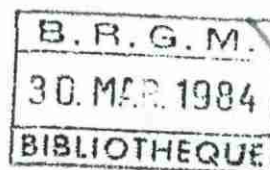


HYDROGÉOLOGIE DES MILIEUX FISSURES

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

DOCUMENT PUBLIC



APPLICATION DE LA TÉLÉDÉTECTION À LA PROSPECTION HYDROGÉOLOGIQUE EN ZONES ARIDES

Département EAU

Rapport du B.R.G.M.

83 SGN 896 EAU

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

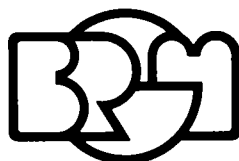
B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex (France) - Tél.: (38) 63.80.01

APPLICATION DE LA TÉLÉDÉTECTION À LA PROSPECTION HYDROGÉOLOGIQUE EN ZONES ARIDES

par

M. GEORGES - E. MOTTI - T. POINTET

avec la collaboration de J. FOURNIQUET



Département EAU

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex (France) - Tél.: (38) 63.80.01

Rapport du B.R.G.M.

83 SGN 896 EAU

Décembre 1983

R É S U M É

Deux types de traitements adaptés viennent d'être testés sur des zones de bouclier pour lesquelles on possédait une "vérité-terrain".

Il s'agit de dérivées noir et blanc adaptées à la définition du réseau de fractures et d'un traitement coloré par étalement dynamique après filtrage du canal 7 (proche infra-rouge) orienté vers la recherche des indices d'eau. L'utilisation des dérivées permet directement de tracer les cartes des réseaux de fractures et linéaments en zone de socle affleurant.

Le traitement coloré mis au point a d'abord conduit à constater que dans l'environnement étudié, les formations détritiques soulignées par des signatures claires sont liées à une présence récente de l'eau ou, en d'autres termes, à une présence répétée de l'eau. Toutes ces formations se signent dans la gamme des rouges (du blanc au rouge clair), contrastant sur un fond coloré dans le bleu-vert.

Ces images sont à analyser avec précautions : l'intensité des signatures (tendance aux teintes claires) est en rapport avec une concentration d'eau, mais dépend encore beaucoup de la lithologie des formations et la superficie des panaches représente exclusivement l'extension des zones à humidité temporaire ou permanente. De plus, ils ne traduisent que des caractéristiques de surface.

Le croisement de ces informations avec les résultats d'une analyse géomorphologique permet de raisonner en termes d'hydrogéologie. Ce type d'analyse se situe dès les préalables de la première reconnaissance de terrain.

L'échelle de travail est conditionnée par la résolution de 70 m, mesure du côté du pixel pour Landsat S. On a le plus couramment recours au 1/250 000 et au 1/500 000.

Cette étude fait l'objet d'une communication au congrès international sur des problèmes de l'hydrologie et des ressources en eau de Hararé (Zimbabwe) les 23-24 juillet 1984.

SOMMAIRE

	pages
<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>1. CADRE GEOGRAPHIQUE</u>	1
1.1. Formes du relief, érosion, hydrographie, formations superficielles	1
1.1.1. Zones à relief vigoureux	1
1.1.2. Zones à collines basses et ondulations faibles	1
1.1.3. Zones tabulaires	2
1.1.4. Coulées volcaniques	2
1.1.5. Grands axes drainants	3
1.1.6. Bassins d'accumulation	4
1.2. Climatologie et hydrologie	5
1.2.1. Températures	5
1.2.2. Précipitations, évaporation	5
1.2.3. Vent	5
1.2.4. Hydrologie	5
<u>2. GEOLOGIE</u>	6
2.1. Histoire géologique	6
2.2. Le socle	6
2.2.1. Les dépôts volcano-sédimentaires	6
2.2.2. Les formations intrusives	8
2.3. Les coulées volcaniques	8
2.4. Les formations superficielles	8
2.5. Déformation et métamorphisme	8
2.6. Sensibilité à l'érosion	8
<u>3. LE TRAITEMENT DES IMAGES</u>	10
3.1. Les données Landsat	10
3.2. La chaîne de traitement IGIS du BRGM	10
3.3. Interprétation des images	12

	pages
4. <u>APPLICATION, REALISATION ET ANALYSE D'IMAGES</u>	13
4.1. Remarques préliminaires	13
4.2. Traitements	13
4.2.1. Analyse des dérivées en N et B	13
4.2.2. Composition colorée standard	13
4.2.3. Traitement particulier réalisé au BRGM	13
4.3. Critères de choix des zones d'intérêt - Méthode	15
4.4. Discussion des résultats acquis sur les zones-tests	16
4.4.1. Coupure n° I : image colorée	16
4.4.2. Coupure n° II : image colorée	24
4.4.3. Coupure n° III : image colorée	26
5. <u>CONCLUSION</u>	34

INTRODUCTION

Une étude à caractère méthodologique a été entreprise en vue d'apprécier les possibilités d'application des traitements de données de scène Landsat à l'orientation des travaux de prospection hydrogéologique.

La région-test (fig. 2.1.) est située en zone aride tropicale pour s'affranchir le plus possible des contraintes liées à la biosphère (quasi absence de sols, végétation, influences humaines). Elle a été choisie pour :

- ses contrastes morphologiques et lithologiques : un socle très métamorphisé et largement affleurant. Elle sera analysée dans l'optique de l'apport de la télédétection à la conception de projets en hydrogéologie des milieux fissurés,
- la relative richesse en données de terrain disponible,
- une qualité particulière de la bande Landsat disponible.

1. CADRE GEOGRAPHIQUE

1.1. Formes du relief, érosion, hydrographie, formations superficielles

1.1.1. Zones à relief vigoureux

Elles sont assez rares, réduites à quelques petits massifs montagneux (arrière plan de la fig. 4.4.2.b.) et à quelques groupes d'inselbergs granitiques disséminés. Le réseau hydrographique y est quasi-inexistant. L'écoulement diffus est de règle générale, il entraîne les éléments fins issus de la corrasion. Les éléments plus grossiers provenant de la désagrégation mécanique (variations thermiques importantes) des roches s'accumulent, sous le simple effet de la gravité, en pédiments. En se mêlant aux précédents, ils donnent des formations superficielles hétérométriques de faible épaisseur généralement : nappes d'épandage à matériau peu évolué, développées à la périphérie immédiate des reliefs, le déplacement n'excédant pas quelques centaines de mètres.

1.1.2. Zones à collines basses et ondulations faibles

Elles sont bien développées dans le quart N.W de la scène, surtout sur substratum non granitique. Elles sont constituées de roches du socle, affleurantes ou

sub-affleurantes (fig. 4.4.1.c, 2ème plan de part et d'autre de la coulée basaltique). La roche est abondamment fracturée, en place, et se désagrège pour donner naissance à un voile de débris anguleux autochtone. Des glissements gravitaires ou par ruissellement lors des pluies peuvent entraîner le colluvionnement des matériaux vers les zones basses : le déplacement horizontal et l'épaisseur des sédiments restent faibles.

Le réseau hydrographique est généralement réduit à un chevelu de petits écoulements, parfois assez bien hiérarchisés mais possédant très peu d'alluvions s.s. ; les épaisseurs sont faibles, aucune trace de terrasse ancienne n'a été relevée, pas plus qu'un quelconque encaissement des lits actuels. Une multitude de petits bassins d'accumulation de matériel argilo-silteux est souvent associée à ces paysages ; la pellicule des sédiments fins accumulés a une épaisseur qui est le plus souvent nettement inférieure à 1 m.

1.1.3. Zones tabulaires

Elles correspondent principalement à des surfaces granitiques pénéplanées. Peu étendues sur la scène, elles apparaissent dans l'angle N.E (arrière-plan de la fig. 4.4.3.b).

Un voile de graviers et de sables, provenant de la désagrégation sur place de la roche, masque à peine le bedrock qui n'est pas, ou très peu, altéré au sens chimique du terme mais subit une intense fragmentation mécanique. L'ensemble fournit un relief plat, d'où sortent les traces de filons, quelques affleurements en "dos de baleine" et inselbergs (granites). Ces zones sont souvent aréiques avec seulement des traces d'écoulements superficiels inorganisés qui doivent signaler une importante infiltration sur place des eaux. Le recouvrement est faible, quelques décimètres au plus et pour l'essentiel autochtone.

1.1.4. Coulées volcaniques

Elles constituent le trait marquant de la morphologie de cette scène dans laquelle elles couvrent de larges surfaces dans les angles SW et SE (fig. 4.4.1.b, 4.4.1.c., 4.4.3.d.).

De grande extension latérale, leur épaisseur unitaire est faible, mais leur accumulation peut atteindre et dépasser 3 à 400 m. Compte tenu de la fluidité des basaltes lors de la mise en place des coulées, la pente topographique (surface structurale de la coulée la plus récente) est faible.

Sur les basaltes anciens (Plio-Quaternaire) les petits bassins d'accumulation de matériel silteux et sableux sont bien développés, avec une épaisseur réduite de sédiments. Un réseau hydrographique a pu se développer. Les écoulements se font en surface, sans incision. Par érosion régressive sur les bords des coulées, des gorges assez étroites, parfois encaissées apparaissent.

Sur les coulées très récentes, aucune trace d'évolution (altération, sédimentation) n'est visible. En particulier, il ne semble exister aucun placage éolien, et l'on ne remarque guère que de petites "flaques" de dépôts silteux. Le réseau hydrographique est inexistant.

1.1.5. Grands axes drainants

Plusieurs grands oueds constituent l'essentiel du réseau hydrographique de cette scène. Ils semblent tous encore actifs, avec des traces d'écoulements récents.

Leur position est bien déterminée, sans divagations, le lit mineur envahit la totalité du lit majeur ; aucune terrasse ancienne n'est visible, aucun encaissement ne se remarque ; les apports de matériaux à partir des zones traversées semblent importants. Des coupes de puits ont montré que l'épaisseur d'alluvions est souvent réduite à 3-4 m avec des éléments assez peu évolués. Il apparaît donc que, sauf exception liée à des raisons structurales, les grands oueds n'ont pas accumulé de fortes épaisseurs de sédiments.

D'une manière générale, les grands oueds ne paraissent pas être directement adaptés aux structures du substratum. On peut y voir une surimposition à partir d'un relief antérieur. Par contre, les positions des affluents et cours mineurs sont souvent étroitement liées aux directions tectoniques (grands accidents, failles secondaires, fracturation locale).

1.1.6. Bassins d'accumulation

Ils sont de taille variable. Suivant la nature des dépôts observés, on distingue :

- des bassins où se produit uniquement la sédimentation des silts et des sables , qui ont déjà été signalés sur toute la surface de la scène (taches blanches de la fig. 2.1.). Les grands oueds traversant la scène montrent tous des élargissements locaux, des bras morts à sédimentation fine (silts essentiellement),
- des bassins d'évaporation, avec sédimentation argileuse. Le niveau piézométrique est proche de la surface, entretenant l'évaporation et la cristallisation qui donnent des dépôts salés sous forme de croûtes superficielles boursouflées.

Les affluents proches de ces bassins fournissent une charge argilo-sableuse pour constituer alors des bassins de type mixte. Dans le détail, toute une zonation fine est visible entre les cônes alluviaux à graviers, les épandages fins de type bassin d'accumulation, et les aires à cristallisation de type bassin d'évaporation, souvent tous réunis dans un même ensemble endoréique.

Ceux-ci se rencontrent fréquemment à la périphérie des coulées volcaniques qui les ont créées en barrant les thalwegs qui constituaient les axes drainants.

En schématisant, il est possible de distinguer au moins deux grandes périodes d'évolution superficielle de cette province géologique :

- érosion et sédimentation antérieures aux basaltes, responsables de la mise en place des grands oueds. La position des oueds actuels résulte d'une antécédence : la morphologie visible est disproportionnée par rapport à l'activité hydrogéologique contemporaine, ce qui suppose des cours d'eau autrefois plus puissants et vraisemblablement la présence d'une couverture meuble aujourd'hui décapée ;
- mise en place progressive des coulées : recouvrement de zones d'accumulations alluviales probables, barrage des grands oueds ; adaptation des écoulements aux nouvelles conditions : développement des bassins endoréiques autour des coulées volcaniques.

1.2. Climatologie et hydrologie

1.2.1. Températures

Dans la zone étudiée, la moyenne annuelle des températures relevées à l'ombre est de 26°C ; la variation interannuelle étant faible. Par contre la variation annuelle est forte ; la moyenne mensuelle des mois les plus froids (décembre-janvier) s'établissant à 17°C et celle des mois les plus chauds (juin-juillet-août) à 33,5°C. Des valeurs extrêmes au-delà de ces moyennes sont observées sur des périodes de courte durée (inférieures à 10°C et supérieures à 40°C).

1.2.2. Précipitations, évaporation

La pluviosité annuelle moyenne est de l'ordre de 100 mm. Des averses sporadiques parfois très violentes peuvent s'observer à des intervalles de temps courts, suivies de longues périodes sèches. La variabilité des précipitations est donc très forte comme dans toutes les zones arides. Les 3/4 de ces précipitations se répartissent de décembre à février parfois jusqu'à avril.

1.2.3. Vent

Vents dominants d'Ouest (février à octobre).

1.2.4. Hydrologie

L'absence de sol et de couvert végétal entraîne lors des précipitations une concentration rapide du ruissellement. Un écoulement apparaît rapidement en rigoles, même sous pente très faible, puis se concentrant, prenant en charge petit à petit une masse énorme de sédiment qui va se déposer plus ou moins loin en aval selon la disposition des pentes ou l'importance de l'infiltration. Ces écoulements s'interrompent tôt ou tard, le réseau hydrographique, d'origine tertiaire et remanié au Quaternaire, n'étant pas en rapport avec l'aridité contemporaine.

2. GEOLOGIE

2.1. Histoire géologique (les grands ensembles lithologiques sont schématisés sur la figure 2.1.).

La région étudiée ici est située à l'intérieur d'une croûte continentale qui s'est édifiée au cours de plusieurs cycles orogéniques. Chacun d'entre eux peut se résumer à une accumulation de dépôts sédimentaires et volcaniques à lithologie très variée que des intrusions, granitiques pour la plupart, ont pénétré. Les événements précambriens se sont accompagnés de métamorphisme et de déformations (plis et failles).

Dès le Paléozoïque, les terrains furent profondément érodés, pénéplanés et évoluèrent peu jusqu'au Tertiaire.

Depuis le milieu du Tertiaire, la proximité de la zone d'extension de la Mer Rouge a engendré une tectonique cassante et la mise en place de nouveaux épanchements volcaniques.

Les formations superficielles quaternaires couvrent indifféremment les dépôts antérieurs.

2.2. Le socle

2.2.1. Les dépôts volcano-sédimentaires

La succession de cycles orogéniques et le contexte de mise en place expliquent la variété des faciès rencontrés.

Les dépôts volcaniques anciens sont parfois massifs (coulées) mais plus souvent bréchifiés. Leur composition va des rhyolites aux basaltes en passant par rhyodacite et andésite. On y rencontre aussi des ignimbrites et des tufs kératophyriques.

Ils sont interstratifiés ou injectés dans les dépôts sédimentaires. Ceux-ci sont constitués de brèches et conglomérats à éléments volcaniques, arkoses, grès, turbidites, calcaires, tuffite, pélite, chert et jaspe.

L'épaisseur de ces séries est considérable, plusieurs milliers de mètres.

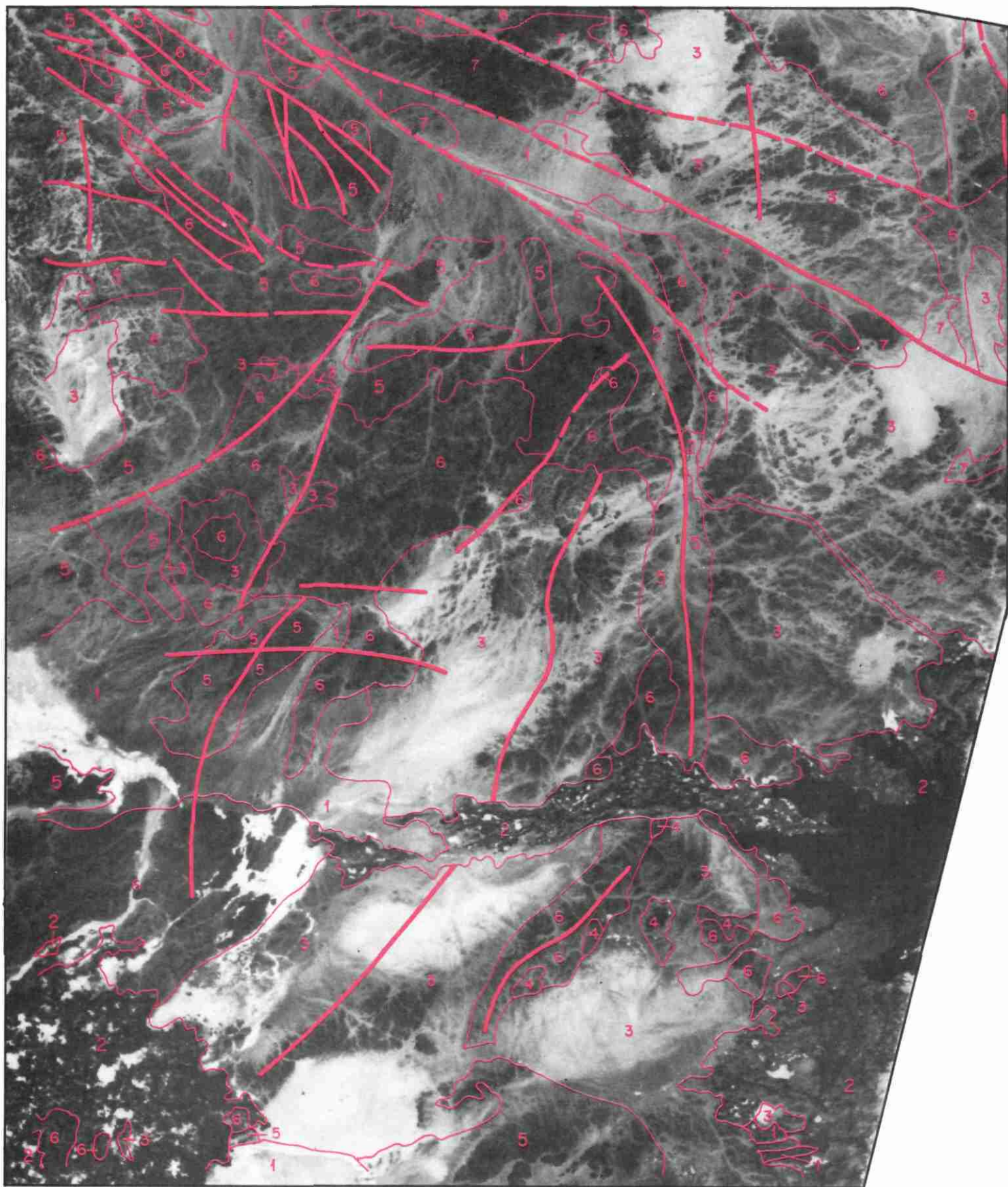


fig. 2.1 - Les grands ensembles morphologiques et lithologiques

- 1 = formations de couverture (détritiques) — 2 = basaltes tertiaires et quaternaires,
 3 = roches intrusives acides — 4 = roches intrusives basiques et ultrabasiques
 5 = série sédimentaire précambrienne — 6 = série volcanique précambrienne indifférenciée
 8 = basaltes précambriens

0 5 10 km

2.2.2. Les formations intrusives

Elles se mettent en place au sein des dépôts volcano-sédimentaires et des formations intrusives antérieures lors des épisodes tectoniques. Les roches rencontrées sont des granites et des diorites quartziques.

2.3. Les coulées volcaniques

Ce sont des épanchements de basalte. Les zones émissives (en dehors de la région étudiée) sont alignées sur une fracture majeure du socle.

2.4. Les formations superficielles

Déjà décrites dans le chapitre 1.1., ce sont des voiles de débris autochtones ou subautochtones déposés sur les pédiments et les dépôts alluviaux observés dans le lit des drains.

2.5. Déformation et métamorphisme

Des plis de grandes ampleurs (anticlinal, synclinal, plis renversés) affectent les séries volcano-sédimentaires.

Les failles se regroupent en deux directions principales :

- N 120° E : la plupart ont fonctionné en décrochements senestres, elles dominent dans la partie NE de la scène
- N 70° E : elles sont antérieures ou conjuguées aux précédentes. Surtout localisées à l'W et au S.W.

On observe un métamorphisme de contact au sein des séries volcano-sédimentaires intrudées par certains corps granitiques, et un métamorphisme plus régional affectant plus ou moins ces mêmes séries.

2.6. Sensibilité à l'érosion

La comparaison de la carte géologique avec l'image satellite permet au sein du socle de distinguer les unités lithologiques sensibles à l'érosion.

Elles apparaissent en teintes plus claires, dues à la réflectance des débris de leur décomposition, en particulier la silice des arènes. Sur ces pentes faibles, le ruissellement est impuissant actuellement à évacuer les produits d'altération.

Les causes de cette sensibilité à l'érosion sont :

- le chimisme : peu d'informations sont disponibles mais il semble que la présence de biotite et d'oligoclase (plagioclase acide) soit responsable de l'érosion des monzogranites, granodiorites et tonalites qui les contiennent. L'attaque de ces minéraux par hydrolyse se serait déroulée sous un climat plus humide qu'à l'actuel,
- la structure des roches : certaines organisations, plus fragiles que d'autres à la fracturation mécanique, facilitent le déchaussement des minéraux et la désagrégation de la roche,
- la fracturation qui augmente les surfaces exposées aux agents météoriques.

3. LE TRAITEMENT DES IMAGES

3.1. Les données Landsat

Tous les 18 jours, le satellite Landsat D fournit d'une même scène couvrant 33 000 km², une analyse multispectrale. Les canaux 4, 5, 6 et 7 correspondent aux bandes spectrales suivantes :

- 4 = 0,5 à 0,6 μ m
- 5 = 0,6 à 0,7 μ m
- 6 = 0,7 à 0,8 μ m
- 7 = 0,8 à 1,1 μ m

On remarque :

- que les canaux 6 et 7 sont situés dans le proche infra-rouge,
- l'absence de canal thermique.

La résolution au sol est relativement faible (1 pixel = 60 x 80 m).

La "vision" n'est pas stéréoscopique.

Les données brutes sont stockées sur bande magnétique ou C.C.T.
(= Computer Compatible Tape) et sont fournies par la NASA.

3.2. La chaîne de traitement IGIS du BRGM

Elle comprend :

- un calculateur PDP 11/44 pour le pré-traitement et les traitements en "aveugle" réalisés à partir de programmes standards,
- un système interactif Contal vision 1/20 pour la visualisation en temps réel des résultats du traitement,
- un restituteur d'image Optronics C4300 pour la matérialisation du traitement sur film noir et blanc ou couleurs (en positif ou négatif).

Ces films sont traités au laboratoire photos couleurs du Département des Arts Graphiques du BRGM. Les documents obtenus sont appelés images par opposition aux photographies obtenues par les procédés optiques classiques.

Elle permet de réaliser :

- Le pré-traitement, réalisé systématiquement quelle que soit la finalité des travaux. Il s'effectue sur les données brutes stockées sur la C.C.T. Suite au décodage des données, on procède pour chaque canal à une rectification géométrique corrigeant les effets de la rotation terrestre (le haut et le bas de l'image n'étant pas synchrone) et portant sur la taille du pixel puis à une rectification radiométrique qui vise à recalibrer les capteurs et à supprimer le bruitage, le lignage et les effets de brume.
- Le traitement proprement dit, en travaillant à partir des données obtenues à l'issue du pré-traitement. Suivant le but fixé on peut réaliser :
 - . l'étalement dynamique : après avoir pour chaque canal, calculé l'histogramme de fréquence des 256 valeurs de gris que le capteur du satellite peut enregistrer pour chaque pixel, on assigne (en "étalant" les "bornes" du pic de l'histogramme) une nouvelle distribution des points de l'image par rapport à ces 256 valeurs,
 - . la combinaison de canaux : toutes les opérations sont possibles, addition, soustraction, "multiplication", rapport de canaux. Elle essaie de différencier - ou au contraire de ne pas différencier - de faibles variances en concordances de signatures spectrales des différents canaux. Le remplacement des niveaux de gris par des couleurs vise à améliorer la vision de ces contrastes ou de ces concordances*. A ce type de traitement appartiennent les compositions colorées standard obtenues par addition des canaux 4, 5 et 7 (le 6 étant redondant avec 5 et 7).

Etalement dynamique et combinaisons de canaux peuvent être faits de façon automatique, mais bien que plus onéreux, l'emploi conjoint du système interactif (orientation des traitements correspondant au meilleur compromis possible après visualisation sur écran de contrôle) permet un résultat plus intéressant. Ces deux traitements sont généralement associés et réalisés en inter-actif.

- . les filtrages : parmi les nombreuses possibilités, le plus fréquemment employé est le filtrage directionnel. Il permet par un pseudo-effet d'ombre sur des images en noir et blanc, de souligner les linéaments et principalement ceux qui sont orthogonaux à la direction de filtrage (dérivée) choisie arbitrairement. L'utilisation de trois dérivées (verticale ou N-S, horizontale ou E-W et diagonale) permet de reconstituer, après repérage et report des trois réseaux partiels sur un même document, l'ensemble du réseau des linéaments.

* L'oeil humain discerne moins bien une variation de niveau de gris qu'une variation de teinte colorée. Les niveaux de gris sont donc remplacés par des couleurs pour mieux mettre en valeur les contrastes.
Ce traitement vise à identifier les signatures spectrales des éléments constituant l'image.

Dans un secteur structuralement connu, les dérivées pourraient être utilement orientées orthogonalement aux principales directions tectoniques ou du moins celles qui ont été reconnues significatives en regard des indices d'eau.

3.3. Interprétation des images

Elle diffère sensiblement de la photo-interprétation.

- L'absence de vision stéréoscopique ne permet pas l'interprétation géologique de la morphologie ; celle-ci n'étant accessible à l'interpréteur que par la qualité des contrastes de l'image. Ceux-ci sont eux-mêmes liés à la réflectance, donc à l'état physique de la surface des éléments du sol.

En analyse structurale, on fait alors l'hypothèse que les linéaments se traduisent au sol par des discontinuités majeures qui sont la trace de surfaces qui affectent les roches en profondeur.

- Il en est de même pour la définition des faciès qui n'est plus, avec l'analyse multispectrale essentiellement morphologique mais radiométrique.
- Le changement d'échelle permet la vision synthétique de toute une région. On met ainsi en évidence des éléments linéaires principaux plurikilométriques (cf. remarque ci-dessus) liés aux discontinuités majeures qui ont affecté les formations sédimentaires ou le socle.

Ces discontinuités limitent des compartiments et des panneaux plurikilométriques. Elles sont ouvertes ou jointives ou secondairement injectées et colmatées. Leur rôle sera celui d'écrans imperméables et étanches ou celui de drains, avec des comportements extrêmes sur les écoulements souterrains dans leur voisinage immédiat.

4. APPLICATION, REALISATION ET ANALYSE D'IMAGES

4.1. Remarques préliminaires

La résolution au sol des scènes Landsat est de l'ordre de 70 m. L'intensité des signatures n'est pas forcément en rapport avec l'importance des phénomènes. Un indice de fortes activité hydraulique, mais de petite dimension (une source par exemple) aura une signature très ténue.

Les faciès lithologiques rencontrés, un socle constitué de granites et de séries volcano-sédimentaires précambriennes indurées et des formations superficielles peu développées tant en puissance qu'en extension (§ 1.1) ont amené à orienter les recherches d'eau vers les possibilités qu'offre le milieu fissuré et vers les indices superficiels d'humidité liés à l'infiltration.

4.2. Traitements

4.2.1. Analuse des dérivées en N et B (1/500 000)

La réunion des réseaux partiels correspondant à une direction de dérivation (NS, EW et diagonales) a fourni une carte des linéaments (cf. fig.4.2.1.).

4.2.2. Composition colorée standard (1/250 000)

Obtenue par addition des canaux 4, 5 et 7 (le 6 étant redondant avec le 5 et le 7), elle a aidé à compléter le relevé des linéaments et a permis, par un repérage topographique plus facile que par les dérivées, d'identifier un certain nombre de zones d'intérêt.

4.2.3. Traitement particulier réalisé au BRGM

C'est une combinaison de canaux sur laquelle on a testé différents étallements dynamiques. Les résultats contrôlés au niveau des zones d'intérêt définies plus haut, ont permis d'en retenir un. Trois extraits (40 x 40 km) de l'image obtenue sont présentés sur les figures

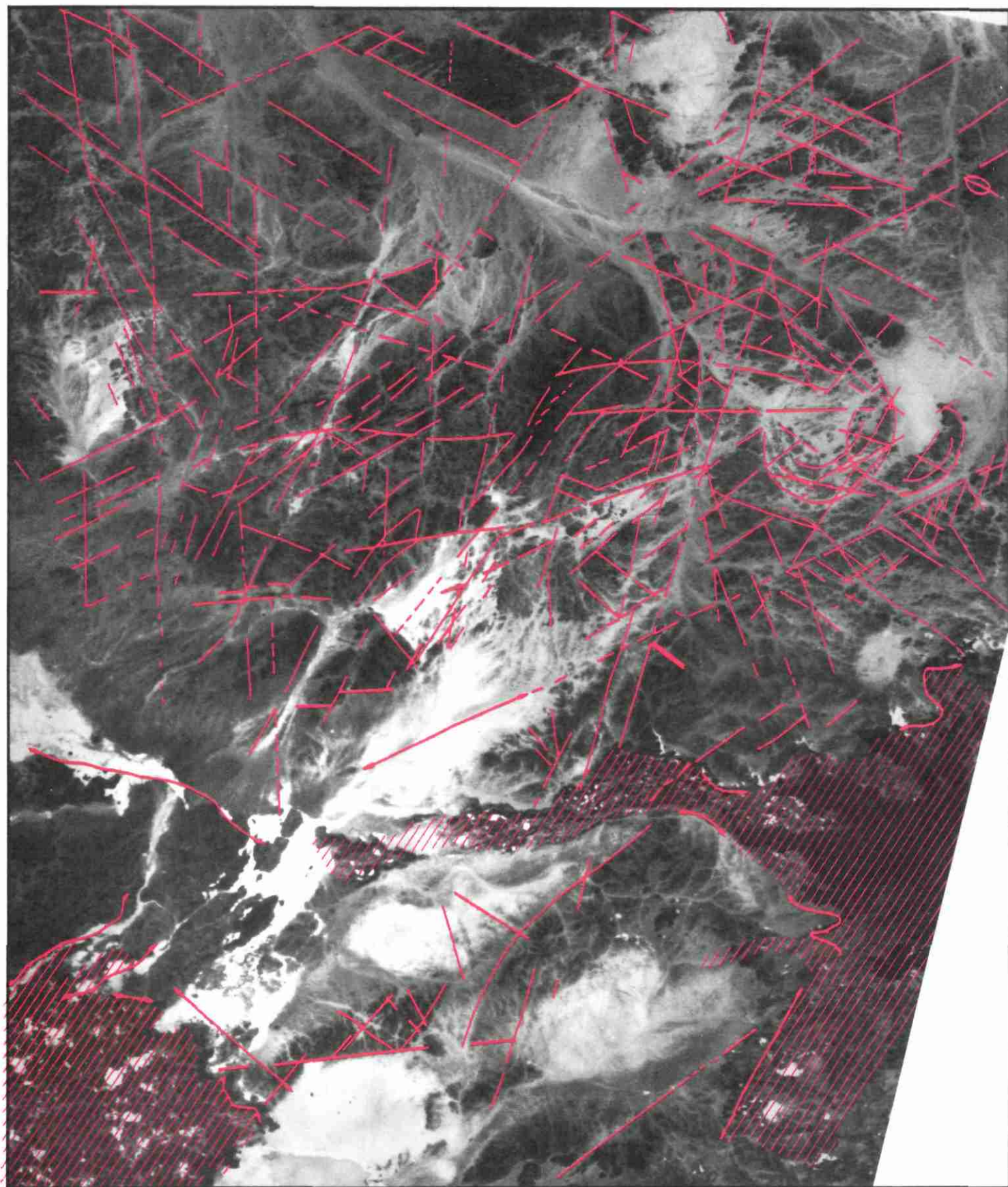


fig.4.2.1 - Recherche des fractures et linéaments du socle. Document de synthèse issu de l'interprétation des dérivées N.B. et de la composition colorée standard.

- Fond N.B. d'après la composition colorée standard
- En hachures : les coulées de basaltes (pas d'interprétation)

4.3. Critères de choix des zones d'intérêt - Méthode

D'une part, l'étude de terrain ayant fourni des éléments significatifs quant à la présence d'eau (sources observées, irrigation, végétation,...), on va, à partir de la comparaison entre données de terrain positives et teintes observées sur l'image, tenter d'identifier une "signature" des indices de présence d'eau. Dans le meilleur des cas, cette signature est sans ambiguïté. Dans le cas contraire, on a convergence de signature avec des phénomènes non corrélés à la présence d'eau et dans ce cas les résultats de l'analyse des images devront être croisés avec d'autres données, de géomorphologie en particulier. Cette opération s'apparente à un calage en fonction des caractéristiques régionales mais aussi en raison du fait que chaque bande Landsat présente des particularités (saison de prise de vue, et nécessité d'une adaptation du traitement).

D'autre part, l'identification des linéaments du socle, autres données à caractère hydrogéologique, fournit un document que l'on confronte aux premiers résultats.

Un certain nombre de critères sont susceptibles d'être corrélés à la présence d'eau ou à ses circulations - superficielles ou souterraines -. On orientera l'analyse vers l'identification de ces critères dont la liste suit, l'ordre d'énumération étant quelconque.

1. Morphologie : appréciation des indices de pente et des relations entre unités morpho-géologiques :
 - a
 - b
 - c
 - d
2. Lithologie du socle : - e
- 2'. Lithologie du socle sous les coulées : - e
3. Fracturation du socle :
 - dans les zones de haut relief : - f
 - en zones basses : - d
 - aux abords des coulées : - e
 - répartition statistique : - g
4. Dégénération et état de surface des coulées volcaniques :
 - près des zones d'émission : - f
 - en bordure des coulées : - f
 - : - d
5. Taches de sel : - d

6. Eau observées : source, irrigation, puits.

7. Recherche de signatures liées à l'humidité et recoupant les indices 1 à 6

8. Définition de l'échelle optimale de travail

9. Choix de la saison de prise de vue

- avec
- a = écoulements gravitaires
 - b = sens de l'écoulement souterrain
 - c = comportement de l'eau de surface dans le cas d'un écoulement d'un relief de socle vers une coulée volcanique
 - d = humidité affleurante et vidange éventuelle (débordement)
 - e = rôle perméable ou imperméable du substratum des coulées, favorisant l'apparition ou la disparition du sous-écoulement
 - f = recharge du système fissural et rôle de drain
 - g = direction structurale préférentielle vis-à-vis de la présence d'humidité

4.4. Discussion des résultats acquis sur les zones-tests

Les chiffres et les lettres minuscules entre parenthèses renvoient aux critères définis au § 4.3.

La fig. 4.4. donne la localisation des coupures étudiées ci-après.

4.4.1. Coupure n° I : image colorée

(fig. 4.4.1.a)

Les traits marquants sont :

- une teinte rose-orange au droit d'un groupe de sources en bordure de coulée. Cette teinte se retrouve dans le vallon puis sur la zone d'épandage aval : zone A ;
- la même teinte rose-orange frangeant une coulée volcanique issue de la coulée principale : zone B ;
- la même teinte bordant une coulée plus large issue du même ensemble volcanique : zone C.

Les critères (§ 4.3) sont : 1, 2', 3, 4, 5, 6, 7 et B, d, e, f.

ZONE A (signatures de type A) : Nous relevons ces signatures en bordure de coulée basaltique. Le critère "terrain" associé est la présence d'un groupe de sources en écoulement permanent issues de la coulée (1b), qui repose à cet endroit sur des diorites quartziques manifestement peu fracturées jouant un rôle de substratum quasi-étanche (3e).

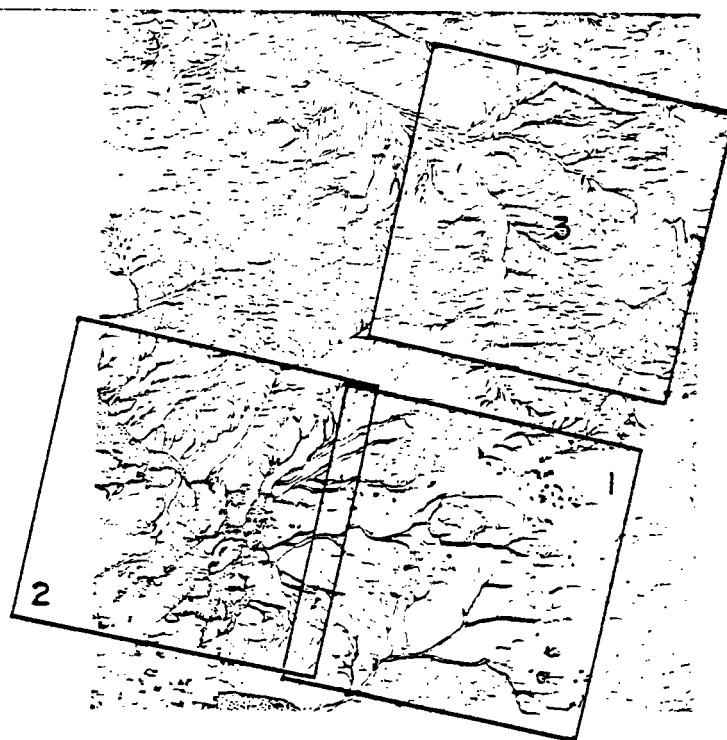
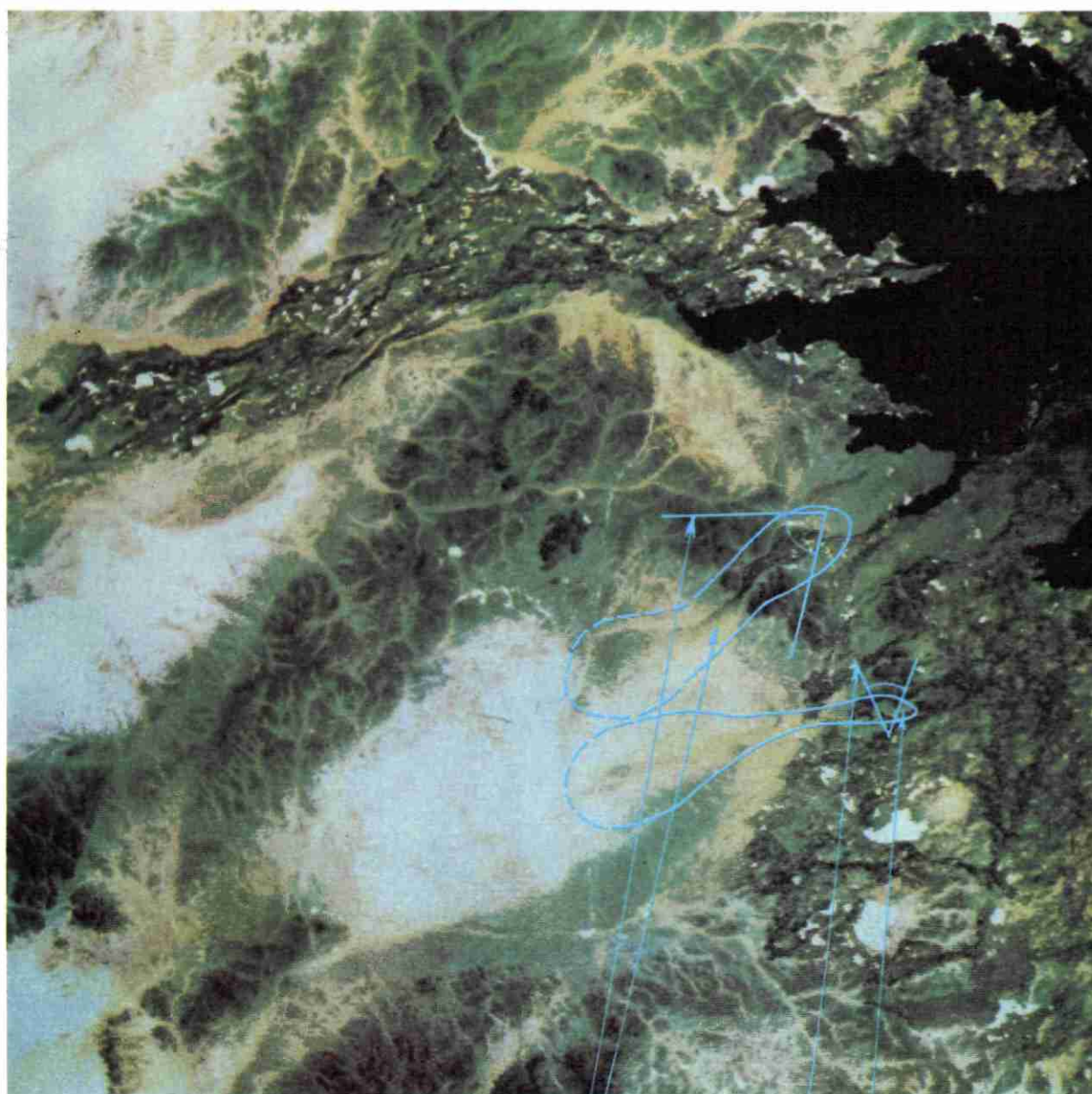


fig. 4.4. - Localisation des secteurs étudiés .Echelle 1/1000 000

1 - Coupure 1 , voir paragraphe 4.4.1

2 - Coupure 2 , voir paragraphe 4.4.2

3 - Coupure 3 , voir paragraphe 4.4.3



site de prise de vue
de la fig. 4.4.1. c

site de prise
de vue de la
fig. 4.4.1. b

Zone B

Zone A : sources à la base des basaltes sur
substratum dioritique

fig. 4.4.1. a - Image colorée sur cadrage 1 - Composition colorée particulière
Echelle 1/250 000 environ.



fig. 4.4.1 b - Erosion régression en bordure de coulée de basalte (cf. cadrage 1) : zone de type A.



fig. 4.4.1 c - Epandage basaltique suivant un ancien thalweg du socle (cf. cadrage 1) : zone de type B.

Cet écoulement entretient une humidité superficielle le long d'un court vallon figurant la trace d'une érosion régressive qui a incisé la bordure de la coulée. A l'aval, cette humidité diffuse dans des formations détritiques disposées en épandages pelliculaires sur les diorites (1d).

Elle y est vraisemblablement reprise progressivement par évaporation. Cette courte "unité hydrologique" est donc caractérisée par :

- une humidité abondante et permanente,
- un cours amont où l'eau est libre et sa présence très localisée, en fort contraste avec un environnement sec (fig. 4.4.1.b),
- un cours aval où l'eau diffuse et imbibe un milieu perméable largement développé avec évaporation depuis la surface.

La composition colorée (fig. 4.4.1.a) fait apparaître très distinctement l'ensemble des zones où se situe l'humidité.

On relève toutefois un accompagnement constant d'encroûtements de sels (blancs, voir fig. 4.4.1.b) à proximité des sources, et de dépôts très clairs sur la zone d'épandage, qui empêchent d'attribuer sans ambiguïté ces signatures de l'image à la présence d'eau (5d).

En outre, la résolution de 70 m rend difficile l'identification des zones humides restreintes, sous quelque concentration que ce soit, puisque des zones vastes constituées d'un milieu en désaturation peuvent être représentées avec la même signature, étendue au prorata de l'aire occupée.

ZONE B : La coloration du sol ne semble pourtant pas systématiquement déterminante ainsi qu'il apparaît sur la zone B (fig. 4.4.1.a et 4.4.1.c).

Cette zone est caractérisée par un paléothalweg du socle qui a fourni un chenal à la progression d'une langue basaltique émanant de la coulée principale. L'eau vraisemblablement présente à l'amont et en particulier provenant de cette coulée transite gravitairement par ce thalweg (1b), dans le basalte "perméable en grand" (4f), au contact des diorites, pratiquement sous la forme d'un sous-écoulement (3e).

A l'aval, l'épandage détritique qui assure un relais perméable au basalte est probablement le siège d'une évaporation en vaste zone, analogue à la partie aval de la zone A mais les matériaux clairs (5d) ici ne sont visiblement pas dominants (fig. 4.4.1.c, arrière-plan dans la moitié gauche de la

photo) et pourtant l'image satellite traitée montre dès le passage de la gorge un panache étendu rose-orange qu'on est tenté d'attribuer à une humidité toujours faible mais certaine.

ZONE D : Sur la même image satellite, on note plus au Nord, de part et d'autre d'une autre coulée (fig. 4.4.1.a), qui s'est épanchée en suivant également un paléo-thalweg du socle, la présence de plages rose-orange (4 à 5 km).

Cette coulée émane du même appareil volcanique en bordure duquel, mais légèrement plus au Nord, on a effectivement observé des trace d'humidité.

Il est très probable qu'elle constitue un "chenal" pour l'écoulement de l'eau de cet appareil (1b), de par la perméabilité en grand du basalte (4f). Bien que la lithologie du socle soit indéterminée (2',3), il est probable que cette eau relativement plus abondante que pour les zones A et B suit la discontinuité et tend petit à petit à être reprise latéralement par capillarité à travers la zone de contact souvent jalonnée de dépôts détritiques fins, puis par évaporation selon la coupe schématique ci-dessous :

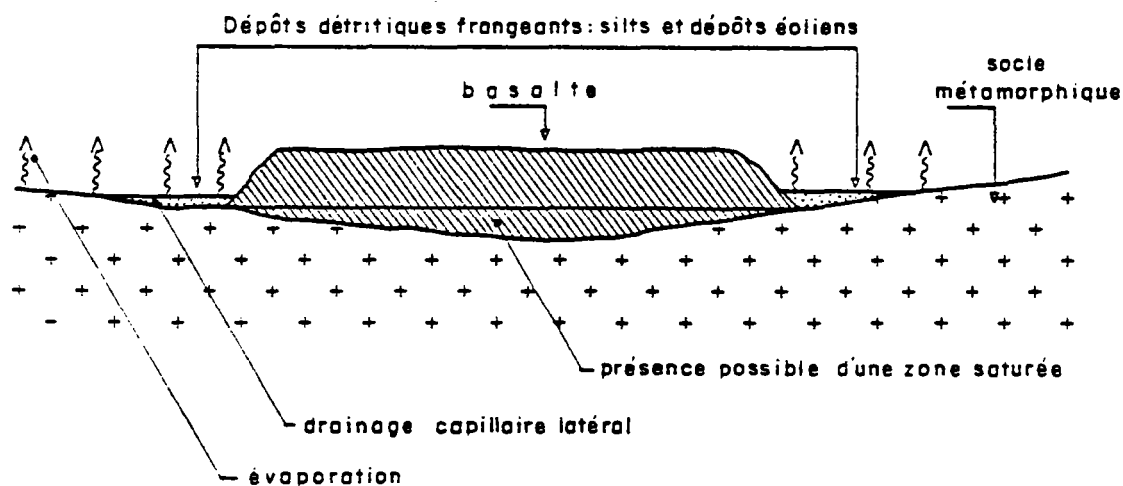


Fig. 4.4.1.d. - Coupe schématique transversale d'une langue basaltique (cf. cadrage 1 et 3)

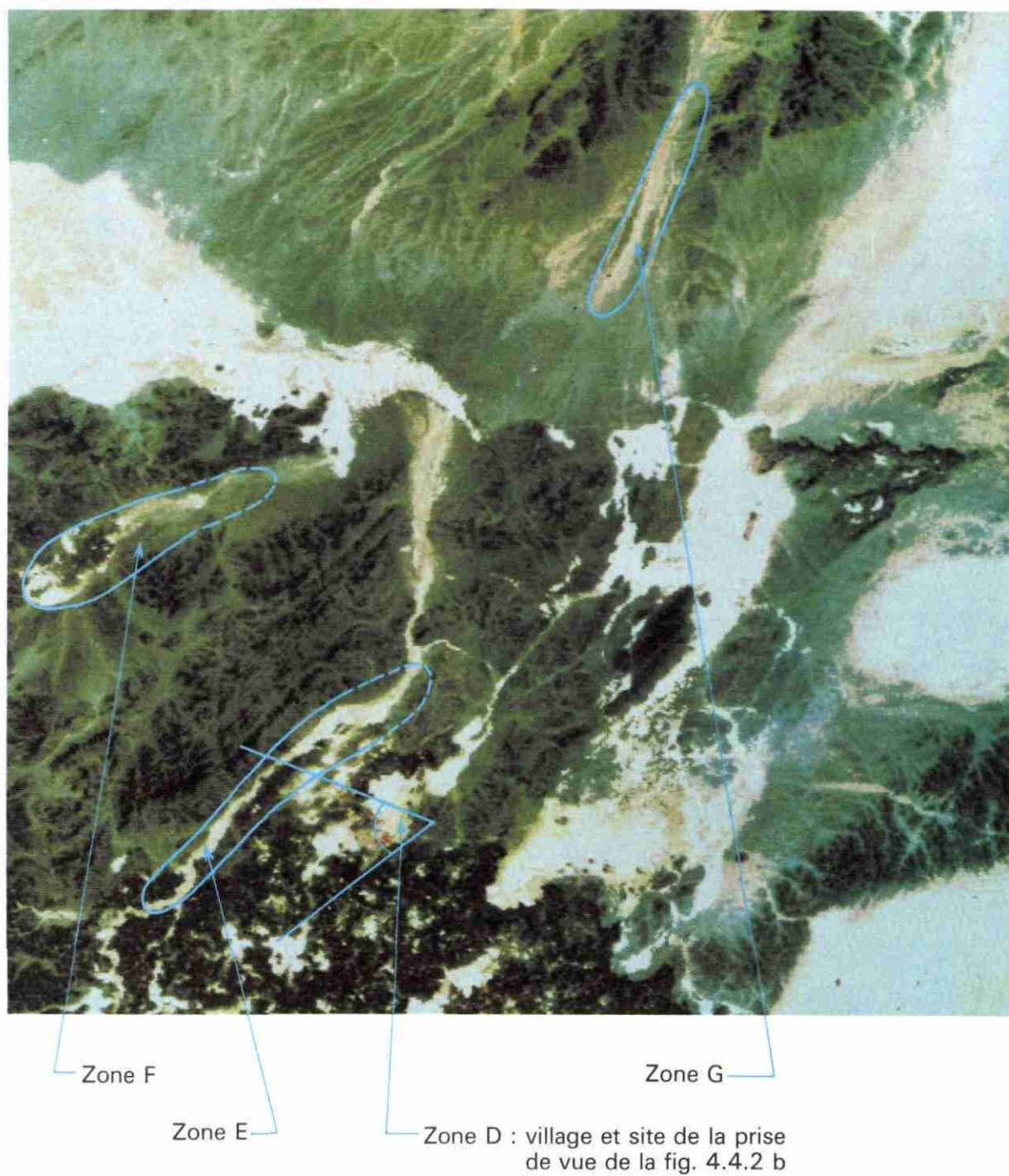


fig. 4.4.2 a - Image colorée sur cadrage 2 - Composition colorée particulière
Echelle 1/250 000 environ.



fig. 4.4.2 b - Village et culture irriguée (cf. cadrage 2) : site de type D.

4.4.2. Coupure n° II : image colorée (fig. 4.4.2.a)

Ce cadrage a été réalisé pour contrôler la constance de ces signatures sur le site connu d'un village et des aires irriguées voisines (fig. 4.4.2.b).

Les traits marquants en sont (les chiffres soulignés renvoient à la fig. 4.4.2.c ci-dessous) :

- 1 : une signature blanche pour les nombreuses petites accumulations de sables éoliens à la surface de la coulée basaltique.
- 2 : une coloration rouge au droit des zones irriguées et cultivées : zone D.
- 3 : une signature par couleurs rose-orange de chenaux qui reçoivent manifestement le sous-écoulement local provenant de la coulée et se comportent en dispositifs évaporateurs : zone E.
- 4 : une signature rose-orange passant au blanc pour les dépressions fermées à efflorescences salines. De telles zones montrent une humidité persistante après les pluies : zone F.
- 5 : une signature rose-orange soulignant des chenaux à la surface des épandages détritiques à faible pente : zone G.

La coupe schématique NE-SW de l'image est la suivante :

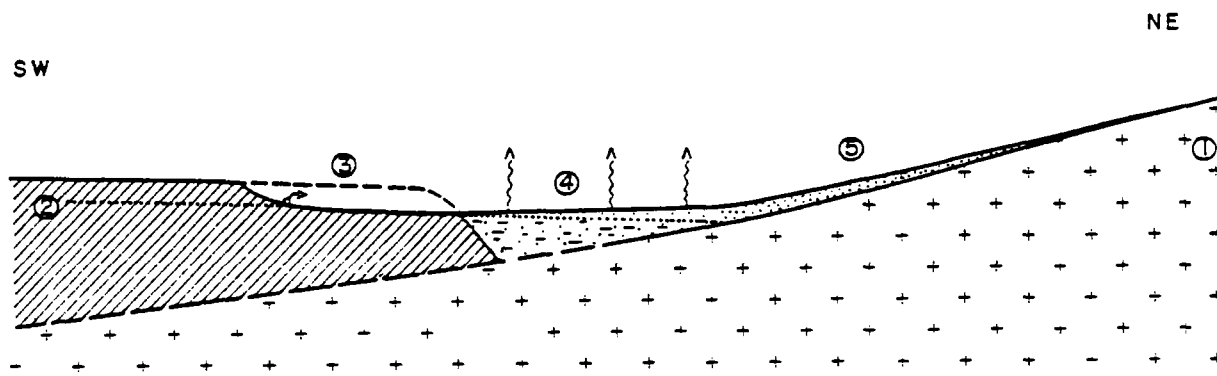


Fig. 4.4.2.c. - Coupe schématique d'une terminaison de coulée basaltique sur socle à contre-pente (cf. cadrage 2) : zone de type E

- 1. Socle métamorphique
- 2. Coulée basaltique
- 3. Erosion régressive sites de type D
- 4. Dépôts détritiques fins et efflorescences salines : évaporation
- 5. Dépôts détritiques pelliculaires en légère déclivité sur socle, sites de type G

On note principalement l'échelonnement des teintes entre le rouge, qui signale les zones irriguées, frangé de orange, qui correspond aux terres fraîchement remaniées, et passant au blanc qui traduit les formations détritiques claires et fréquemment salifères donc réfléchissantes (voir fig. 4.4.2.a).

Cette gamme de couleur correspond probablement à trois valeurs d'un type de réflectance distincte de celle des formations dominantes à l'affleurement qui se signalent pour leur part dans la gamme des bleu-vert.

Le choix de ces zones s'est fait selon les critères du § 4.3 suivants :

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------|
| - 1, 2', 3, 4, 5, 6, 7 et b, d, e, f, | pour les zones D et E |
| - 5, 6, 7 et d | pour la zone F |
| - 1, 2, 3, 6, 7 et a, b, c, f, g | pour la zone G |

ZONE D : Les indices d'humidité superficielle y sont certains. La présence d'eau en surface est entretenue par les pratiques culturales (6).

ZONE E : L'humidité est très probable et justifiée, et la situation amont du basalte en position de réservoir permet de supposer que cette humidité est entretenue et que l'imbibition des dépôts fins est régulière d'une année sur l'autre sinon quasi-permanente (1b). Et dans ces conditions, les teintes significatives rose-orange traduiraient soit une présence d'eau d'imbibition en surface au moment de la prise de vue, soit une réflectance particulière et intense de ces formations. Ceci signifie une absence de patine sur les éléments détritiques et traduit soit une incrustation de sel, soit plutôt un remaniement fréquent, éolien ou par l'eau.

ZONE F : Concernant les dépressions fermées on note, comme sur l'image précédente, une couleur extrême, à dominante blanche manifestement liée à la forte réflectance des dépôts salifères (5d).

ZONE G : Par contre, pour les signatures relevées sur les altérites du socle, à défaut d'information de terrain, on ne peut pas avancer d'interprétation

fiable. Tout au plus peut-on noter que ces panaches apparaissent sur un cône d'épandage situé à l'aval d'un passage étroit entre deux reliefs du socle, qui ferme un petit bassin sédimentaire (voir fig. 4.2.1.c).

Sous réserve de vérification des conditions altimétriques, il est possible que ce petit bassin soit aquifère et qu'il alimente une surverse vers le Sud-Ouest conduisant à une imbibition des altérites qui constituent le cône d'épandage (1b). On observerait alors humidité superficielle et dispersion de l'eau par évaporation, et une signature du même type que ce que nous avons vu précédemment.

Aucun lien notable n'est relevé entre humidité et directions tectoniques sur cette coupure (3g).

4.4.3. Coupure n° III : image colorée (fig. 4.4.3.a)

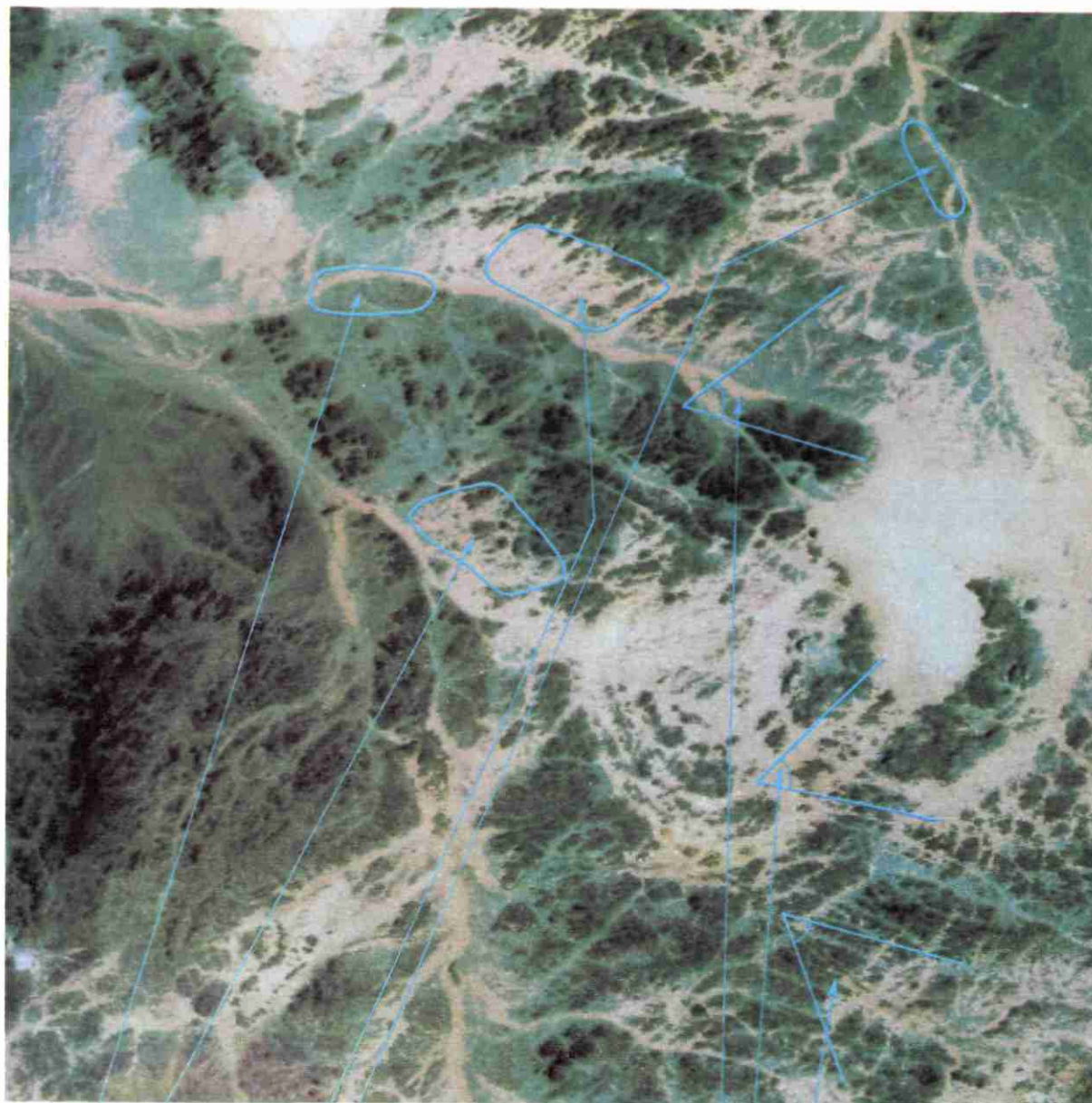
Elle retient l'attention par trois traits marquants :

- la signature rose-orange des arènes des deux batholites granitiques emboîtés : zone H,
- la même signature sur les thalweg des cours (ici amont) des deux oueds présents : zone I,
- la même signature sur certains petits chenaux affluents de ces oueds, principalement ceux qui sont orientés NE-SW, selon une des directions tectoniques principales de l'image (N 70° E) : zone J,
- la même signature que pour la zone C (image I) de part et d'autre d'une langue basaltique très mince : zone K.

Les critères du § 4.3 retenus sont :

- 1, 2, 3, 6, 7 et a, b, f, g pour les zones H, I, J
- 1, 2', 3, 4, 5, 6, 7 et b, d, e, f pour la zone K

ZONE H : La couleur naturelle des arènes est très claire (fig. 4.4.3.b) et constitue peut-être l'élément marquant et responsable de la teinte de restitution sur l'image traitée (fig. 4.4.3.a). Mais il apparaît, sur les vues de terrain, des indices d'une humidité renouvelée sous la forme d'une végétation clairsemée aux endroits où l'arène est peu épaisse, c'est-à-dire au niveau des auréoles qui, au pied des affleurements ou inselbergs, marquent l'enracinement du granite.



Zone I
Zone J
Zone J
Zone I

Zone I : site de prise de vue de la fig. 4.4.3 c

Zone H : site de prise de vue de la fig. 4.4.3 b

Zone K : site de prise de vue de la fig. 4.4.3 d

fig. 4.4.3 a- Image colorée sur cadrage 3. - Composition colorée particulière -
Echelle 1/250 000 environ.



fig. 4.4.3 b - Batholite de granite et couverture arénacée (cf. cadrage 3) : zone de type H.



fig. 4.4.3 c - Dépôt silteux pelliculaire en fond de thalweg (cf. cadrage 3) : zone de type I.



fig. 4.4.3 d - Langue basaltique mise en place dans un paléothalweg
(cf. cadrage 3) : zone de type K.

Dans de telles conditions, il est certain qu'on ne peut pas parler d'une ressource notable puisqu'on est sur un point haut de la topographie et qu'en termes de surface de bassin, on ne peut comptabiliser que la superficie de la partie affleurante du batholite. Mais la présence de végétation malgré ce côté restrictif est à interpréter comme le signe que l'eau, en si faible quantité soit-elle, circule (car la pente est notable) préférentiellement dans l'arène, ne pénètre pas (ou peu) dans le granite et entretient pendant un temps une imbibition superficielle du milieu, prévenant ainsi la formation d'une patine (1a,b).

Teinte claire des dépôts et imbibition périodique allant jusqu'au ruissellement vont encore de pair, en termes de cause à effets, et signalent systématiquement la présence saisonnière de l'eau en surface et en sub-surface.

ZONE I : Les cours des grands drains, saisis ici dans la partie amont, sont nettement soulignés de la même teinte.

L'observation d'une vue de terrain (fig. 4.4.3.c) y signale la présence de matériaux clairs silteux. Compte tenu de la distribution très constante de ces dépôts en fond de thalwegs, il ne peut s'agir de dépôts éoliens (qui seraient d'ailleurs plus grossiers) mais plutôt d'un apport entretenu de matériaux alluvionnaires, ce qui souligne à nouveau le rôle de l'eau, eau de surface cette fois (1a).

L'aspect singulier de ces cours amont par rapport aux cours aval, tient probablement des deux facteurs suivants :

- forme ramassée de la zone collectrice où l'apparition d'un ruissellement est probablement plus fréquente qu'à l'aval (1a),
- origine granitique (silice) d'une bonne partie des matériaux compte tenu de la proximité des batholites, d'où une signature analogue à celle d'une arène (2).

ZONE J : Elle est composée de petits chenaux, affluents du haut cours des grands oueds . Sur l'image colorée (fig. 4.4.3.a) il apparaît une nette direction d'étirement (N 70° C) des panaches colorés caractéristiques que nous recherchons, doublée d'une disymétrie de répartition entre rive gauche et rive droite des oueds concernés.

Trois raisons peuvent jouer dans cette distribution :

- 1) Une sédimentation éolienne selon une direction préférentielle associée à une fermeture systématique de ces chenaux par des reliefs (à l'amont naturellement) jouant le rôle de pièges à sédiments.
- 2) La facilité d'implantation d'un réseau hydrographique en superposition avec une direction tectonique (ici N 70° E). Pour un oued coulant vers l'WNW (zones J1 et J3) ce sont les chenaux affluents de rive droite qui sont concernés, à l'inverse de ceux de la rive gauche qui se disposeront plutôt orthogonalement à cette direction. A l'opposé pour un oued coulant du Sud vers le Nord (zone J2), il s'agira de chenaux affluents de la rive gauche, et c'est effectivement cette distribution que l'on observe. Mais il faut aussi considérer le critère suivant, à savoir
- 3) La lithologie qui peut jouer un rôle par le chimisme, la foliation, la schistosité, etc. (2).

Si la distribution des panaches est liée à une sédimentation éolienne, ceci exclut presque à coup sûr un rôle des eaux de surface, car, quand il existe, le ruissellement est suffisamment répétitif pour être généralement l'agent d'érosion le plus puissant. Or l'image est datée d'un mois de mars, c'est-à-dire à la fin de la période d'humidité et s'il y a eu ruissellement, il n'a pu être déjà oblitéré par des dépôts éoliens. L'eau ayant tendance à éroder les dépôts amenés par d'autres agents de transport, il faudrait, pour que des dépôts éoliens demeurent, qu'un alluvionnement ait lieu dans les mêmes sites, or il n'y a jamais identité entre les conditions qui sont favorables à la sédimentation éolienne et celles qui le sont pour l'alluvionnement.

Donc de deux choses l'une, soit ces chenaux sont systématiquement secs et offrent de bons sites pour l'accumulation de dépôts éoliens*, soit ils sont le siège d'un alluvionnement silteux, c'est-à-dire une manifestation hydrographique**. De ces deux possibilités, la première nous semble la moins probable

* dès lors, il n'y a pas seulement orientation selon une direction, mais également selon un sens unique le long de cette direction, dépendant des vents dominants, ce qui conduit à écarter un effet "d'ombre" parfois observé et consistant en une dispersion éolienne des fines dans les directions et sens du vent dominant à partir d'un léger relief. Ici, ce n'est pas le cas puisque le phénomène s'observe tantôt au Sud-Ouest, tantôt au Nord-Est des reliefs.

** associé ou non à un phénomène éolien ; on parle alors de sédiments "fluvio-éoliens" constitués de sables éoliens sédimentés dans certains vallons selon les conditions dynamiques des vents, puis remaniés et re-sédimentés par les eaux.

car aucune raison apparente ne justifie une absence de ruissellement sélective selon les versants des reliefs. La seconde par contre s'appuie sur la plus grande facilité d'érosion sur une direction régionale de fracturation nette entraînant une orientation préférentielle des chenaux et par conséquent du ruissellement.

Mais cette facilité d'implantation du réseau hydrographique n'est pas seule en cause, car on expliquerait mal que ce soit la direction N 70° E qui soit de préférence soulignée par les petits chenaux alors que d'autres directions tectoniques sont aussi fortement marquées (N 150° E et N 120° E).

En confrontant lithologie et fracturation (fig. 2.1 et 4.2.1.c) on voit que les fractures majeures se traduisent à l'affleurement par la contiguïté d'unités lithologiquement différentes. Le versant rive droite n'est donc pas directement comparable au versant rive gauche quant à la facilité d'implantation des petits thalwegs. Par contre il y a concordance significative entre les limites lithologiques et la distribution des colorations de l'image.

Les roches ainsi mises en cause étant connues pour leur sensibilité à l'érosion (cf. § 2.6), on en revient à un critère mécanique. La surimposition d'une fracturation (3g) et d'une lithologie sensible à l'érosion (2) a ainsi facilité le creusement des thalwegs observés. La densité de fracturation observée pourrait être due à la compétence élevée des roches et à la proximité des accidents majeurs (avec développement de failles conjuguées ou de second ordre dans le cas de grandes failles ou de fractures de Riedel liées à des zones de cisaillement). On voit d'ailleurs entre les zones J1 et J3 un léger changement de direction de l'axe des thalwegs allant dans le même sens que celui des drains majeurs.

ZONE K : Une langue basaltique très mince mais très étirée (plusieurs dizaines de kilomètres) est flanquée de deux franges de sédiments probablement humides qui apparaissent sur l'image traitée de la même façon que ce qui fut observé pour la zone C (1b).

La vue de la figure 4.4.3.d montre une perspective vers le S.E de cette structure sur laquelle on observe que des puits ont été creusés (6) à même le basalte, c'est-à-dire plus ou moins précisément vers l'axe du paléothalweg (premier plan à gauche) dans le but d'exploiter le sous-écoulement probable (3e).

Les critères (8) définition de l'échelle optimale de travail et (9) choix de la saison de prise de vue, sont discutés dans la conclusion.

5. CONCLUSION

L'application de la télédétection à l'hydrogéologie en zones arides doit apporter une aide certaine au stade de la prospection.

Deux types de traitements adaptés viennent d'être testés sur des zones pour lesquelles on possédait une "vérité-terrain". Ils s'ajoutent aux documents déjà couramment utilisés (mosaïque des images aériennes, image satellite en couleurs pseudo-naturelles ("true-false color")).

Il s'agit de dérivées noir et blanc adaptées à la définition du réseau de fractures et d'un traitement coloré par combinaison de canaux obtenus par étalement dynamique orienté vers la recherche des indices d'eau. L'utilisation des dérivées permet directement de tracer des cartes des réseaux de fractures et linéaments en zone de socle affleurant. Le deuxième traitement conçu à titre d'essai a été jugé positif.

Il a d'abord conduit à une constatation ayant trait au phénomène lui-même : dans l'environnement étudié, les formations détritiques de couleur claire sont liées à une présence récente de l'eau, et par conséquent une présence répétée, qu'il s'agisse de silts fraîchement déposés sans patine ni reprise d'altération, d'incrustation de sel à la surface, tantôt très ténue qui assure juste une cohésion entre les fines, tantôt abondantes (dépressions fermées), on relève chaque fois à l'origine une présence d'eau, soit eau de surface, soit imbibition accompagnée d'évaporation.

L'intensité des signatures dans la gamme des rouges, est nettement en rapport avec une concentration d'eau. Toutefois, pour les faibles intensités (teintes claires) la réponse intègre la réflectance de certains types de formations. Elle ne permet pas, dans ce cas, une identification sans ambiguïté, plusieurs effets au sol fournissant la même signature. Lorsque, par ces indices, on relève une présence d'eau, la superficie des panaches représente exactement l'extension des zones à humidité temporaire ou permanent indépendamment de la notion de concentration.

On doit donc admettre que l'on sait localiser les zones où l'eau est présente à l'état libre ou en imbibition dans les formations poreuses, et que l'on parvient dans certains cas à préciser la teneur en eau de la zone qui se

signale. En aucun cas on ne met directement en évidence un indice d'eau sous la surface du sol : seul le croisement de ces informations avec les résultats d'une analyse géomorphologique permet de raisonner en termes d'hydrogéologie, principalement en suivant l'orographie, ce qui permet de comprendre la succession des aires d'alimentation, aires d'écoulements libres ou souterrains, aires de concentration de ces écoulements et aires de dispersion par évaporation.

Ce type d'analyse se situe dès les préalables de la première reconnaissance de terrain et permet par la suite de hiérarchiser les résultats des observations au fur et à mesure de leur acquisition.

L'échelle de travail est conditionnée par la résolution de Landsat (taille du pixel 60 x 80 m). En règle générale, l'échelle de restitution des documents doit permettre de distinguer le pixel sans effort d'accommodation.

Pour des travaux de reconnaissance, le 1/250 000 et le 1/500 000 ont cet avantage (\approx 3 pixels dans le millimètre), doublé de celui de rendre les documents superposables avec les cartes existantes. Pour des repérages plus fins, il convient de travailler au 1/125 000 ou 1/100 000 ; échelles où le lissage optique est moins sensible mais auxquelles on a la certitude de ne pas perdre les informations ponctuelles de l'image.

Le choix de la saison de prise de vue, dépend des phénomènes que l'on cherche à mettre en évidence.

En pays de contraste entre période sèche et période humide - ou sensée l'être - il conviendrait de contrôler, sur un cycle, l'évolution des signatures, en extension et intensité, en particulier dans l'idée de suivre l'évolution de la recharge des aquifères.

*
*
*

