservoir sont définies par de multiples critères correspondant à deux grands domaines qui sont celui des structures et celui de la géomorphologie.

2.1.1 - Critères structuraux

Selon le type de support utilisé pour aborder l'étude des structures, ils peuvent prendre les formes suivantes :

- analyse linéamentaire sur photo satellite,
- étude de la méga et de la meso-fracturation sur photos aériennes,
- reconnaissance de la méso-fracturation sur le terrain,
- étude éventuelle de la micro-fracturation sur le terrain,
- prise en compte de données géophysiques.

2.1.2 - Critères géomorphologiques

Au sens large, le domaine géomorphologique sera défini par l'ensemble des critères suivants :

- la lithologie : en domaine cristallin homogène, elle intervient surtout par l'influence qu'elle peut avoir sur l'altération ;
- l'altération : selon leur nature et leur développement, les altérites peuvent constituer des réservoirs capacitifs poreux ;
- la morphologie : elle fait intervenir plusieurs critères :
 - . les pentes (incision du relief),
 - . la conservation d'éléments de surfaces anciennes,
 - . le développement du réseau de drainage.

2.1.3 - Démarche d'étude

Au cours de la première phase de l'étude (87 SGN 720 EAU), la plupart de ces critères ont été pris en compte et traités, pour partie, par des moyens informatiques (analyse linéamentaire), pour partie, par des moyens manuels.

La seconde phase de l'étude du massif granitique de HUELGOAT se propose d'utiliser le logiciel SYNERGIE pour "mettre en images" les différents critères, les croiser, les combiner de façons diverses.

La "mise en images" impose que chaque critère considéré soit appréhendé à l'aide d'une échelle d'évaluation (quantitative ou qualitative), échelle dont les classes sont toujours fixées entre un pôle négatif et un pôle positif, de manière à apprécier le plus justement possible l'existence d'un réservoir potentiel.

La conjonction de plusieurs critères positifs sur un même secteur sera interprétée comme correspondant à l'existence d'un réservoir potentiel.

2.2 - CRITERES STRUCTURAUX RETENUS

Quelle que soit la nature des données structurales prises en compte, c'est toujours en termes de variation de densité que les différents critères structuraux ont été évalués :

- les zones de très forte densité (de linéaments ou de fractures) constituent le pôle favorable à l'existence d'un réservoir potentiel ;
- les zones de densité nulle ou très faible augurent très défavorablement de la présence d'un réservoir ;
- deux classes intermédiaires (densité forte et densité faible) s'inscrivent entre les deux pôles et constituent des zones de moins en moins privilégiées.

Six types de données structurales seront traités selon cette grille d'estimation, ce qui conduit à six documents cartographiques exprimant successivement les densités :

- de l'ensemble des linéaments SPOT,
- de chacune des deux principales familles directionnelles,
- de la fracturation issue des photos aériennes,
- de la fracturation portée sur la carte géologique,
- des discontinuités gravimétriques.

Pour l'ensemble des critères structuraux, les zones les plus favorables à l'existence d'un réservoir potentiel seront celles dans lesquelles on observera une conjonction de fortes densités pour plusieurs des documents cartographiques établis.

REMARQUE

Les discontinuités gravimétriques issues de l'étude intitulée "Analyse structurale interactive Gravimétrie/Géologie" (CASTAING (C.) et DEBGLIA (N.) 88 DT 027 GPH/GEO) ont également été traduites en carte de densité. Cependant, ce document fera l'objet d'une interprétation prudente à cause du décalage spatial entre les structures internes et superficielles.

2.3 - CRITERES GEOMORPHOLOGIQUES RETENUS

Quatre critères géomorphologiques ont été retenus pour leur signification hydrogéologique ; ils s'expriment quantitativement ou qualitativement selon leur nature ; il s'agit :

- des pentes,
- des éléments de surfaces morphologiques conservées,
- de la nature et de la répartition des altérites sur le massif,
- de la densité de drainage.

2.3.1 - La carte des pentes

Elle est issue par traitement direct à l'aide du logiciel SYNERGIE d'un modèle numérique de terrain (MNT) conçu par IGN. Les zones de faible pente peuvent être considérées comme favorables à l'infiltration donc à la recharge alors que les pentes fortes, favorisant le ruissellement et l'évacuation rapide des eaux météoriques par le réseau de surface constituent un caractère défavorable à la recharge d'un éventuel réservoir souterrain.

2.3.2 - Les éléments d'anciennes surfaces morphologiques

La localisation des vestiges de surfaces morphologiques est également issue du MNT par deux opérations successives : un classement par tranches d'altitudes, suivi d'une sélection des zones de faible pente (< 5 %). Ces surfaces anciennes peu pentues, donc relativement peu disséquées par le réseau hydrographique, donc peu érodées, sont des lieux propices au développement d'altérites capacitives.

Elles représentent une configuration morphologique favorable à l'existence d'un réservoir poreux susceptible d'exploitation.

2.3.3 - Les altérites

Les observations de terrain, menées en vue de déterminer la nature et la répartition des altérites sur le massif de HUELGOAT, procèdent de la même démarche que la recherche des anciennes surfaces à pente faible. L'évaluation par rapport à l'existence d'un réservoir possible suppose une condition favorable : la présence d'altérites évoluées essentiellement des arènes, mais aussi des alluvions et colluvions, en extension et puissance affirmées. Ces altérites peuvent alors constituer des réservoirs poreux exploitables ou assurant au moins la recharge du milieu fracturé sous-jacent, en agissant comme milieu tampon.

2.3.4 - La densité de drainage

Le réseau de surface considéré dans sa totalité (tous ordres confondus) est pris en compte sous forme d'une carte de densité de drainage, établie selon les mêmes classes estimatives, que pour les cartes de densité de linéaments ou de fractures.

Les zones de fortes densités de drainage sont considérées comme favorables à la recharge lorsqu'elles coïncident avec de faibles pentes.

Au contraire, l'abondance de drains développés sur des pentes affirmées, signale la prédominance du ruissellement, l'absence locale de recharge, ce qui va à l'encontre de l'existence d'un réservoir.

2.3.5 - Synthèse des critères géomorphologiques

Si l'on considère globalement les quatre critères géomorphologiques retenus, il apparaît que la configuration la plus favorable à l'existence d'un réservoir exploitable réunira les caractéristiques suivantes :

- ancienne surface morphologique,
- pente faible (< 5 %),
- présence d'altérites en extension et puissance affirmées,
- caractère évolué des altérites (arènes),
- drainage bien développé, relief non incisif.

Au contraire, les affleurements de granite sain, les pentes aigües, les vallées profondes constituent le pôle défavorable.

Dans le chapitre suivant, chaque document cartographique (ou image) fera l'objet d'un commentaire descriptif ou qualitatif, qu'il s'agisse d'une image initiale (image de base correspondant à la mise en forme cartographique de données) ou d'une image combinée (résultat du croisement de deux ou plusieurs images initiales ou intermédiaires).

3 - ANALYSE MULTICRITERE TRAITEE PAR LE LOGICIEL SYNERGIE

3.1 - ORIGINE DES DONNEES

Les données proviennent à la fois des documents synthétiques tels que la carte géologique de la France au 1/50 000 (BRGM), un modèle numérique de terrain (IGN), une carte des discontinuités gravimétriques (BRGM), mais aussi de documents non élaborés tels que les images satellitaires (SPOT - IMAGE) ou les photographies aériennes (IGN).

Ces documents non élaborés ont dû faire l'objet de travaux préliminaires interprétatifs :

- L'image SPOT a subi des traitements divers, destinés à formaliser et à sélectionner les informations utiles :
 - . exclusion des linéaments de nature anthropique
 - . tri des linéaments montrant les familles directionnelles dominantes
- Les photographies aériennes ont servi de support à la reconnaissance de la méga et de la méso fracturation affectant le massif, ainsi qu'à la localisation des altérites, complétée par une étude de terrain

Ainsi, directement ou indirectement, sept documents de base ont été rassemblés :

- la carte géologique pour la lithologie et la structure
- la carte des linéaments repérés sur les photographies aériennes
- le modèle numérique de terrain en semis de point X, Y, Z au pas de 75 m
- la carte partielle de l'état d'altération du socle
- le réseau hydrographique extrait des cartes topographiques IGN et classé selon la hiérarchie de STRAHLER
- la carte des discontinuités gravimétriques

A l'exception du modèle numérique de terrain (M N T) toutes les données font l'objet d'une saisie digitale pour permettre la création d'images numériques de même échelle. Les documents de base ont été choisis au 1/50 000 en coordonnées Lambert I, avec les limites suivantes pour le M N T :

$$136 \leq X \leq 152 \text{ km} \quad \text{et} \quad 89 \leq Y \leq 99 \text{ km}$$

3.2 - MISE DES DONNEES SOUS SYNERGIE

3.2.1 - Présentation du logiciel SYNERGIE

SYNERGIE est un logiciel interactif graphique, permettant le traitement multivarié de données cartographiques d'origines diverses. Il comporte un ensemble important de fonctions élémentaires dont l'enchaînement est effectué au choix de l'utilisateur, selon la finalité imposée par l'étude. Un certain nombre de fonctions est en rapport direct avec la gestion même du logiciel ; il s'agit de celles relatives à :

- . la gestion des images
- . le traitement du signal
- . les opérations d'entrées/sorties

Les autres fonctions correspondent aux traitements proprement dits et concernent les domaines suivants :

- . opérations arithmétiques et logiques
- . opérations géométriques
- . définition de paramètres
- . manipulations graphiques

Pour réaliser l'étude multicritère du massif d'HUELGOAT, les fonctions principalement utilisées sont d'ordre arithmétique et logique (additions, intersections d'images), d'ordre géométrique (seuillage d'une image), de nature graphique (collage d'images) ou de simples traitements bruts (calcul des pentes).

Pour réaliser ces opérations, des fonctions de gestion du logiciel, de visualisation et de dessin des cartes, sont également mises en oeuvre.

3.2.2 - Organisation des données en bases images

Les sept documents de base représentant l'ensemble des données ont été numérisés, à l'exception du M N T, déjà sous cette forme par nature. Ces documents sont placés "sous SYNERGIE" par une opération qui les transforme en images, stockées dans deux "bases - images". Chaque document prend donc la forme d'une image définie point par point, c'est-à-dire pixel par pixel (*Pixel = Picture Element*) = c'est une image en mode RASTER.

FIGURE 4

ORGANIGRAMME DE TRAITEMENT CARTOGRAPHIQUE SOUS LE LOGICIEL SYNERGIE
APPLIQUE A L'ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DU MASSIF CRISTALLIN DE HUELGOAT
(FINISTERE)

Exemple méthodologique destiné à l'aide à la prospection sur socle
et à une échelle régionale

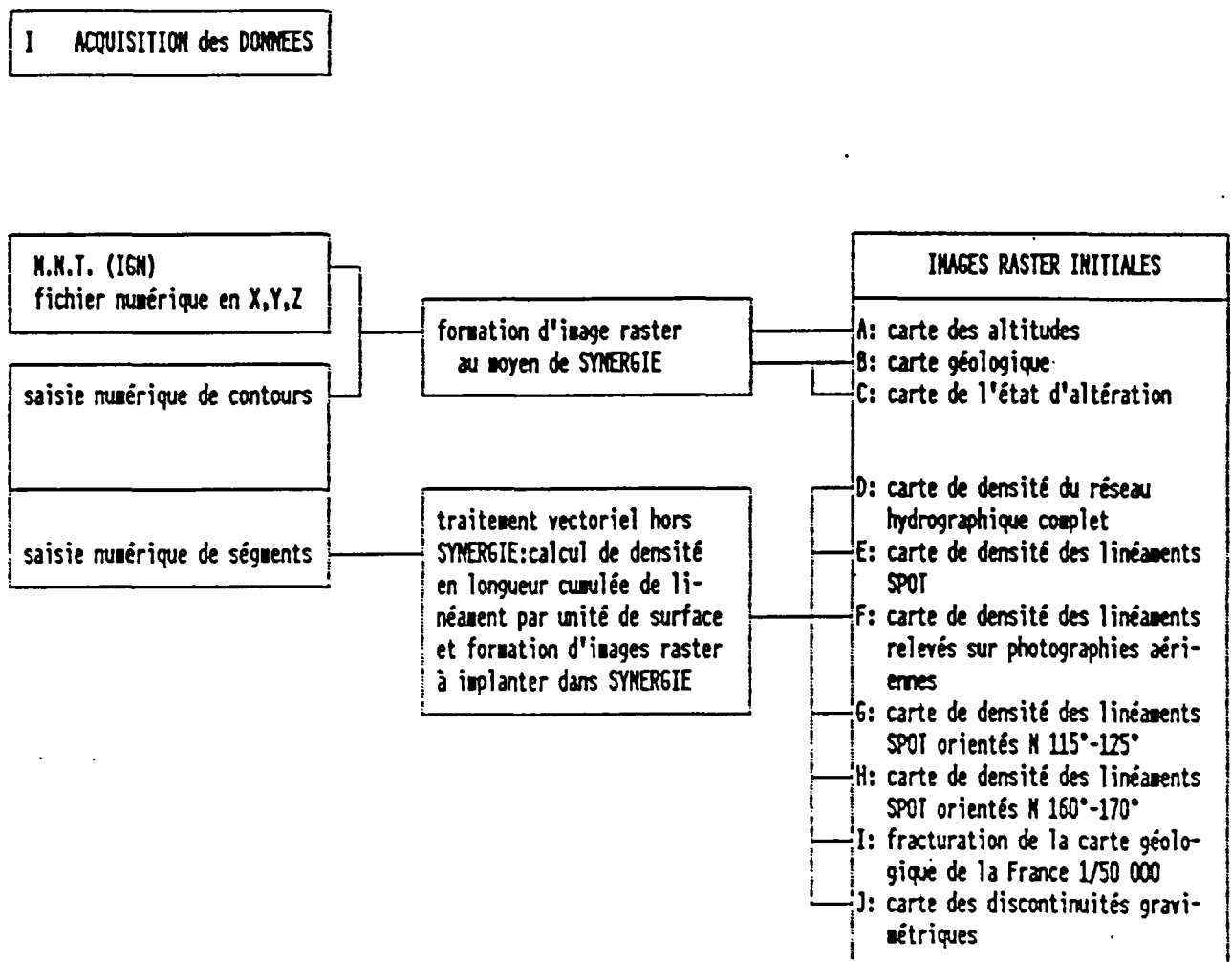


FIGURE 4 (suite)

II CREATION D'IMAGES INTERMEDIAIRES

Avec les données GEOMORPHOLOGIQUES

A:	carte des talwegs	:A1
	carte des pentes classées	:A2
	carte des altitudes classées	:A3
A2:	carte des éléments de surface à	:K
A3:	faible pente classés en altitude	
A2:	état superficiel des éléments de surface	:L
C:	de faible pente	
A2:	lithologie des éléments de surface	:M
B:	de faible pente	

Avec les données STRUCTURALES

G:	carte des zones à forte densité de linéaments ...	:N
H:	N 120° ou N 165°	

III IDENTIFICATION de SYSTEMES AQUIFERES POTENTIELS

D:	carte sélective des zones de recharge	:P
L:		
N:		
N:	carte sélective des zones de perméabilité	:Q
A1:		
P:	ZONAGE DES POTENTIALITES AQUIFERES DU MASSIF DE	:R
Q:	HUELGOAT : combinaison des zones de recharge, des zones à perméabilité de fracture favorable et des talwegs N 120° et N 165°.	

Les nombres de pixels selon les axes X et Y sont fixés lors de la création d'une base image. Ils sont identiques pour les images d'une même base. Il est nécessaire que les bases dont les images sont susceptibles d'être combinées aient une taille semblable ou proportionnelle en X et en Y. Les limites des bases qui vont être employées sont de 2 000 000 pixels mémorisables, utilisables pour la réalisation de 10 images au maximum, la taille de chacune d'elle ne pouvant excéder 750 x 750 pixels.

3.2.3 - Procédures de traitements cartographiques

La procédure de traitement peut être résumée en trois étapes :

- la création des images initiales
- la création d'images intermédiaires d'abord unicritères puis multicritères
- la création d'une carte multicritère, de potentialité aquifère

(c.f. organigramme donné en figure 4)

3.3 - LES IMAGES INITIALES

Les images initiales sont implantées dans deux bases-images de SYNERGIE. Elles sont au nombre de dix dont sept sont issues d'un prétraitement en image de densité pour pallier un défaut provisoire du logiciel, la version disponible de ce logiciel ne permettant pas le passage d'une image vecteur à une image raster.

Deux autres images découlent directement de la digitalisation des cartes par saisie de périmètres. C'est le cas de la carte géologique et de celle de l'état d'altération du socle cristallin.

Le modèle numérique de terrain est intégré directement par le logiciel.

La taille de ces images est de 215 pixels en X et de 135 pixels en Y. Enfin, quelques fichiers d'habillage sont prévus pour la présentation.

3.3.1 - Présentation des images initiales

Image A : Carte des altitudes (*cf figure 5 ci-contre*)

Le modèle numérique de terrain est saisi directement sous SYNERGIE par la commande "ign"

Commentaire :

- La déclivité du massif est orientée Nord-Ouest Sud-Est.

- Les valeurs de l'image raster ainsi obtenues sont réparties entre + 92 mètres et + 381 mètres d'altitude, avec un maximum de fréquence entre 250 et 275 mètres (*cf histogramme de la figure 6*)

- Le relief est marqué par l'encaissement de deux vallées autour d'une zone élevée qui prolonge dans la moitié Sud les secteurs supérieurs à 225 mètres d'altitude. Les causes de ce relief seront recherchées dans la lithologie (*cf image M*). Cette image des classes arithmétiques, combinée à celle des pentes conduira à la mise en évidence des paléosurfaces favorables à la conservation des altérites, ce qui constituera une étape vers la détermination des zones favorables à la recharge.

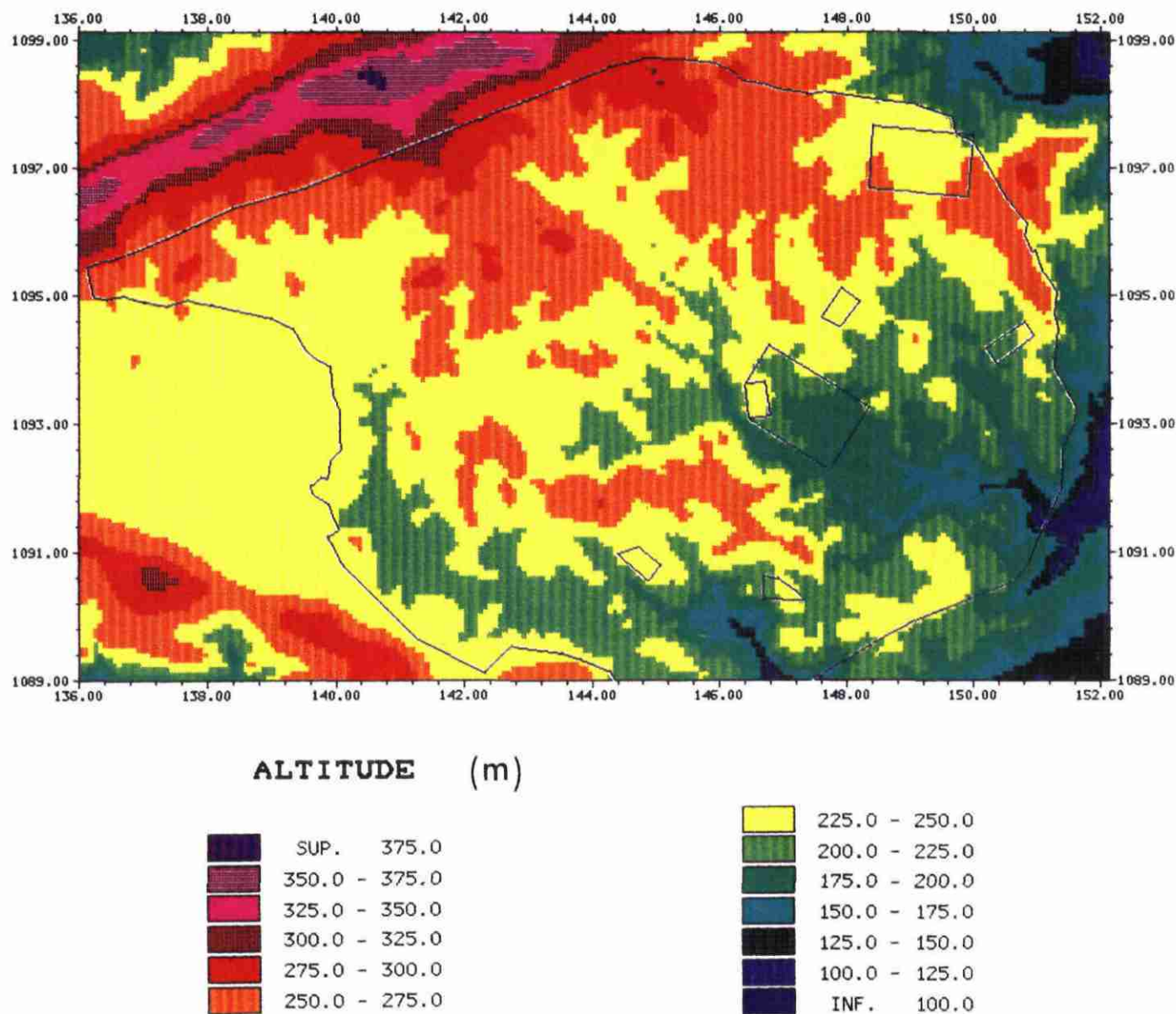


Figure 5 - Image A : Carte des altitudes.

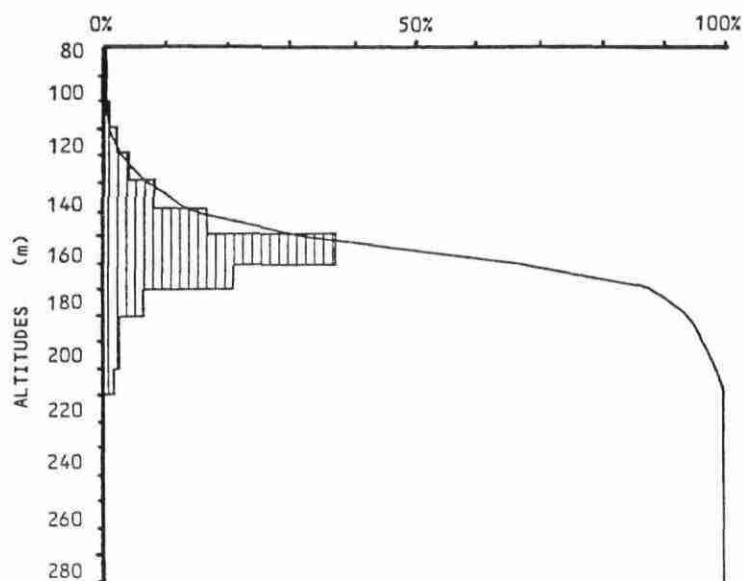


FIGURE 6 - Histogramme des altitudes dans le secteur du massif de HUELGOAT

Image B : Carte géologique (cf figure 7 ci-contre)

Commentaire :

- Cette image comporte les différentes formations cristallines du massif ainsi que les alluvions et les colluvions mentionnées sur la carte géologique de la France au 1/50 000. La fracturation reproduite sur cette dernière carte n'apparaît pas sur l'image B. Elle est reportée séparément sur l'image I.

- En comparant cette image avec celle des altitudes, on constate que l'encaissement au-dessous de 225 mètres est limité aux zones d'affleurement du monzogranite du HUELGOAT. Le relief existant dans le secteur de LEINTAN et du CLOITRE se superpose aux affleurements des formations de monzogranite de mêmes noms. Le grain plus fin de ces formations et leur situation en position inférieure dans la structure du diapir de HUELGOAT par rapport au monzogranite de HUELGOAT (donc à l'écart des zones d'altération hydrothermale) peuvent permettre d'expliquer leur meilleure résistance à l'altération supergène et à l'érosion.

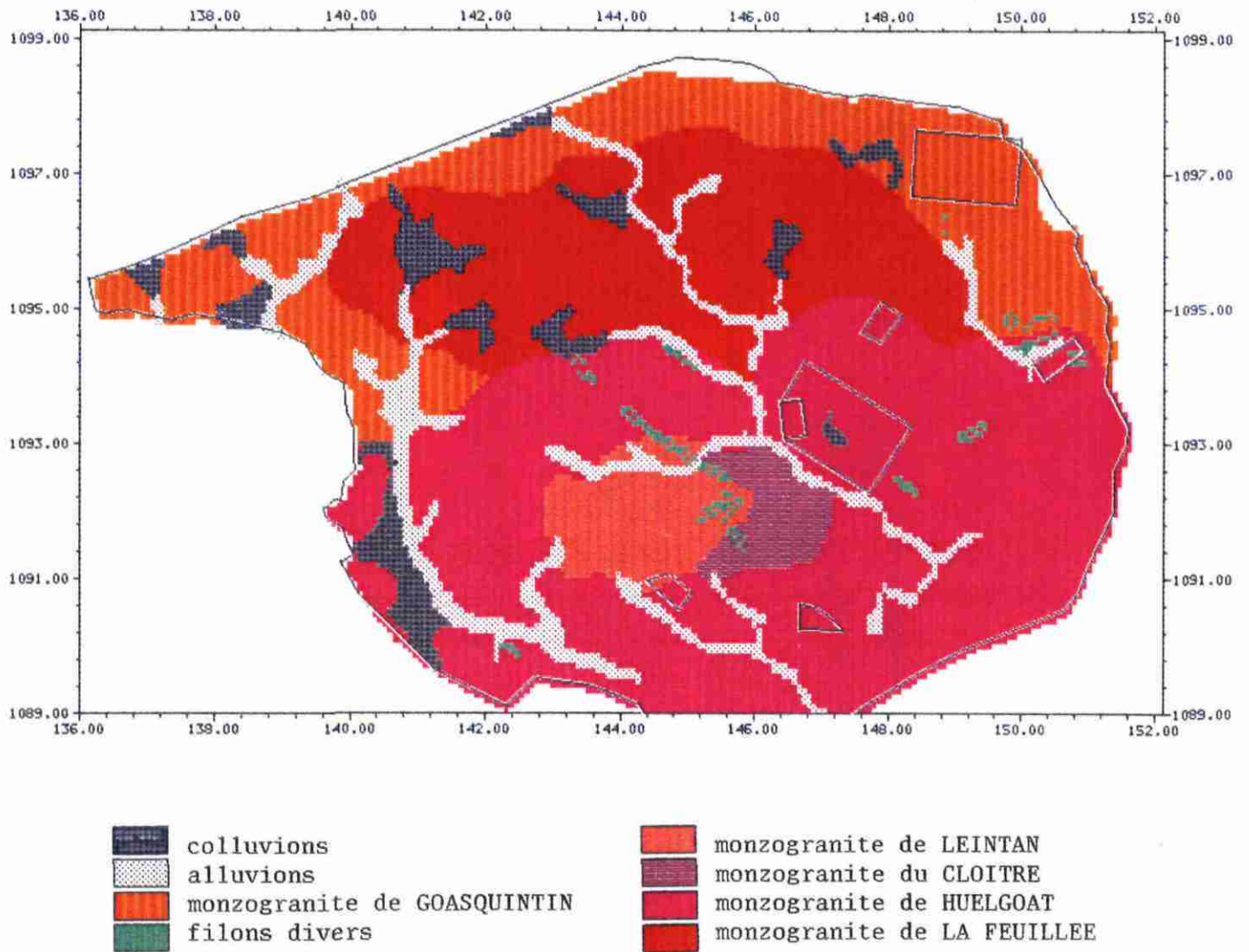


Figure 7 - Image B : Carte géologique.

Image C : Carte partielle des altérites et des formations superficielles
(cf. figure 8 ci-contre)

Commentaire:

- La carte est partielle ; les observations qui ont permis d'établir ce document ne couvrent pas l'ensemble du massif.

- L'état d'altération est cartographié sous trois aspects différents : les arènes, le granite décomprimé et les affleurements de granite sain. On constate, en accord avec le relief, que les affleurements de granite sain prédominent dans la partie la plus encaissée du massif. Ils caractérisent aussi le secteur d'altitude relativement élevé des monzogranites de LEINTAN et du CLOITRE

- Certaines de ces arènes qui affleurent dans la partie aval du massif, correspondent à des altérations hydrothermales développées dans le granite de HUELGOAT (cf chapitre 1, Etat d'altération)

- Les formations superficielles sont les alluvions et les colluvions figurant déjà sur la carte géologique.

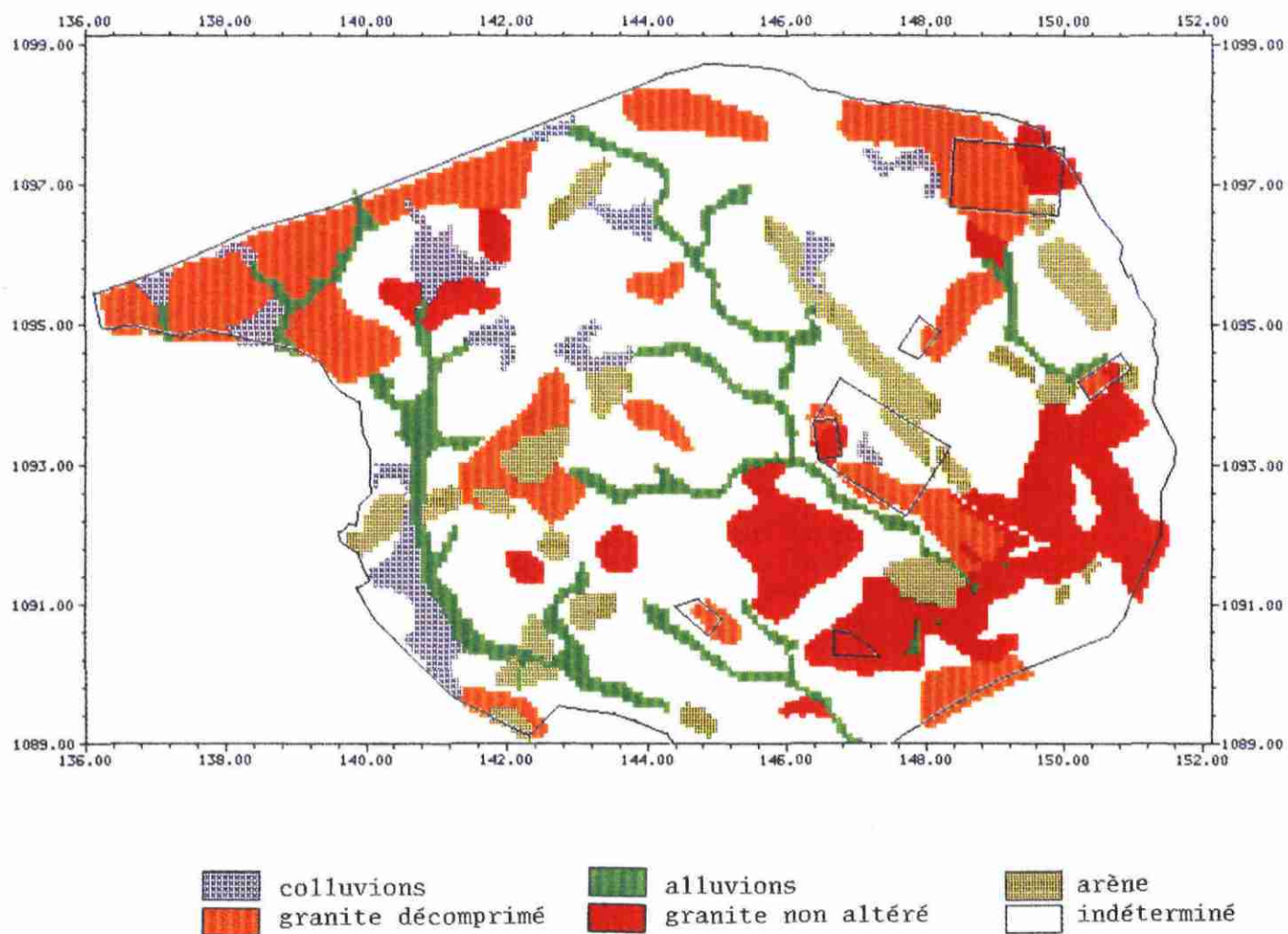


Figure 8 - Image C : Carte de l'état d'altération.

Image D : Carte de densité de drainage du réseau hydrographique complet
(cf figure 9 ci-contre)

Pour obtenir cette image de densité de drainage, la carte du réseau hydrographique numérisée a fait l'objet de calculs et de divers traitements. La saisie sous SYNERGIE a finalement été effectuée par la commande TELE.

Commentaire :

- Comme dans les images du même type qui suivent, cette carte représente des densités de longueur cumulée classées en zones nulle à très faible, faible, forte et très forte. En l'occurrence, le traitement concerne tous les ordres de segments du réseau hydrographique.

- La carte vectorielle du réseau classé est présentée en figure 10 ci-contre.

- Un axe de forte densité de drainage traverse le massif du Nord-Ouest au Sud-Est, tandis que le relief du CLOITRE et de LEINTAN est à l'inverse souligné par un faible drainage. Dans ce dernier secteur, la figure 10 montre que les segments d'ordre 1 du réseau hydrographique sont plus rares.

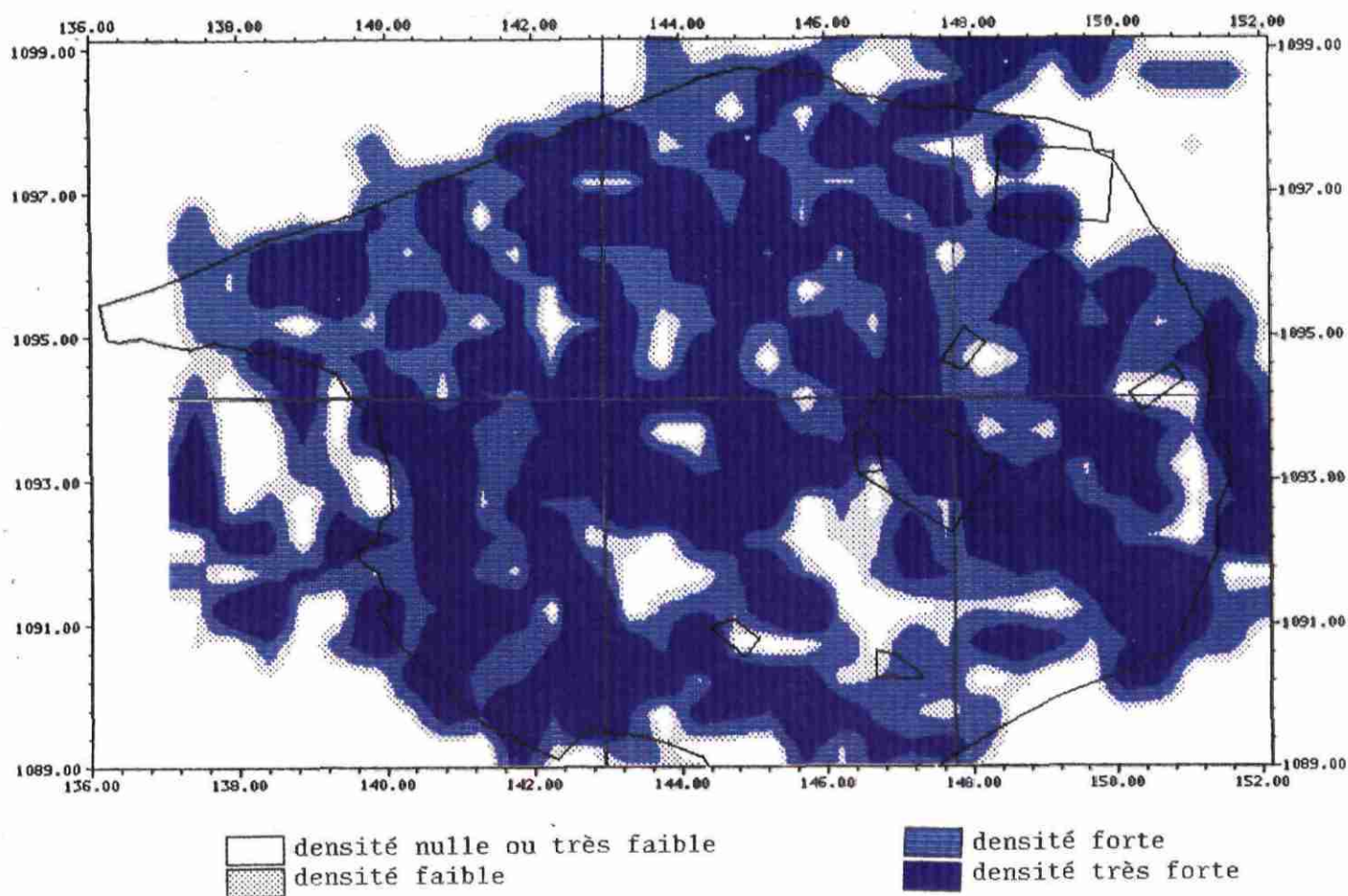


Figure 9 - Image D : Carte de densité de drainage.

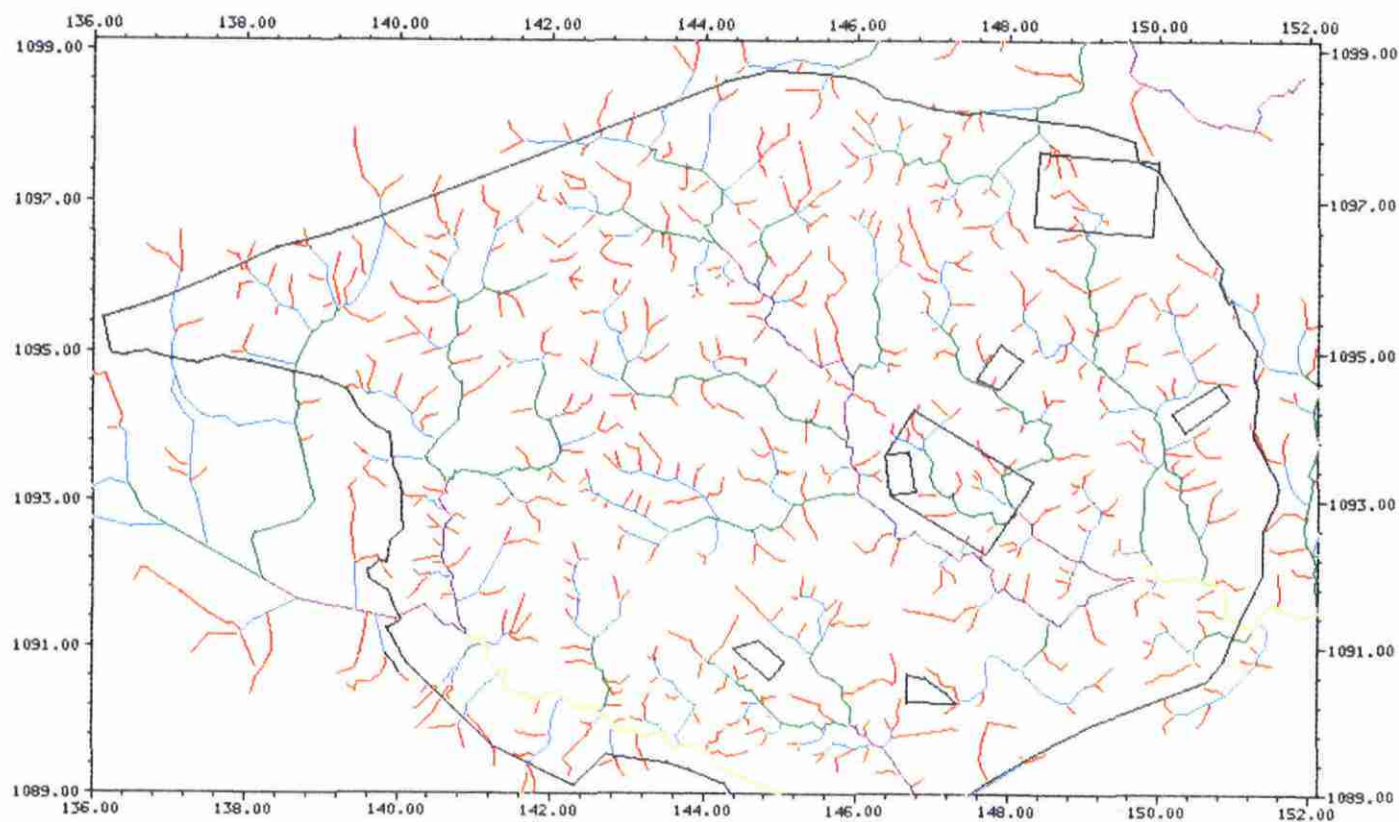


Figure 10 - carte vectorielle du réseau hydrographique complet.

Image E : Carte de densité des linéaments SPOT (cf. figure 11 ci-contre)

Commentaire :

- Les densités sont exprimées en longueurs cumulées classées en zone nulle à très faible, faible, forte et très forte.

- L'histogramme directionnel calculé à partir des fichiers séquentiels de vecteurs, montre la prédominance décroissante des familles de linéaments SPOT N 105°, N 125°, N 20° et N 70° (cf figure 12 ci-dessous).

- La carte vectorielle des linéaments permet la comparaison (cf figure 13). L'image E permet d'isoler les zones de très forte densité de linéaments. Ces zones, contrairement à celles de forte densité, ne montrent pas d'orientation particulière. Elles sont plus larges et plus nombreuses dans la partie Sud du massif. Les zones de forte densité se superposent à l'encaissement des vallées. Elles adoptent leurs directions suggérant ainsi une relation morphostructurale, notamment autour de N 120° comme c'est le cas au centre du massif. Les zones de plus faible densité se répartissent surtout au-dessus de 200 mètres d'altitude et dans les zones fortement boisées. Les secteurs du CLOITRE et de LEINTAN sont par contre des zones de densité forte à très forte, autour des directions structurales N 110° et N 130°, alors que la morphologie locale montre une orientation Est-Ouest pour cet ensemble de granites à grains fins.

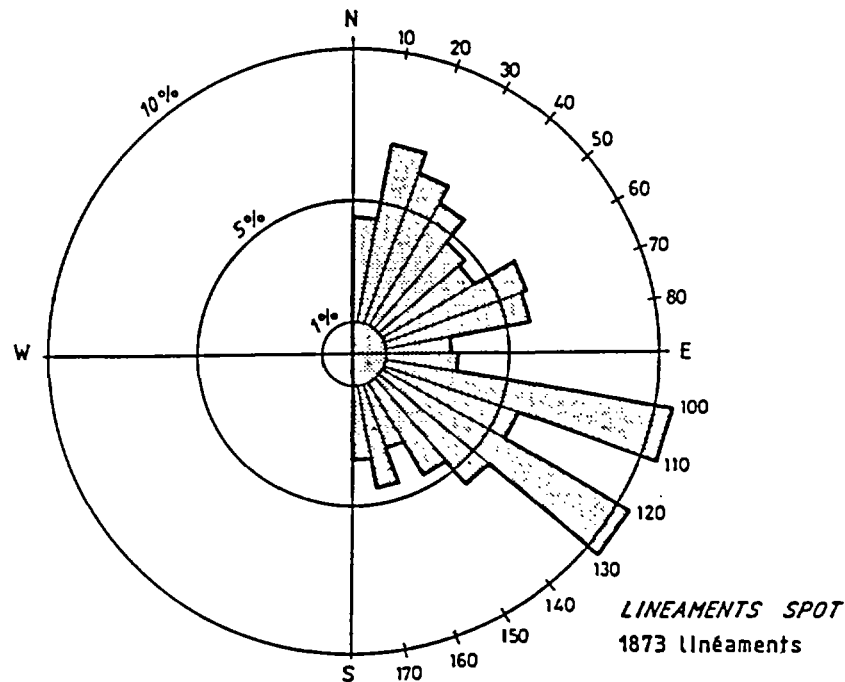


FIGURE 12 - Histogramme directionnel des linéaments SPOT observés sur le massif de HUELGOAT

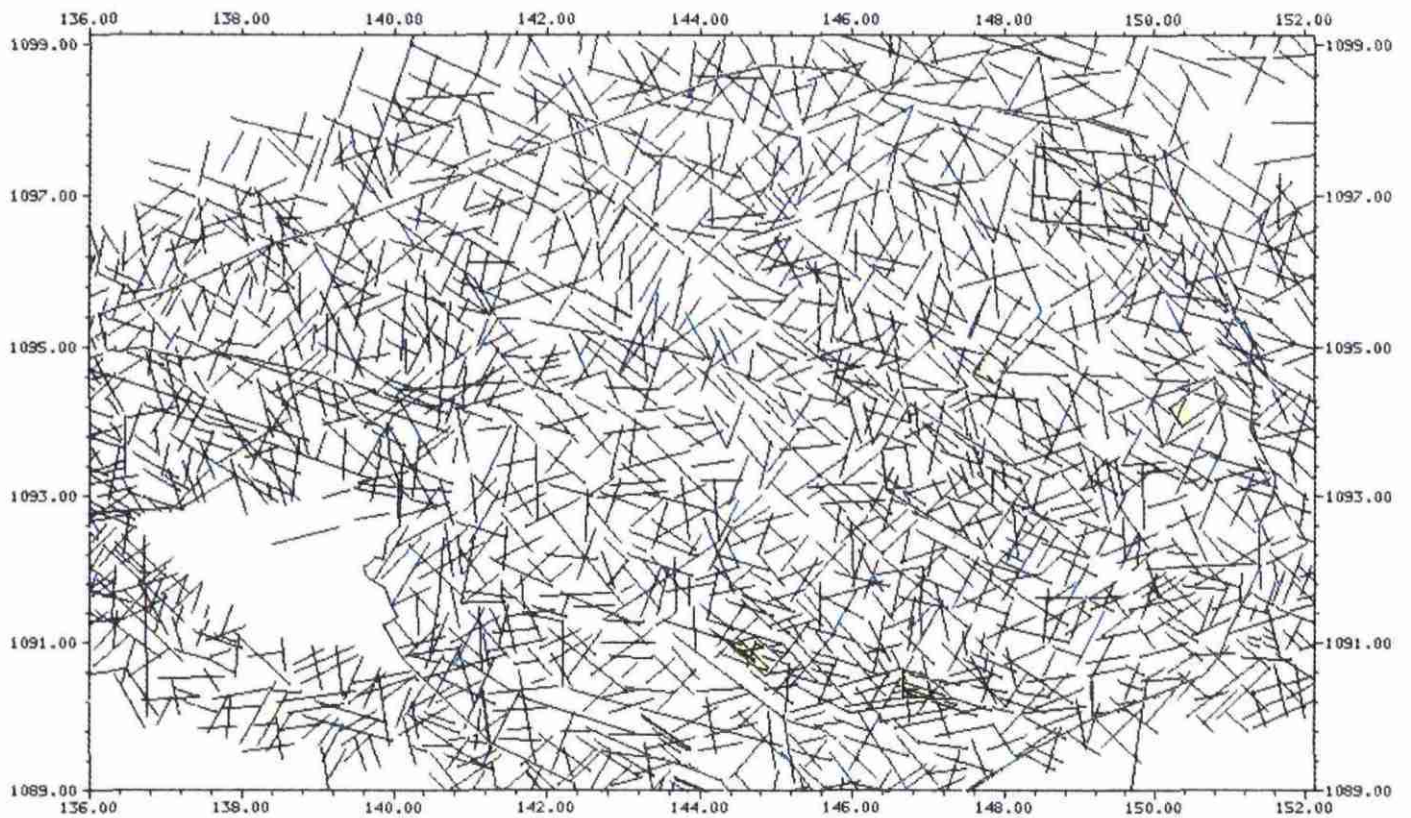
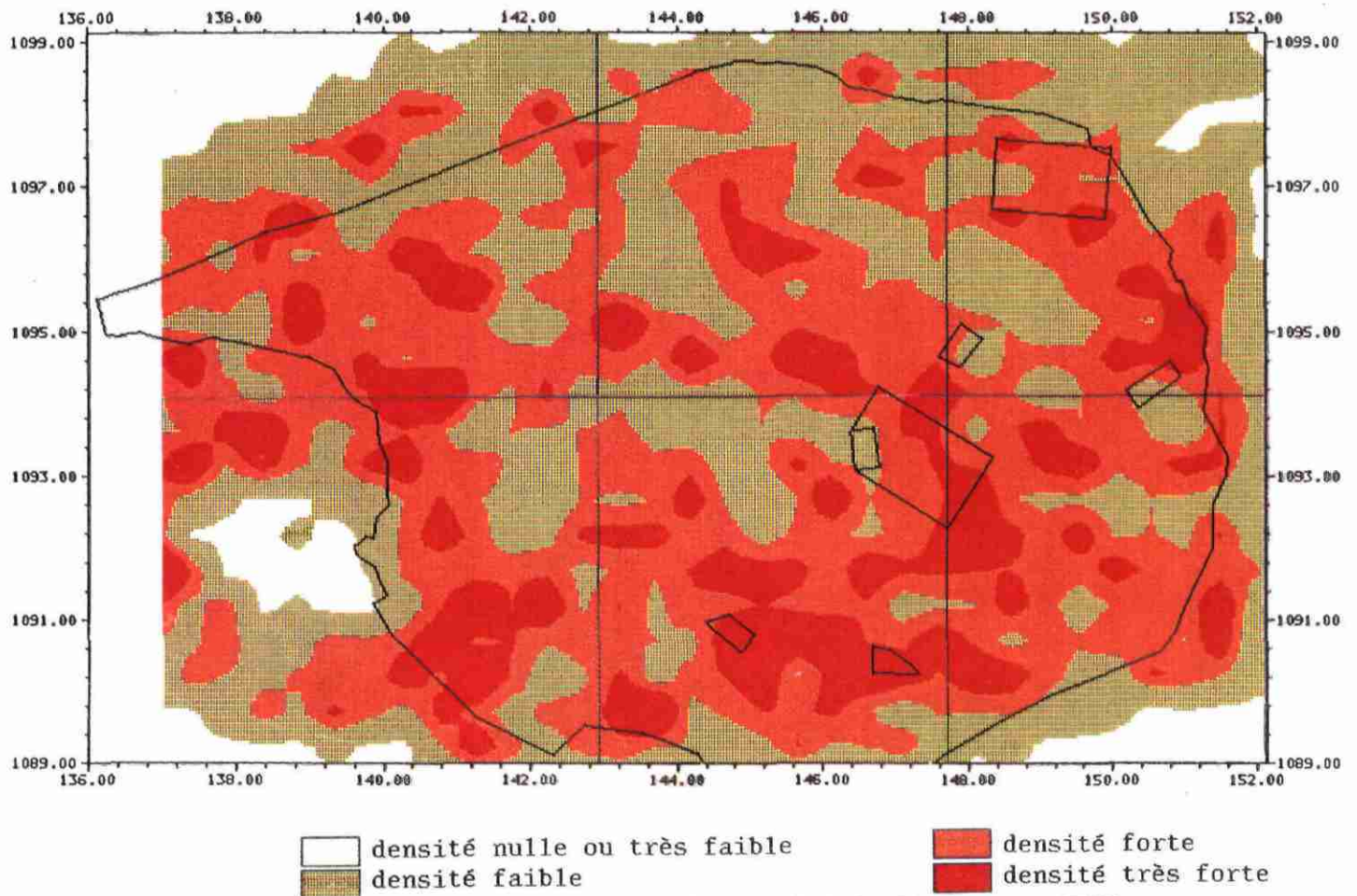


Image F : Carte de densité des linéaments extraits sur photographies aériennes
(cf figure 14 ci-contre)

Commentaire :

- Cette carte est constituée comme l'image E
- Elle est mise en parallèle avec la carte vectorielle des linéaments à la même échelle (figure 15 ci-contre)
- Les images F et E ont une relation morphostructurale N 125° dans le centre du massif, une densité de linéaments forte à très forte dans l'extrême Ouest du massif, et des densités nulles à très faibles augmentant du Sud vers le Nord.
- 53% des zones de forte à très forte densité de cette image se superposent aux mêmes classes de l'image E (SPOT)

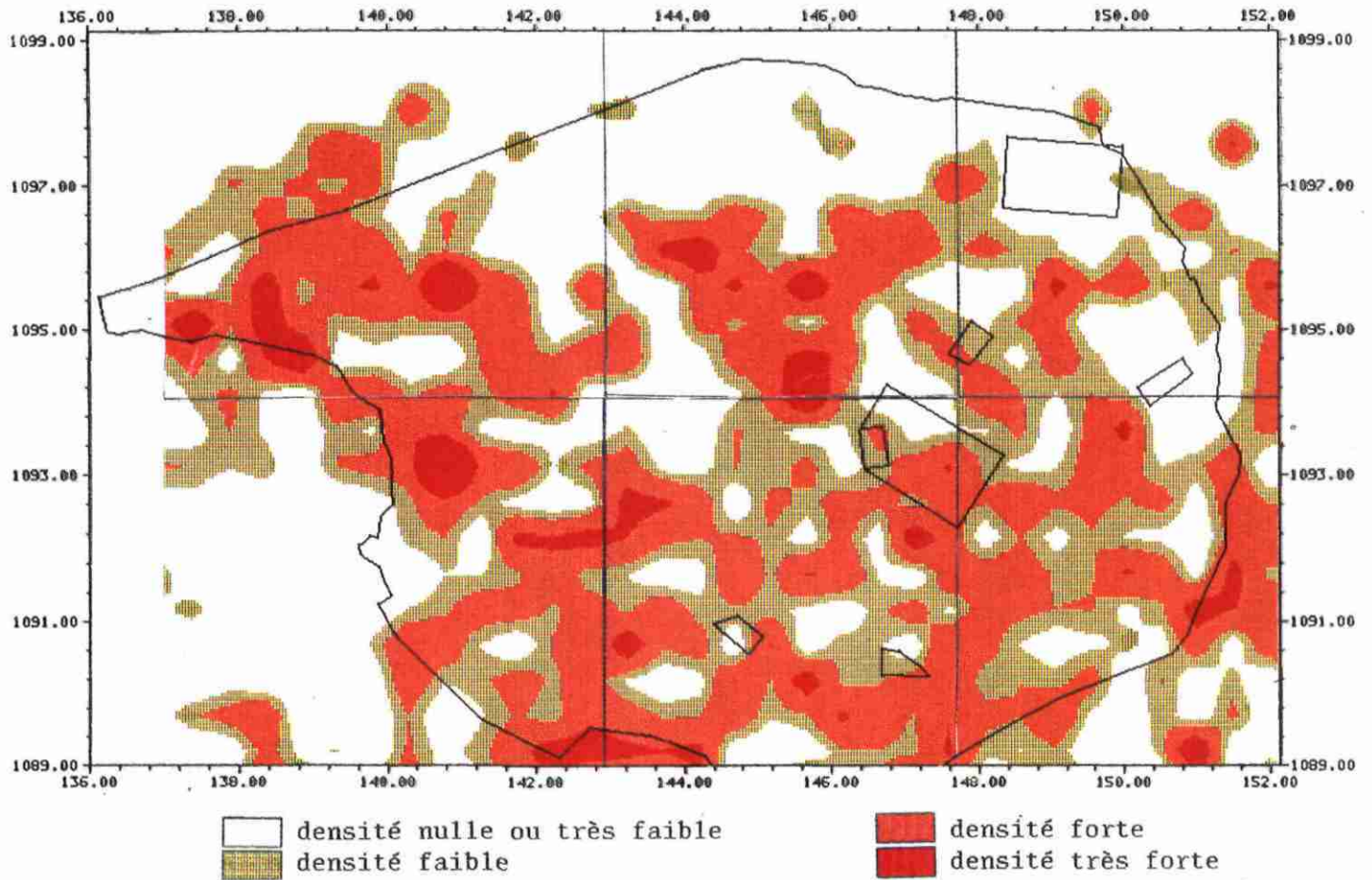


Figure 14 - Image F : Carte de densité de linéaments (photographie).

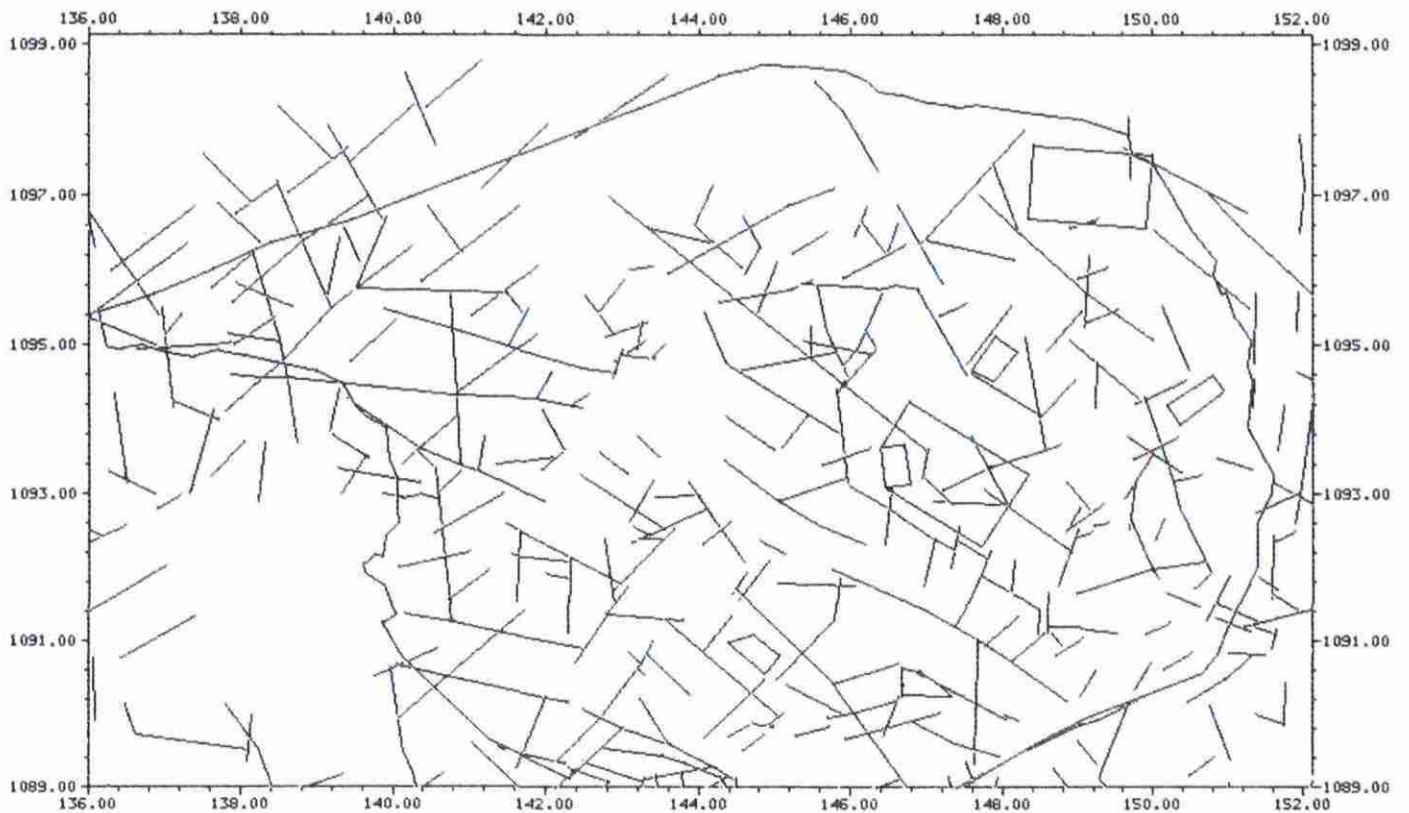


Figure 15 - carte vectorielle des linéaments observés sur photographies aériennes.

Image G : Carte de densité des linéaments SPOT orientés entre N 115° et N 125°
(cf figure 16 ci-contre)

Commentaire :

- Cette image a nécessité un tri angulaire des linéaments SPOT. Elle permet d'isoler sur la famille de linéaments N 120° des zones de forte à très forte densité ayant une perméabilité potentielle élevée. Cette famille est en effet proche de la direction de contrainte principale la plus récente, pour laquelle les fractures sont susceptibles d'avoir joué en extension.

- Les zones favorables sont disséminées dans le massif, mais un peu plus abondantes au Nord-Ouest et au Sud-Ouest. Elles ne sont pas nettement orientées selon la direction N 120° bien que quelques zones soient alignées sur l'axe morphostructural.

Image H : Carte de densité des linéaments SPOT orientés entre N 160° et N 170°
(cf figure 17 ci-contre)

Commentaire :

- Ce document est établi dans le même but que l'image G avec l'autre direction susceptible d'avoir récemment joué en extension.

- Les zones de forte et de très forte densité de linéaments N 165° sont également disséminées à travers le massif. Elles sont bien représentées suivant l'axe morphostructural N 120°.

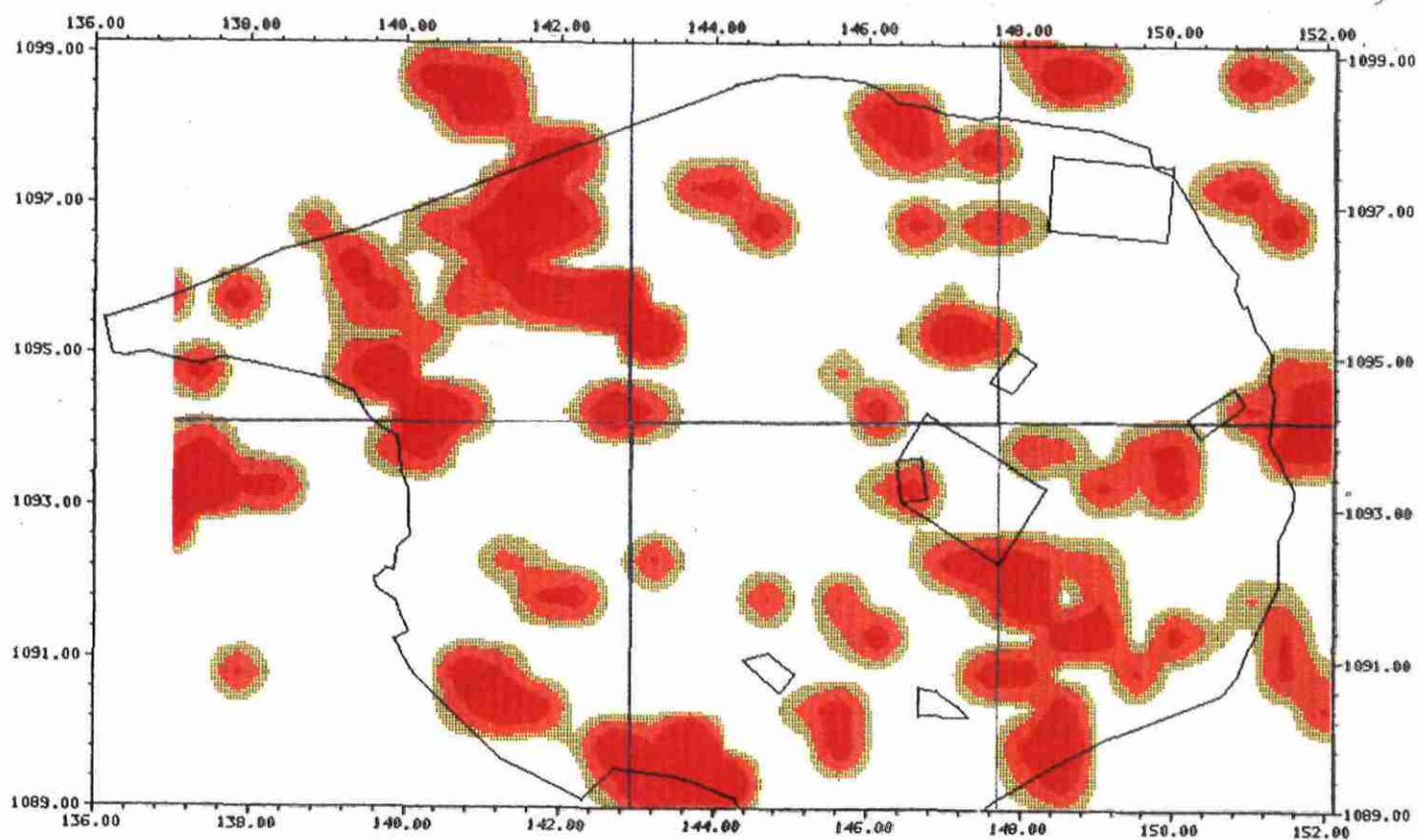


Figure 16 - Image G : carte de densité de linéaments SPOT N 120°.

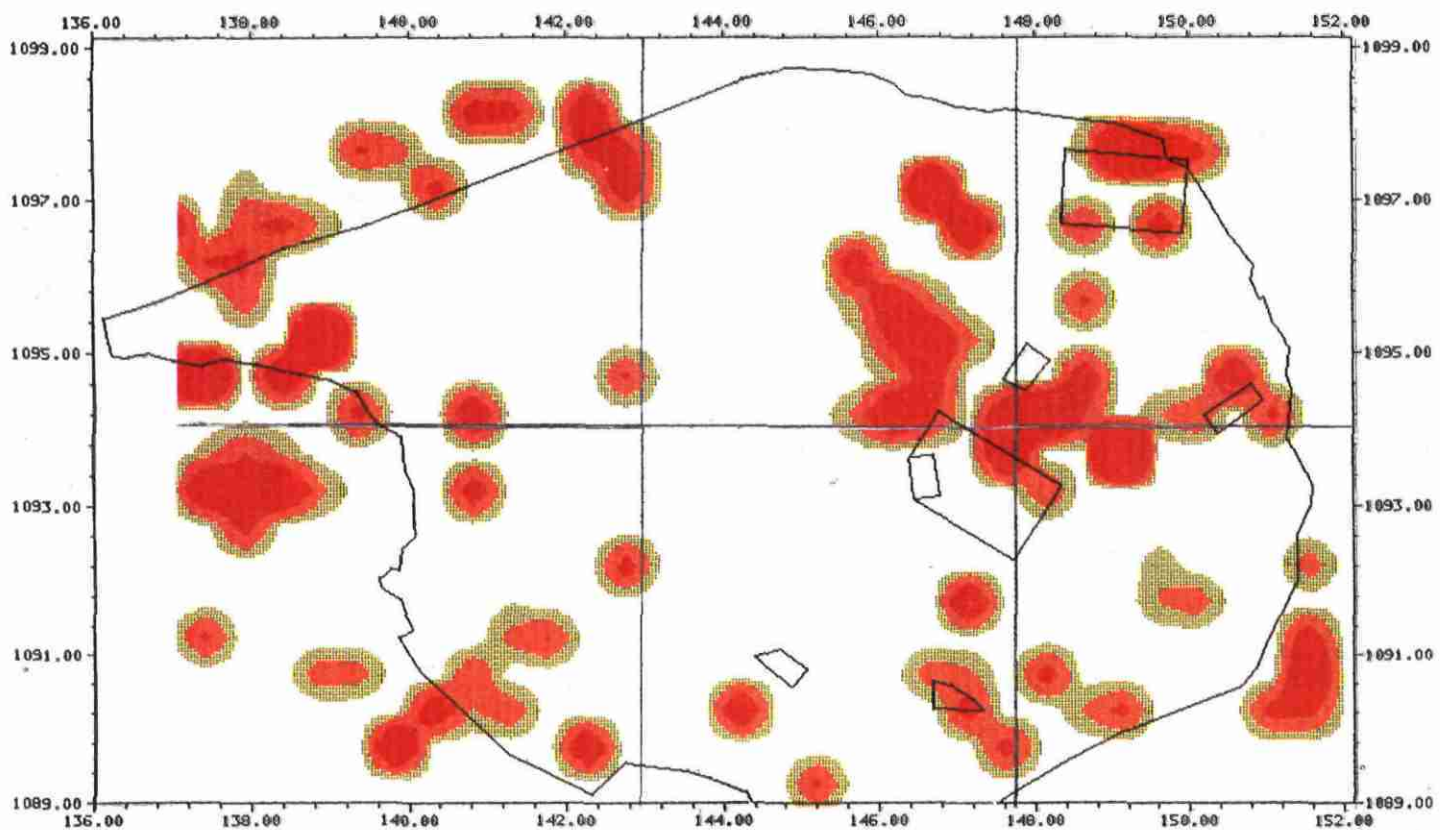


Figure 17 - Image H : Carte de densité de linéaments SPOT N 165°.

densité nulle ou faible
 densité faible

densité forte
 densité très forte

Image I : Carte de densité de la fracturation portée sur la carte géologique de la France au 1/50 000 (*cf figure 18 ci-contre*)

Commentaire :

- Les deux images raster et vectorielle (*cf figure 19*) sont placées en parallèle. La direction N 120° ressort nettement sur l'image raster.

- 78% de la superficie des zones de forte et de très forte densité de linéaments de cette image I sont superposés aux mêmes classes de l'image E (SPOT) contre 49% de recouvrement avec celles de l'image F (photographies aériennes).

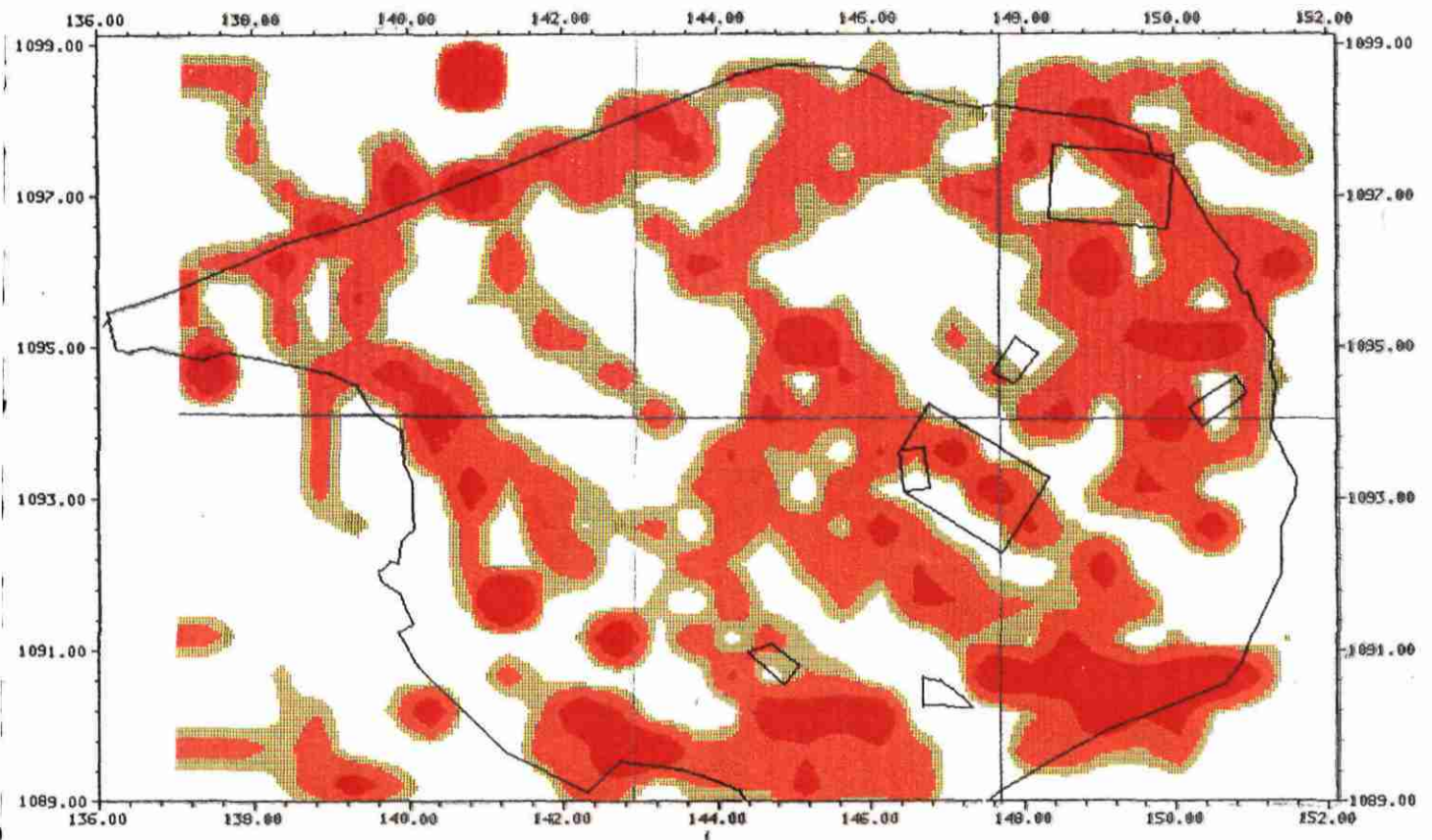


Figure 18 - Image I : Carte de densité de fracturation (1/50 000).

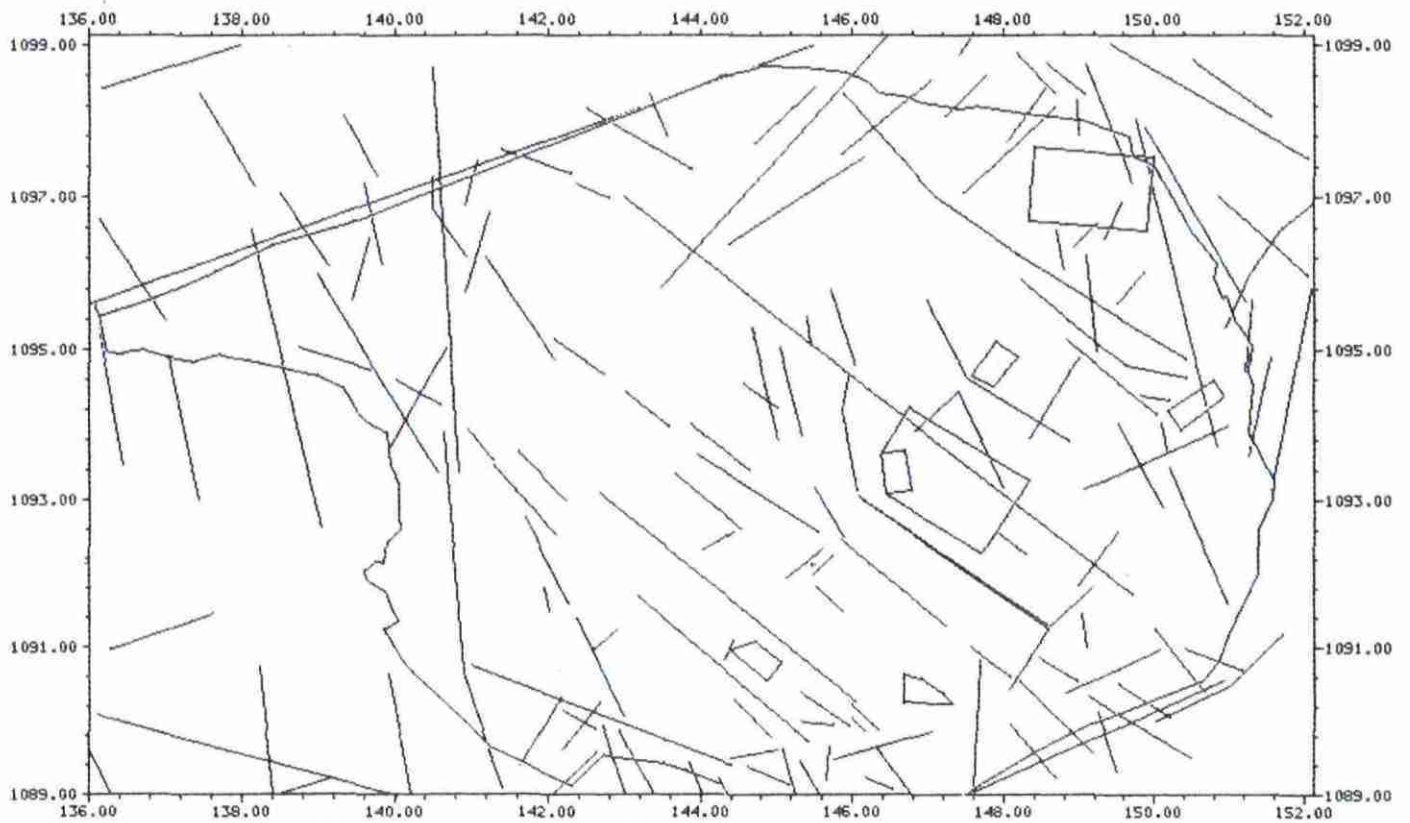


Figure 19 - image vectorielle de la fracturation de la carte géologique de la France au 1/50 000 dans le secteur du massif de HUELGOAT.

Image J : Carte de densité des discontinuités gravimétriques
(cf figure 20 ci-contre)

Commentaire :

- Les cartes raster et vectorielle sont données successivement (cf figure 21). La parfaite correspondance des deux cartes est due à la distribution des discontinuités gravimétriques en longs faisceaux isolés les uns des autres.

- Ce document est issu des travaux de CASTAING (C.) et DEBEGLIA (N.), 1988. Il est introduit dans cette étude pour déterminer les accidents majeurs traversant le massif. A première vue les directions sont regroupées entre N 40° et N 70° et entre N 110° et N 130°. On observe à deux reprises la coïncidence entre deux faisceaux ou des portions de faisceau de discontinuités gravimétriques, et la fracturation de la carte géologique : une première fois au Nord-Nord-Est du massif selon la direction N 50°, et une seconde fois au centre du massif selon la direction N 120° recoupant les zones du CLOITRE et de LEINTAN, en relation avec des filons hercyniens de microdiorite. Il ne paraît ressortir de ce document aucune information sur la fracturation à rejeu récent.

3.3.2 - Conclusions de l'analyse des images initiales

Au-dessus de 250 mètres d'altitude la surface du massif est moins marquée par l'érosion et l'encaissement du réseau hydrographique. Ce sont les secteurs où les arènes et les altérites paraissent le mieux conservées.

La résistance à l'altération et à l'érosion du secteur du CLOITRE et de LEINTAN paraît être due à des causes lithologiques et à la position des deux formations dans la structure du diapir.

Des relations morphostructurales très nettes sont observées à l'Ouest du massif selon un axe Nord-Sud et dans la moitié Est du massif selon la direction N 120°.

Les zones de forte et de très forte densité de linéaments SPOT N 120° et N 165° ne sont pas organisées en structures significatives.

Il n'apparaît pas de relation entre la fracturation potentiellement perméable et les données gravimétriques.

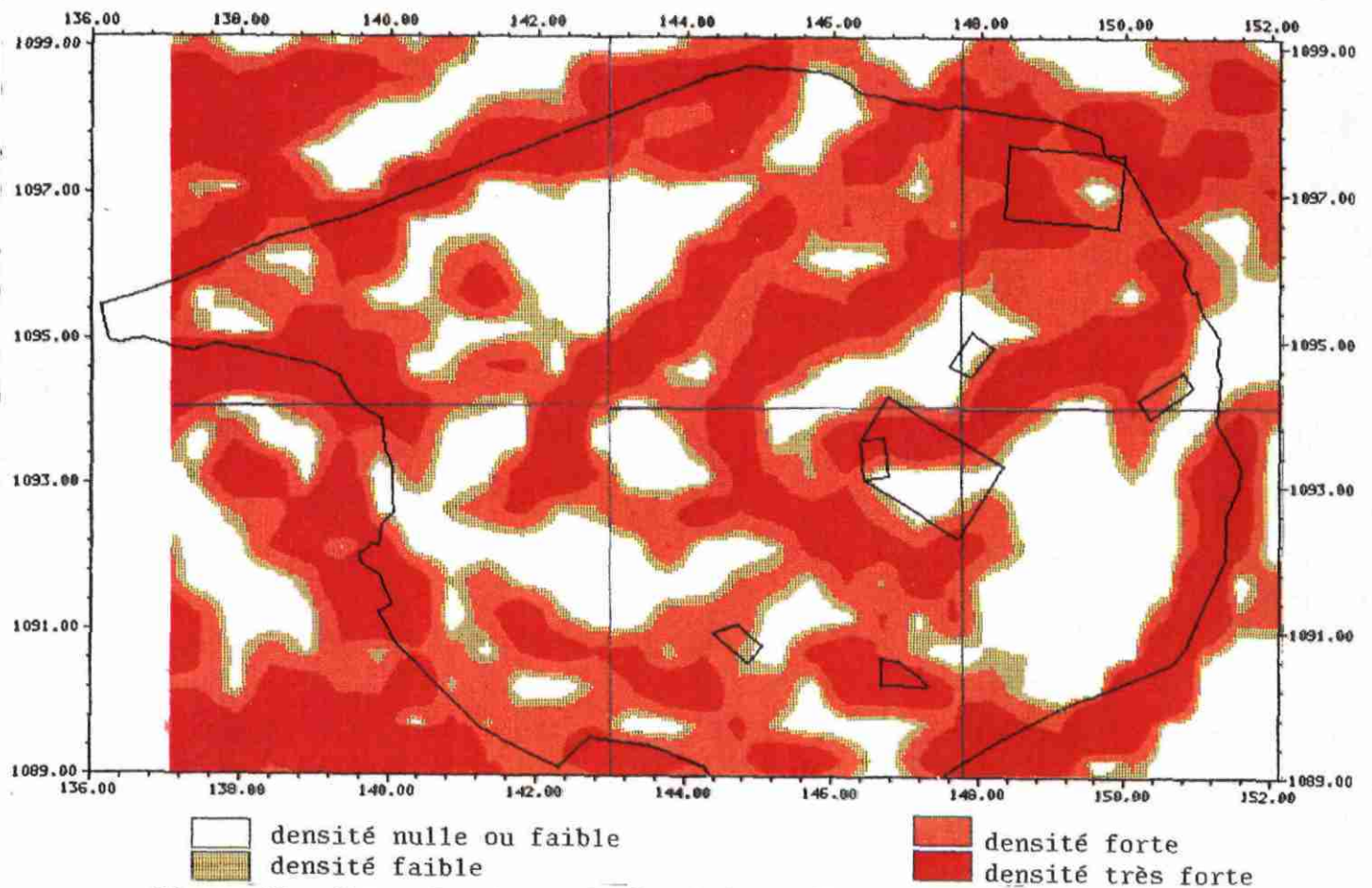


Figure 20 - Image J : Carte de densité des discontinuités gravimétriques.

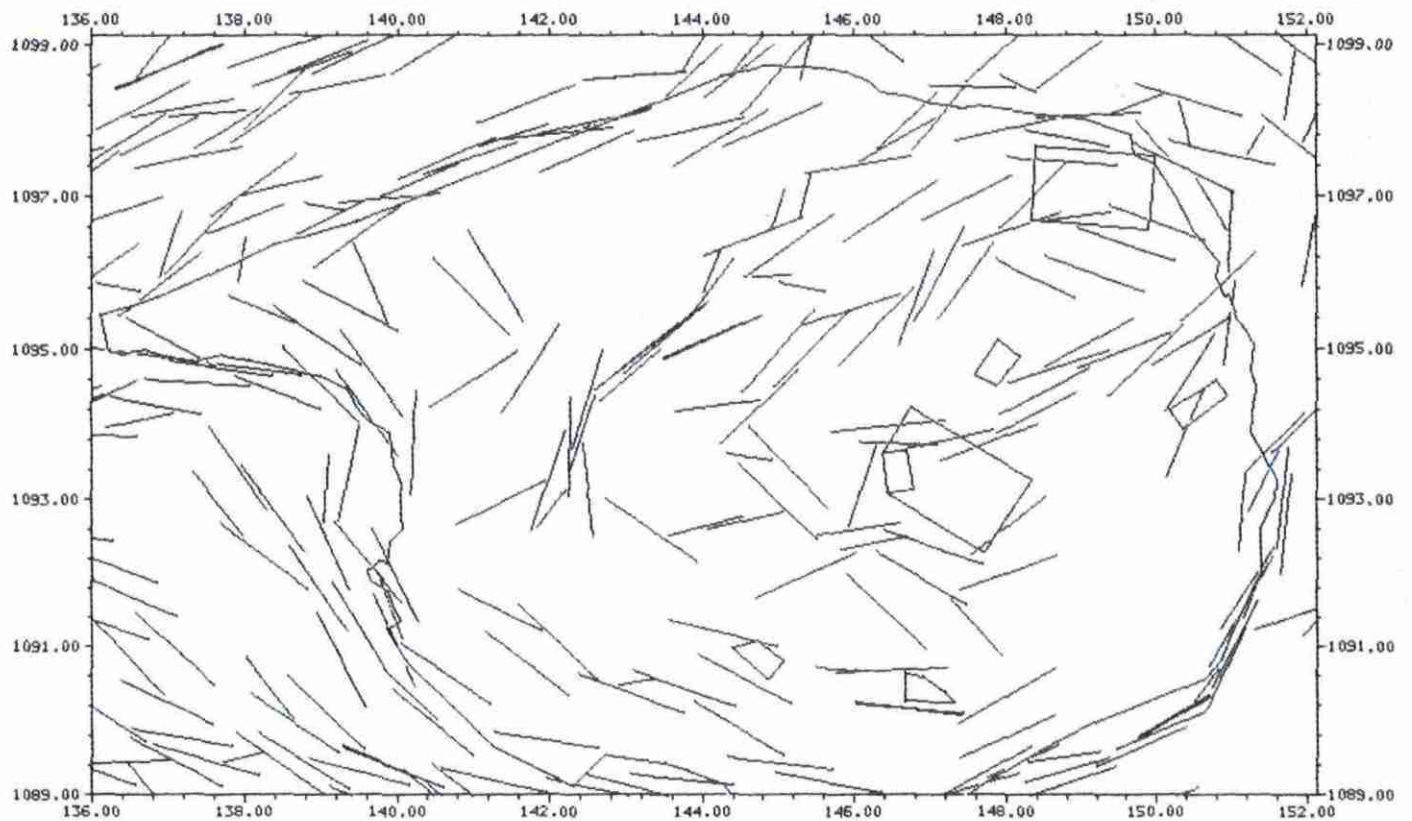


Figure 21 - Carte vectorielle des discontinuités gravimétriques du massif de HUELGOAT.

3.4 - LES IMAGES INTERMEDIAIRES

Les images intermédiaires sont créées sur une troisième et sur une quatrième base-image. Elles exploitent séparément les critères géomorphologiques puis structuraux.

3.4.1 - Présentation des images

Image A1 : Carte des talwegs (*cf figure 22 ci-contre*)

Commentaire :

- Cette image est calculée à partir de la carte des altitudes. Elle permet de visualiser les talwegs les plus étroits.

- Le réseau est très incomplet en comparaison du réseau hydrographique de la figure 10. La différence est due en partie à l'existence de vallées à fond plat encombrées d'alluvions. Une densité de talweg un peu moindre existe dans le secteur du CLOITRE et de LEINTAN.

- Conformément aux cartes structurales, de nombreux talwegs sont orientés Nord-Ouest Sud-Est. Ils prolongent parfois les zones où la fracturation est favorable à la perméabilité. Dans ce cas ces talwegs deviennent alors des indices structuraux qui doivent aussi être considérés comme favorables.

Image A2 : carte des pentes classées (*cf figure 23 ci-contre*)

Commentaire :

- L'image découle de la carte des altitudes.

- Dans la moitié Est du massif, les pentes supérieures à 5% soulignent l'encaissement du réseau hydrographique, alors que dans l'autre partie, les vallées sont plus larges et planes, à cause d'un remplissage d'alluvions et de colluvions.

- Les secteurs de faible pente sont bien représentés dans les zones élevées de la moitié Nord du massif où les éléments d'une surface subsistent de part et d'autre de l'axe morphostructural N 120°.

- Dans la région Sud-Est la plus érodée, des éléments de surface de faible pente jalonnent des interfluvies larges d'un kilomètre. Les vallées sont relativement étroites, sauf au Sud et au Sud-Est dans les parties les plus en aval. L'érosion paraît avoir suivi des axes de fracturation en entaillant une surface dont l'altitude décroît du Nord-Ouest vers le Sud-Est et autour du noyau résistant du secteur du CLOITRE et de LEINTAN.

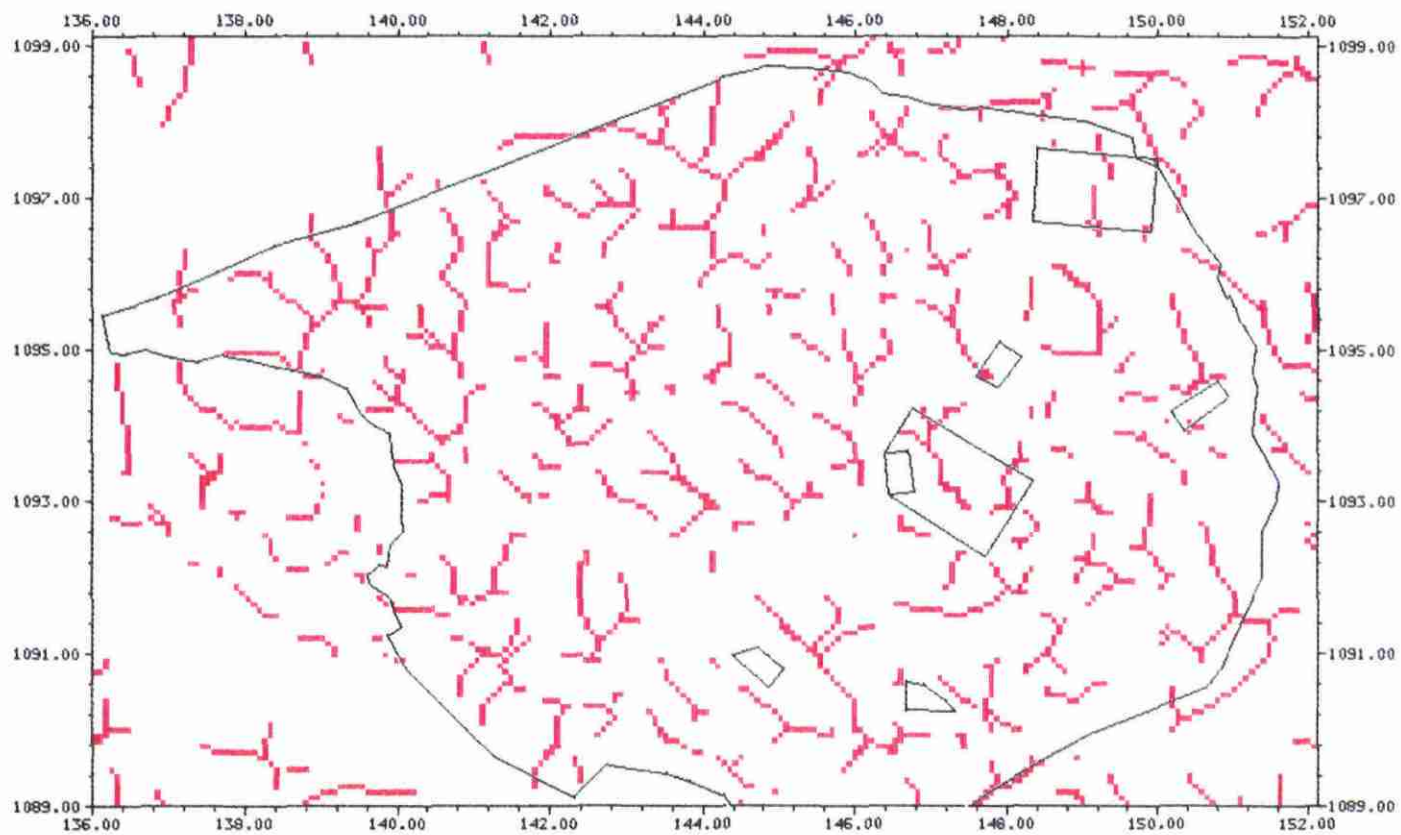


Figure 22 - Image A1 : Carte des talwegs.

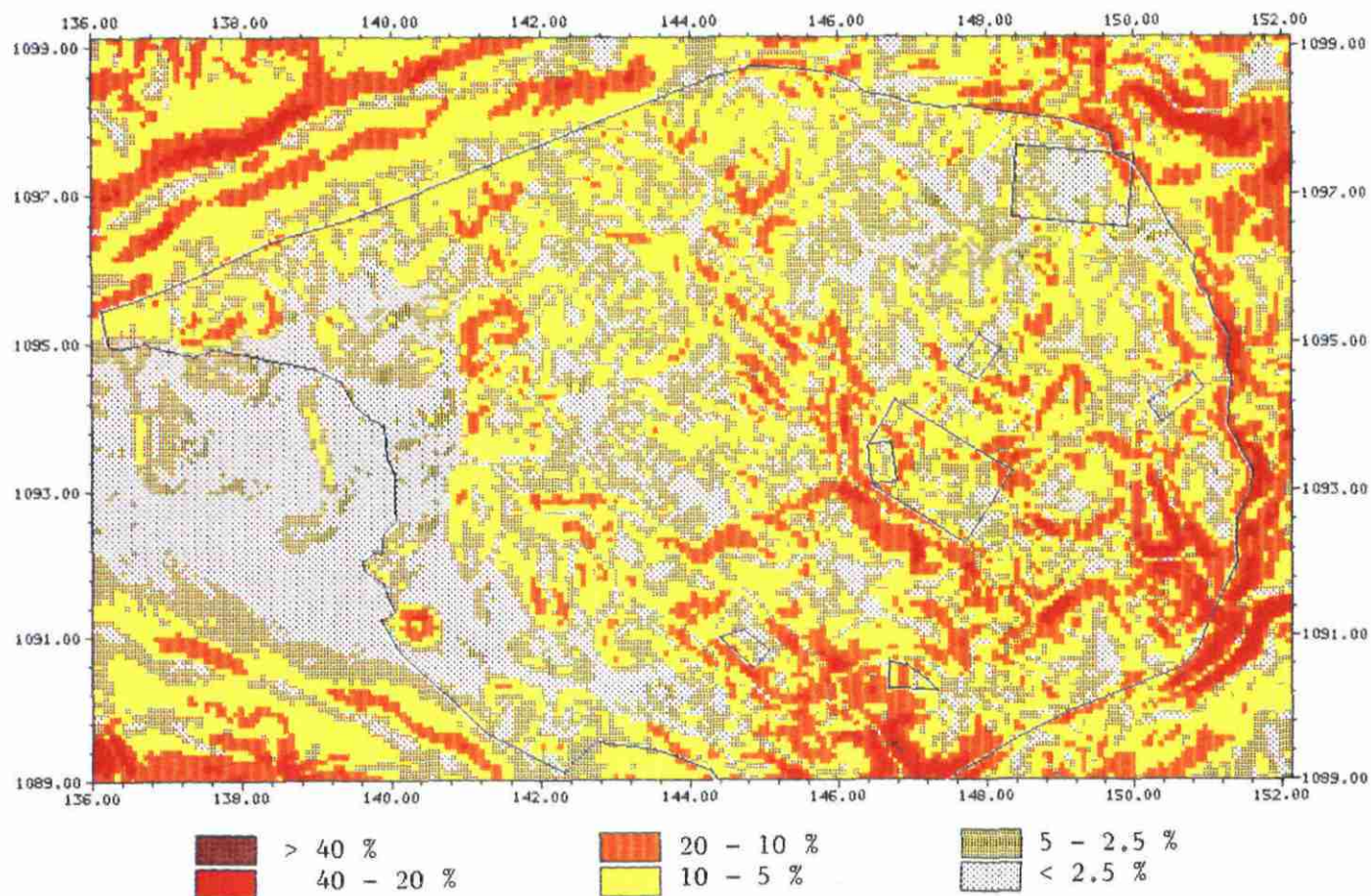


Figure 23 - Image A2 : Carte des pentes.

Image A3 : Carte des altitudes classées (cf figure 24 ci-contre)

Commentaire :

- Ce document a pour but de montrer l'organisation du relief en éléments de surface. Quatre classes d'altitudes sont déterminées à partir de la population des points hauts de la carte.

- La classe 1, la plus élevée (> 280 m) n'intéresse pratiquement pas le massif de Huelgoat, mais caractérise au contraire les Monts d'Arrée, situés en limite Nord du granite. Ensuite, au Sud des Monts d'Arrée, les trois autres classes s'étagent régulièrement.

- La classe 2 (240 - 280 m) occupe la moitié Nord du massif. C'est celle qui se prolonge dans le secteur du CLOITRE et de LEINTAN. Cette surface en comparaison avec l'image A2 conserve une pente faible où le drainage est plus lent que vers l'aval.

- La classe 3 (225 - 240 m) est discrète sur le massif à cause de l'encaissement actif du réseau hydrographique. Elle est présente sur la bordure Ouest et au dehors du massif sur le pourtour du lac de Saint-Michel.

- La classe 4 (<225 m) caractérise la zone des fortes pentes dues à l'encaissement, où affleure le granite sain. Cette classe se superpose presque exclusivement à la formation du monzogranite de HUELGOAT, faisant apparaître son manque relatif de résistance à l'érosion.

Image K : Carte des éléments de surfaces morphologiques, de faible pente, classés par niveaux d'altitude (cf figure 25 ci-contre)

Commentaire :

- Cette image représente l'intersection de l'image A3 avec les zones de pente inférieure à 5% de l'image A2.

- Les surfaces planes existent dans toutes les classes d'altitude.

- Trois niveaux de surfaces concernent le massif granitique.

- Le niveau le plus élevé est constitué par une succession d'éléments de surface de faible pente, situés au-dessus de 240 mètres. Ce niveau existe surtout dans la moitié Nord du massif ainsi que dans le secteur de LEINTAN et du CLOITRE. Les arènes y sont mieux conservées. Il se prolonge vers l'aval en s'estompant le long des interfluves à cause de l'encaissement du réseau hydrographique.

- Dans la moitié Ouest du massif, un autre niveau s'étend entre 225 et 240 mètres. Quelques éléments se retrouvent ailleurs, au centre et au nord du massif dans des vallées larges à fond plat. Ce niveau est couvert par des formations superficielles quaternaires qui débordent sur le troisième niveau.

- Le troisième niveau, légèrement plus bas que le deuxième se situe sous 225 mètres dans les vallées du Sud-ouest et du centre où subsistent des alluvions quaternaires.

- Les deux derniers niveaux s'emboîtent dans le même canevas morphostructural.

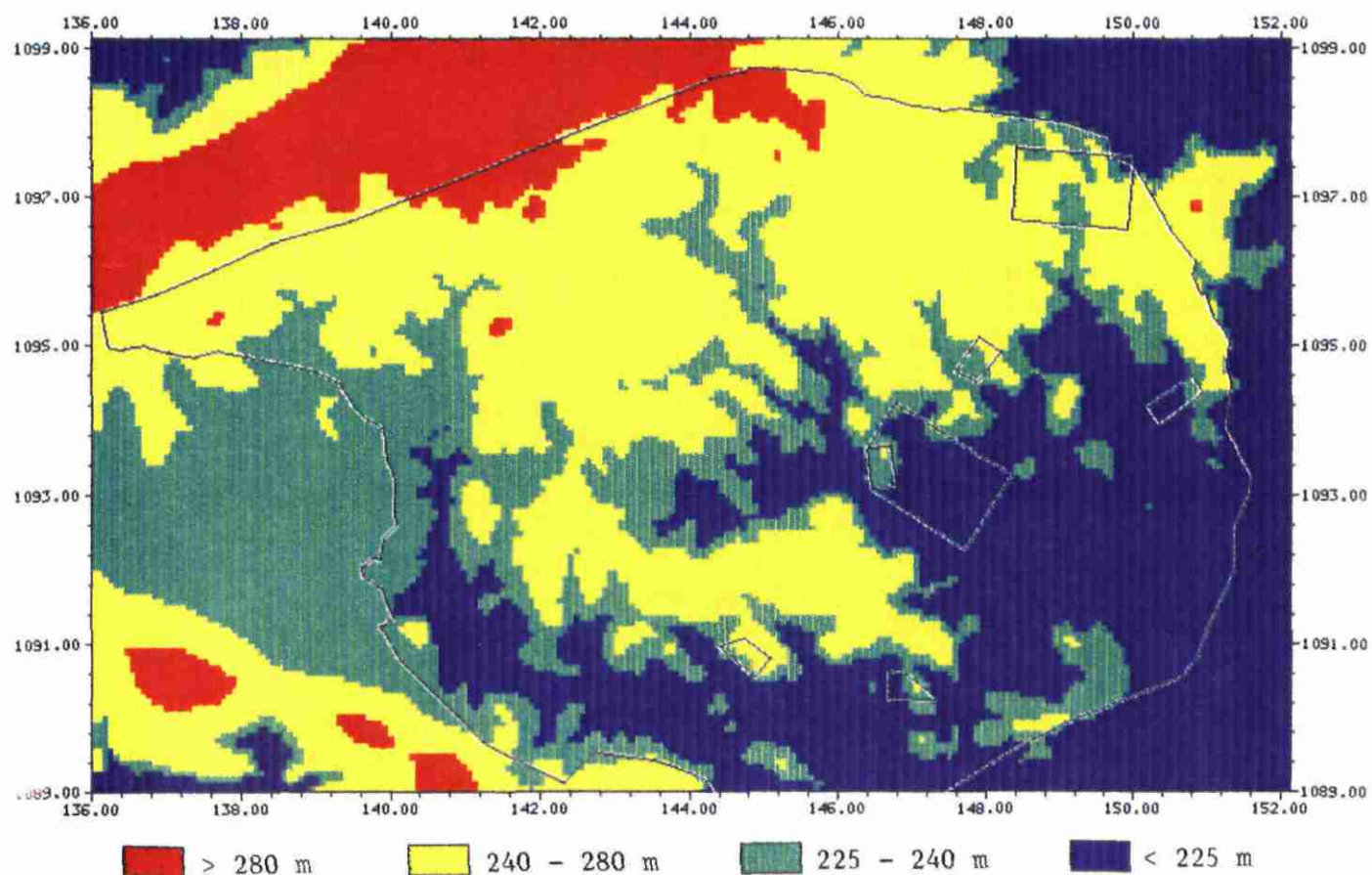


Figure 24 - Image A3 : Carte des altitudes classées.

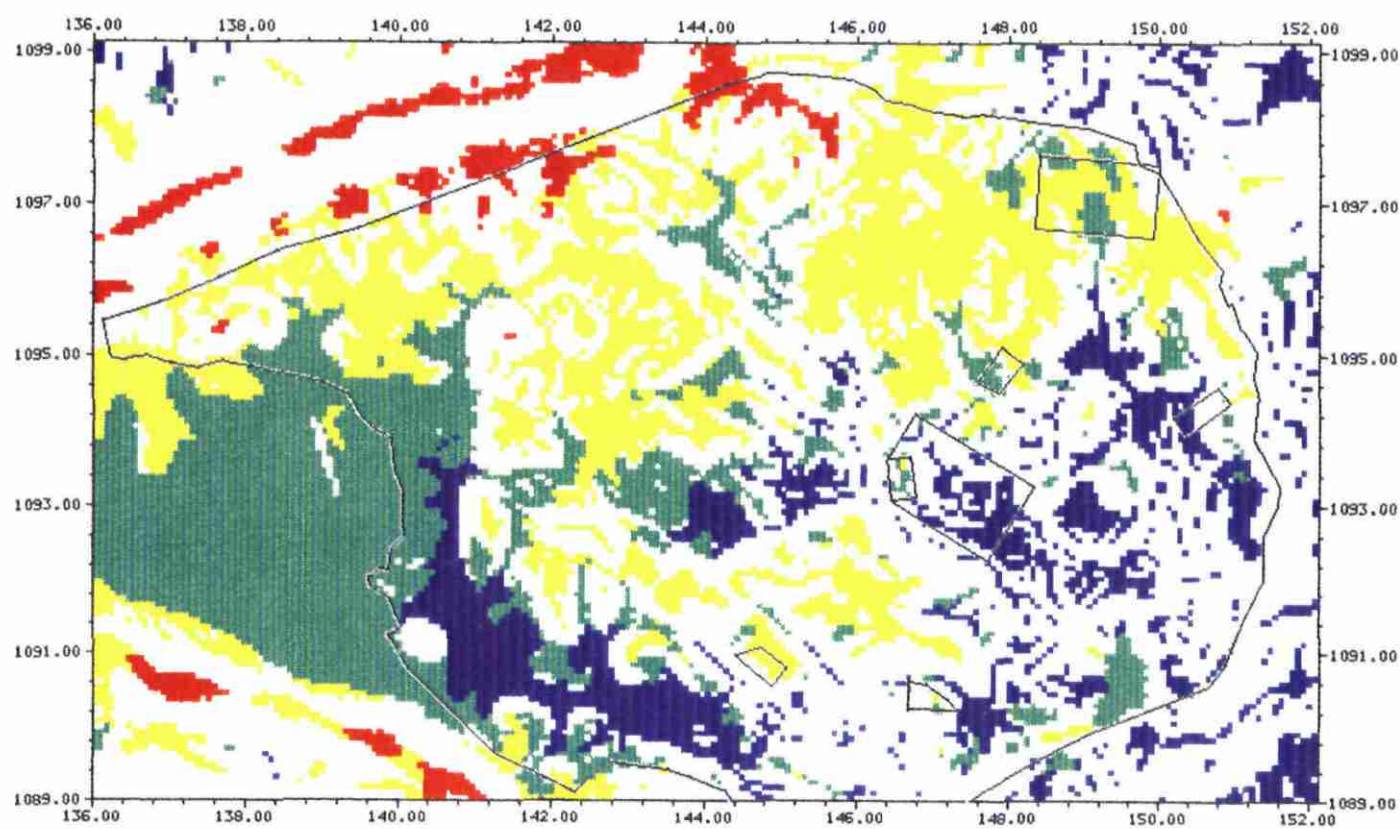


Figure 25 - Image K : Carte des surfaces planes classées en altitude.

Image L : Carte des faciès d'altération sur les éléments de surface de faible pente (cf figure 26 ci-contre)

Commentaire :

- Cette image représente l'intersection de l'image C (altérites et formations superficielles) avec les zones de pente inférieure à 5% de l'image A2.

- On constate la disparition des dépôts quaternaires et des arènes dans tout le sud-est du massif ainsi que selon l'axe morphostructural N 120° au centre du massif.

- Les arènes et le granite décomprimé et altéré observés sur le terrain, constituent des plages de faible pente dont la superficie peut atteindre le kilomètre carré. Sans considérer la fracturation, ces secteurs sont à priori favorables à la recharge, de la même façon que les dépôts quaternaires.

- Le secteur du monzogranite de LEINTAN ressort comme une large surface de faible pente, d'altitude élevée où affleure une roche non altérée. Il présente peu d'intérêt comme zone de recharge si ce n'est dans sa partie sud où existe une zone de forte densité de linéament N 120°.

Image M : Carte géologique des éléments de surface de faible pente (cf figure 27 ci-contre)

Commentaire :

- Cette image représente l'intersection de l'image B (lithologie) avec les zones de pente inférieure à 5% de l'image A2.

- Elle montre d'une part la répartition des surfaces de faible pente sur la carte géologique et elle permet d'autre part, de situer les secteurs érodés du monzogranite de Huelgoat au Nord, à l'Est et au Sud du noyau résistant du CLOITRE et de LEINTAN : ces secteurs érodés, entaillés, caractérisés par des pentes fortes correspondent aux espaces non retenus par le traitement des images, c'est-à-dire laissés en blanc sur l'image M résultante.

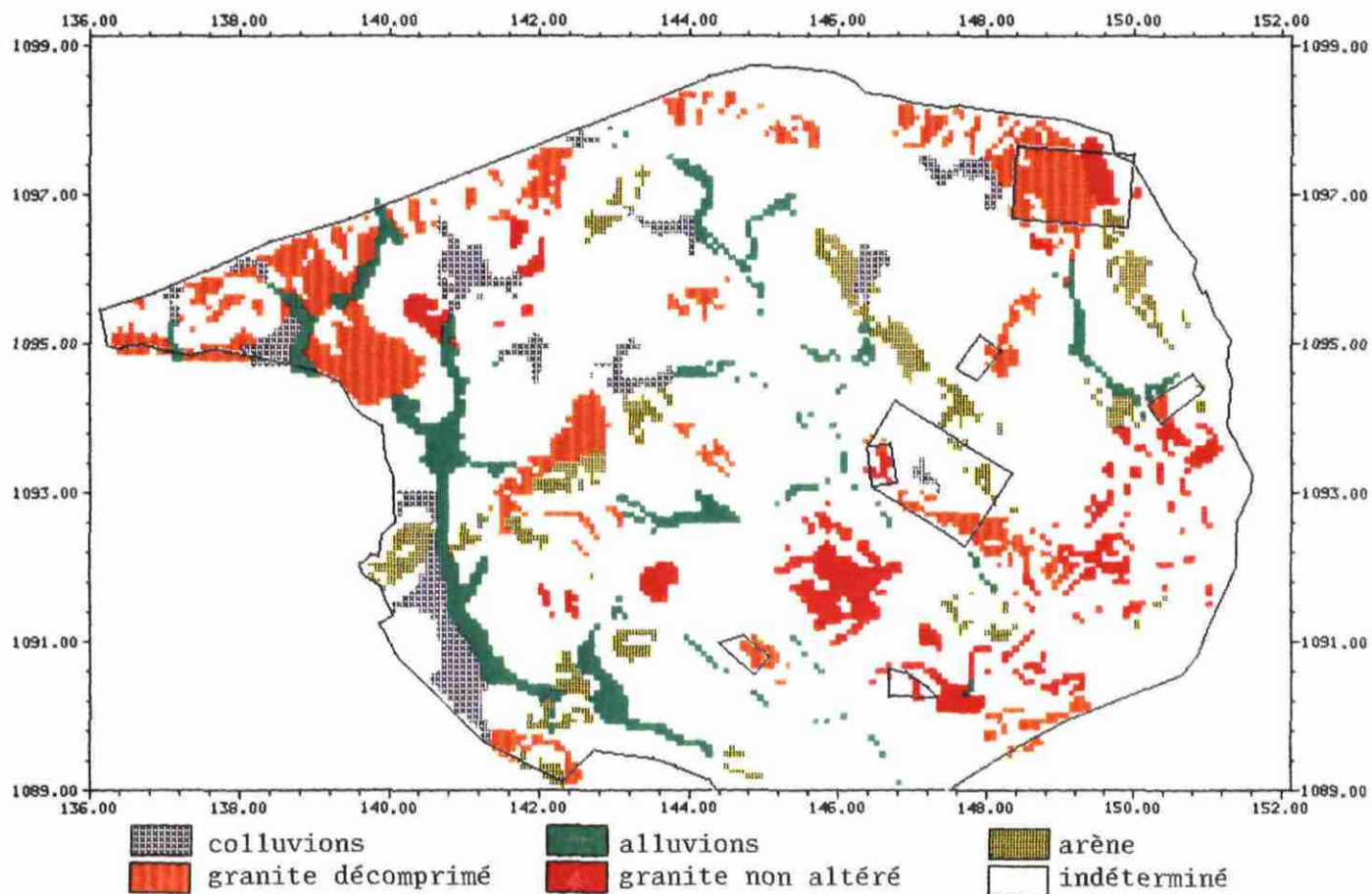


Figure 26 - Image L : Carte des faciès superficiels des zones plates.

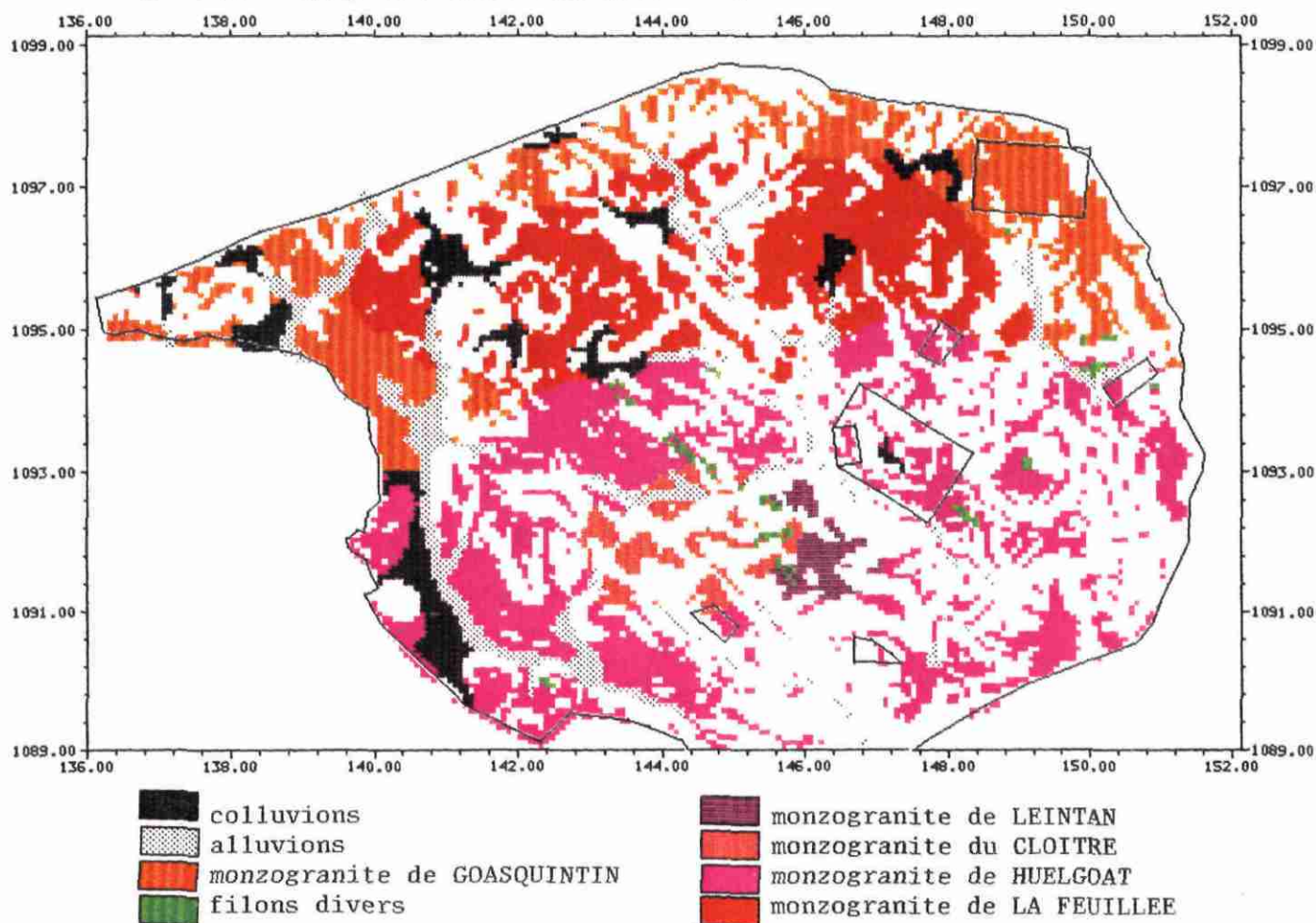


Figure 27 - Image M : Carte lithologique des surfaces plates.

Image N : Carte des zones de forte à très forte densité de linéaments
SPOT N 120° et N 165° (cf figure 28 ci-contre)

Commentaire :

- L'image est formée par juxtaposition partielle des images G et H.

- On constate la faible quantité des zones à perméabilité favorable dans le centre du massif, sans qu'il soit possible d'expliquer ce phénomène par un effet de masque superficiel. Les linéaments de ces familles semblent simplement ne pas exister dans ce secteur.

3.4.2 - Conclusions issues de l'analyse des images intermédiaires

Il existe trois niveaux de surfaces géomorphologiques dont les éléments jalonnent l'ensemble du massif, et qui, localement, comportent des dépôts quaternaires.

Au-dessus de 250 mètres d'altitude un premier niveau est moins marqué par l'érosion. Les altérites y sont conservées sous les secteurs de faible pente, rassemblant ainsi des conditions favorables à la recharge.

Les zones favorables à la perméabilité de fracture sont plus rares au centre du massif.

Des talwegs orientés Nord-Ouest Sud-Est prolongent parfois les zones structurales favorables. Ils doivent aussi être considérés comme favorables vis-à-vis de la perméabilité de fracture.

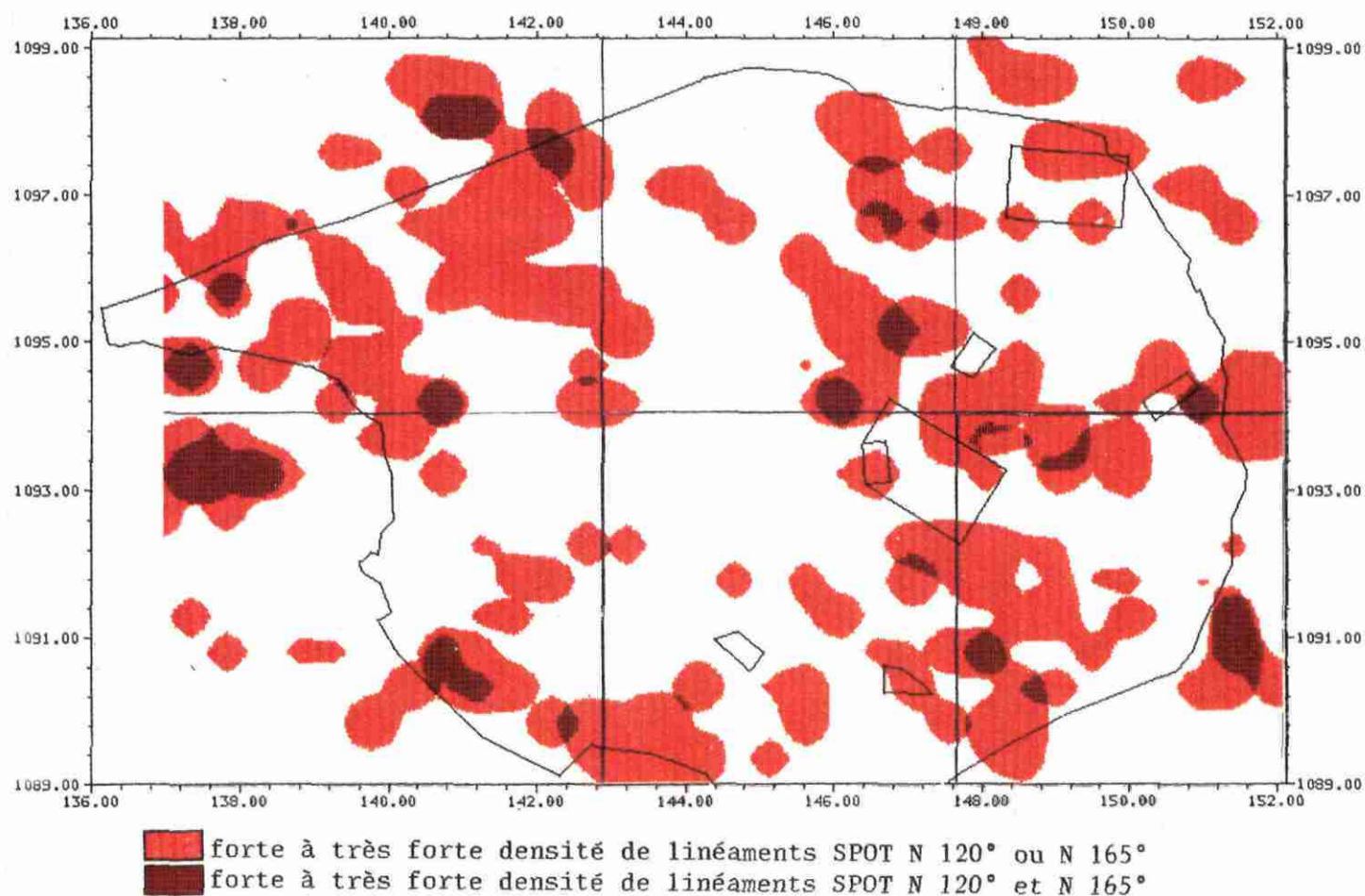


Figure 28 - Image N : Zones de grande densité de linéaments N 120° ou N 165°.

3.5 - PHASE D'IDENTIFICATION DES ZONES FAVORABLES A L'EXISTENCE D'AQUIFERE

Cette dernière phase consiste à rassembler sur un même document les informations concernant les zones de recharge et les zones de fractures perméables pour composer une carte finale d'aide à la prospection.

Image P : Carte de sélection multicritère des zones de recharge
(cf figure 29 ci-contre)

Commentaire :

- La sélection délimite simultanément des zones de recharge et de perméabilité favorables par croisement des images D, L et N. Elle prend en compte l'état superficiel partiellement connu sur le massif, l'importance de l'écoulement de surface en fonction des pentes, et en troisième lieu la perméabilité de fractures.

- Les zones très favorables combinent les formations superficielles perméables ou capacitives, les éléments de surface de faible pente, les zones de faible densité de drainage et de forte densité de linéaments SPOT N 120° et N 165°.

- Les zones favorables ont en moins le critère de densité de drainage

- Les zones assez favorables combinent seulement les faibles pentes avec les fortes densités de linéaments N 120° et N 165°

Image Q : Carte des zones de fractures perméables (cf figure 30 ci-contre)

Commentaire :

- Cette image regroupe les zones de forte densité de linéaments N 120° - N 165° et les talwegs de mêmes directions repérés sur l'image A1.

- Les talwegs orientés dans ces directions présentent un lien morphostructural marqué, intéressant vis-à-vis de la perméabilité de fracture. Ils peuvent constituer des axes de drainage souterrain dont la relation avec l'hydrographie est un atout pour la ressource.

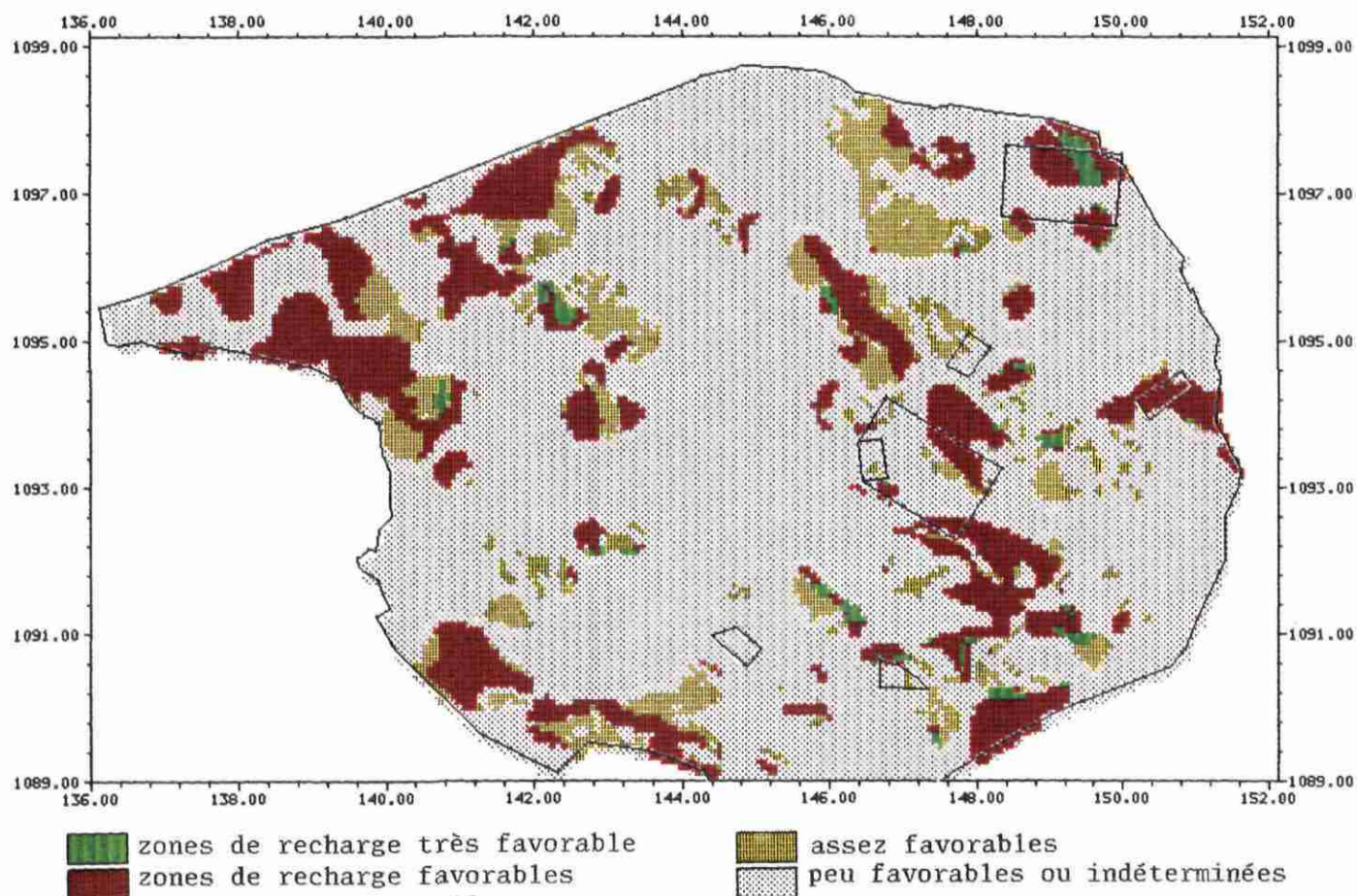


Figure 29 - Image P : Potentialités de recharge.

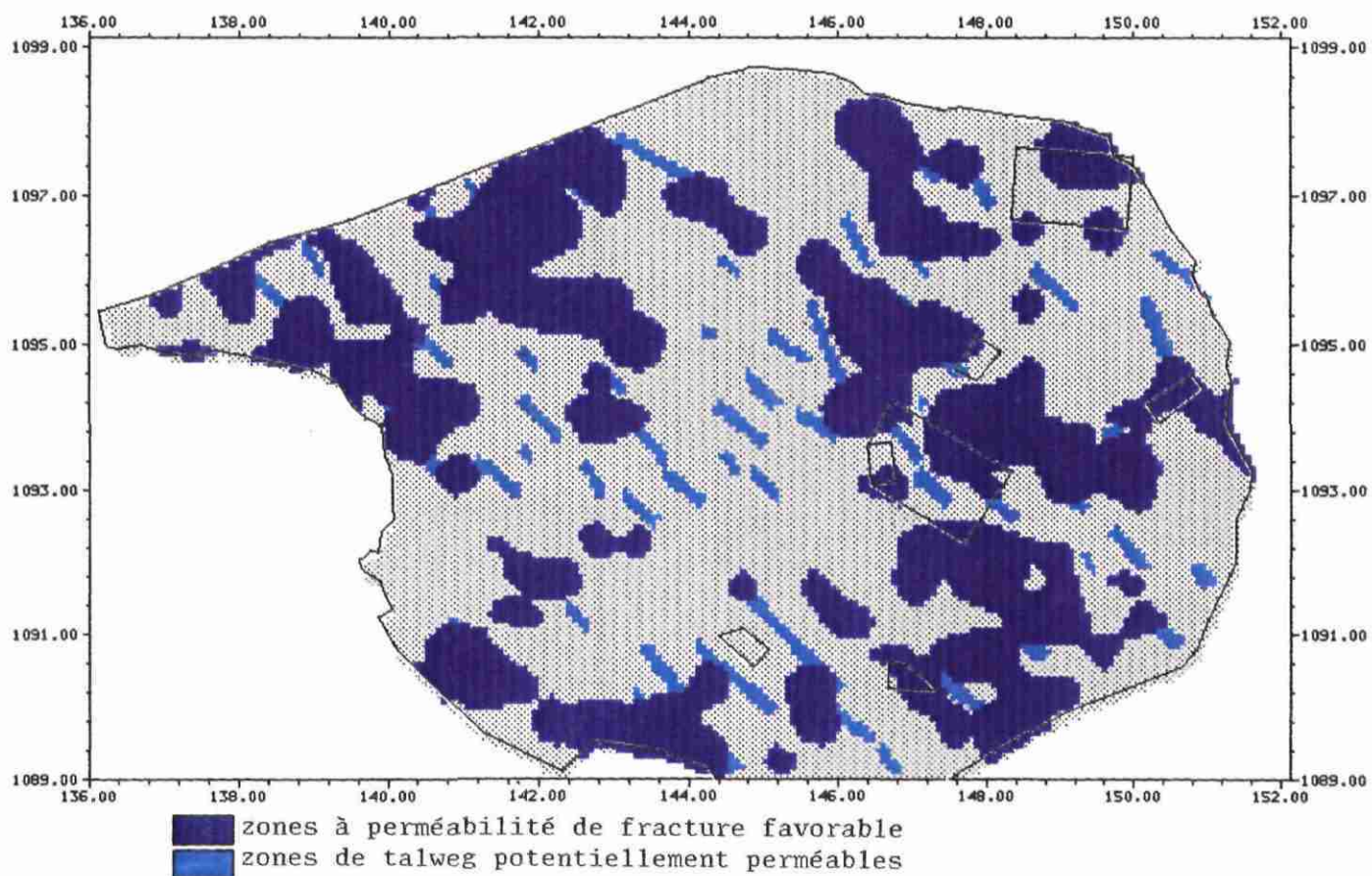


Figure 30 - Image Q : Potentialités de perméabilité.

Image R : carte des potentialités aquifères du massif de HUELGOAT
(cf figure 31 ci-contre)

Commentaire :

- Le document hydrogéologique ainsi constitué permet de visualiser les secteurs du massif où la potentialité de ressource en eau souterraine est la meilleure, à la fois pour son renouvellement et pour son exploitation.

- L'image R regroupe les trois paramètres les plus déterminants, eux mêmes déjà sélectionnés, épurés et seuillés, au cours des traitements ultérieurs (réalisation d'images initiales et d'images intermédiaires).

- Les zones à perméabilité de fracture favorable, issues de l'image Q, sont reprises intégralement en surface, et à l'intérieur de ces zones, le critère de recharge est représenté (en trois niveaux).

- Quand le critère de recharge n'existe pas, la couleur attribuée au critère de perméabilité (bleu) apparaît.

- Là où apparaissent les couleurs exprimant les trois niveaux de recharge (vert, jaune, jaune grisé), il y a donc co-existence de ce paramètre et du paramètre perméabilité de fracture favorable.

3.6 - CONCLUSION

Le document final est la synthèse de trois critères seulement, qui sont :

- la perméabilité de fracture
- l'aptitude à la recharge
- les talwegs actifs (collecteur ou drain), convenablement orientés

Cependant chacun de ces critères renferme plusieurs paramètres avec lesquels il a été construit au fur et à mesure de l'élaboration des images intermédiaires.

Ainsi, en trois critères composites, c'est l'ensemble des paramètres initiaux qui se trouve sélectionné puis condensé. La carte des discontinuités gravimétriques est la seule exception : elle n'a pas été utilisée, par manque de liens logiques connus avec l'hydrogéologie.

La carte de potentialité aquifère du massif de Huelgoat montre que les zones susceptibles de faire l'objet d'une prospection classique avec promesse de succès, sont relativement restreintes (environ 1/3 de la surface du massif). Il est extrêmement intéressant de pouvoir éliminer après analyse

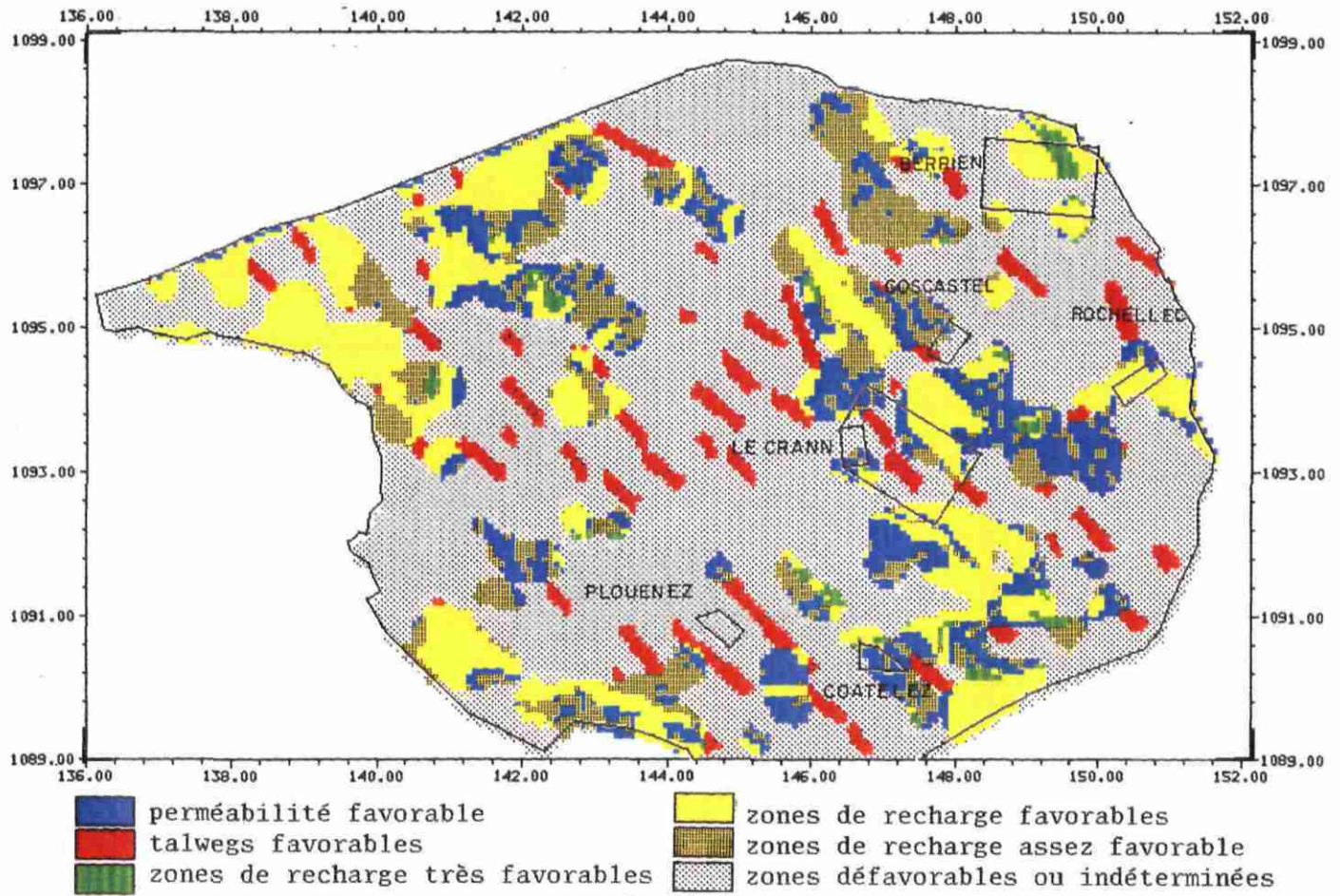


Figure 31 - Image R : Carte des potentialités aquifères du massif.

multicritère, environ 2/3 de la superficie promise primitivement à la prospection : cette technique se présente donc, particulièrement dans le cas de vastes surfaces, comme un instrument d'orientation, capable de faciliter les décisions et d'indiquer les directions de recherche en matière de prospection hydrogéologique.

4 - CONTROLE DU NIVEAU DE POTENTIEL HYDRAULIQUE DE QUELQUES SECTEURS TEST

Grâce à l'analyse multicritère effectuée à l'aide de SYNERGIE, les zones potentiellement les plus favorables ont été mises en évidence : c'est ce que montre l'image R (figure 31).

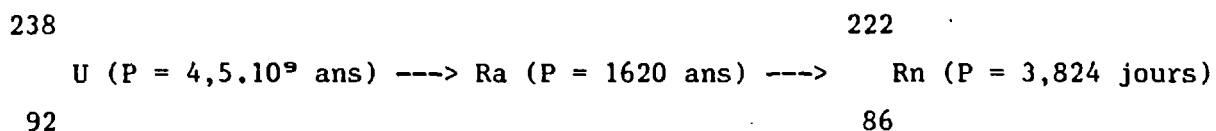
Afin d'asseoir la réalité de cette carte des potentialités aquifères du massif, il convient de procéder à une vérification par des mesures de terrain. Celles-ci devront rendre compte de la perméabilité de fracture donc de l'existence de réserves souterraines potentielles.

Il n'est pas possible d'exercer un tel contrôle sur l'ensemble du massif (98 km²) c'est pourquoi des secteurs tests ont été définis, sur lesquels la perméabilité de fracture a été estimée par mesure du gaz radon dans le sol.

4.1 - RAPPEL DE LA METHODE DE PROSPECTION PAR MESURE DU GAZ RADON DANS LES SOLS

4.1.1 - Fondement de la méthode

Le Radon issu du Radium est un produit qui s'inscrit dans la filiation de l'uranium



Les faibles quantités d'uranium (35 ppm en moyenne) qui sont toujours présentes, en particulier dans les roches cristallines sont donc génératrices de gaz Radon.

Celui-ci peut se déplacer de deux façons :

- par diffusion = déplacements du Radon au sein du fluide qui remplit les pores de la roche
- par transport = le fluide se déplace soit dans le milieu poreux soit dans le réseau de discontinuités de la roche (fractures, fissures, microfissures)... et véhicule le radon sous forme de gaz dissous, ou ses antédécents (U, Ra) sous forme de sels dissous

Les mouvements de l'eau dans le sol se font généralement à très faibles vitesses, mais, cependant, le réseau de fractures aquifères draine le radon et l'achemine plus rapidement vers la surface du sol. Dans une fracture les déplacements par diffusion et par transport se trouvent en effet conjoints. De plus, à l'approche de la surface, lorsque la diminution de pression autorise le passage du Radon à l'état gazeux, son ascension s'en trouve accélérée.

Dans la zone non saturée, les mouvements de l'air sont plus importants le long des fractures que dans la roche homogène : les fractures constituent des cheminements privilégiés pour les échanges gazeux entre le sous-sol et l'atmosphère ; le gaz radon a tendance à s'y rassembler et à se dégager plus intensément au droit des fractures ouvertes ainsi repérables.

Ce processus est schématisé sur la figure 32 où ne sont représentées que quelques sources de Radon, ponctuelles, disséminées dans la roche ou dans l'arène en place. La longueur des flèches symbolise l'importance et la rapidité de déplacement du Radon.

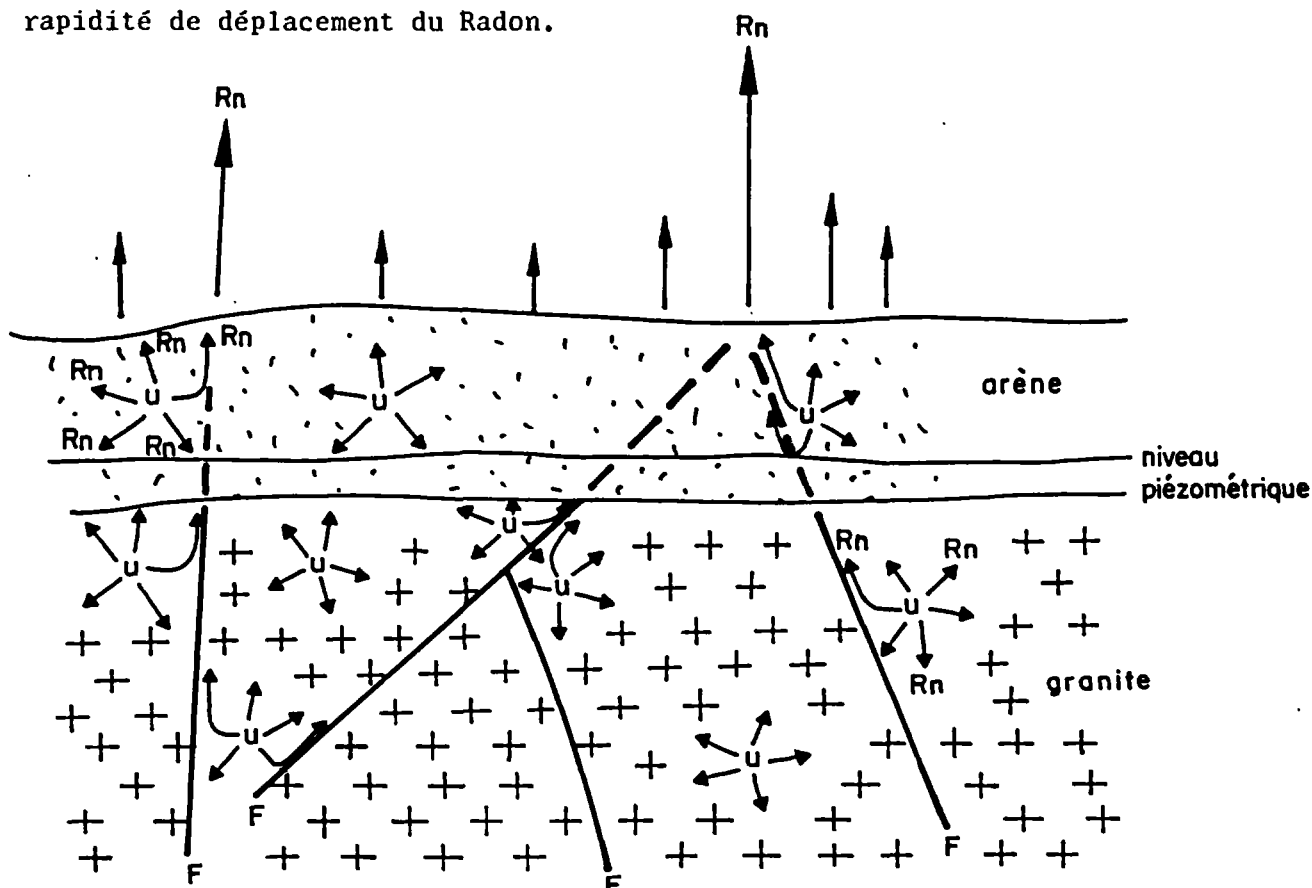


FIGURE 32 - Cheminements privilégiés du Radon dans le sous-sol et panaches d'émergence

4.1.2 - Technique de prélèvement et de mesure

- une canne métallique creuse est plantée dans le sol
- une pompe à vide manuelle aspire les gaz du sol et les entraîne dans une fiole de prélèvement
- la présence de radon dans cette fiole est décelée ensuite par comptage des particules α émises par le Radon. En effet, chaque α entrant en contact avec le réactif qui tapisse les parois des fioles, donne naissance à un photon : un scintillomètre permet de comptabiliser les photons, donc les atomes de Rn émetteurs de particule α .

Une correction prenant en compte l'heure de prélèvement et l'heure d'analyse optimise les mesures et donne un résultat en picoCuries par litre d'air (pCi/l)

REMARQUE

Le Curie est l'activité radionucléaire (ou radioactivité) résultante de $3,7 \cdot 10^{10}$ désintégrations par seconde, c'est-à-dire $3,7 \cdot 10^{10}$ Becquerels

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ pCi} = 10^{-12} \text{ Ci} = 37 \cdot 10^{-3} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Bq} = 27 \text{ pCi}$$

4.1.3 - Justification méthodologique

Le Radon se déplace dans le fluide ou/et avec le fluide et profite des voies plus faciles et plus rapides que sont les fractures ; la circulation du Radon dans le sol, jusqu'à son émergence en surface, témoigne donc directement de l'importance de la perméabilité de fracture du socle.

Les propriétés particulières du Radon qui permettent d'accréditer ce processus sont les suivantes :

- un petit rayon atomique qui lui permet de quitter la maille cristalline de naissance
- une inertie réactionnelle de gaz rare qui évite sa combinaison dans l'eau
- une radioactivité avec émission alpha (5,9 Mev) facilitant la détection de faibles activités volumiques dans le sol (il est le seul gaz émetteur α naturel)
- une période de 3,82 jours, assez longue pour que la diffusion se fasse jusque dans le sol sans accumulation, mais suffisamment courte pour ne marquer que les circulations actives

4.2 - CHOIX DES SECTEURS TESTES PAR LE RADON

4.2.1 - Dénomination - Localisation

Au cours de la première phase d'étude (1987) deux grands secteurs tests avaient fait l'objet d'un contrôle par le RADON (*figure 33*). Pour la seconde phase (1988), les zones de contrôle ont été réduites en superficie, mais augmentées en nombre : 5 secteurs de 12 ha ont été prospectés par la méthode Radon ; ils portent les dénominations suivantes (*figure 33*) :

- COSCASTEL
- ROCHELLEC
- LE CRANN
- PLOUENEZ
- COATELEZ

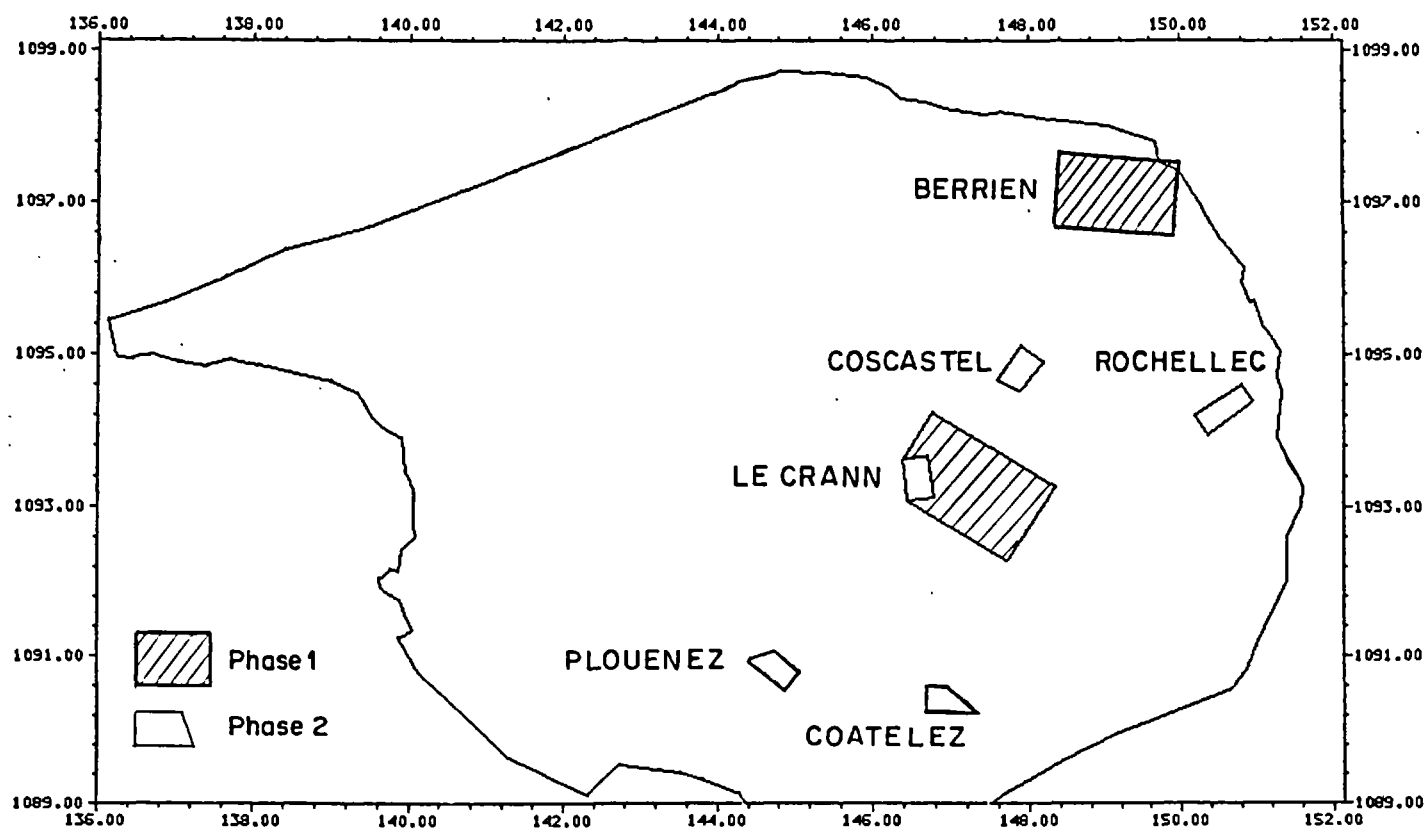


FIGURE 33 - Position des secteurs testés par le Radon

4.2.2 - Raisons et conditions ayant présidé au choix des secteurs tests

Les secteurs tests ont été choisis au début de la phase 2 de l'étude, avant le traitement multicritères décrit dans le chapitre 3,... ceci pour deux raisons :

- Raison pratique : la campagne de prélèvements RADON ne pouvait attendre la fin du traitement par SYNERGIE pour des raisons de calendrier, de disponibilité du matériel et de conditions météorologiques favorables
- Raison méthodologique : il est plus probant de pratiquer la méthode multicritère et le contrôle Radon, "en aveugles" afin de donner plus de poids à ce qui sortira de la confrontation

Le choix des 5 secteurs de contrôle a été fait au vu des critères
lithologiques
structuraux
géomorphologiques

Au critère lithologique a été ajouté une information concernant les teneurs en uranium des trois principales formations de monzogranite du massif de Huelgoat (GEORGET (Y)., 1986). Les teneurs mesurées sont un peu plus élevées pour le faciès de Huelgoat que pour celui de La Feuillée (cf tableau 2).

	nombre d'échantillons	teneurs min. et max. (ppm)	teneur moyenne (ppm)
faciès du CLOITRE	7	4.1 - 10.0	6.3
faciès de LA FEUILLEE	6	3.4 - 7.5	5.3
faciès de HUELGOAT	11	4.4 - 15.8	8.0

TABLEAU 2 - Teneurs en uranium dans les trois principaux faciès de monzogranite du massif de Huelgoat (d'après GEORGET Y., 1986)

Le tableau 3 indique dans le détail, critère par critère, la tendance de chaque secteur test à présenter des émergences de Radon, c'est-à-dire à montrer une perméabilité de fracture bien développée.

- + = critère favorisant les émissions de Radon ou secteur à perméabilité de fracture forte
- / = caractère moyen, indécis pour un critère ou pour un secteur
- = critère défavorable aux émergences de Radon ou secteur à perméabilité de fracture potentielle faible

	Prospects Radon (phase 2)					(Phase 1)	
	COATELEZ	COSCASTEL	PLOUENEZ	LE CRAWN	ROCHELLEC	LE CRAWN	BERRIEN
CRITERES LITHOLOGIQUES							
SUBSTRATUM	+	+	+	+	+	+	/
ETAT SUPERFICIEL	+	/	/	+	+	+	+
CRITERES STRUCTURAUX							
DENSITE DE LINEAMENTS SPOT	+	/	+	-	/	+	+
DENSITE DE LINEAMENTS PHOTOGRAPHIES AERIENNES	/	/	/	/	-	+	-
DENSITE DE LINEAMENTS SPOT N 120°	-	/	-	+	/	/	-
DENSITE DE LINEAMENTS SPOT N 165°	+	/	-	-	+	+	+
DENSITE DE FRACTURA- TION DE LA CARTE GEOLOGIQUE	-	/	+	+	/	+	+
CRITERES GEOMORPHO- LOGIQUES							
ALTITUDE DES ELEMENTS DE SURFACE PLATS	/	-	-	/	/	+	-
PENTE	+	-	/	/	/	/	-
DENSITE DE DRAINAGE	-	/	-	-	-	+	+
TALVEGS	-	+	-	-	+	+	+
INFLUENCE GLOBALE SUR L'EMISSION DE RADON	/	/	-	-	+	+	+
POSITION PAR RAPPORT A LA PERMEABILITE	+	+	-	-	+	+	+

TABEAU 3 - Tendance globale de chaque prospect par rapport aux facteurs pouvant influencer l'activité volumique en radon dans le sol, et position de ces prospects par rapport à la perméabilité de fracture

La tendance globale de chaque secteur est une simple estimation faite AVANT le traitement multicritère par SYNERGIE et bien sûr AVANT le contrôle de la perméabilité de fracture par prospection du RADON.

Il ne sera donc pas surprenant, au moment des confrontations, de constater un désaccord éventuel entre l'une de ces tendances et le résultat de l'analyse multicritère ou du contrôle RADON.

4.2.3 - Pas d'échantillonnage et nombre de prélèvements

En phase 1, l'étude intéressait deux secteurs totalisant 3,5 km², prospectés à la maille carrée de 75 m. Ceci représentait un peu plus de 500 prélèvements compte tenu de zones marécageuses impossibles à tester.

En phase 2, les contrôle Radon ont porté sur 5 secteurs de 12 ha (0,6 km²), mais la maille de prospection choisie est de 40 m ce qui correspond à un peu plus de 400 prélèvements. Le nombre de mesures pour chaque secteur test est donné dans le tableau 4.

4.3 - ANALYSE STATISTIQUE DES VALEURS CORRIGÉES

Pour chaque secteur, l'ensemble des mesures a fait l'objet d'une analyse statistique (*document en annexe*) qui présente :

- les données principales
- un premier environnement statistique possible (DISCRIMINATION A)
- un second environnement statistique envisageable (DISCRIMINATION B)
- un histogramme des fréquences : sous forme chiffrée et sous forme graphique

4.3.1 - Hypothèses statistiques prises en considération

. Caractéristiques de la DISCRIMINATION A

Elle considère par hypothèse que 10% des valeurs sont anormales

- le seuil Anomal correspond donc alors à la valeur du percentile 90
SA = percentile 90

- le Bruit de fond se définit comme la moyenne arithmétique des 90% des valeurs classées

$$BF = M = \sum_{i=1}^{n.90\%} x_i \cdot (n.90\%)^{-1}$$

x étant la variable (RADON)
n étant le nombre de mesures considérées

. Caractéristiques de la DISCRIMINATION B

C'est le Bruit de Fond qui est par hypothèse assimilé à la moyenne géométrique.

Le seuil anomal est une expression complexe de la moyenne géométrique et de la déviation géométrique.

- Bruit de Fond = moyenne géométrique

$$BF = G = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n}$$

- Seuil Anomal =

$$SA = G \cdot \epsilon^2$$

avec ϵ = déviation géométrique
et ϵ étant défini dans la relation

$$\log \epsilon = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\log x_i - \log G)^2}$$

	PROSPECTS RADON						
	COATELEZ	COSCASTEL	PLOUENEZ	LE CRANN	ROCHELLEC	LE CRANN	BERRIEN
Nombre de mesures	80	79	95	89	88	280	239
Moyenne arithmétique	2837	3178	2699	2180	2066	4092	3694
Ecart type	1406	3111	1832	1080	1202	3620	2060
Bruit de fond	2472	2384	2266	1927	1762	3379	3197
Déviation géométrique	1,759	2,055	1,792	1,664	1,822	1,863	1,792
Seuil anomal	7047	10069	7274	5338	5851	11730	10266
Percentile 90	4681	6007	4705	3466	3288	7163	6269
Valeur maximale	6857	13746	11480	5369	7738	48414	17558

TABLEAU 4 - Paramètres statistiques des mesures de Radon pour les sept prospectes du massif de Huelgoat
(les activités volumiques sont exprimées en pCi.l⁻¹)

Les deux limites que sont le Bruit de Fond (BF) et le Seuil Anomal (SA) divisent les populations statistiques en trois domaines :

valeur > SA = domaine Anomal
 SA > valeur > BF = domaine fluctuant
 BF > valeur = domaine résiduel

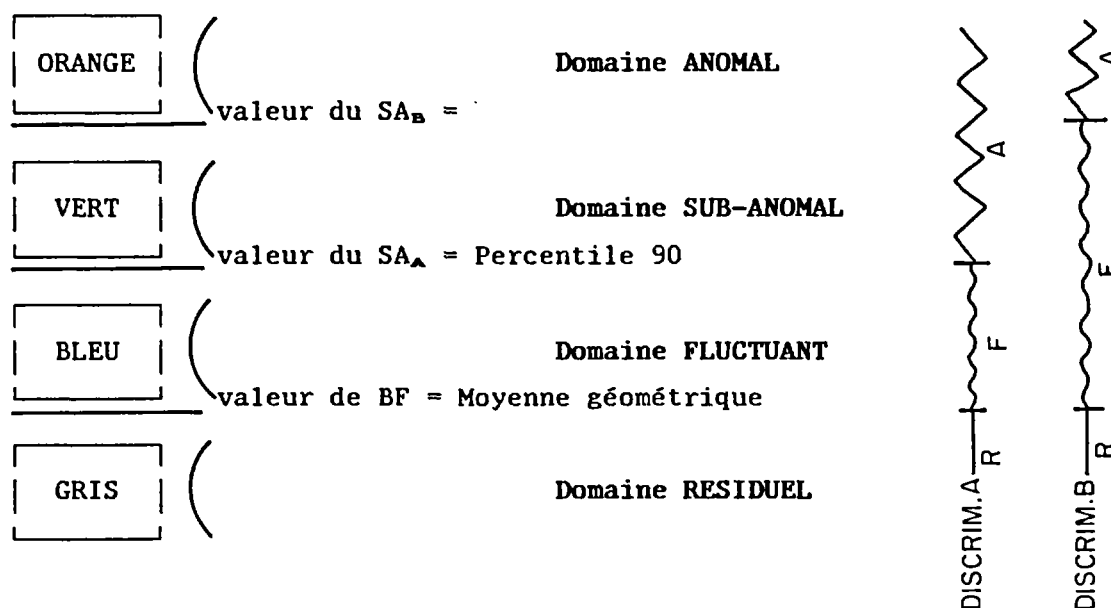
4.3.2 - Application à la représentation cartographique

La discrimination B a été choisie pour fixer les limites des classes représentées sur les cartes d'isovaleurs de chaque secteur test. Cependant le percentile 90 (définissant le SA dans la DISCRIMINATION A) a également été retenu pour rendre cartographiquement compte des deux environnements statistiques.

Par ailleurs, les Bruits de Fonds selon DISCRIMINATION A et DISCRIMINATION B sont relativement proches et peuvent être considérés comme confondus, d'autant mieux que le BF est une limite beaucoup moins déterminante en ce qui concerne l'évaluation de la perméabilité de fracture d'un secteur.

On peut ainsi considérer que les cartes d'isovaleurs rendent compte à la fois des deux environnements statistiques définis.

Ainsi, pour chaque secteur, les cartes d'isovaleurs obtenues par interpolation des mesures comportent donc quatre classes définies comme suit :



TABEAU 5 - Classes de valeurs retenues pour la cartographie
 Les histogrammes montrent que l'activité volumique de RADON obéit NON à une loi normale, MAIS à une loi log-normale

4.4 - INTERPRETATION DES CARTES D'ACTIVITE VOLUMIQUE DU RADON

4.4.1 - Présentation des documents

Les cartes d'isovaleurs sont tracées pour les sept secteurs de contrôle : les deux grands secteurs prospectés en phase 1 de l'étude et les cinq petits secteurs de la phase 2 (*figures 34 à 40*).

Ces documents cartographiques autorisent des commentaires concernant :

- la représentativité relative des cartes maillées à 75 m ou à 40 m,
- la configuration et l'importance des anomalies,
- le développement de la perméabilité de fracture dans le secteur considéré.

L'analyse de chaque carte conduira, en conclusion, à apprécier la réalité du degré d'aptitude d'un secteur à produire des émanations de Radon, aptitude appréciée au moyen des divers critères disponibles lors du choix des secteurs tests.

4.4.2 - Essai de représentativité comparée selon le pas de prélèvement adopté

Le petit périmètre du CRANN a été sélectionné dans une zone apparemment imperméable où les teneurs en radon mesurées au pas de 75 m sont toutes inférieures à la valeur du percentile 90. Entre les deux campagnes de prélèvement, la réduction en superficie entraîne la modification des paramètres statistiques et de l'aspect des cartes. Dans les deux cas, les activités volumiques sont inférieures à 5000 pCi.l^{-1} . Le nouvel échantillonnage ne révèle pas plus de teneur anormale mais il fait ressortir quelques points supérieurs au percentile 90. Par conséquent, les deux types de maillage semi-tactique ont la même représentativité des teneurs en radon et la prospection à la maille de 40 m confirme la première prospection à la maille de 75 m.

4.4.3 - Configuration, importance des anomalies et développement de la perméabilité de fracture

SECTEUR DE COATELEZ

- > Seuil Anomal = aucun point
- > Percentile 90 = seulement quelques points

Commentaire :

Pas d'anomalie ni d'organisation dans les plus fortes valeurs **DONC** pas de fracturation caractérisée et développée.

Ce secteur ne révèle donc pas de perméabilité de fracture notable : le contrôle RADON le fait apparaître comme **DEFAVORABLE** c'est-à-dire sans intérêt potentiel.

SECTEUR DE COSCASTEL

- > Seuil Anomal = deux anomalies mais limitées à trois points
- > Percentile 90 = quelques points, et auréoles subanomaux autour des deux anomalies

Commentaire :

Emanations de Radon intenses aux deux points anomaux et importantes pour trois autres points subanomaux, ce qui correspond à une fracturation localement bien développée.

Ce secteur présente une assez bonne perméabilité de fracture sur des points bien précis : le contrôle Radon le fait apparaître comme **PEU FAVORABLE**, sauf localement.

SECTEUR DE PLOUENEZ

- > Seuil Anomal = quelques points isolés
- > Percentile 90 = quelques points isolés

Commentaire :

Valeurs ponctuellement élevées mais n'intéressant pas des surfaces étendues, et ne présentant pas d'organisation.

Le contrôle Radon fait apparaître ce secteur comme **PEU FAVORABLE**, voire **DEFAVORABLE**, c'est-à-dire ne présentant pas de perméabilité de fracture développée donc **SANS** potentiel aquifère intéressant.

SECTEUR DU CRANN (phase 2)

- > Seuil Anomal = aucun point
- > Percentile 90 = quelques points disséminés

Commentaire :

Pas d'émanations Radon caractéristiques de fractures bien développées, donc secteur à faible perméabilité de fracture.

Le contrôle Radon présente ce secteur comme privé d'une perméabilité de fracture suffisante, donc démunie de potentiel aquifère notable.

SECTEUR DE ROCHELLEC

- > Seuil Anomal = deux points anomaux seulement, en limite
- > Percentile 90 = quelques points bien organisés et en liaison avec les points anomaux

Commentaire :

En limite NE, le secteur présente une organisation et des valeurs qui témoignent de l'existence d'une fracturation émettrice de Radon.

Sur le reste du secteur, aucune manifestation de fracturation ouverte.

Le contrôle Radon montre un secteur non homogène, **PEU FAVORABLE**, dans l'ensemble, sauf **EN LIMITE NE** où les valeurs Radon et l'organisation traduisent localement une bonne perméabilité de fracture. La limite NE constitue donc l'amorce d'un espace à potentialité aquifère positive.

SECTEUR DU CRANN (phase 1)

- > Seuil Anomal = rares points isolés
- > Percentile 90 = rares points isolés

Commentaire :

Une petite plage (presque centrale) apparaît organisée pour les quelques valeurs anomaux et subanomaux : elle présente les caractères d'émanations Radon liées à une fracturation.

Seule cette petite zone semble dotée d'une perméabilité de fracture élevée et affirme donc une potentialité aquifère notable. Le reste du secteur est défavorable.

SECTEUR DE BERRIEN (phase 1)

- > Seuil Anomal = très rares points
- > Percentile 90 = quelques points peu organisés sauf en limite Nord où une liaison existe avec un point anomal

Commentaire :

Le secteur ne présente pas d'émanations Radon caractéristiques d'une fracturation ouverte. Une exception est peut-être à faire pour une petite zone située en limite Nord, là où un début d'organisation semble traduire une fracturation mieux développée, c'est-à-dire l'amorce d'une potentialité aquifère FAVORABLE. Le reste du secteur test paraît PLUTOT DEFAVORABLE.

4.5 - RECAPITULATION - CONCLUSION

4.5.1 - Synthèse des interprétation des cartes d'isovaleurs Radon

Le contrôle des secteurs tests par le Radon, permet, au vu de l'importance des émanations de ce gaz, de localiser des zones de fracturation ouverte, d'en exprimer l'importance relative par contraste avec l'environnement.

Des zones à perméabilité de fracture privilégiée sont ainsi désignées, et considérées comme disposant d'un potentiel aquifère susceptible d'exploitation.

La position de l'ensemble des secteurs tests est synthétisée dans le tableau 6, ci-après, fondé sur l'analyse cartographique de chaque secteur faite au paragraphe précédent.

Figure 34

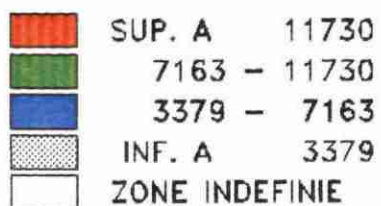
HUELGOAT

SECTEUR LECRANN

PROSPECTION
DU GAZ RADON
DANS LES SOLS

CARTE DES
TENEURS, EN pCi/l

100 m.



.... Limites de marécage

+ point de prélèvement

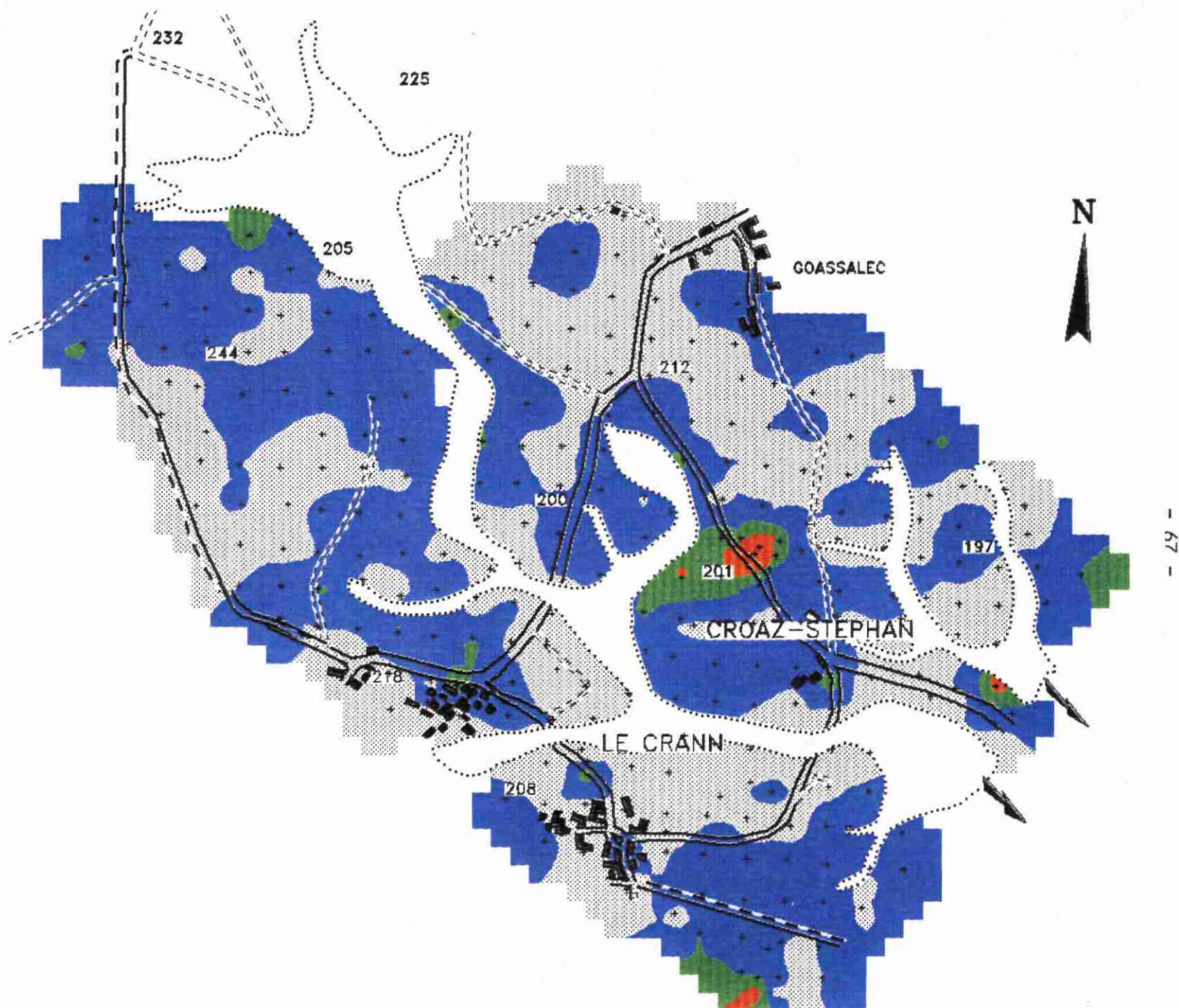


Figure 35

HUELGOAT

SECTEUR COSCASTEL

PROSPECTION
DU GAZ RADON
DANS LES SOLS

CARTE DES
TENEURS, EN pCi/l

100 m.

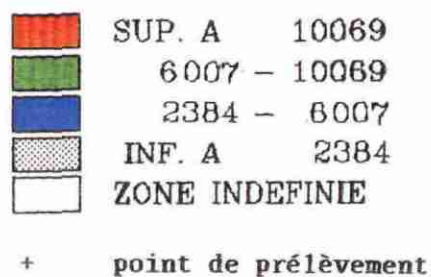


Figure 36

HUELGOAT

SECTEUR BERRIEN

PROSPECTION
DU GAZ RADON
DANS LES SOLS

CARTE DES TENEURS, EN pCi/l

100 m.

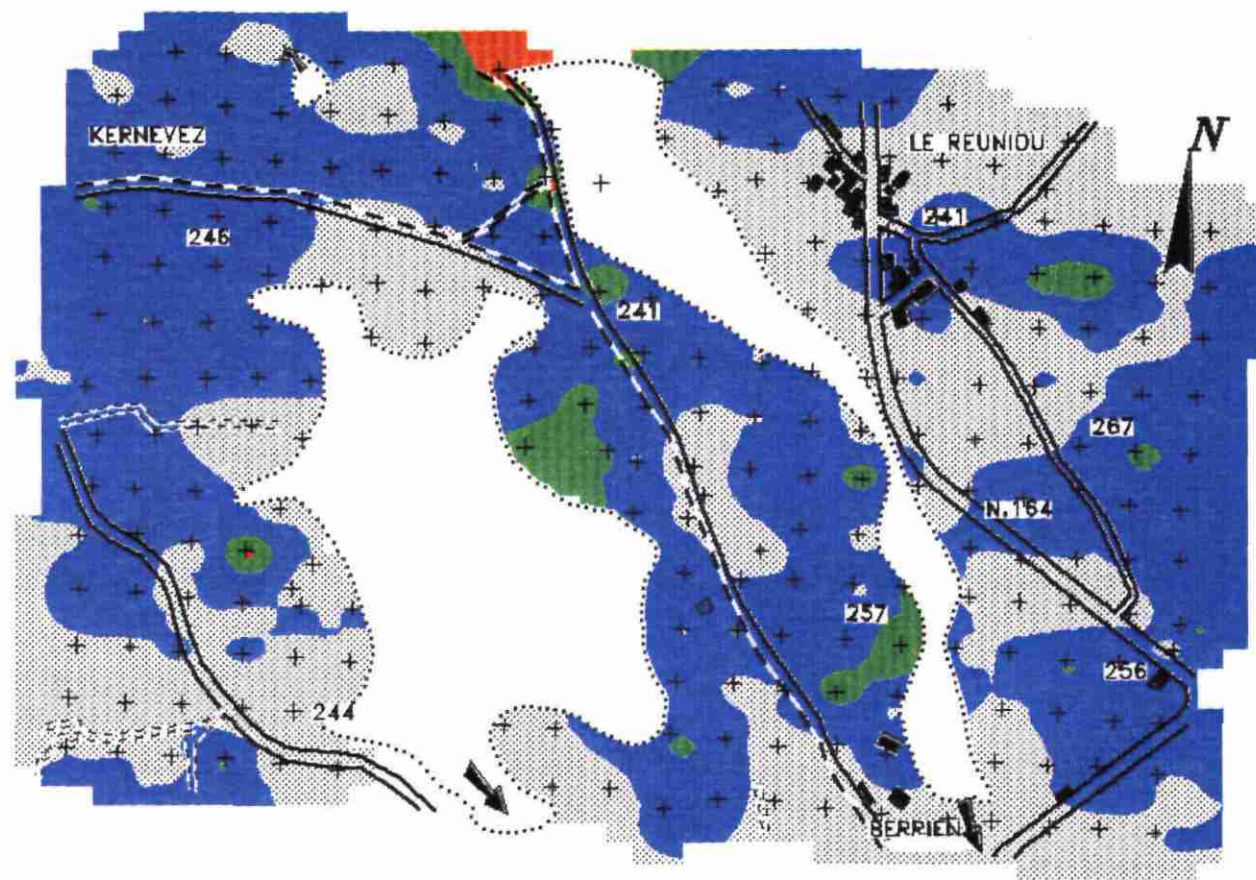
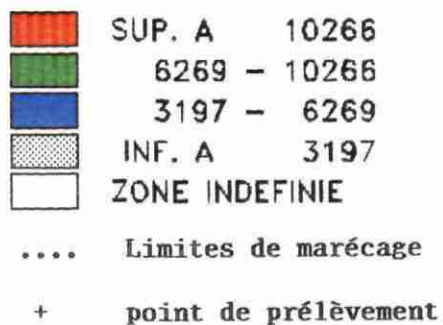


Figure 37

HUELGOAT

SECTEUR ROCHELLEC

PROSPECTION
DU GAZ RADON
DANS LES SOLS

CARTE DES
TENEURS, EN pCi/l

100 m.

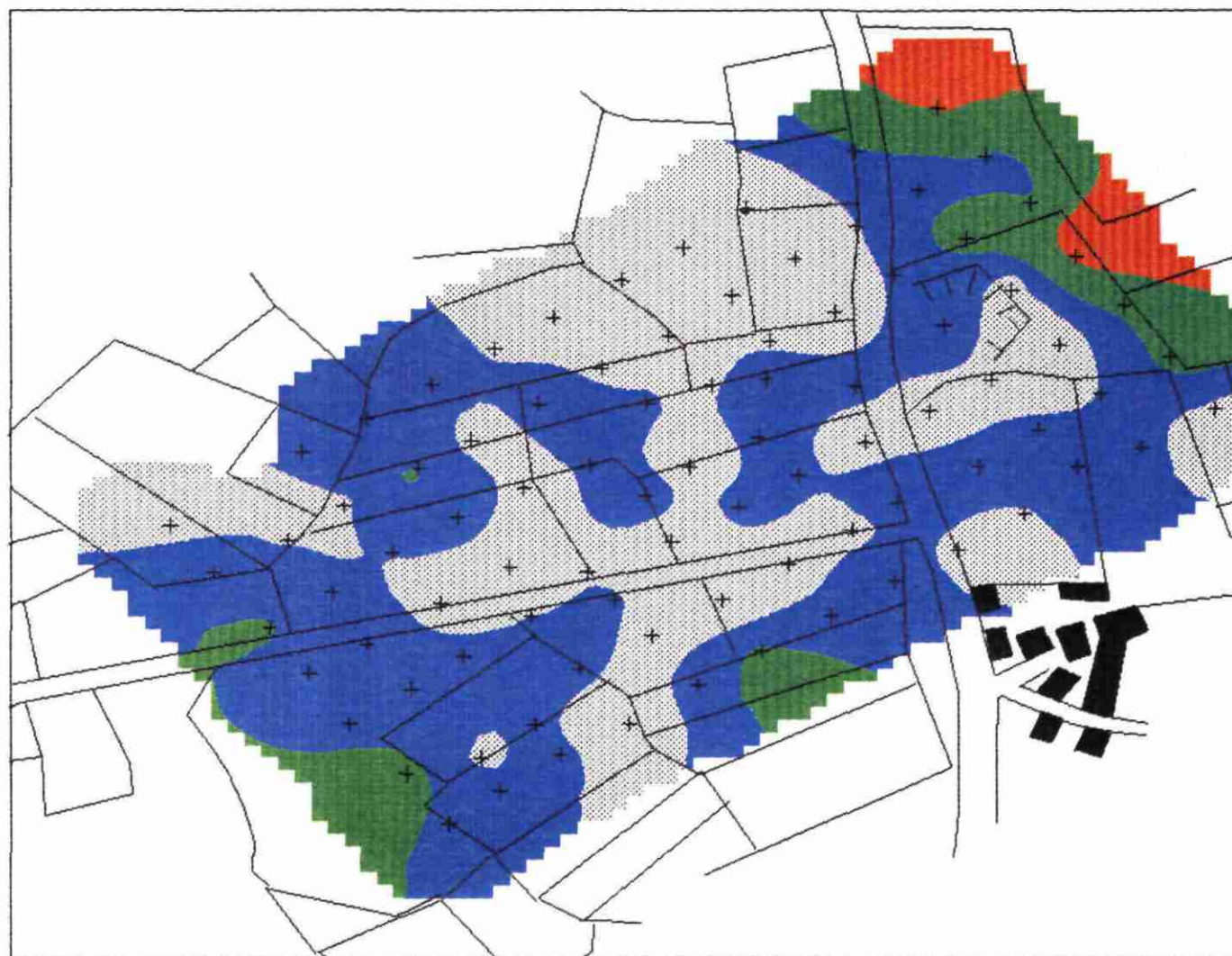
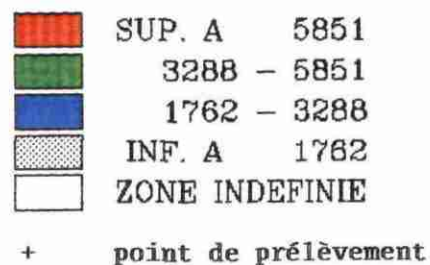


Figure 38

HUELGOAT

SECTEUR PLOUENEZ

PROSPECTION
DU GAZ RADON
DANS LES SOLS

CARTE DES
TENEURS, EN pCi/l

100 m.

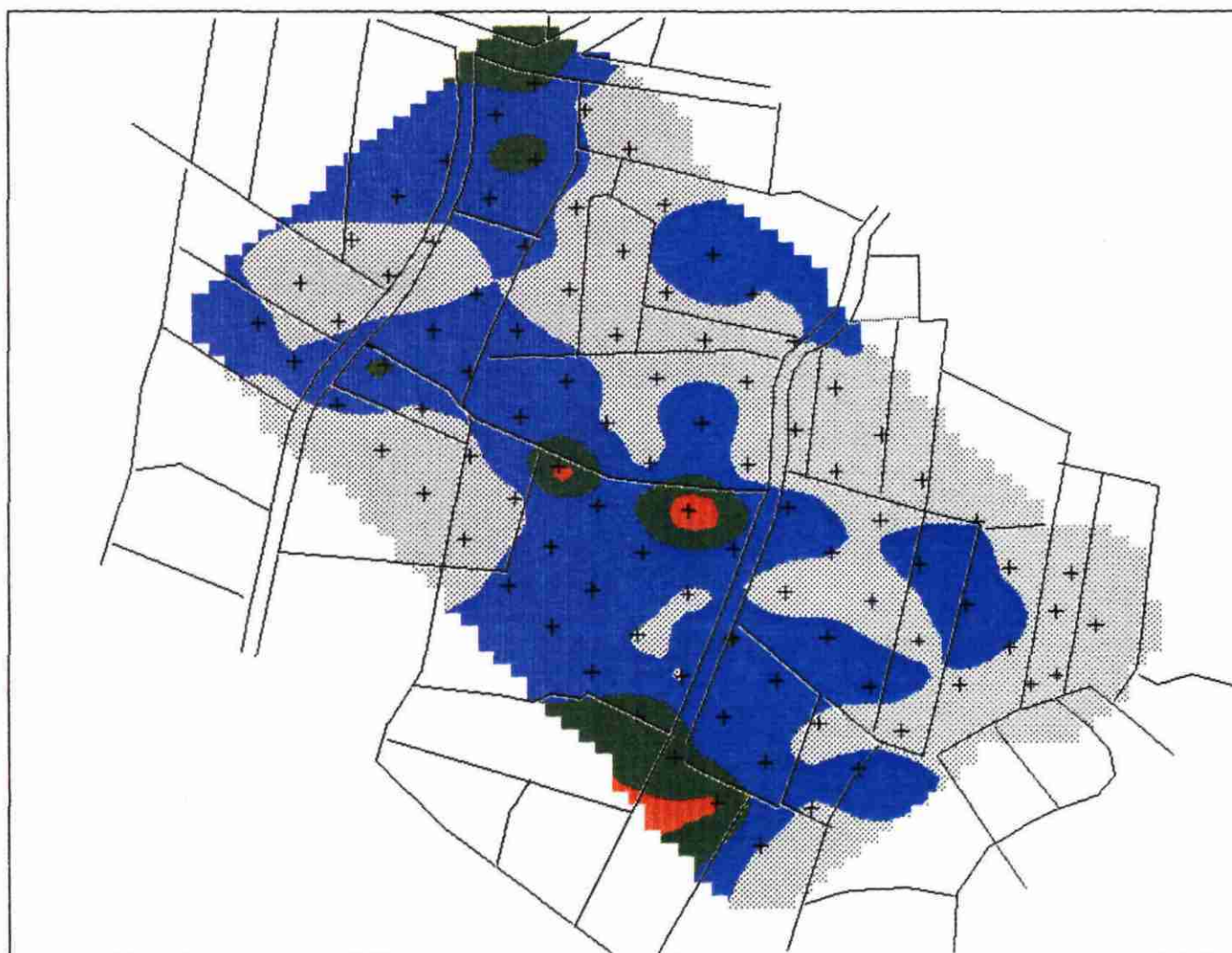
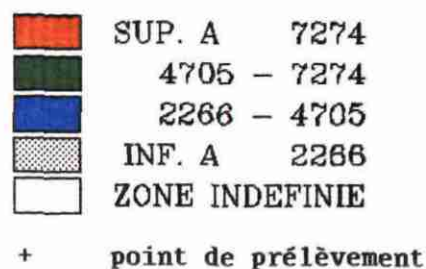


Figure 39

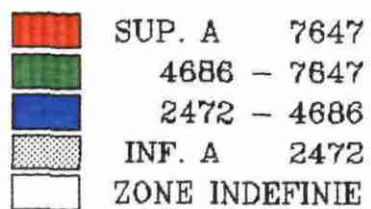
HUELGOAT

SECTEUR COATELEZ

PROSPECTION
DU GAZ RADON
DANS LES SOLS

CARTE DES
TENEURS, EN pCi/l

100 m.



+ point de prélèvement

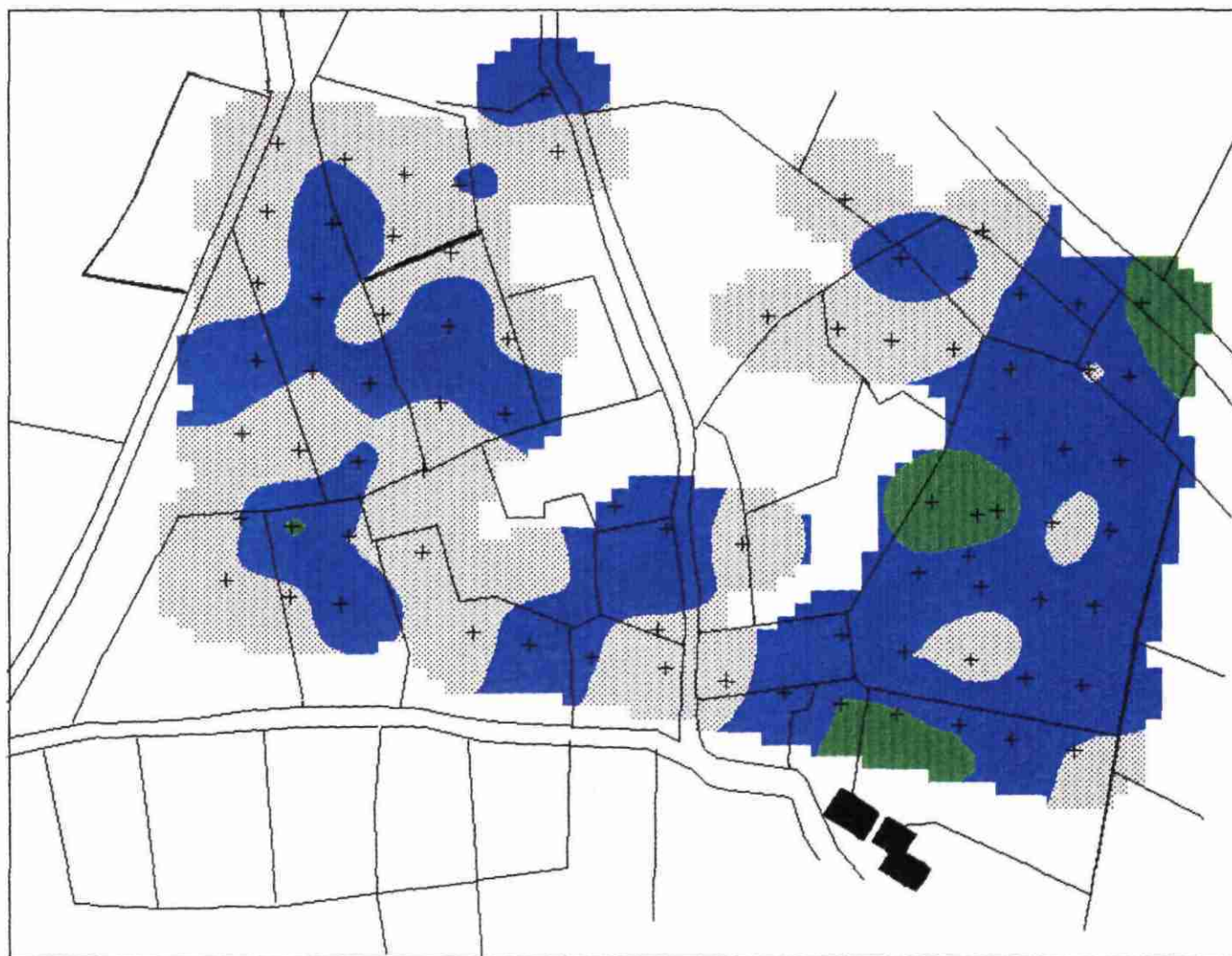


Figure 40

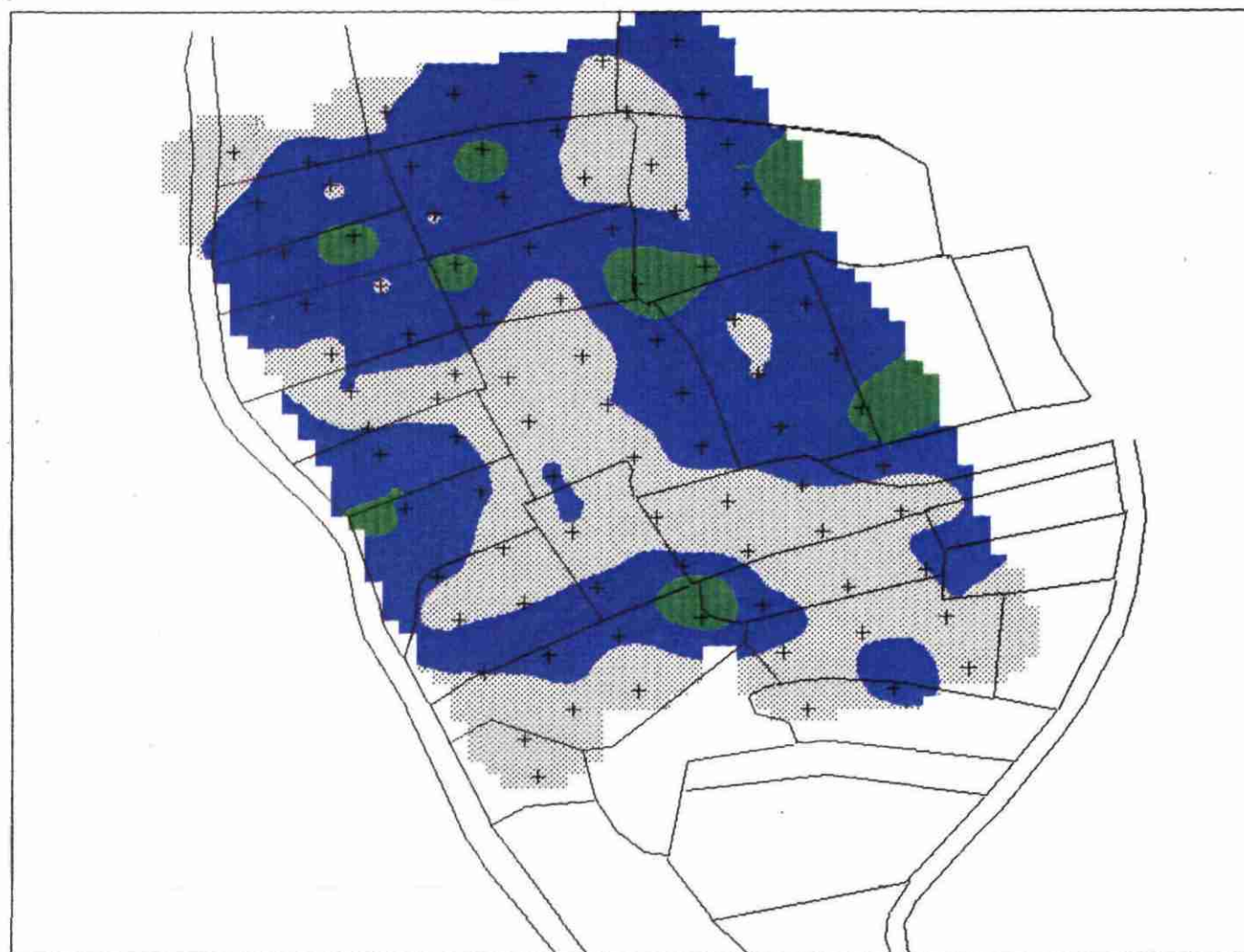
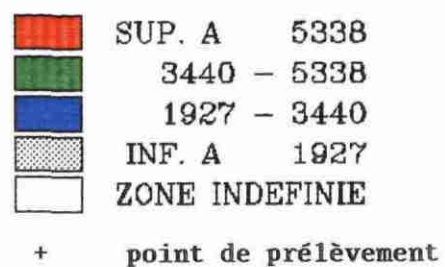
HUELGOAT

SECTEUR LE CRANN

PROSPECTION
DU GAZ RADON
DANS LES SOLS

CARTE DES
TENEURS, EN pCi/l

100 m.



SECTEURS TESTS						Phase 1	Phase 1
CARACTERISTIQUES	COATELEZ	COSCASTEL	PLOUENEZ	LE CRANN	ROCHELLEC	LE CRANN	BERRIEN
Valeur MAXIMALE pCi/l	6857	19822	11480	5369	7738	16319	17578
Plage(s) ANOMALE(S)	non	oui ponctuelles	oui ponctuelles	non	oui peu	oui ponctuelles	oui rares
Plage(s) SUB-ANOMALE(S)	peu	oui beaucoup	oui ponctuelles	oui ponctuelles	oui	oui	oui
% du secteur test concerné par ANOMALIES et SUB-ANOMALIES	> 50 % ≈ 25 % ≈ 10 % < 10 %	< 10 %	> 50 %	≈ 10 %	< 10 %	≈ 25 %	< 10 %
ORGANISATION des valeurs anormales et/ou sub-anormales	non (ponctuelles)	peu nette	non	non	oui en limite NE	oui localement	oui vague et locale
Zones d'émanations RADON, à bonne PERMEABILITE de FRACTURE	non	oui mais ponctuelles	rares ponctuelles	non	oui	non sauf localement	non sauf très localement
POTENTIALITE AQUIFERE : tendance générale du secteur test DEF = DEFAVORABLE ; FAV = FAVORABLE	DEF	peu FAV sauf ponctuellement	DEF	DEF	Peu FAV (localement FAV)	DEF (sauf localement)	DEF (sauf très localement)

TABLEAU 6 - POTENTIALITES AQUIFERES DES SECTEURS TESTS

D'après analyse des cartes d'isovaleurs en activité volumique du gaz RADON dans les sols

4.5.2 - Corrélations RADON/Estimation "manuelle" du niveau d'intérêt des secteurs tests

Le contrôle Radon modifie-t-il l'appréciation portée sur chaque secteur au moment du choix de ces secteurs au vu des différents critères disponibles ?

Le tableau ci-dessous montre le niveau de corrélation entre les deux modes de jugement.

Estimation de la tendance du secteur	COATELEZ	COSCASTEL	PLOUENEZ	LE CRANN	ROCHELLEC	LE CRANN	BERRIEN
Par les divers CRITERES	Moyen	Moyen	DEF	DEF	FAV	FAV	FAV
Par les résultats du CONTROLE RADON	DEF	Peu FAV sauf localement	DEF	DEF	Peu FAV sauf localement	DEF sauf locale.	DEF sauf locale.
CORRELATION	-	+	+	+	+	-	-

**TABLEAU 7 - Potentiel aquifère des secteurs tests :
corrélations entre l'estimation faite au vu des critères
déterminants, et la tendance des mêmes secteurs, issue du
contrôle par le Radon**

L'observation du tableau 7 montre que les contrôles effectués par prélèvement du Radon donnent des résultats un peu plus pessimistes que ceux escomptés par prise en compte individuelle des multiples critères.

Il faut tempérer cette "déviation" en considérant les éléments suivants :

- . D'une part l'analyse manuelle des critères concerne l'ensemble du massif et débouche sur le choix de secteurs tests
- . D'autre part, le contrôle par le Radon ne concerne plus que les secteurs sélectionnés
- . Il en ressort que les deux modes d'estimation ne se font pas à "niveau égal", le "contrôle Radon" étant en fait une forme de précision apportée sur chaque secteur.
- . Dans ces conditions, il est assez naturel de parvenir à des conclusions plus nuancées dans le cas du contrôle Radon : c'est ce qui arrive pour trois des secteurs qui se révèlent peu favorables à défavorables avec des nuances localement favorables.

Le niveau de corrélation exprimé par le tableau 7 ne présente en fait qu'un caractère indicatif, la corrélation essentielle restant à faire entre les résultats des contrôles Radon et la carte des potentialités aquifères issues des traitements SYNERGIE : c'est l'objet du chapitre suivant.

5 - CONFRONTATION DES DEUX DEMARCHES ET ABOUTISSEMENT : PROCEDURE SIMPLIFIEE POUR UNE PRE-PROSPECTION ASSISTEE PAR SYNERGIE

5.1 - CARACTERISATION DES SECTEURS TESTS D'APRES L'ANALYSE MULTICRITERE SOUS SYNERGIE

5.1.1 - "Lecture" de la carte des potentialités aquifères du massif

L'aboutissement de l'analyse multicritère sous SYNERGIE est la "carte des potentialités aquifères du massif" (*figure 31 - image R rappelée ci-après*). Cette carte présente :

- en gris : les zones défavorables ou indéterminées
- en couleur, (sauf rouge) : les zones à perméabilité de fracture favorable, et à l'intérieur de ces zones :
 - . en jaune grisé : les zones à recharge assez favorable
 - . en jaune : les zones à recharge favorable
 - . en vert : les zones à recharge très favorable
 - . en bleu : les zones à perméabilité de fracture favorable, mais pour lesquelles il n'y a pas d'informations concernant l'aptitude à la recharge
 - . en rouge : les talwegs favorables (en liaison avec l'une des formations décrites ci-dessus)

Chacun des secteurs tests est reporté sur la carte des potentialités aquifères du massif : il est donc possible, par simple lecture de la carte, de caractériser chaque secteur test par un niveau d'intérêt relatif à la perméabilité de fracture, à l'aptitude à la recharge et à la tendance aux limites.

Le barème d'appréciation du niveau de potentialité aquifère utilisé ci-après pour caractériser chaque secteur test est exposé dans le tableau 8.

5.1.2 - "Lecture" détaillée pour chacun des secteurs tests

A l'aide de la figure 30 rappelée ci-après, on regardera pour chaque secteur, quel est le développement des zones à Perméabilité de Fracture favorable (P.F.), quel est le niveau d'Aptitude à la Recharge (A.R.) et quelles sont les Conditions en Limites du secteur (C.L.). Ceci permettra de dégager la tendance générale du secteur, exprimée en se référant au barème d'appréciation de la potentialité aquifère (*tableau 8*).

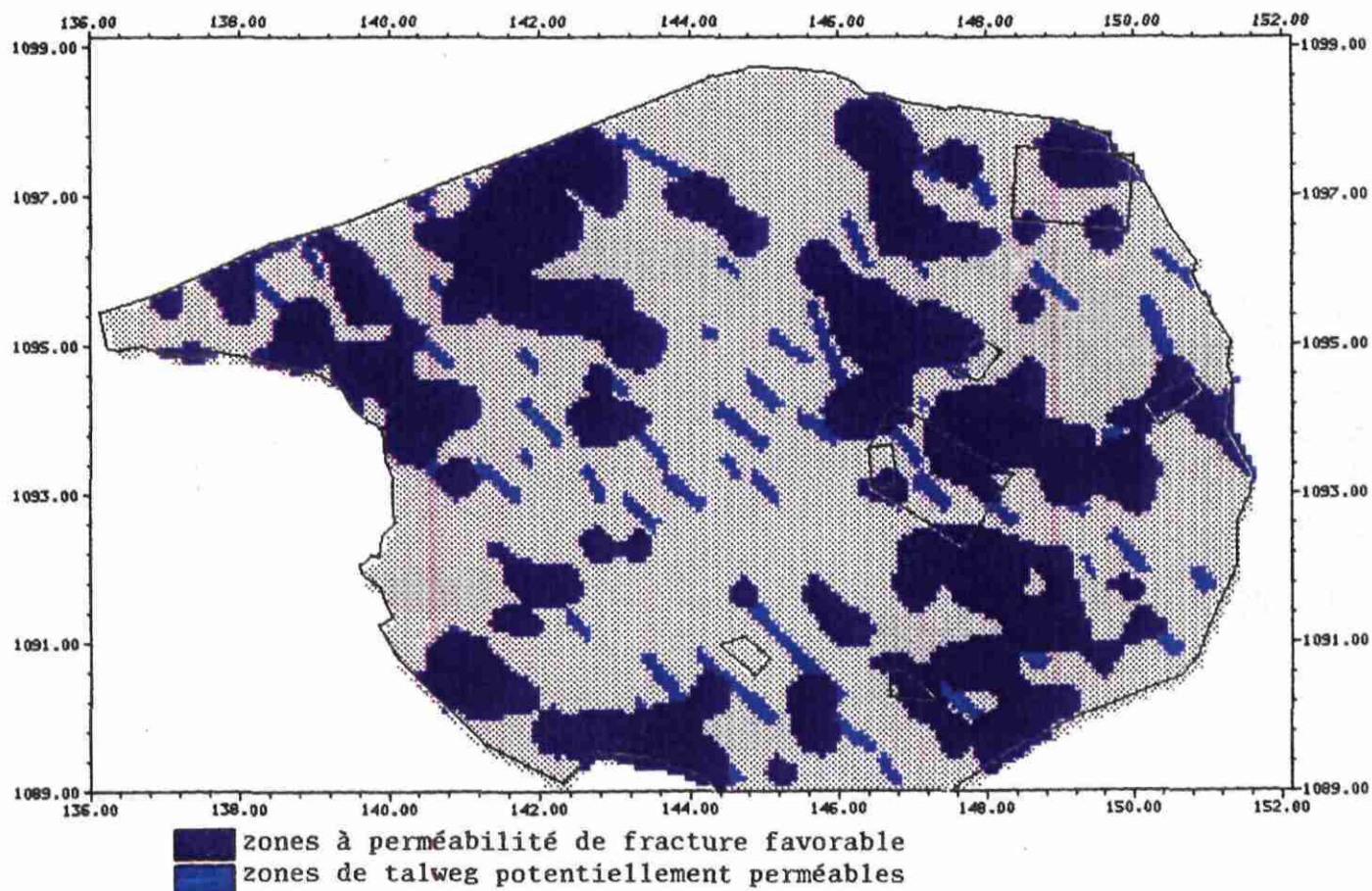


FIGURE 30 (rappel) - Image Q : Potentialités de perméabilité

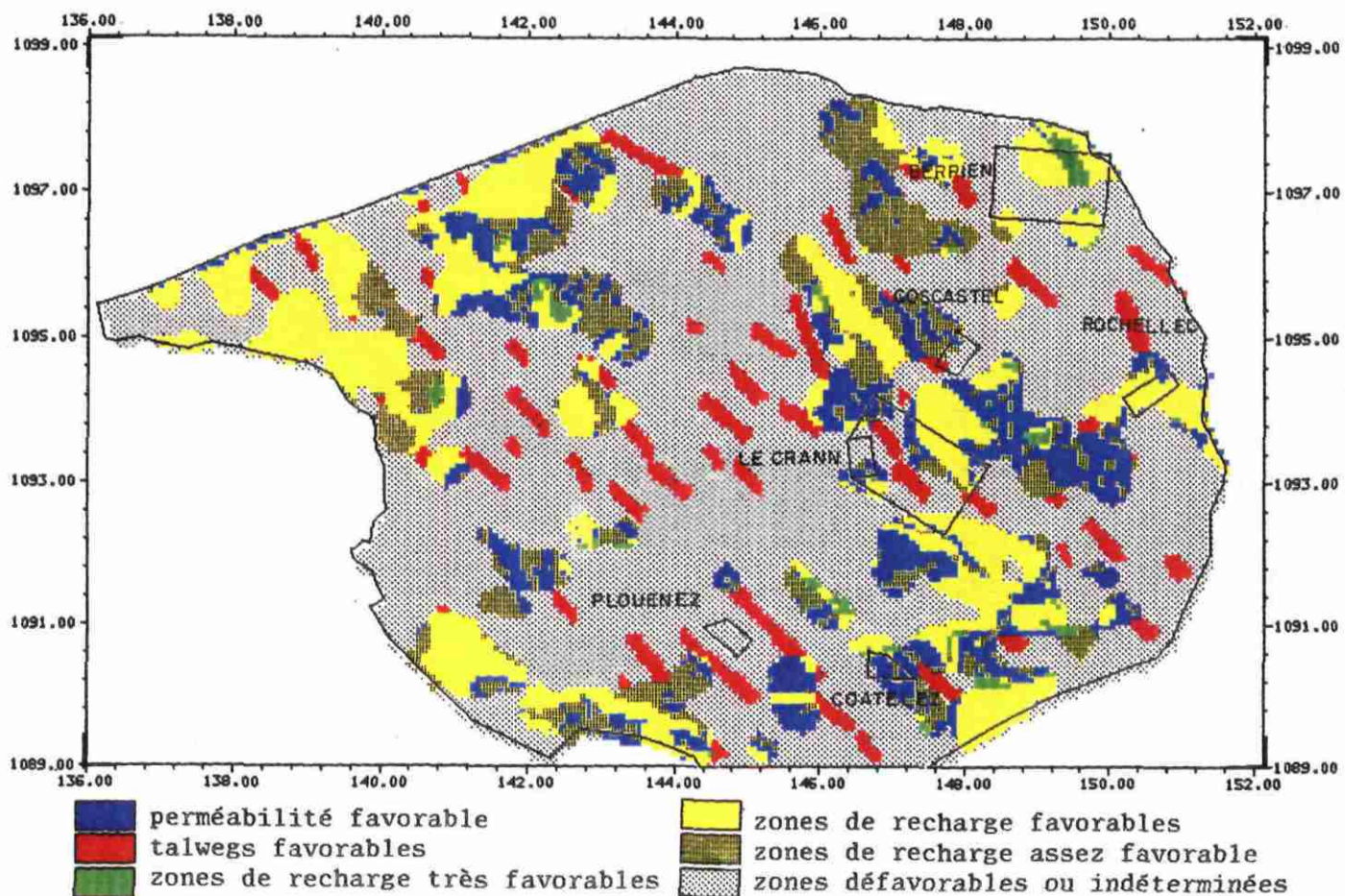


FIGURE 31 (rappel) - Image R : Carte des potentialités aquifères du massif

Couleur	Symbolique couleurs	Remarques	Potentialité aquifère : niveau d'intérêt du secteur
Gris	Zones défavorables ou indéterminées	Absence de critères favorables	DEFAVORABLE (DEF)
Bleu	Perméabilité de fracture favorable	Concerne 1 seul critère (perméabilité de fracture = PF)	Peu FAVORABLE (peu FAV)
Jaune-grisé	Zone de recharge assez favorable	Concerne 2 critères PF + Aptitude à la Recharge (AR)	Assez FAVORABLE (assez FAV)
Jaune	Zone de recharge favorable	Concerne 2 critères PF + AR	FAVORABLE (FAV)
Vert	Zone de recharge très favorable	Concerne 2 critères PF + AR	Très FAVORABLE (très FAV)

TABEAU 8 - Potentialité aquifère : niveau d'intérêt

SECTEUR DE COATELEZ

- P.F. (Perméabilité de Fracture) = favorable dans presque tout le secteur
- A.R. (Aptitude à la Recharge) = indéterminée
- C.L. (Caractères aux Limites)
 - limite Nord = recharge favorable
 - limite Ouest et Sud = recharge défavorable ou indéterminée

Tendance générale :

Secteur plutôt homogène à potentialité aquifère assez favorable

SECTEUR DE PLOUENEZ

- P.F. = défavorable
- A.R. = défavorable ou indéterminée
- C.L. = défavorables dans toutes les directions

Tendance générale :

Secteur très homogène, totalement négatif au regard de la carte des potentialités aquifères du massif

SECTEUR LE CRANN (phase 2)

- P.F. = favorable uniquement à l'extrémité Sud du secteur (elle est, partout ailleurs, indéterminée ou défavorable)
- A.R. = indéterminée ou défavorable sur l'ensemble du secteur
- C.L. = en limite Sud, l'aptitude à la recharge est favorable. Les autres limites ne présentent aucun caractère positif

Tendance générale :

Secteur à potentialité aquifère défavorable, sauf vers la limite Sud.

SECTEUR DE COSCASTEL

- P.F. = défavorable ou indéterminée, sauf sur la bordure ouest
- A.R. = indéterminée ou défavorable, sauf sur la bordure ouest, où elle est assez favorable

- C.L. = identiques aux caractéristiques du secteur :
 - . assez favorable en limite Ouest
 - . indéterminée ou défavorable dans toutes les autres directions

Tendance générale :

Secteur à potentialité aquifère plutôt défavorable, sauf sur la bordure ouest.

SECTEUR DE ROCHELLEC

- P.F. = favorable sur la totalité du secteur
- A.R. = favorable sur la totalité du secteur
- C.L. = favorables dans presque toutes les directions, sauf au Sud et au Nord-Est, où les caractères aux limites sont indéterminés ou défavorables.

Tendance générale :

Le secteur de ROCHELLEC est très homogène et sa potentialité aquifère est tout à fait favorable, tant au regard de la perméabilité de fracture qu'à celui de l'aptitude à la recharge. En outre, un talweg favorablement orienté existe en limite Nord.

Parmi les secteurs tests, la carte des potentialités aquifères du massif désigne de loin celui-ci comme le plus favorable.

SECTEUR LE CRANN (phase 1)

Les secteurs tests choisis en phase 1 sont nettement plus étendus et pour cette raison se montrent moins homogènes quant à leur niveau de potentialité aquifère.

- P.F. = elle est indéterminée ou défavorable dans la partie centrale du secteur. La moitié Nord-Est est favorable, ainsi que chacun des coins du secteur
- A.R. = elle est favorable ou assez favorable dans la partie Nord-Est, ainsi que dans le coin Sud

Tendance générale :

En fait, le secteur du CRANN est installé entre trois blocs à potentialité aquifère favorable se développant largement au Nord, à l'Est et au Sud du périmètre testé = la tendance générale est plutôt DÉFAVORABLE mais localement elle se montre peu FAVORABLE à FAVORABLE.

SECTEUR BERRIEN (phase 1)

- P.F. = la moitié Nord présente, (sauf dans le coin Nord-Ouest) une perméabilité de fracture favorable. Il en va de même dans les angles Sud-Est et Sud-Ouest du périmètre
- A.R. = favorable à très favorable dans les mêmes limites que la perméabilité de fracture

Tendance générale :

Le secteur de BERRIEN présente localement en plusieurs endroits, une potentialité aquifère favorable, voire très favorable.

5.2 - CORRELATIONS ET COMMENTAIRES

5.2.1 - Tableau de corrélation

Estimation de la potentialité aquifère	Identification des secteurs tests						
	COATELEZ	COSCASTEL	PLOUENEZ	LE CRANN	ROCHELLEC	LE CRANN	BERRIEN
Par les cartes d'isovaleurs RADON	DEF	Peu FAV sauf ponctuellement	DEF	DEF	Peu FAV sauf localement FAV	DEF sauf localement	DEF sauf localement
Par la carte des POTENTIALITES AQUIFERES (SYNERGIE)	Peu FAV	Plutôt DEF (localement assez FAV)	DEF	DEF sauf très local. peu à assez FAV	FAV	Plutôt DEF sauf local. de peu à FAV	Plutôt DEF sauf localement FAV et très FAV
CORRELATION	/	+	+	+	-	+	+

(Echelle d'appréciation des corrélations :

++ = bonne; + = convenable; / = indécise; - = mauvaise; -- = très mauvaise)

TABLEAU 9 - Potentialité aquifère des secteurs tests - Corrélation entre l'estimation par le Radon et l'estimation par la carte multicritère (issue de SYNERGIE)

5.2.2 - Commentaire du tableau 9

A l'exception d'une corrélation mauvaise, et d'une autre indécise, cinq corrélations se montrent convenables et bonne...ce qui est tout à fait satisfaisant.

Afin de mieux asseoir le résultat de cette confrontation, il est intéressant de placer les différentes cartes d'isovaleurs Radon à côté de la carte des potentialités aquifères du massif (*figure 31*) ; on verra assez bien la coïncidence géographique entre les zones d'anomalies Radon et les zones à potentialité aquifère convenable ou bonne.

5.2.3 - Conclusions

La carte des potentialités aquifères du massif, aboutissement de la méthode multicritère, est, sur les secteurs tests, confirmée par les mesures de Radon. Les corrélations établies (*tableau 9*) autorisent à valider la carte dans son ensemble. C'est en même temps l'analyse multicritère menée sous SYNERGIE qui trouve ici sa légitimité.

La figure 41 désigne les quelques endroits qui apparaissent comme étant les meilleurs sur la carte des potentialités aquifères, compte tenu, en particulier, de l'existence d'un talweg favorable, susceptible de jouer un rôle important :

- Rôle de collecteur, en amont d'une zone de recharge
- Rôle de drain (transfert), depuis une zone chargée, vers une autre zone de recharge, plus favorable, ou plus étendue.

Dans tous les cas de prospection hydrogéologique sur un secteur assez vaste et assez peu reconnu, il sera possible -et souhaitable- grâce à l'analyse multicritère, de procéder à une présélection des zones potentiellement les plus riches.

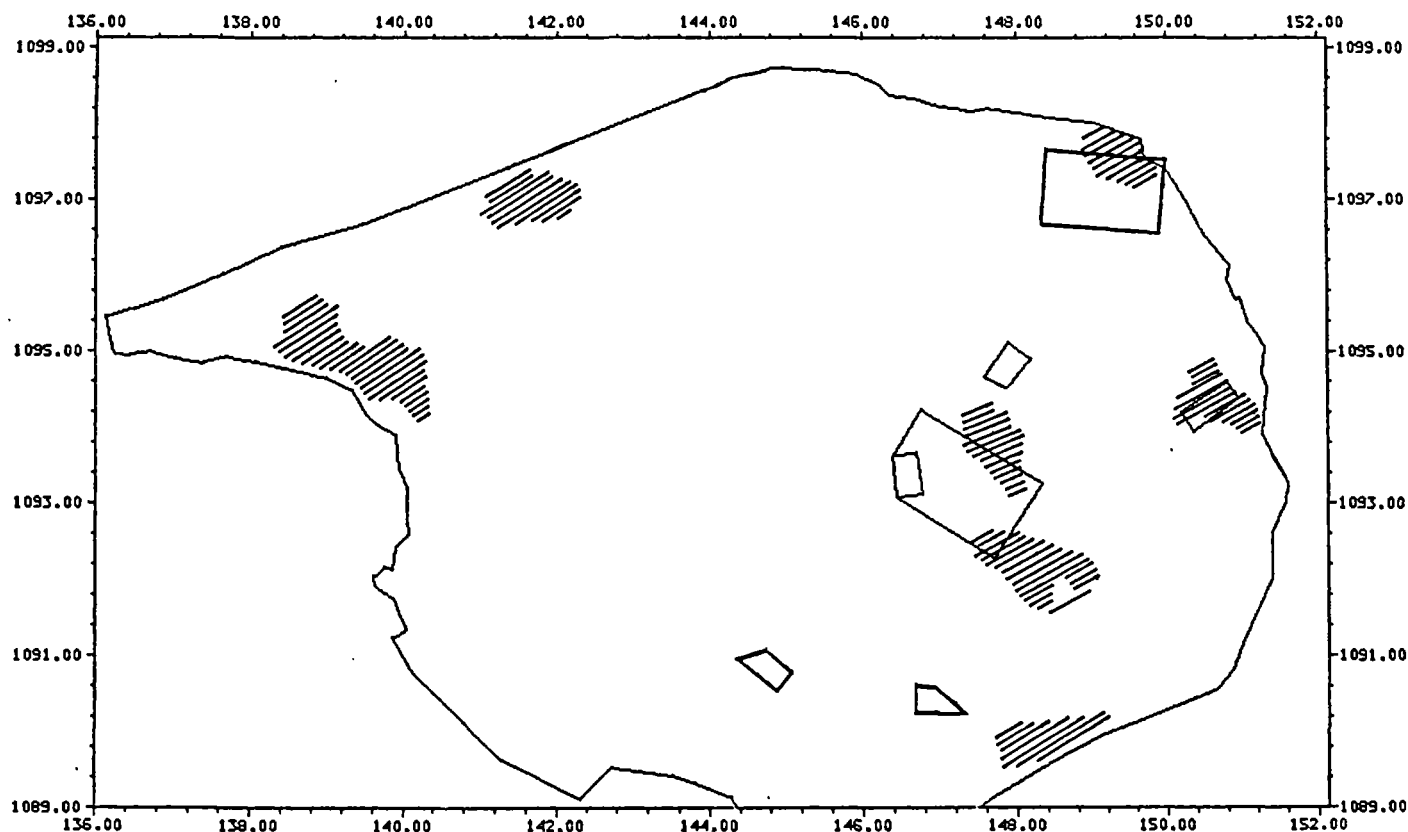


FIGURE 41 - Secteurs les mieux placés sur la carte
des potentialités aquifères

5.3 - ELEMENTS D'UNE PRE-PROSPECTION HYDROGEOLOGIQUE ASSISTEE PAR SYNERGIE

L'analyse multicritère menée sur le massif de Huelgoat a pris en compte de très nombreux paramètres, et nécessité des traitements informatiques complexes. Il n'est pas envisageable de déployer une procédure aussi complète et aussi complexe pour chaque étude de préprospection...mais au contraire, d'appliquer une méthode d'analyse limitée aux paramètres essentiels et déterminants. Il convient donc de dégager clairement :

- les critères à étudier
- les données indispensables à l'élaboration de ces critères
- les moyens à mettre en oeuvre

5.3.1 - Critères à retenir pour une analyse multicritère restreinte

La carte des potentialités aquifères est bâtie sur la coexistence de trois critères :

- le développement de la perméabilité de fracture
- l'aptitude à la recharge
- l'existence de talwegs privilégiés jouant un rôle de collecteur ou de transfert de la ressource

Ces critères, qui sont composites, résultent de la combinaison de plusieurs critères simples associés par l'intermédiaire de SYNERGIE.

5.3.2 - Données indispensables pour l'analyse multicritère

Pour constituer les trois critères essentiels et les rassembler en un seul document, il est nécessaire de réunir les données indispensables :

- Altimétrie : un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est la forme la plus pratique, la plus fiable et la plus directement utilisable. A défaut de MNT, les courbes de niveau (toutes ou partie) peuvent être digitalisées et restituées par interpolation selon une grille fine.
- Géologie : A partir d'une carte géologique, les principales formations seront digitalisées et restituées en surfaces "homogènes" ; toutes précisions géologiques provenant d'une étude locale, de récents travaux de terrain... pourront être intégrées dans ce document de base
- Altération : s'il existe une carte des formations superficielles et (ou) une carte pédologique, un document fixant l'état d'altération des terrains sera facilement établi...et informatisé par digitalisation. Si ces cartes n'existent pas, il faudra recourir à la lecture attentive de la notice de la carte géologique et à une reconnaissance au moins rapide sur le terrain. Il est envisageable de se satisfaire d'un document partiel, laissant de larges surfaces dépourvues d'information, mais cet état conduira nécessairement à une limitation des zones sélectionnées en phase finale.
- Hydrogéologie : A partir des cartes topographiques (et des photos aériennes éventuellement), une carte du réseau hydrographique complet est établie. La densité du réseau sera prise en compte dans le critère estimatif des zones de recharge.

Fracturation : Les données concernant les structures en général, et tout particulièrement la fracturation, sont de celles dont la collecte peut se révéler difficile et lourde.

- Dans le cadre d'une procédure restreinte de pré-prospection, l'analyse linéamentaire sur photo satellite par les procédés de la Télédétection sera abandonnée.
- Les informations retenues seront issues de l'analyse des photographies aériennes et des fractures figurées sur les cartes.

Selon l'importance des informations ainsi retenues, un tri dégageant les principales familles directionnelles sera effectué ou non.

5.3.3 - Moyens à mettre en oeuvre

Pour mener à bien l'étude multicritère restreinte d'un secteur d'étude, les moyens à mettre en oeuvre sont de natures diverses :

- . Unité d'oeuvre Ingénieur (*Géologue, hydrogéologue, structuraliste, télédétecteur*) : c'est en fait le "moyen" le plus important et le plus coûteux de l'opération. Il est appliqué à toutes les phases de la procédure, mais est principalement développé en ce qui concerne la sélection et collecte des données, l'analyse des photos aériennes et les interventions de terrain.
- . Table à numériser et micro-ordinateur associé. Tous les documents devront être transformés en données informatisées, par digitalisation.
- . Logiciel SYNERGIE. Il nécessite l'utilisation du système VAX et un terminal TEKTRONIX de type 4107 ou 4207, associé à un traceur couleur de type 4696.

5.4 - PROCEDURE SIMPLIFIEE POUR UNE PRE-PROSPECTION HYDROGEOLOGIQUE ASSISTEE PAR SYNERGIE

5.4.1 - Contraintes liées à l'analyse multicritère

L'objectif, objet de la prospection, doit répondre à plusieurs impératifs qui conditionnent la possibilité de réaliser une analyse multicritère.

- Le périmètre d'étude doit autant que possible présenter une homogénéité lithologique, structurale et de milieu (au sens hydrogéologique) à l'imitation de l'exemple d'Huelgoat :
 - ensemble de granitoïdes (*unité lithologique*)
 - massif circonscrit (*unité structurale*)
 - milieu fissuré (*unité du "milieu"*)
- Les informations indispensables, décrites au paragraphe 5.3.2 doivent nécessairement exister ou être synthétisables rapidement sans investissements lourds.
- Les moyens techniques (mise à disposition de SYNERGIE) doivent évidemment être dégagés.

5.4.2 - Organisation du travail

Les différentes phases d'une étude de préprospection assistée par SYNERGIE s'enchaînent de la façon suivante :

- phase préparatoire : elle comprend :
 - . la collecte des données : acquisition d'un MNT, de cartes diverses, de photos aériennes...(cf 5.3.2)
 - . Etudes complémentaires :
 - sur photos aériennes : recherche des fractures et linéaments
 - sur le terrain : compléments d'informations éventuels et contrôle des documents en matière d'altération et de fracturation
- phase de mise en forme des données
 - . Digitalisation des différents documents cartographiques complétés
 - . Mise en ordre des fichiers obtenus (travail à la console, en mode éditeur)
- phase de traitement : les informations sont placées sous SYNERGIE
 - . Création de la base image
 - . Création des images initiales
 - + carte des altitudes (obtenue directement si l'on possède un MNT)
 - + carte du réseau hydrographique total
 - + carte géologique
 - + carte de l'état d'altération
 - + carte des fractures et linéaments

- . Création d'images intermédiaires (par traitements ou combinaisons des images initiales)
 - + *cartes des pentes classées*
 - + *cartes des altitudes classées*
 - + *carte des talwegs*

Ces trois premières images intermédiaires sont obtenues à partir de l'image des altitudes.

- + *carte des éléments de surface de faible pente, classés en altitude*
- + *carte de l'état d'altération limité aux éléments de surface de faible pente*
- + *carte de la lithologie limitée aux éléments de surface de faible pente*
- + *histogramme des fractures et linéaments sélection des grandes familles directionnelles principales*
- + *carte de densité du réseau hydrographique complet*
- . Identification de systèmes aquifères potentiels (par combinaison des images intermédiaires)
 - + *carte des zones de recharge, classées par niveau de possibilités*
 - + *carte des zones à perméabilité de fracture élevée*
 - + *carte estimative classée des potentialités aquifère du secteur étudié : cet ultime document cumule :*
 - *les zones de recharge*
 - *les zones à perméabilité de fracture élevée*
 - *les talwegs orientés selon les directions des principales familles de fractures*

Pour une vue synthétique de la phase de traitement, on pourra se reporter à la figure 4, dont l'exposé ci-dessus est une forme simplifiée.

5.4.3 - Conclusion

Cette carte des potentialités aquifères est l'aboutissement de la procédure de PRE-PROSPECTION. Elle désigne les zones à laisser de côté, et les zones probables de succès.

La méthode d'analyse multicritère permet de s'affranchir de la phase de prospection stratégique. La PRE-PROSPECTION constitue en fait la phase semi-tactique et débouche directement sur une prospection hydrogéologique tactique des quelques secteurs les mieux situés sur la carte des potentialités aquifères.

Les méthodes de prospection tactique ensuite utilisées seront la géophysique, l'analyse structurale fine (sur photo et sur le terrain), les mesures de Radon...Elles conduiront à l'implantation de sondages de reconnaissance.

BILAN DE L'ETUDE

L'étude menée sur le massif d'HUELGOAT a montré dans quelles conditions il est possible de caractériser un secteur géologique par un faisceau de paramètres et de critères, et comment un problème particulier peut être saisi grâce à une sélection soigneuse des critères les plus représentatifs, puis traité par l'analyse multicritère assistée par ordinateur ; l'étude démontre la réalité d'une solution apportée au problème de la pré-sélection de zones hydrogéologiquement favorables, par utilisation de l'ANALYSE MULTICRITERE.

Réalisée de façon manuelle (en phase 1 de l'étude) cette analyse restait floue, imprécise et non totalement formulée. Le travail effectué sous SYNERGIE a permis d'aboutir à des documents totalement formalisés, clairement exprimés sous forme cartographique, et couvrant l'ensemble du massif. L'étude constitue une illustration démonstrative des possibilités du logiciel SYNERGIE, dont l'utilisation n'a porté que sur un nombre restreint des fonctions disponibles.

Le traitement multicritère (*chapitre 3*) est bien sûr valorisant par la réalisation du document final qu'est la carte des potentialités aquifères du massif, objectif formulé de l'étude. Cependant, la mise sous forme "image" de chacun des paramètres et critères considérés, constitue un vivier d'informations parfaitement utilisables, comparables (toutes les images sont réalisées à la même échelle)... pour le traitement d'un autre problème : il faudrait sélectionner alors les paramètres et critères caractéristiques, et procéder aux combinaisons d'images spécifiques du nouveau problème à traiter. Le travail de formalisation des données reste acquis, et le système est ouvert à d'autres utilisations.

Le contrôle du résultat de l'analyse multicritère exercé par les mesures du gaz Radon sur plusieurs secteurs tests, présente un niveau de corrélation satisfaisant, qui témoigne également du bien fondé de la technique Radon.

Enfin, l'élément positif le plus évident, à retenir dans le bilan de cette étude, est consigné dans le chapitre 5.4 (*Procédure simplifiée pour une pré-prospection hydrogéologique assistée par SYNERGIE*). Débarrassée de trop lourds traitements de télédétection appliqués à la recherche des linéaments et fractures, ainsi que de données superfétatoires, car trop mal reliées au problème des potentialités aquifères (il s'agit des discontinuités gravimétriques), la démarche multicritère devient facilement applicable à n'importe quelle entité géologique, pourvu que les informations nécessaires puissent être rassemblées.

L'analyse multicritère constitue alors une réelle PRE-PROSPECTION dont les avantages essentiels sont le gain de temps, l'exclusion d'une partie du territoire à prospector, et la sélection de secteurs à potentiel aquifère prometteur.

En conclusion, les éléments positifs à retenir à l'issue de cette étude se résument ainsi :

- un problème hydrogéologique s'accommode bien d'un traitement par analyse multicritère
- l'étude est une bonne démonstration du domaine d'utilisation du logiciel SYNERGIE
- une grande partie du travail reste directement réutilisable pour un autre objectif
- les corrélations établies portent un crédit au compte de la méthode de reconnaissance par le Radon
- une procédure simplifiée pour une PRE-PROSPECTION hydrogéologique est mise au point.

L'intérêt de cette procédure de PRE-PROSPECTION trouvera sa justification dans les applications prochaines qui en seront faites.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDREWS (J.N.), WOOD (D.F.), 1972.- Mechanism of radon release in rock matrices and entry into groundwaters.- *Trans. Inst. Min. Metall. Sec. B* 81, pp. 198-209.
- APHRODISIS (S.), BESOGNET (P.), POINTET (T.), 1983.- Statistical study on 270 boreholes in igneous rocks of the Troodos massif (Cyprus). *BRGM 83 SGN 655 EAU*.
- ARMAND (C.), 1982.- Prospection hydrogéologique dans un contexte de socle défavorable. *Doc. BRGM, n°45, 1982, pp. 13-23*.
- BAKULIN (V.N.), 1969.- Dependence of radon exhalation and its concentration in the soil on meteorological conditions (in Russian). *Uch. Zap. Kirov. Gaz. Pedagog. Inst. (30), pp. 70-79*.
- BARETTO (P.Mc), CLARK (R.D.), ADAMS (J.A.S.), 1972.- Physical characteristics of radon 222 emanation from rock soils and minerals : its relation to temperature and alpha dose.- *The natural radiation environment II, vol.2, Symposium proceedings, Houston, Texas, Aug. 7-11, 1972, p. 731-740*.
- BARETTO (P.Mc), 1973.- Emanation characteristic of rocks, soils and Rn 222. Loss effect on the U-Pb system discordance.- *Ph. D. Thesis, Rice University, Houston, Texas*.
- BERARD (P.), 1982.- Interprétation des images satellites en complément à la photo-interprétation traditionnelle pour la définition des structures hydrogéologiques au Niger et en Haute-Volta.- *Doc. BRGM n°45, 1982, pp. 67-82*.
- BILLAUX (D.), FEUGA (B.), GENTIER (S.), 1984.- Etude théorique et en laboratoire du comportement d'une fracture rocheuse sous contrainte normale.- *Revue française de géotechnique (à paraître)*.
- BLES (J.L.), GROS (Y.), 1980.- La fracturation du granite de Bassiès, Pyrénées ariégoises, France. Chronologie des phases tectoniques, évolution des fractures.- *Bull. Soc. Géol. France, (7), t. XXII, n°3, p. 377-390*.
- BLES (J.L.), FEUGA (B.), 1981.- La fracturation des roches.- *Manuels et Méthodes n°1, Orléans, éd. BRGM*.
- BLES (J.L.), 1984.- Distribution de la fracturation en surface et en profondeur dans les granites.- *Doc. BRGM n°84, p. 70-80*.
- BONNEFOY (D.), GUILLEN (A.).- Le traitement multisources, le logiciel SYNERGIE.- *BRGM 85 DAM 040 GMX*.
- BONNEVILLE (A.), LALANNE (X.), LENAT (J.F.), 1984.- Expérimentation des méthodes de polarisation spontanée, de surveillance thermique et de l'émanation du radon au Piton de la Fournaise ; présentation du réseau de la zone sommitale.- *Bulle. PIRPSEV, 95 : 37 pp*.

- BOURGUET (L.), CAMERLO (J.), FAHY (J.C.), VAILLEUX (Y.), 1981.- Méthodologie de la recherche hydrogéologique en zone de socle cristallin.- *Bull. BRGM*, (2), III, n°4, pp. 273-288, 10 fig., 7 tabl.
- BROSSE (J.M.), 1975.- La télédétection en géologie structurale. Deux exemples : le massif granitique de Villefranche-de-Rouergue (Aveyron) et le système filonien de Vialas (Lozère).- *Thèse 3e cycle, Univ. Orléans*, 122 p., 46 fig., 3 tableaux.
- BUDDE (E.), 1961.- Emanations messungen zu Splatensuche (emanation measurements for Fault searches).- *In : Lehrbuchs der angewandten Geologie I, Band Allgemeine Methoden. A. Bentz (ed.)*, 839 p.
- BULASHEVICH, KARTASHOV, BASHORIN, 1970.- Diffusion coefficients of radon and helium in rocks in situ.- *Izv. Acad., Sci., USSR Phys. Solid Earth* (1), p. 45-47.
- CALLOT (G.), 1976.- Analyse d'un système géopédologique régional.- *Thèse d'état, Univ. Montpellier*
- CARLSSON (A.), OLSSON (T.), 1980.- Caractéristiques de fracture et propriétés hydrauliques d'une région du sous-sol cristallin en Suède.- *XXVIème CGI, Paris, 1980*.
- CASTAING (C.), CHEVREMONT (P.), MARTIN (P.), 1984.- Massif de Huelgoat. Etudes pétrographiques et structurales (stockage de déchets radioactifs en formations géologiques).- *Rapport BRGM 83 SGN 827 GEO*.
- CASTAING (C.), ROLET (J.), CHEVREMONT (P.), CALVEZ (J.Y.), 1985.- La région de Huelgoat (Finistère central) dans le contexte géodynamique armoricain.- *Rapport BRGM 85 GEO 054*.
- CASTAING (C.), ROLET (J.), CHEVREMONT (P.), CALVEZ (J.Y.), THONON (P.), 1987.- La région de Huelgoat (Finistère) dans le contexte géodynamique armoricain.- *Bull. BRGM Géologie de la France*, n°1, pp. 23-26, 12 fig., 1 tabl.
- CASTAING (C.), DUTARTRE (P.), FOURNIGUET (J.), GOUYET (J.F.), LANGEVIN (C.), LOISEAU (P.), PERNEL (F.), 1987.- Etude du massif granitique de Huelgoat (Finistère). Application de critères géologiques et structuraux à la prospection hydrogéologique dans le socle.- *Rapport BRGM 87 SGN 720 EAU*, 48 p.
- CASTAING (C.), DEBEGLIA (N.), 1988.- Analyse structurale interactive Gravimétrie-Géologie. Obtention d'une image structurale du granite de Huelgoat et de son encaissant (Massif Armoricaïn) à partir de l'interaction de données gravimétriques et géologiques.- *Rapport 88 DT 027 GPH/GEO*, 14 p.
- CECH (I.), LEMMA (H.), KREITLER, PRICHARD (H.), 1988.- Radium and Radon in water supplies from the Texas Gulf Coastal Aquifer.- *Water Res.*, vol. 22, n°1, p. 109-122
- CHAURIS (L.), 1984.- Origine hydrothermale post-magmatique de la kaolinisation à Berrien (Finistère).- *C.R. Acad. Sc. Paris.*, t. 298, Série II, n°1, p. 13-16.

- CHOVELON (P.), MARTY (B.), 1985.- Analyses des gaz dans le sol sur les zones du Lamentin et du Morne Rouge - Montagne Pelée (Martinique).- *BRGM-AFME, 85 SGN 413 GTH.*
- CLEMENTS, MARVIN (H.), WILKENING, 1974.- Atmospheric pressure effects on radon 222. Transport across the earth-air interface.- *J. Geophys. Res. 79 (33) p. 5025-5029*
- CRENSHAW (W.B.), WILLIAMS (S.N.), STOIBER (R.E.), 1982.- Fault location by radon and mercury detection at an active volcano in Nicaragua. *Nature, 300 : p. 345-346*
- COLLEAU (A.), LAVILLE (P.).- Vignoble gardois. Zonage des typicités des terroirs de l'AOC Côtes du Rhône.- *BRGM 88 SGN 283 GEO*
- COLLEAU (A.), CLEMENT.- Etude du terroir du canton de Vertou. Vignoble du Muscadet de Sèvres-et-Maine.- *BRGM 88 SGN 187 GEO*
- COLLEAU (A.).- Etude du terroir de Saint-Maurice sur Eygues et Vinsobres (Drôme).- *BRGM 88 SGN 284 GEO - BRGM 88 SGN 285 GEO*
- CONQUERE (F.), 1966.- Contribution à l'étude géologique de la bordure septentrionale du bassin de Châteaulin, région de Huelgoat (Finistère).- *Thèse 3e cycle, Paris, 167 p.*
- CONQUERE (F.), 1969.- Le massif granitique de Huelgoat (Finistère).- *Mém. Mus. Nat. Hist. Nat., Nouvelle série, C, Sciences de la Terre, t. XXI, fasc. I, 42 p.*
- COSTE (B.).- Essai de traitement simultané de l'ensemble des données de l'inventaire transgabonnais.- *BRGM 85 GAB 020*
- D'AMORE(F.), SABROUX (J.C.) 1976-1977.- Signification de la présence de Radon 222 dans les fluides géothermiques.- *Bull. Volcano., vol. 40-2*
- DEPRAETERE (C.), 1985.- Quelques exemples d'analyses géomorphométriques à partir de modèles numériques de terrain américains.- *Département de Géographie, Université de Pensylvanie (USA)*
- DESFONTAINES (B.), 1986.- Proposition d'une méthode géomorphologique permettant une approche de la néotectonique en pays tempéré. Exemple d'application à la région de Fougères.- *Rapport BRGM 85 SGN 659 GEO*
- DOREMUS (P.), 1985.- Les anomalies uranifères dans le Gédinnien inférieur de l'anticlinal de l'Ardenne (Oizy, Belgique). Prospection sédimentologique, tectonique et géochimique.- *Thèse, Université Lille, 342 p.*
- DOREMUS (P.), QUINIF (Y.), CHARLET (J.M.).- Mise au point d'un détecteur passif du radon 222 en milieu saturé. Premiers résultats. *Ann. Soc. Géol. Nac. CVII, 211-219, oct. 1988*
- DUBREUILH (J.), LAVILLE (P.), COLLEAU (A.).- Château d'Arsac (33). Comparaison de son terroir à celui de la région de Margaux.- *BRGM 87 SGN 331 AQI*
- DURAND (A.), 1986.- Réflexions sur les principes, domaines de validité et applications des méthodes de prospection géophysique de surface.- *Rapport BRGM 86 SGN 247 EAU*

- DUTARTRE (P.), 1981.- Etude de la fracturation du granite de la Margeride (Région de Saint-Alban-sur-Limaghole, Lozère). Géométrie, cinématique, densité des fractures.- *Thèse 3e cycle, Univ. Paris VII*
- DUTARTRE (P.), MALON (J.F.), 1986.- Traitement d'images et représentation cartographique d'analyses de fracturation.- *Rapport BRGM 86 SGN 577 GEO*
- EDWARDS (J.C.), BATES (R.C.), 1980.- evaluation of radon emanation under a variety of conditions.- *Thealth physics*, 39, 263-274.
- ENGALENC (M.), SAWADOGO (A.N.), 1975.- Rôle de la fracturation dans la recherche des eaux souterraines dans les granites de l'Afrique occidentale.- *Bull. CIEH n°20, Ouagadougou*, p. 2-7
- ENGALENC (M.), 1981.- Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines. Atlas de photo-interprétation.- (T.3). *Bulletin de liaison du CIEH*
- ENGALENC (M.), 1982.- Rôle de la photo-interprétation dans la détermination des facteurs influençant la productivité des fractures du socle cristallin.- *Doc. BRGM, n°45, 1982, p. 291-299*
- FEUGA (B.), VAUBOURG (P.), 1980.- Principales méthodes de reconnaissance des milieux fissurés. Etat des connaissances.- *Rapport BRGM 80 SGN 855 EAU, 86 pl., 61 fig.*
- FEUGA (B.), 1984.- Eléments d'approche des milieux rocheux fracturés du point de vue de l'hydraulique souterraine.- *Rapport BRGM 84 SGN 128 GEG*
- FLAGEOLLET (J.C.), 1976.- Formations superficielles et reliefs d'érosion différentielle dans les Massifs anciens cristallins : l'exemple du Limousin et de la Vendée du Nord-Ouest.- *Thèse, Doc. ès Lettres, Univ. Paris VII*
- FLEISCHER (R.L.), MOGRO-CAMPERRO (A.), 1978.- Mapping of integrated radon emanation for detection of long-distance migration of gases within the earth : techniques and principles.- *J. Geophys. Res.*, 83 : p. 3539-3549
- FLEISCHER (R.L.), MOGRO-CAMPERRO (A.), 1980.- Techniques and principles for mapping of integrated radon emanation within the earth.- *In : T.F. GESELL et W.M. LOWDER, Eds. Natural Radiation Environment III, U.S. DOE, Springfield (va.)*, p. 57-71
- FLUGGE (S.), ZIMENS (K.E.), 1939.- The determination of grain size and diffusion constant by the emanation power.- *Z. Phys. Chem. (Leipzig)* B42, p. 179-220
- GEORGET (Y.), 1986.- Nature et origine des granites péralumineux à cordiérite et des roches associées. Exemple des granitoïdes du massif armoricain (France). Pétrologie et géochimie.- *Mémoires et documents du centre Armoricain d'Etude Structurale des socles, n°9, ISSN 0755-978-X*
- GEORGES (M.), MOTTI (E.), POINTET (T.), 1983.- Application de la télédétection à la prospection hydrogéologique en zones arides.- *Rapport BRGM 83 SGN 896 EAU*

- GHOSH (P.C.), SHEIKH (I.A.), 1976.- Diffusion of radon through inactive rocks.- *Sections, Indian J. Pure Appl. Phys.* 14(8) : p. 666-669
- GINGRICH (J.E.), 1984.- Radon as a geochemical exploration tool.- *Journal of Geochemical Expl.*, 21 (1984), p. 19-39
- GODARD (A.), 1967.- Morphologie des socles et des massifs anciens. Erosion différentielle et tectonique récente.- *Rev. Géogr. Est*, 1967, 1-2, p. 201-209
- GODARD (A.), 1972.- Quelques enseignements apportés par le Massif Central français dans l'étude géomorphologique des socles cristallins.- *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.* (2), vol. XIV, fasc. 3, p. 265-298, 1972
- GOGUEL (J.), 1983.- Etude mécanique des déformations géologiques.- *Série Manuels et Méthodes n°6*, éd. BRGM, Orléans
- GOUYET (J.F.), 1987.- Télédétection en hydrogéologie, création d'outil d'interprétation pour la définition de critères simples pour la recherche d'eau dans les milieux fissurés, massif granitique de Huelgoat (Finistère).- *DESS de télédétection, méthodes et applications CETEL-PARIS VI*
- GUENIOT (B.), 1983.- Distribution et modes de fixation de l'uranium dans les grands types de pédogénèses climatiques et stationnelles sur roches cristallines.- *Thèse 3e cycle, Nancy I, ...CREGU*
- GUERIN (F.), 1989.- Stratégie de mise en oeuvre et d'interprétation de la méthode Radon, appliquée à la prospection hydrogéologique du socle.- *Rapport BRGM 89 SGN 594 EEE*
- HENOU (B.), 1985.- Site pilote de Broualan (Ille-et-Villaine). Le radon dans le sol et la fracturation du Bed-rock.- *BRGM Note technique Dpt EAU 85/29*
- HENOU (B.), 1986.- Dosage du radon dans les gaz du sol - Application à la recherche d'eau en milieu fissuré - Etude bibliographique.- *Rapport BRGM 86 SGN 299 EAU*
- ISRAEL (H.), BJORNSSON (S.), 1967.- Radon (Rn 222) and thoron (Rn 220) in soil air over faults.- *J. Geophys.*, 33(1) : p. 48-64
- IUNDT (F.), AUSSEUR (J.Y.), BERTHIER (F.), 1985.- Prospection des teneurs anormales des gaz et des sols par une technique légère et rapide.- *Rapport BRGM 85 SGN 281 EAU*
- IUNDT (F.), 1985.- Méthodologie de terrain en hydrogéochimie.- *Rapport BRGM 85 SGN 404 EAU*
- JURAIN (G.), 1960.- Moyens et résultats d'étude de la radioactivité d'origine au radon dans les eaux naturelles.- *Géochim Cosmochimica Acta*, 20, p. 51-82
- JURAIN (G.), 1962.- Contribution à la connaissance géochimique des familles de l'uranium-radium et du thorium dans les Vosges méridionales.- *Thèse, 1962. Faculté des Sciences de Nancy*

- KRANER (H.W.), 1963.- Measurements of the effects of atmospheric variable in radon 222 flux and soil-gas concentrations
- KRANER (H.W.), SCHROEDER (G.L.), EVANS (R.D.), 1964.- Measurements of the effects of atmospheric variables on radon 222 flux and soil-gas concentrations.- *In* : J.A.S. ADAMS et W.M. LOWDER, Eds. *Natural Radiation Environment, the University of Chicago Press, Chicago, p. 191-215*
- LABEY (D.), 1983.- Recherche et exploitation de l'eau souterraine dans les terrains de socle ancien. Application à une étude statistique de forages hydrauliques réalisée dans diverses régions d'Afrique occidentale.- *Thèse CNAM Paris*
- LAMBERT (G.), BRISTEAU (P.), 1973.- Migration des atomes implantés dans les cristaux par énergie de recul.- *J. Phys. (Paris). Colloq. C5 Suppl. to n°11-12, 34 (C5) : p. 137-138*
- LAVILLE (P.).- Cartes géologiques modulables et bases de données associées. Application à une commune viticole.- *BRGM 83 SGN 542 GEO*
- LEBLANC (P.), 1986.- Structure et hydrodynamique des milieux fissurés aquifères. Synthèse bibliographique.- *Rapport BRGM 86 SGN 102 EAU*
- LEBLANC (P.), 1986.- Site expérimental de Broualan (Ille-et-Villaine). Interprétation de la seconde série de pompage d'essai.- *Rapport BRGM 86 SGN 133 EAU*
- LEGRAND (H.E.), 1987.- Radon and Radium emanation from fractured crystalline rocks - A conceptual hydrogeological model.- *Groundwater, vol. 25, n°1*
- LEVEQUE (P.C.), MAURIN (C.), SEVERAC (J.), 1971.- Le radon 222, traceur naturel complémentaire en hydrologie souterraine.- *C.R. Acad. Sc. Paris, t. 272 (3 mai 1971), série D-2293-6*
- LUCAS (H.F.), 1957.- Improved low-level alpha-scintillation counter for radon. - *Rev. Sci. Instr., 28(9) : p. 680-683*
- MAISONNEUVE (J.), REMY (M.L.), 1984.- Les éléments radioactifs naturels et les eaux thermominérales.- *Congrès sur les données actuelles sur la radioactivité naturelle. Monte-Carlo, 5-7 nov. 1984, p. 186-202.*
- MANIGAULT (B.), 1986.- Révision des caractères morphologiques et structuraux des fissures ouvertes de granites sous recouvrement d'altérations superficielles.- *Rapport BRGM 86 SGN 385 EAU*
- MANIGAULT (B.), 1986.- La fracturation des granites. Mise en place des massifs, âge, altération, comportements aquifères et guides de prospection.- *Rapport BRGM 86 SGN 700 EAU*
- MARRE (J.), 1982.- Méthodes d'analyse structurale des granitoïdes.- *Manuels et méthodes n°3, éd. BRGM, Orléans*
- MATHERON (G.), 1965.- Les variables régionalisées et leurs estimations. *Ed. Masson, Paris*

- MASSOUD, 1987.- Modélisation de la petite fracturation par les techniques de la géostatistique.- *Thèse ENSMP*
- MEGUMI, MAMURO, 1974.- Emanation et exhalation of radon and thoron gases from soil particles.- *J. Geophys. Res.*79(23), p. 3357-3360
- MOGRO-CAMPERO (A.), FLEISCHER (R.L.), 1976.- Changes in subsurface radon concentration associated with earthquakes.- *Earth Planet. Sci. Lett.*, 34, 321
- MOGRO-CAMPERO (A.), FLEISCHER (R.L.), 1977.- Subterrestrial fluid convection : a hypothesis for long-distance migration of radon within the earth.- *Earth Planet. Sci. Lett.*, 34 : p. 321-325
- MONNIN (M.), 1980.- Mesure de l'émanation du radon. Rapport d'activité mai 1979-1980 du programme interdisciplinaire de recherche sur la prévision et la surveillance des éruptions volcaniques.- *CNRS/INAG. Labo. de physique corpusculaire. Univ. Clermont-Ferrand*, 14 p.
- MURPHY (P.J.), BRIEDIS (J.), PECK (J.H.), 1979.- Dating techniques in fault investigations.- *Geological Society of America Reviews in Engineering*, vol. IV, p. 153-168
- ODDOU (A.), 1981.- Mesures des variations de concentrations du radon dans le sol. Relations avec la tectonique active.- *Thèse, Univ. de Nice*
- PFRASON (J.E.), JONES (G.E.).- Emanation of radon 222 from soil and its use as a tracer.- *J. of Geophysical Research*, vol. 70, n°20, october 1965
- PERNEL (F.), POINTET (T.), 1985.- Identification par télédétection de la fracturation et de l'humidité superficielle dans le socle et le recouvrement (Anti-Atlas, Maroc).- *Rapport BRGM 85 MAR 058 EAU*
- PETYJOHN (W.A.), DEUTCH (M. Ed.), WIESNET (A. Ed.).- Groundwater and satellites : an overview/introduction.- *Proc. Ann. W.T. Pecora. Mem. Symp. Remote sensing. Sioux Falls*
- PITCHER (W.S.), 1978.- The anatomy of batholith.- *J. Geol. Soc., London* 135, p. 157-182, 10 figs., 1 table
- POINTET (T.), 1988.- Stratégie d'implantation des forages à gros débits en milieux fissurés.- *Note technique BRGM 88 3E 07*
- QUINIF (Y.), DROME (P.), BOUKO (P.), CHARLET (J.M.).- Une méthode d'analyse du radon 222 dans les eaux naturelles. Application à la prospection de l'uranium (région de Oizy, Belgique).- *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 299, série II, n°17, 1984, p. 1187-1190
- RAMPON (A.), 1969.- Mesures de pendage et de directions de fractures dans des granites : considérations théoriques et applications à la circulation souterraine de l'eau.- *Revue de géographie physique et de géologie dynamique* (2), vol. XI, fasc.2, p. 177-188, Paris 1969
- RAZACK (M.), 1978.- Contribution à l'étude de la structure des aquifères en roches fissurées. Numérisation et analyse quantitative de la fracturation relevée sur clichés aériens.- *Thèse doct. Ing., Univ. Sc. et Tech. du Languedoc*, 58 p., 18 fig.

- RAZACK (M.), 1982.- A propos d'une loi de distribution des fractures : intérêt pour l'hydrogéologie des aquifères fissurés.- *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 294, série II, 1295
- REEVES (R.G.), 1975.- Manual of remote sensing.- Virginia, American Society of Photogrammetry
- ROBERTSON (J.B.), 1969.- Diffusion from a gaseous source in porous medium. A field and theoretical comparison in Geological Survey Research 1969.- Professional paper 650 D. Chap. D, p. D265-D273. U.S. Geological Survey, GPO
- ROQUIN (C.), 1985.- Traitement des données en prospection géochimique : facteurs de variation du signal et sélection de la composante anormale.- Document du BRGM n°86
- ROY (A.K.), 1985.- Remote sensing in groundwater targetting.- International Worskhop. Rural hydrogeology and hydraulics in fissured basement zones.- March, 15-24, 1985
- SABINS (F.F.Jr), 1978.- Remote sensing, principles and interpretation.- W.H. FREEMAN & Co, San Francisco
- SAWADOGO (S.), 1982.- Contribution de la télédétection à l'étude de la fracturation. Application à l'hydrogéologie du socle du milieu intertropical.- Thèse Doct. 3e cycle, Univ. Orléans, 238 p., 79 fig., 15 tabl., 12 pl. h.t., 2 cartes
- SCANVIC (J.Y.), 1983.- Utilisation de la télédétection dans les Sciences de la Terre.- *Manuels et méthodes*, n°7, ed. BRGM
- SCHERY (S.D.), GAEDDERT (D.H.), WILKENING (M.M.), 1982.- Transport of radon from fractured rock.- *J. of Geophysical Research*, vol. 87, n°134, p. 2969-2976, 1982
- SCHROEDER, KRANER, EVANS, 1965.- Diffusion of radon in several naturally occuring soil types.- *J. Geophys. Res.* 70(2) : p. 471-474
- SOONAWALA (N.H.), TELFORD (W.M.), 1980.- Movement of radon in overburden.- *Geophysics*, vol. 45, n°8, p. 1297-1314
- SUGISAKI (R.), ANNO (H.), ADACHI (M.), HIROJAKA (V.), 1980.- Geochemical features of gases and rocks along active faults.- *Geochemical Journal*, vol. 14, p. 101-112
- TANNER (A.B.), 1964.- Physical and chemical controls on distribution of radium 226 and radon 222 in groundwater near Great Salt Lake, Utah.- *In : the natural radiation environment, Symposium proceedings, Houston, Texas, Apr. 10-13, 1963. John A.S. ADAMS and W.M. LOWDER (Ed.)*, p. 161-190
- TANNER (A.B.), 1980.- Radon migration in the ground ; a supplementary review.- *In : J.A.S. ADAMS, W.M. LOWDER et T.F. GESELL, Eds. The natural radiation environment II. US ERDA, Springfield (Va)* p. 5-56
- VALERIO (C.), VUILLAUME (G.) et al, 1979.- Ressources en eau et télédétection.- OPIT, Paris (Operation Pilote Interministérielle de Télédétection), 2e édition

VUILLEMOT (P.), 1982.- Contribution de l'hydrogéologie et de l'hydrogéochimie (gaz radiogéniques et autres traceurs en solution) à la prospection de l'uranium. Application à un socle sous couverture dans le Bazois (Nièvre).- *Thèse 3e cycle, Faculté des Sciences et des Techniques de l'Université de Franche-Comté*

VOGIER (G.), 1960.- Ursachen emanometrischer anomalien (origins of emanometric anomalies).- *Z, Geophys.* 26-2 : p. 57-71

WAKSMAN (G.), 1977.- Application à l'hydrogéologie de l'image satellite traitée au 1/80 000. *Rapport CGG*

WILKENING (H.M.), HAND (J.E.).- Radon flux of the earth air interface.- *J. of Geophysical Research*, vol. 65, n°10, 1960, p. 3367-3370

ZETTWOOG (P.), 1984.- Exploitation des signaux fournis par les isotopes du radon pour la mesure de la vitesse effective des fluides de transport dans les milieux géologiques.- *Rapport interne DPT/SPIN - 84/10 - CEA*

ZIMEN (K.E.), MERTENS (P.), 1971.- Nuclear recoil in solids and the knock out effect.- *Z. Naturforsch, Ser, A*, 26(4) : p. 773-775

