



document public

**APPORT DU CANAL MOYEN INFRA-ROUGE (1.55-1.75 μm) A LA
RECHERCHE HYDROGEOLOGIQUE :
Application au massif granitique de Huelgoat et à son environnement
schisteux (Bretagne)**

G. Delpont, J.F. Desprats, Ph. Dutartre

**Décembre 1993
Rapport du BRGM R37911**

AVANT-PROPOS

Dans le cadre du programme MIR SPOT IV , le CNES a soutenu des actions méthodologiques visant mettre en évidence les propriétés de canal moyen infra-rouge pour l'étude hydrogéologique des formations superficielles.

Le massif granitique de Huelgoat a été choisi tant pour la nature des roches qui le composent, et qui constituent le sous-sol de nombreuses régions du globe, que pour la connaissance géologique et hydrogéologique préalable que le BRGM en avait acquise au cours de ses différents programmes de recherche.

Ce travail fait référence à la convention n° 92/CNES/0348 MIR SPOT IV.

RESUME

En région pénéplanée comme celle de Bretagne, en particulier sur le massif granitique de Huelgoat, l'accès aux informations géologiques qui permettent d'optimiser la gestion de l'eau est le plus souvent indirect. L'étude des formations superficielles comme témoin des phénomènes de stockage de surface, puis de recharge, peut constituer une information très utile, par le biais de données extraites de sondages ou de campagnes de géophysique.

La réponse spectrale des sols nus d'images satellitaires, notamment dans les bandes du moyen infra-rouge (MIR), est susceptible de traduire leur état d'humidité et, par là, leur capacité quant aux phénomènes d'infiltration ou de ruissellement. Cette capacité dépend de la composition granulométrique des sols, elle même conditionnée par la nature des roches mères sous jacentes.

La présente étude permet d'aboutir à deux niveaux de réponse, suivant que sont considérés les rapports entre les granites et leur encaissant schisteux ou les différents granites qui composent le massif lui-même :

- l'analyse granulométrique des sols permet de différencier assez nettement les granites des schistes à partir de la fraction fine, argiles + limons fins ($<20\mu\text{m}$). Ce fait, bien établi dans la région d'Elven, est confirmé sur l'image utilisée où le massif granitique est signalé par des sols "secs" alors que les schistes supportent des sols "humides". Des différenciations peuvent même être faites au sein des schistes, suivant leur composition lithologique, plus ou moins gréseuse,

- la différenciation des sols, sus-jacents aux divers granites, par l'examen de la granulométrie est moins nette que précédemment mais elle reste possible, notamment quand seule est prise en compte la fraction argileuse, la plus fine. Les images ne permettent pas par contre de différencier les granites entre eux pour une raison qui n'est apparue qu'au moment des travaux de terrain : l'activité agricole qui n'est plus constituée que d'élevage conduit à une absence quasi totale de sols nus, en général très fréquents au moment des labours. En outre comme les images disponibles ont été enregistrées, à deux dates différentes, dans des conditions climatiques sèches, les prairies présentent une réponse spectrale de sol nu sec, phénomène qui a été source d'erreur au moment du choix de la zone.

Malgré cette relative déconvenue, la méthode garde son intérêt du fait de l'importance des populations dont l'alimentation en eau dépend de ce type de milieu où la ressource est peu abondante et la recherche difficile, souvent limitée aux aspects structuraux. En outre la résolution des images SPOT constitue un atout du fait de la taille souvent réduite des aquifères.

TABLE DES MATIERES

Résumé	3
Introduction	5
1. Objectifs de l'étude	6
2. Situation géographique et géologique. Cartographie existante	7
2.1. Situation générale	7
2.2. Intérêt géologique et hydrogéologique de la zone	7
3. Généralités sur la réflectance des sols et leur taux d'humidité	11
4. Image utilisée et choix du meilleur canal spectral	12
5. Méthode d'analyse des images.	13
5.1. L'image TM 452	13
5.2. Les traitements de type classification	13
6. Etude statistique des analyses de sol et des réflectances	18
6.1 Echantillonnage	18
6.2 Analyse et constitution de la base de données.	18
6.3 Analyse de la totalité de la base de données.	19
6.4 Analyse des échantillons prélevés sur sols nus lors de la prise d'image	19
Conclusion	23
Liste des figures	24
Bibliographie	25
Annexe 1	26
Annexe 2	27

INTRODUCTION

La région de Bretagne (fig. 1) se présente schématiquement comme un plateau subhorizontal, résultat de la pénéplation intense de massifs anciens granitiques et volcano-sédimentaires schisteux, réentaillé par une érosion régressive récente. Une telle morphologie, jointe à une intense occupation agricole du sol, rend très difficile la recherche hydrogéologique : les différentes lithologies et structures qui conditionnent la géométrie des aquifères ne sont accessibles que par le biais d'affleurements rares et de faible extension, le plus souvent limités aux flancs des vallées rajeunies. L'hydrogéologue ne peut de ce fait baser sa connaissance du milieu, qu'au travers d'informations indirectes comme les forages de reconnaissance, la géophysique, essentiellement électrique et magnéto-électrique ou la détection de gaz radioactifs (radon). L'analyse structurale du milieu constitue le but principal des recherches puisque la fracturation reste, en région granitique et métamorphique, l'objet géologique le plus susceptible de concentrer, sinon de stocker, la ressource.

L'observation de la surface terrestre à l'aide d'images satellitaires peut correspondre dans de telles conditions à une source d'information alternative importante qui vient s'ajouter aux données factuelles (banque des données du sous-sol) ou régionales (cartes de géochimie ou de géophysique) préexistantes. C'est à cette dernière échelle que trouve sa place la télédétection, aussi bien comme outil de connaissance préalable du terrain que comme guide d'exploration voire parfois comme instrument de synthèse final.

L'analyse fine de la morphologie apporte, le plus souvent, l'information géologique la plus pertinente contenue dans une image satellitaire. Cependant, la combinaison des données enregistrées dans les bandes spectrales allant du bleu au moyen infra-rouge (MIR) du capteur Landsat Thematic Mapper (TM) permet d'affiner les observations en ajoutant aux analyses précédentes des différenciations liées à la réponse spectrale des sols nus : celles causées par les variations du taux d'humidité sont notamment bien mises en évidence par le MIR et il semble fondé de penser que l'utilisation de telles données serait appropriée à la recherche de formations infiltrantes favorables à la concentration de la ressource. Malgré les problèmes rencontrés ci-après, liés à la faible densité des parcelles en sol nu, la présente étude semble confirmer l'intérêt d'une telle approche.

A cet intérêt méthodologique s'ajoute un intérêt économique, lié à la grande extension des formations géologiques granitiques et schisteuses dans le monde (Afrique en grande partie, fortes proportions du continent américain et australien, Inde, etc) dont dépendent pour leur alimentation en eau des populations nombreuses.

1. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Les différents types de manteau d'altération qui se développent à la surface des matériaux plutoniques, comme ceux du massif granitique de Huelgoat, constituent les seules interfaces entre les apports en eaux sous la forme des précipitations, et le stockage d'une ressource dans des potentiels réservoirs sous-jacents.

L'intérêt de ces formations superficielles paraît donc primordial. Ce sont elles en effet qui, réglant les possibilités de stockage de surface puis de recharge, améliorent ou non les possibilités d'exploitation.

Ces deux éléments hydrogéologiques fondamentaux sont régis par les potentialités d'infiltration de ces mêmes manteaux d'altération, potentialités qui se traduisent en surface par des manifestations particulières sous la forme de pouvoir de rétention en eau, de ressuyage, de ruissellement, etc... Elles dépendent entre autres, de la granulométrie des sols, de leur teneur en argile et en matière organique, paramètres que des travaux récents (G.Delpont et al. 1993) ont permis d'appréhender, à travers la réponse dans la bande du moyen-infra-rouge des sols développés sur schistes et sur granite (région d'Elven située à quelques dizaines de kilomètres à l'Est de Huelgoat).

Il paraissait donc de premier intérêt dans ces conditions d'évaluer l'intérêt des données moyen-infra-rouge pour différencier les sols quant à leur pouvoir d'infiltration bien que les conditions de morphologie, de microclimat et surtout d'occupation du sol se soient avérées très perturbantes,

2. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE CARTOGRAPHIE EXISTANTE

2.1. SITUATION GENERALE

Géographiquement, la zone étudiée (fig. 1), située à une trentaine de kilomètres à l'est de Brest, en région de Bretagne, jouit d'un climat tempéré doux et humide, propice à une agriculture basée sur l'élevage et les cultures fourragères, comme le maïs et surtout les prairies, etc....

Géologiquement, le massif granitique de Huelgoat (Langevin & al. 1989, Chantraine, 1989, Braux & al., 1991) forme une intrusion au sein des formations schisteuses dévoniennes, au contact desquelles il développe un métamorphisme de contact. Il est structurellement limité au nord et au sud par des accidents majeurs, de direction N70°E, dont les fonctionnements les plus patents sont définis comme cisaillement dextre pour le premier (axe des Monts d'Arrée) et distension pour le second (bassin de Chateaulin) (fig.2).

2.2. INTERET GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DE LA ZONE

Le massif de Huelgoat (Langevin & al. 1989) est composé de plusieurs types de granites, plus ou moins emboîtés, dont les compositions chimiques, minéralogiques et granulométriques sont différentes. Ces roches se présentent sous des aspects variés tels que "plutôt saines", "essentiellement décomprimées" et "plutôt arénisées". En outre sont signalées des formations d'altérites qui affectent localement tous les granites et qui sont qualifiées de réservoir potentiels intéressants (fig. 3).

La variété des types de roches rencontrés ainsi que les différents états de fracturation et d'altération qui l'affectent ont conduit le BRGM à effectuer sur ce massif une étude méthodologique multicritères d'hydrogéologie, incluant une prospection radon (Langevin & al., 1989).

Ce contexte géologique et hydrogéologique signalait donc cette zone comme *a priori* favorable à une étude par télédétection visant à tester l'intérêt du canal moyen infra-rouge pour la recherche de zones à potentialités hydrogéologiques intéressantes.

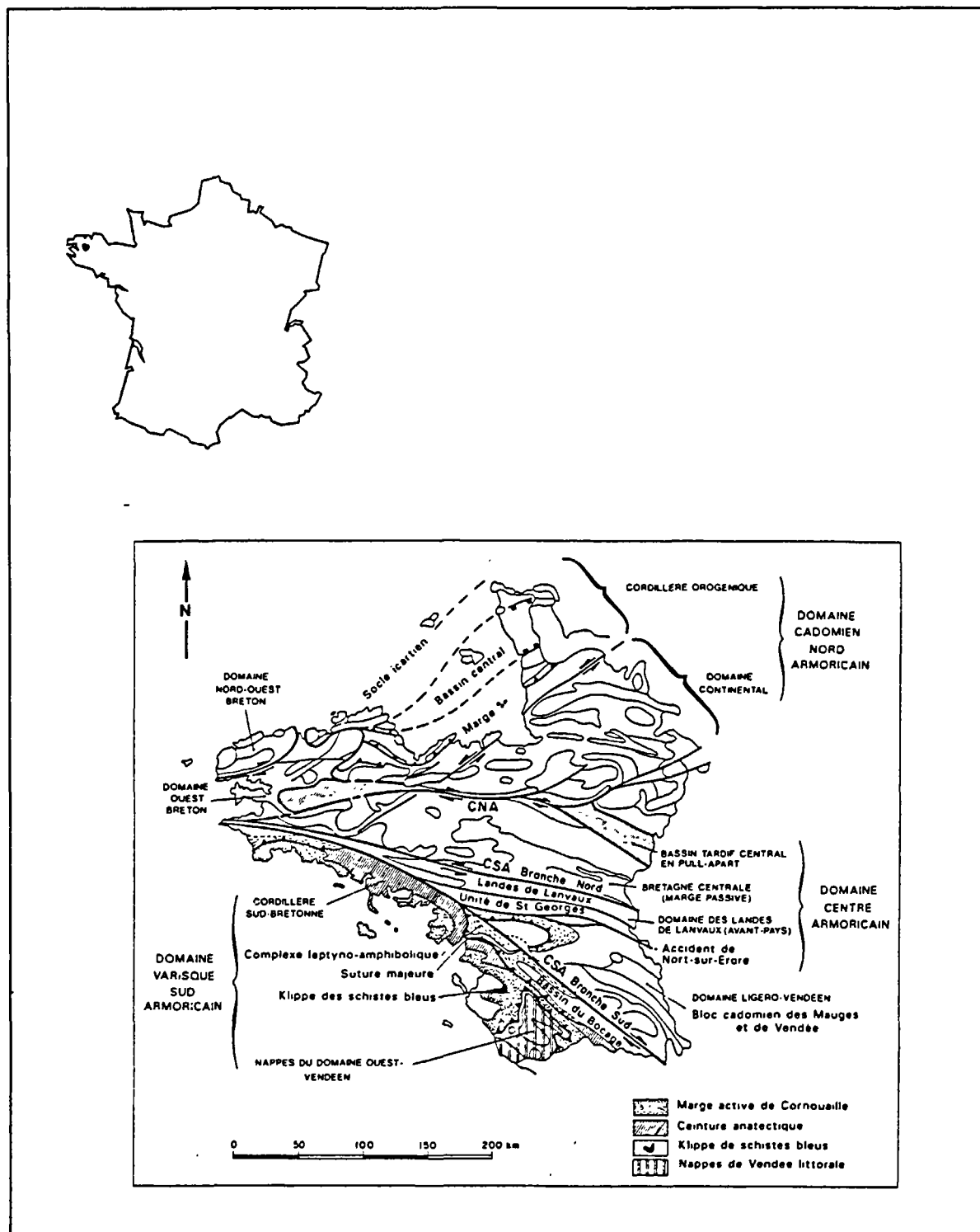


Figure 1 : Localisation géographique et schéma géologique (d'après Chantraine, 1989, in Braux et al., 1991)

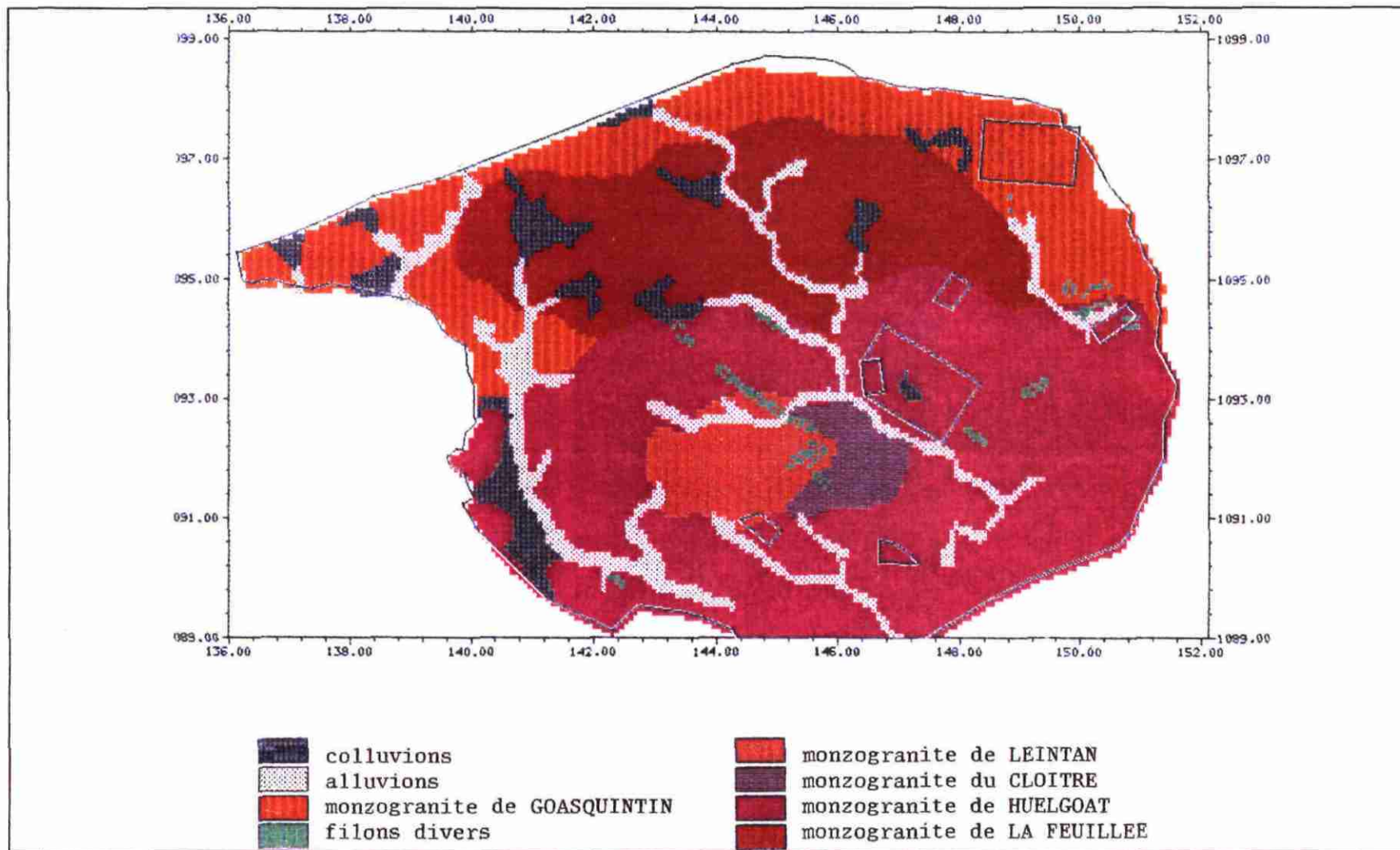


Figure 2 : Carte géologique du massif de Huelgoat (Langevin et al. 1989)

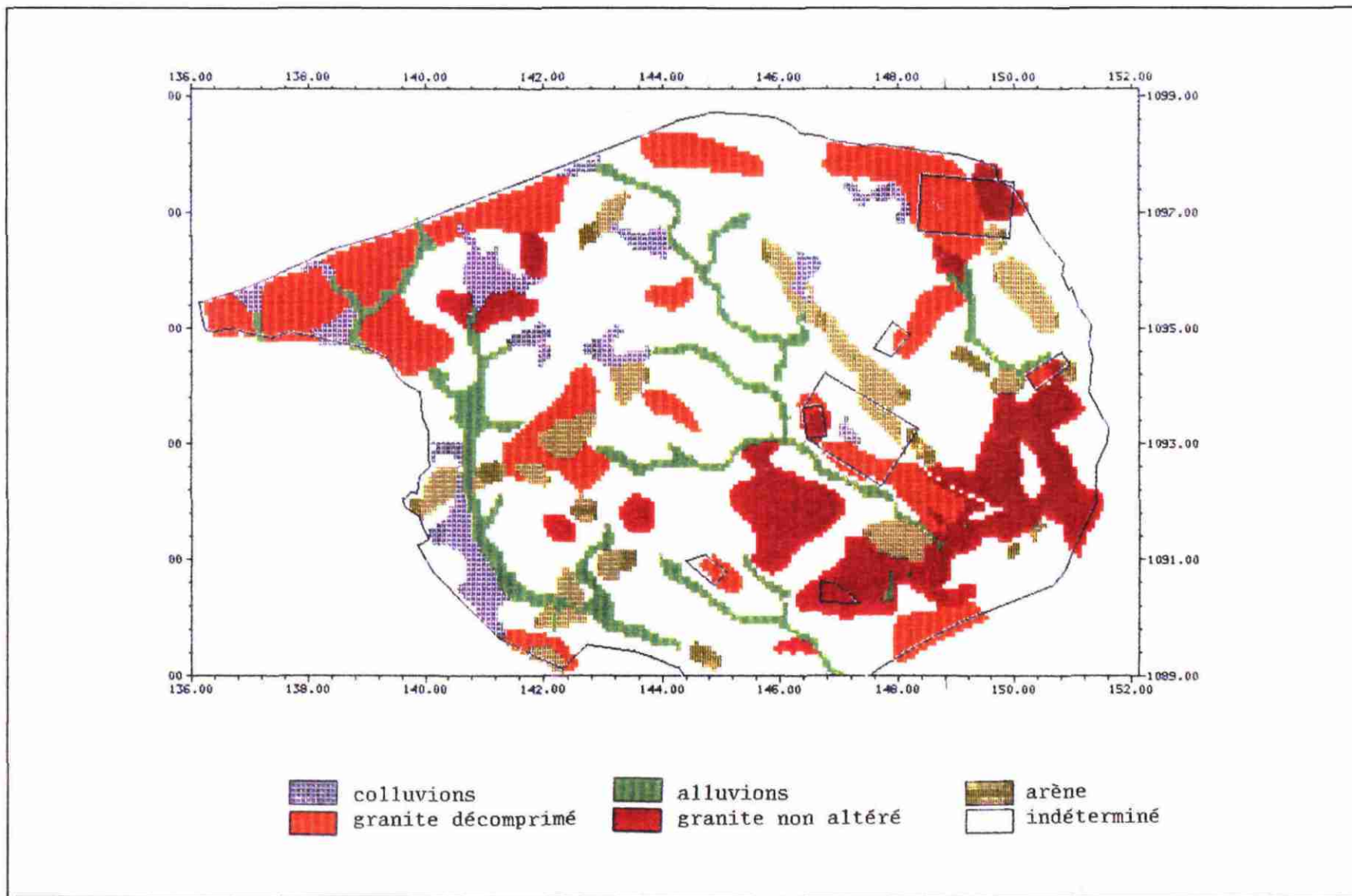


Figure 3 : Carte de l'état d'altération (Langevin et al. 1989)

3. GENERALITES SUR LA REFLECTANCE DES SOLS ET LEUR TAUX D'HUMIDITE

Les relations entre l'intensité de la réflectance des sols et leur taux d'humidité ont fait l'objet de nombreux travaux (Bedidi, 1992; Courault, 1989 ; Escadafal, 1989; Louahala, 1987; Razia Garcia, 1992; Stoner et Baumgardner, 1981). Il en ressort qu'une augmentation d'humidité entraîne une baisse générale de la réflectance dans toutes les longueurs d'onde, avec toutefois des facteurs différents selon ces longueurs d'onde :

- dans le visible, les phénomènes sont complexes puisque la taille des particules comme la distribution de l'eau dans les deux systèmes de porosité, inter- ou intraparticulaire, peuvent avoir un effet comparable à celui de l'humidité sur les spectres de réflectance.

- dans le proche et surtout le moyen infra-rouge, l'augmentation du taux d'humidité se traduit essentiellement par un abaissement systématique de la réflectance et par une intensification des bandes d'absorption de l'eau, localisées vers 1,45 et 1,95 µm : l'interprétation de la réflectance des sols y semble moins problématique. Ainsi ont été testées les possibilités des bandes 5 (1,55-1,75 µm) et 7 (2,08-2,35 µm) du capteur TM, malgré leur décalage vers la droite par rapport aux valeurs précises des bandes d'absorption de l'eau.

L'intérêt de la bande spectrale MIR 1,55-1,75 µm a déjà été étudié au BRGM (Delpont et al., 1993) dans le cadre d'une application à la carte géologique en milieu lithologiquement contrasté de granites et de schistes, dans la région d'Elven, en Bretagne centrale (annexe 1). L'étude citée a porté sur les possibilités de différenciation de ces deux types de roches mères, le plus souvent non affleurantes, par le biais de la réflectance des sols nus qui les recouvrent et dont ils proviennent en majeure partie. Les conclusions de cette étude se sont révélées favorables :

- il existe une correspondance assez systématique entre la lithologie des roches sous jacentes, la granulométrie et l'humidité des sols susjacentes non exogènes,

- l'erreur enregistrée entre les limites géologiques interprétées et les limites observées sur le terrain, à l'occasion des rares affleurements existants, est tout à fait comparable à l'erreur commise par le géologue qui effectue ses relevés à partir des seuls indices de surfaces et des documents préexistants.

Toutefois, il est à noter que ce critère de différenciation lithologique par l'humidité des sols reste d'usage local dans la mesure où des sols d'origine différente pourront avoir un même comportement vis à vis de l'humidité.

Cette restriction perd de son acuité dans une application visant plus particulièrement à localiser des unités géologiques susceptibles de jouer un rôle de réservoir hydrogéologique : les sols les plus infiltrants, relativement les plus secs, quelle que soit leur origine, sont a priori les témoins les mieux à même de signaler ces unités.

4. IMAGE UTILISEE ET CHOIX DU MEILLEUR CANAL SPECTRAL

L'image TM utilisée (203-26) a été enregistrée le 15/11/88, à la suite d'une période de temps relativement sec. La dernière journée pluvieuse notable date du 11 octobre et n'a été suivie que d'événements négligeables (0,5 à 1,5 mm) dont le dernier (0,5 mm) a eu lieu 4 jours avant l'enregistrement de l'image. Elle présente donc *a priori* des contrastes hydriques relativement accusés, favorables à une meilleure différenciation spectrale entre les sols légers ressuyés et les sols lourds encore humides, sans pour autant qu'une sécheresse trop prononcée n'ait eu le temps de la niveler.

Avant tout traitement, l'image est mise en conformité géométrique par rapport au fond topographique de référence (carte IGN, échelle 1/50 000ème). Une première restitution, sous forme d'un document photographique en fausses couleurs, composé des canaux 4 (proche infra-rouge : PIR), 5 (moyen infra-rouge : MIR) et 2 (vert : V), forme le support principal de l'analyse visuelle des images.

Le choix du canal spectral MIR se fait à l'issue de l'examen des histogrammes de l'image qui montre que le canal 5 bénéficie d'une meilleure dynamique que le 7 : 99% des valeurs numériques s'étalent sur 53 niveaux (4 à 56) pour le canal 5 alors que 97% des valeurs se répartissent sur 24 niveaux (2 à 27) pour le canal 7, le restant étant éparpillé aléatoirement tout au long de l'histogramme. L'utilisation du canal 5 laisse donc espérer des différenciations plus fines et c'est sur l'intérêt éventuel de cette longueur d'onde que portera l'essentiel de cette étude.

Le choix des autres canaux est classique, appuyé par leurs caractéristiques radiométriques fondamentales, le canal 4 (proche infra-rouge ou PIR) apportant l'information relative à la végétation et le canal 2 l'information du visible. Ce dernier est préféré au canal 3, malgré sa dynamique plus faible (84% sur 10 niveaux au lieu de 77% sur 16 niveaux), pour être plus décorrélé du PIR.

5. ANALYSE DES IMAGES

L'observation des images résultant des différentes approches, pseudo Spot2 (TM4, TM3, TM2 et pseudo Spot4 (TM4, TM5, TM2) permet d'individualiser des unités de couleurs de sols nus qui sont susceptibles de matérialiser le comportement homogène des sols vis à vis de l'humidité. La comparaison avec les cartes géologiques disponibles permet de formuler plusieurs remarques qui soutendent la réflexion de la présente étude :

5.1. L'IMAGE TM 452 (FIG. 4)

Cette image montre une coïncidence géographique générale, entre les parcelles de couleur verte (*a priori* sèches) et bleue (*a priori* humides) et les principales formations respectivement granitiques et schisto-quartzeuses indiquées par la carte géologique existante.

Elle révèle en revanche de nombreuses différences, parfois importantes, entre les tracés précis des limites de ces mêmes formations géologiques, issus respectivement de l'image et de la carte. Ces différences sont dues :

- à la morphologie dont les contrastes traduisent les différences entre les formations granitiques de Huelgoat au centre et les formations schisteuses de la plaine, séparées par des axes hauts de quartzites dures. Les variations de morphologie induisent des variations d'éclairement qui perturbent l'interprétation,

- à la présence d'anomalies de réflectance causées par la végétation. Elles sont matérialisées par de vastes étendues de landes, sèches sur l'image TM utilisée, qui se développent avec le même aspect sur des formations géologiques différentes (granites, schistes, formations récentes) en les rendant radiométriquement indiscernables. En effet ces vastes étendues de landes présentent une réponse radiométrique de sol nu sec plus ou moins sombre mais homogène

- à la présence de parcelles de radiométrie intermédiaire, apparaissant en bleu-vert, au NO du massif de Huelgoat, notamment sur les formations granitiques de Comana.

5.2. LES TRAITEMENTS DE TYPE CLASSIFICATION (FIG. 4 ET 5)

Ces traitements ne sont pas réalisés dans le but de tracer des limites très précises entre les différents ensembles géologiques, même si l'hypothèse de travail originale est globalement respectée, à savoir que la majorité des sols "humides" est localisée sur les schistes et celle des sols "secs" sur les granites. Ils devraient en revanche faire apparaître des tendances de répartition des sols.

En outre il n'est pas possible de réaliser de différenciations nettes au sein du granite de Huelgoat, notamment dans la recherche des formations infiltrantes et non infiltrantes. La principale cause, sans toutefois préjuger des résultats qui auraient pu être obtenus dans d'autres conditions, semble être l'occupation agricole des sols sur le massif : le Recensement Général de l'Agriculture de 1988 montre

en effet dans cette zone la forte emprise de l'élevage bovin. L'altitude, les faibles températures et le relief rendent difficile la polyculture céréalière ou même l'élevage bovin intensif hors-sol basé sur la culture du maïs. Les prairies temporaires, renouvelées tous les 7 à 8 ans y dominent donc, et les cultures de maïs qui laissent les sols nus au printemps sont très rares (en revanche, les plaines schisteuses situées au sud du massif de Huelgoat, permettent une agriculture beaucoup plus intensive où les céréales dominent. La proportion de sols nus au printemps y est largement supérieure).

Lors de la mission de validation, il est ainsi apparu que la majorité des parcelles, qui avaient une réponse spectrale de sols nus, correspondaient en fait à des prairies d'herbe sèche, et ce, tant sur l'image TM utilisée (du 15/11/88) que sur l'image Spot (du 07/09/89) disponible sur la même zone (fig 4). C'est pourtant cette présence apparente de nombreux sols nus qui, outre les connaissances hydrogéologiques de la zone et les conditions météorologiques existant lors de l'enregistrement de l'image, avait appuyé le choix de la zone.

A l'instar du phénomène qui affecte les zones de landes, la végétation masque la surface du sol et introduit un biais qui n'a été mis en évidence que lors des travaux de terrain.

Les classifications, réalisées sur la base d'une pseudo image SPOT2 mobilisant les canaux 2, 3 et 4 de TM et d'une pseudo image SPOT4 où s'ajoute le canal MIR, ont toutefois confirmé l'intérêt de ce dernier canal pour la discrimination des sols "humides" et "secs", particulièrement au sein des formations encaissantes schisteuses. L'examen visuel des figures 5 et 6, qui comprend les deux pseudo images originales, SPOT2 et SPOT4, et les deux classifications correspondantes permet ainsi d'apprécier l'apport du MIR quant à la différenciation des surfaces classées :

- meilleure perception des sols peu infiltrants sur l'encaissant schisto-quartzitique des granites par rapport aux sols plus infiltrants sur les granites,
- différenciation plus fine entre les sols peu infiltrants sur les schistes quartzitiques dévoniens (sud-ouest du massif de Huelgoat) et ceux, plus infiltrants sur les schistes gréseux carbonifères (sud des précédents).

Cette discrimination plus fine, constatée visuellement avec l'ajout du canal MIR, se traduit sur les matrices de confusions (annexe 2) par une plus forte proportion de pixels rejetés par l'algorithme de classification. Une amélioration globale, classe par classe, du nombre des pixels bien classés est également constatée, excepté pour les classes landes et feuillus. Ces variations, dans un sens ou dans l'autre, demeurent toutefois de faible amplitude.

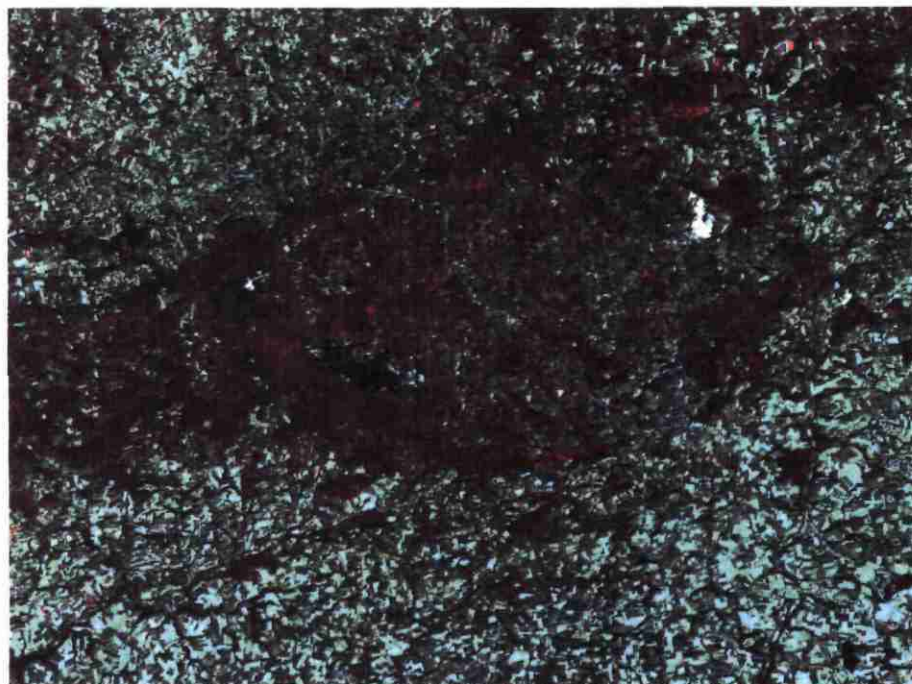


Figure 4 : Composition colorée - Image SPOT du 07/09/89

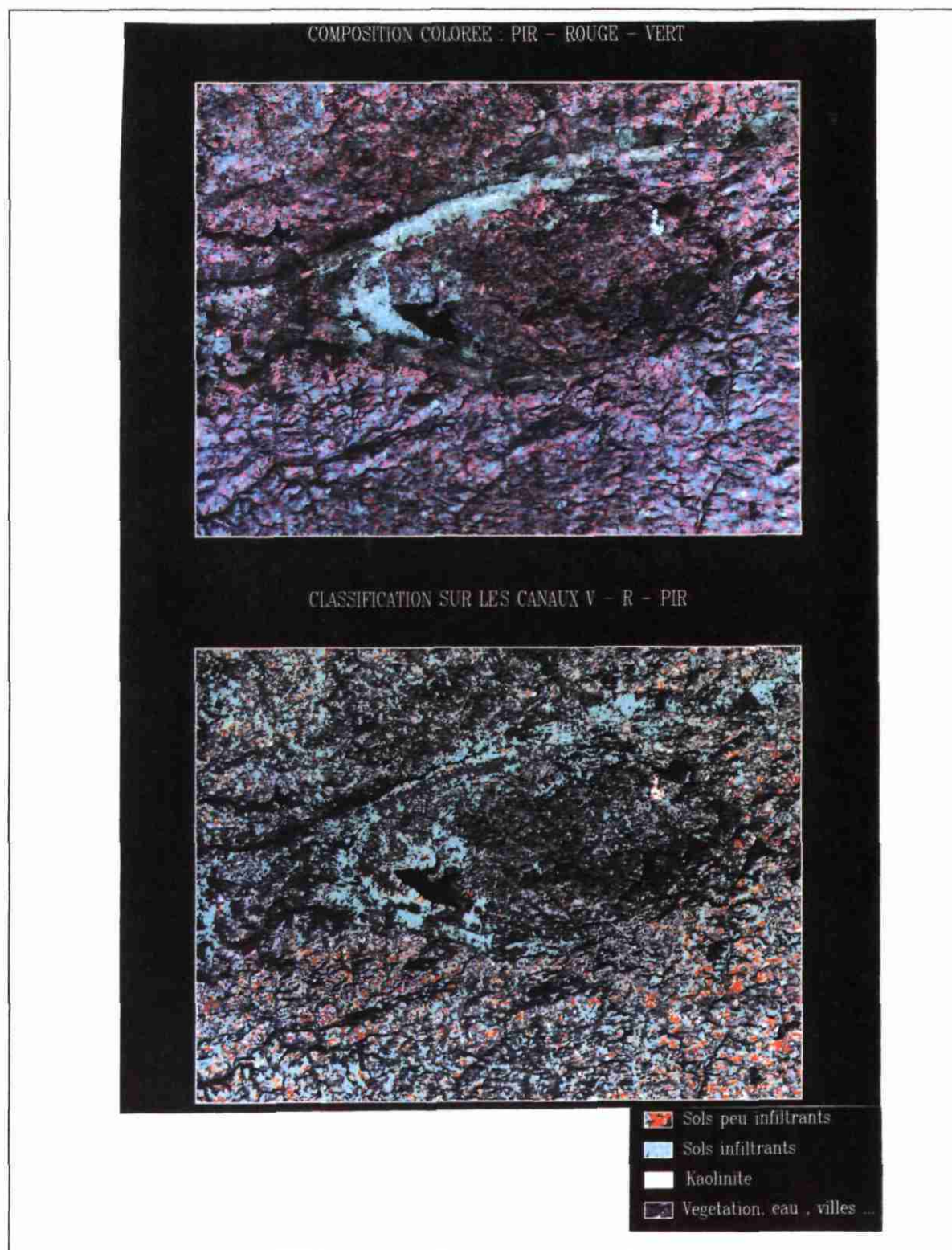


Figure 5 : Compositions colorées et classifications - Simulation de SPOT 2

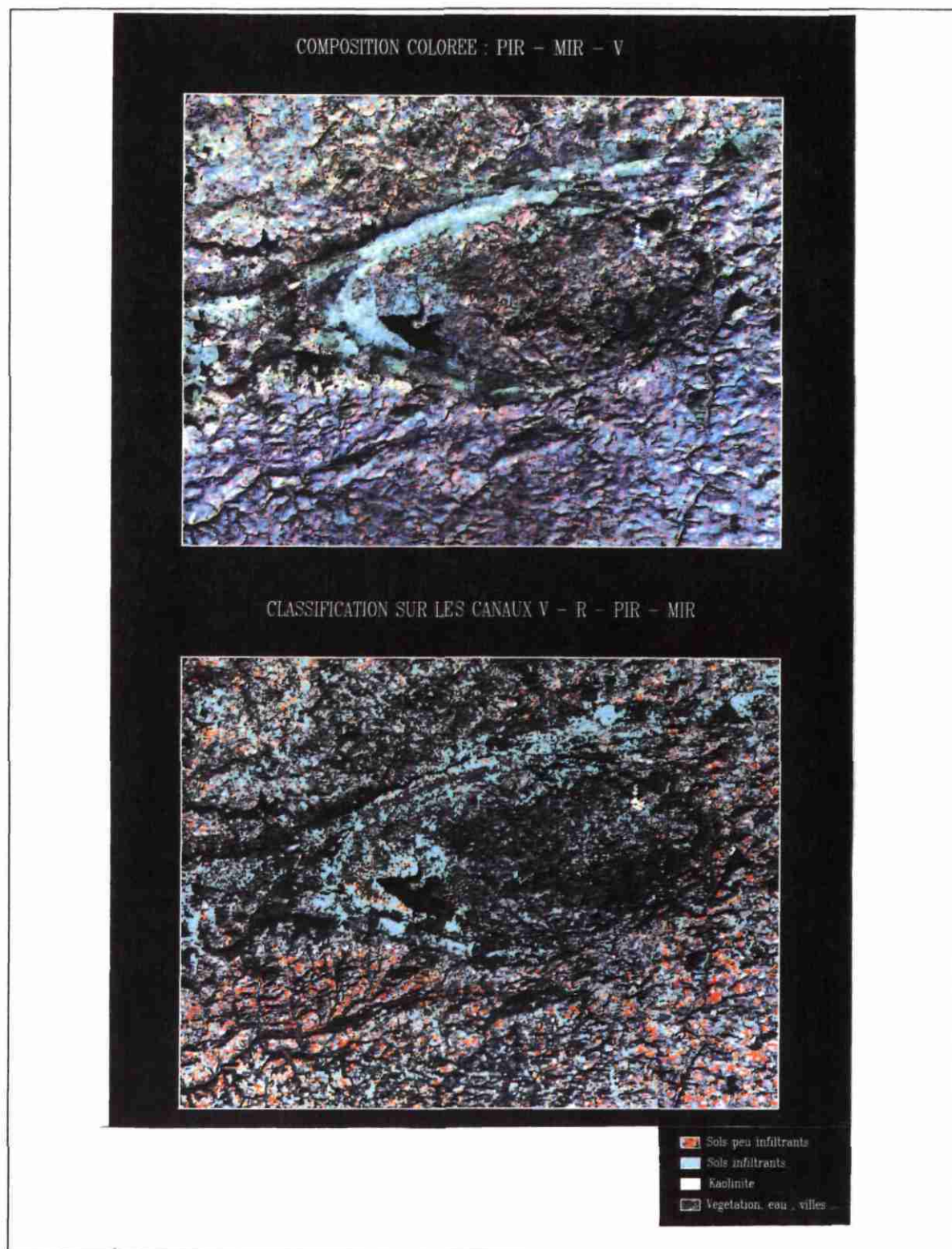


Figure 6 : Compositions colorées et classifications - Simulation de SPOT 4

6. ETUDE STATISTIQUE DES ANALYSES DE SOL ET DES REFLECTANCES

6.1 GENERALITES SUR L'ECHANTILLONNAGE

La localisation des prélèvements a été réalisée à partir de la carte géologique, de la carte des altérations et de la scène Landsat TM, de façon à échantillonner les sols correspondants à toutes les formations géologiques, indépendamment de la présence ou de l'absence de couverture végétale. 50 échantillons ont été prélevés sur la zone d'étude.

6.2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE ET CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNEES

Dans la région d'Elven (op. cit.) la granulométrie s'est montrée, dans des conditions climatiques et géologiques très ressemblantes, le critère d'interprétation prépondérant. Seul ce critère a donc été pris en compte au cours de la présente étude.

Une analyse granulométrique sur 5 fractions (argile, limons fins, limons grossiers, sables fins et sables grossiers) permet de définir la proportion des éléments fins (argile, limons fins : diamètre inférieur à 20 µm). Cette dernière conditionne en effet la capacité de rétention en eau des sols correspondant (humidité) alors que celle des éléments les plus grossiers (limons grossiers et sables va conditionner l'infiltration et la constitution de réserves de surface et par là favoriser la recharge des aquifères sous-jacents.

Les 50 points échantillonnés ont été incrustés dans l'image Landsat TM dans le but d'en extraire les statistiques de la radiométrie de la parcelle : les calculs (moyenne, écart-type) portent sur les 9 pixels situés autour du point de prélèvement, dans les canaux vert, rouge, proche et moyen infra-rouge.

Une couverture ARC/INFO a donc été construite autour de toutes ces données, associée aux paramètres suivants :

- la surface
- le périmètre
- la proportion d'argile
- la proportion de limons fins
- la proportion de limons grossiers
- la proportion de sables
- la réflectance moyenne dans le vert
- la réflectance moyenne dans le rouge
- la réflectance moyenne dans le proche infra-rouge
- la réflectance moyenne dans le moyen infra-rouge
- le code géologique
- le code altérite

- la culture en place lors de l'échantillonnage

L'interprétation des données statistiques a été alors conduite à deux niveaux :

- le premier prend en compte la totalité des échantillons prélevés,
- le second ne considère que les points pour lesquels l'indice de végétation est inférieur à 0,3, ce qui permet de s'affranchir en partie de l'influence de la couverture végétale, tout en conservant un nombre de points minimum.

6.3 ETUDE STATISTIQUE PORTANT SUR LA TOTALITE DE LA BASE DE DONNEES

Dans le massif de Huelgoat, la végétation, essentiellement représentée par les prairies, interfère fortement sur la radiométrie des points échantillonnés. Par conséquent, l'analyse, envisagée dans un premier temps sur l'ensemble de la base de données, prend exclusivement en compte le critère granulométrique.

La figure 7.1 met en relation ce critère, représenté par la fraction fine, et le code géologique. Les schistes s'y différencient bien des granites par leur texture : les premiers -3- ont une proportion supérieure d'éléments fins, de l'ordre de 20%, qui se traduit au niveau des sols par une quantité d'argiles et limons fins plus forte que celle des sables.

Ces résultats confirment ceux obtenus précédemment dans la région d'Elven, où les massifs granitiques avaient été clairement identifiés des schistes du fait de la différence granulométrique entre les sols, différence granulométrique qui se traduit par une différence radiométrique, dans le MIR plus particulièrement.

Il n'est, en revanche, pas constaté de différence de granulométrie significative (fig. 7.2) entre les sols susjacentes aux différentes formations d'altération des granites (granite du Cloître-Leintan, codé 5 ; granite de Huelgoat, codé 6 ; granite de la Feuillée-Goasquintin, codé 7), bien que le niveau d'altération atteint paraisse cohérent (fig. 3) avec la nature des roches : le granite du Cloître, à grains fins, est cartographié en roches saines et ne porte pas d'altération notable alors que les granites de Huelgoat et de la Feuillée, à gros grains, sont décomprimés ou arénisés. Le code des échantillons est S pour les sols sur roche saine, D pour les sols sur roche décomprimée et A pour les sols sur roches altérées.

La différenciation des granites est toutefois améliorée si l'on ne considère que la fraction la plus fine des sols qui les recouvre, à savoir les argiles : la figure 8.2 montre un meilleur regroupement des points et un décalage plus marqué, notamment entre le granite de Huelgoat (6) et celui de la Feuillée (7). En revanche, la distinction schistes-granites (3 et 4,5,6,7) est moins nette (fig. 8.1).

6.4 ANALYSE DES ECHANTILLONS PRELEVES SUR SOLS NUS LORS DE LA PRISE D'IMAGE

L'analyse de la réflectance des sols implique une parcelle dépourvue de végétation lors de la prise de vue de l'image satellitaire. Le calcul de l'indice de végétation normalisé fait apparaître

24 échantillons prélevés sur des parcelles ayant eu une végétation importante (NDVI > 0.3) en 1988. La limite de 0.3 a été fixée ainsi afin de conserver un nombre d'échantillons suffisant (supérieur à 25) pour une couverture végétale la plus réduite possible.

La figure 7.3 met en relation la granulométrie avec la réflectance dans le MIR. Il n'apparaît pas de relation claire entre ces deux paramètres ; en effet, les schistes (3) sont bien séparés des granites (5, 6 et 7) par rapport à l'axe granulométrie, mais pas du tout par rapport à l'axe radiométrie. Des schistes comme des granites se trouvent par conséquent dans les fortes et dans les faibles réflectances MIR. Cette constatation est aussi vraie avec les autres longueurs d'onde.

Curieusement, ces résultats contredisent l'observation de la composition colorée 4-5-2 de l'image Landsat. En effet, le massif granitique y est parfaitement identifiable au sein de formations schisteuses bleuâtres : les sols argileux sur les formations schisteuses ont une capacité de rétention en eau importante et se ressuient donc plus lentement après une pluie, ce qui entraîne une réflectance inférieure dans le MIR en particulier. Il est toutefois probable que la perception de la morphologie contrastée des bordures du massif aide à son individualisation.

Les confusions statistiques sont vraisemblablement attribuables à la méthode de sélection des points à partir de la valeur de leur NDVI ainsi qu'à la date de prise de vue de l'image (seule donnée TM disponible sur le site) : les échantillons sur sols schisteux sont réellement des sols nus, puisque les cultures céréalières (maïs et blé) sont moissonnées et les parcelles travaillées pour la prochaine saison culturale, voire pour les semis des céréales d'hiver. En revanche, il est vraisemblable que certains points présentant un NDVI inférieur à 0.3 ne soient que des "pseudo sols nus", en particulier sur les granites du massif de Huelgoat. En effet, le mois qui a précédé la prise de l'image TM a été particulièrement sec (11.1 mm de pluie sur les 34 derniers jours), n'entraînant qu'une repousse limitée des prairies, à l'issue des fauchages, ensilages ou pacages de l'été. Leur faible indice de végétation est donc justifié. Au cours de l'observation visuelle ou de la classification, de telles parcelles sont ainsi assimilées à des sols nus du fait de leur NDVI, tout en ayant des caractéristiques physiques totalement différentes. Ceci explique les confusions constatées.

De plus, la forte déprise agricole constatée dans cette région se traduit par l'abandon de prairies qui deviennent rapidement des landes (fougères, ajoncs, genêts...), assimilables à des sols nus lorsqu'elles sont sèches (fin automne), alors que la couverture végétale sèche est compacte et continue. L'exemple des monts d'Arrée est significatif où les rares exploitations qui subsistent n'utilisent que faiblement les pâturages, ce qui conduit à une évolution progressive des prairies naturelles vers la lande. En novembre, la radiométrie des monts d'Arrée est ainsi désormais très proche de celle des sols nus.

La situation agricole du massif de Huelgoat, basée sur l'élevage extensif, ne laisse donc qu'un nombre très limité de parcelles sans végétation à un moment donné de l'année culturale. L'analyse statistique des points échantillonnés a été confrontée à ce problème, qui ne permet pas d'affirmer que l'on parle de radiométrie de sols nus. Ceci est la principale explication des confusions radiométriques observées sur deux types de sols, sur schistes et granites, qui se sont révélés très différents par leur radiométrie dans un autre contexte breton (Delpont et al., 1993).

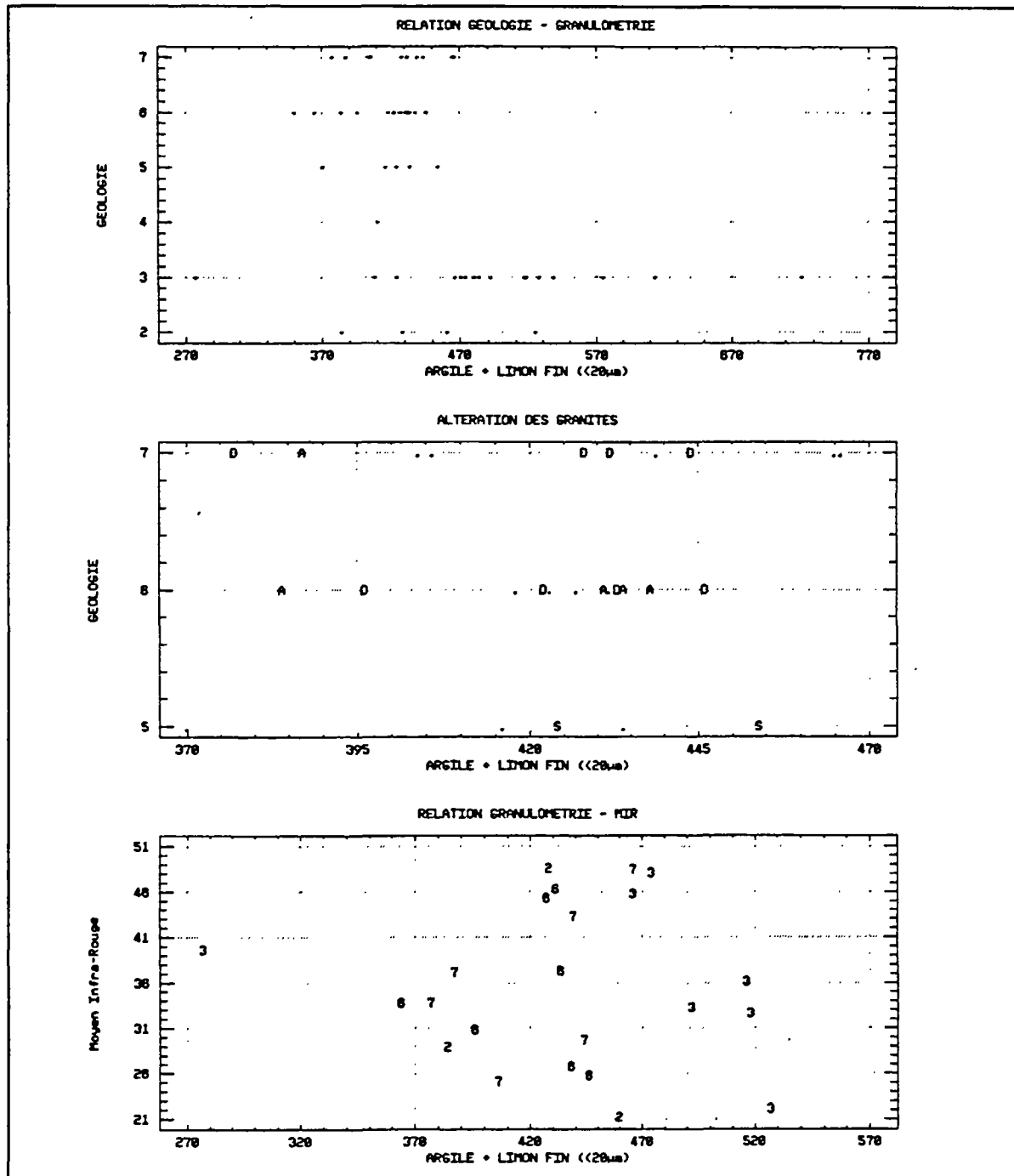


Figure 7 : Analyse statistique (géologie, réflectance, éléments fins : argiles et limons fins)
 2 : colluvions ; 3 : schistes ; 4 : microgranite ; 5 : granite du Cloître ;
 6 : granite de Huelgoat ; 7 : granite de la Feuillée ; A : roche arénisée ;
 D : roche décomprimée ; S : roche saine.
 Echelle horizontale : g/kg

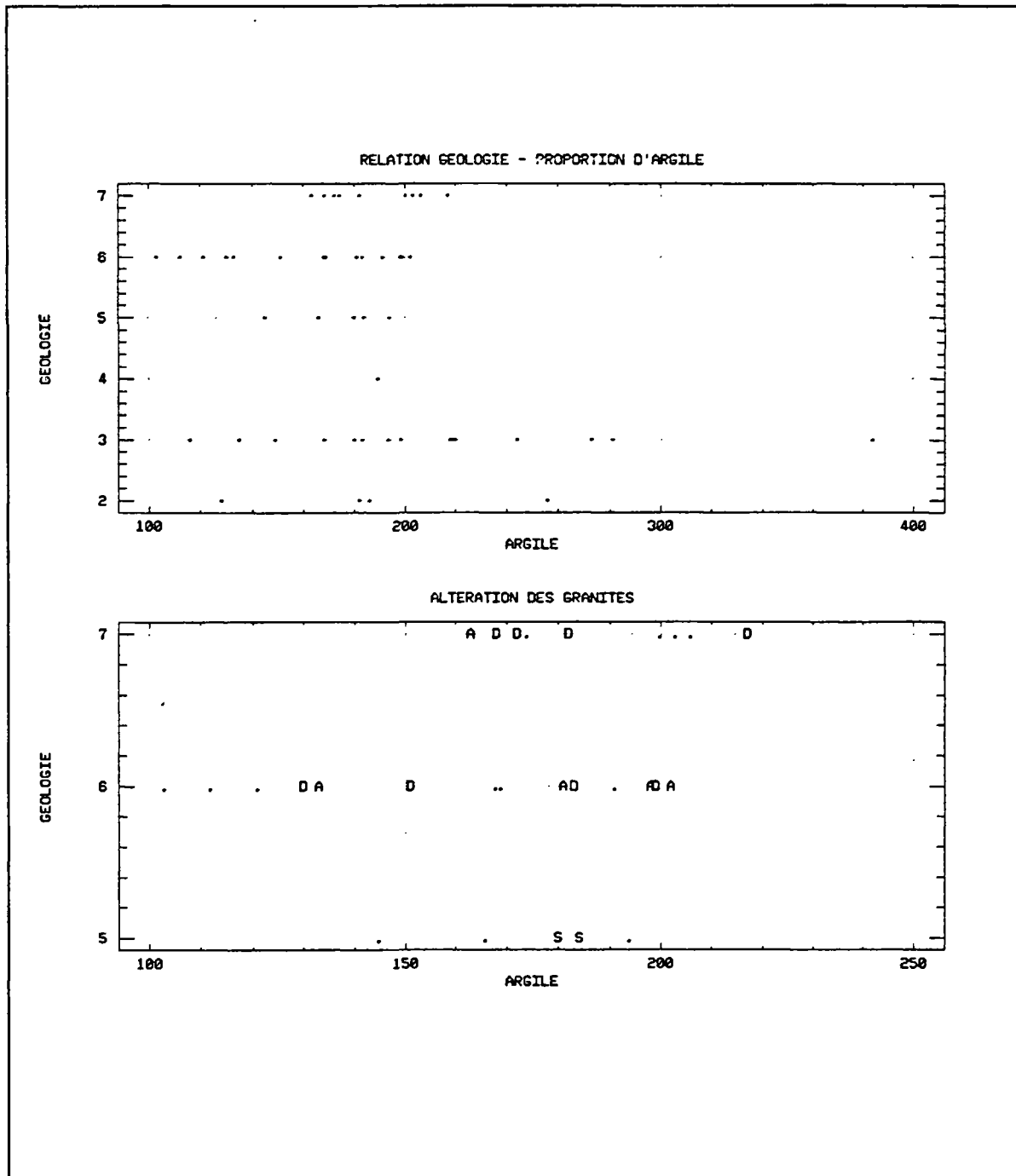


Figure 8 : Analyse statistique (géologie, état d'altération, éléments fins : argiles)
 2 : colluvions ; 3 : schistes ; 4 : microgranite ; 5 : granite du Cloître ;
 6 : granite de Huelgoat ; 7 : granite de la Feuillée ; A : roche arénisée ;
 D : roche décomprimée ; S : roche saine.
 Echelle horizontale : g/kg

CONCLUSION

La présente étude s'est attachée à montrer l'intérêt de la bande du moyen infra-rouge (1.55-1.75 μm ; MIR), qui correspond au canal 5 du capteur Thematic Mapper de Landsat V, pour la localisation de formations géologiques infiltrantes susceptibles de faciliter la recharge de réservoirs sous-jacents. Le site du massif de Huelgoat a été choisi puisqu'il correspond à une unité homogène quant à la famille de roches (granites), affectée de différents types d'événements géologiques supposés faire varier ses capacités de stockage d'eau (fracturation, décompression, altération etc). Il a, en outre, déjà fait l'objet d'une étude hydrogéologique très détaillée, par le BRGM.

Cette étude n'a pas eu les résultats escomptés pour deux raisons dont la première est indépendante des images bi-date utilisées:

- l'occupation agricole du sol, notamment pâtures ou landes sur prairies abandonnées, constitue un masque qui gêne considérablement l'observation des images : cette dernière suggère en effet un nombre important de sols nus, notamment sur le massif de Huelgoat, quand il ne s'agit en réalité que de parcelles couvertes de matière végétale sèche qui miment une réponse spectrale de sol nu. Indécélable sur les seules images, cette confusion a été mise en évidence au cours de la campagne de validation des classifications et de l'échantillonnage,

- les variations de granulométrie des sols ne reflètent pas systématiquement les variations lithologiques des roches mères granitiques et de leurs altérations. Toutefois, la précision des résultats paraît dépendre de la taille des éléments fins pris en compte puisque les seules argiles s'avèrent plus discriminantes que les argiles et limons fins associés. La confirmation d'une telle hypothèse, qui n'a pu être entreprise au cours de ce travail, serait d'un grand intérêt pour affiner cette méthodologie.

L'étude confirme toutefois globalement les résultats obtenus précédemment, dans des conditions géologiques et morphoclimatiques équivalentes, dans la région d'Elven : des sols humides ont été différenciés de sols plus secs grâce aux variations de réponse spectrale des sols nus, particulièrement dans le moyen infra-rouge. Ces variations restent en relation avec celles de la granulométrie des sols, elles-mêmes liées aux variations de lithologie : schistes plus ou moins gréseux situés au sud du massif de Huelgoat et, observé à la faveur de quelques rares points, schistes et granites.

Ainsi, malgré la déception relative causée par les résultats de cette étude, l'intérêt de disposer d'un outil accélérant la prospection de zones d'infiltration et de stockage potentiels en environnement de roches granitiques demeure, vu la relative pauvreté en eau de ces milieux et l'importance des populations qui y sont attachées. La filière télédétection moyen infra-rouge, dont la sensibilité à l'humidité a déjà été montrée, garde donc son intérêt, d'autant que la résolution spatiale de 20 m envisagée pour SPOT, rendra *a priori* possible la détection de systèmes hydrogéologiques de taille modeste, qui constituent la norme en milieu plutonique.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation géographique et schéma géologique (d'après Chantraine, 1989 in Braux et al., 1991)

Figure 2 : Carte géologique du massif de Huelgoat (Langevin et al., 1989)

Figure 3 : Carte de l'état d'altération (Langevin et al., 1989)

Figure 4 : Compositions colorées - image SPOT du 07/09/89

Figure 5 : Compositions colorées et classifications - pseudo SPOT 2

Figure 6 : Compositions colorées et classifications - pseudo SPOT 4

Figure 7 : Analyse statistique (géologie, radiométrie, éléments fins : argiles et limons fins)

Figure 8 : Analyse statistique (géologie, altération, éléments fins : argiles)

BIBLIOGRAPHIE

Bedidi A. (1992).- Comportement spectral (VIS-NIR) des sols latéritiques mouillés. Modèle de diffusion optique.- Thèse Université de Paris VII, 202 p.

Cassard D. et Chantraine J. (1990).- Commentaires de la carte de synthèse à 1/320 000 de la partie méridionale du Massif armoricain.- *Rapport BRGM inédit n° R30006*.

Chantraine J. (1989).- Commentaire sur la carte de synthèse du Massif Armoricain.- *Document interne BRGM inédit*.

Courault D. (1989).- Etude de la dégradation de la surface des sols par télédétection: analyses spectrales spatiales et diachroniques. Thèse INAPG.- *Revue Sols, INA-PG n°17. Paris*.

Delpont G., Desprats J.F. et Girault F. (1994).- Apport du canal moyen infra-rouge (1,55 - 1,75 μm) à la cartographie géologique en milieu couvert : exemple de la région d'Elven, Bretagne, France.- *Géologie de la France n° 2*, p. 21-30.

Escadafal R. (1989).- Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications: exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Thèse es Sciences.- *Ed. de l'Orstom, coll. Etudes et Thèses, Paris..*

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 massifs fissurés, massif granitique de Huelgoat (Finistère).- DESS de Télédétection, méthodes et applications, CETEL-PARIS VI.

Hunt G.R. (1979).- Near-infrared (1,3-2,4 μm) spectra alteration minerals. Potential for use in remote sensing. *Geophysics*, 44,12, p.1974-1986.

Langevin C., Pernel F. et Pointet T. (1989).- Recherche de secteurs à potentiel aquifère en zone de socle. Massif granitique de Huelgoat, Finistère. Analyse multicritère, cartographie assistée (Synergis), perméabilité de fracture (méthode Radon).- *Rapport BRGM R30 000*.

Louahala S. (1989).- Signatures spectrales de roches en milieu tempéré. Valeurs réelles et valeurs perçues par le satellite.- Thèse Univ. Paris 6.-*Document du BRGM n° 168, 205p*.

Riaza Garcia A. (1992).- Reflectancia en rocas en funcion de su litologia y fabrica interna. II.Cartografia de rocas igneas en el complejo de Burguillos de Cerro en el visible e infrarojo cercano: reflectancia espectral en laboratorio y evaluacion estadistica de la misma en relacion con imagenes Thematic Mapper.- *Boletin geologico y minero, vol.103-3, pp411-434*.

Stoner E.R. & Baumgardner M.F. (1981).- Characteristic variations in reflectance of soil surface.- *Journal paper n°8460, Purdue University*.

ANNEXE 1

Apport du canal moyen infra-rouge (1,55-1,75 µm) à la cartographie géologique en milieu couvert : Exemple de la région d'Elven, Bretagne, France

Georges Delpont, Jean François Desprats, François Girault
Département Télédétection, BRGM, B.P. 6009 Orléans Cedex 2, France

Mots clés : Télédétection, carte géologique, moyen infra-rouge, humidité, sols nus

Résumé

En région couverte peu affleurante et à morphologie peu contrastée, la cartographie géologique nécessite, du fait de la faible densité des affleurements, l'utilisation de données d'observation indirecte de la surface terrestre. A la géophysique et la géochimie, classiquement utilisées quand existent des études antérieures, s'est ajoutée, ces dernières années, la télédétection dont les données sont comparativement peu onéreuses et facilement accessibles.

L'essentiel de l'information extraite de ces données est, le plus souvent, relative à la morphologie mais l'étude de la radiométrie des sols nus peut venir compléter utilement cette information. En effet, la relation existant entre les roches-mères et les sols surincombants peut être considérée comme assez étroite, hormis dans le cas d'accumulation de formations superficielles exogènes.

Dans la région d'Elven, en Bretagne centrale, le canal moyen infra-rouge (1,55-1,75 µm) du capteur Landsat Thematic Mapper (TL) permet de différencier des pointements leucogranitiques et des dépôts pliocènes récents de leur environnement schisto-gréseux briovériens et de cartographier leurs limites. Cette différenciation est effectuée grâce à une analyse des variations de la radiométrie des sols nus qui recouvrent les formations géologiques sous-jacentes. Les variations sont corrélées à celles de leur taux d'humidité résiduelle qui s'avère fortement contrôlé par la composition granulométrique des sols. Le rapport argiles/éléments grossiers, qui dépend en grande partie de la composition de la roche-mère, peut être considéré, avant la matière organique, comme le facteur primordial déterminant l'humidité, et donc la radiométrie.

La précision des limites géologiques obtenues par l'interprétation de telles images est comprise entre 0 et 50 m dans 62 % des cas (124 points test) et entre 0 et 100 m dans 73 % des cas. Le niveau de précision est compatible avec l'ambition de ce type d'étude qui est de fournir un document de travail amont fiable au géologue cartographe. L'intérêt de ce type d'approche sera d'autant plus grand que l'infrastructure géologique du pays étudié sera limitée.

ANNEXE 2

(matrices de confusions)

Matrice de confusion sur SPOT 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	Reject
1 : Eau	535	0	0	0	0	0	0	0	9
2 : Nuages	0	190	0	0	0	0	5	0	6
3 : Monts d'Arrée	0	32	569	9	0	0	1	151	2
4 : Feuillus	3	0	0	1003	114	1	0	283	27
5 : Conifères	2	0	0	188	886	0	0	1	17
6 : Cultures	0	0	0	8	0	544	0	0	14
7 : Sols schisteux	0	24	34	43	0	0	1733	611	9
8 : Sols granitiques	0	3	103	100	0	0	22	318	0

Matrice de confusion sur SPOT 4

	1	2	3	4	5	6	7	8	Reject
1 : Eau	523	0	0	0	0	0	0	0	21
2 : Nuages	0	181	0	0	0	0	3	0	17
3 : Monts d'Arrée	0	42	545	10	0	0	0	156	11
4 : Feuillus	0	0	0	1160	58	3	0	164	46
5 : Conifères	0	0	0	260	797	0	0	0	37
6 : Cultures	0	0	0	14	0	524	0	0	28
7 : Sols schisteux	0	9	33	82	0	0	1709	576	45
8 : Sols granitiques	0	4	106	110	0	1	18	301	6