

**UTILISATION DES DONNEES SPECTRALES MSS, TM ET SPOT,
EXPRIMEES EN VALEUR DE REFLECTANCE EXO-ATMOSPHERIQUE
POUR L'ETUDE DIACHRONIQUE DE L'EVOLUTION DES SOLS, DES
ZONES D'EXPLOITATION MINIERE OU DU COUVERT VEGETAL**

**BILDGEN P.¹, GILG J. P. ², GEROYANNIS H.²,
BOULEGUE J.¹, MABRUT K.¹**

RESUME

L'utilisation simultanée ou conjointe des données MSS, T.M. ou SPOT, dans le cadre d'une étude diachronique de la dynamique de phénomènes tels que l'évolution de sols, de zones d'exploitation minière ou du couvert végétal par exemple, est entravée par le fait que les données fournies par ces capteurs ne sont pas cohérentes les unes par rapport aux autres. Divers facteurs, les uns relatifs aux caractéristiques technologiques (méthode d'égalisation des détecteurs, taux de saturation de ces derniers, pouvoirs de résolution spectrale et spatiale, position des orbites), les autres essentiellement liés aux influences atmosphériques, font que les données brutes ainsi obtenues - exprimées en valeurs de luminance apparente et codées sur des niveaux variables - ne peuvent être utilisées telles quelles dans le but d'une étude diachronique précise de la signification ou de la variation spatio-temporelle des mesures. Elles ne peuvent pas non plus être confrontées aux mesures radiométriques de terrain ou de spectrophotométrie de Laboratoire, qui sont exprimées en termes de pourcentages de réflectance ou d'absorbance. Afin de pouvoir utiliser plusieurs scènes provenant de capteurs différents, mais relatives à un même objectif, on procède à une série de corrections destinées à exprimer les valeurs des données brutes en valeurs de réflectance pour cent, ramenées au niveau du capteur (réflectance exoatmosphériques). Les données ainsi traitées sont ensuite rééchantillonnées et corrigées géométriquement: quelque soit leur origine, elles sont donc comparables entre elles et avec les mesures de terrain. Le contrôle de la mesure et des signatures spectrales est alors assuré. Les exemples concernant l'évolution de l'exploitation de zones bauxitiques haïtiennes, le repérage de zone d'indurations ferrugineuses au Brésil ou la salinisation de sols dans la Crau, sont présentés pour illustrer la validité de ces traitements.

Depuis 1972, date du premier lancement de Landsat 1, les données acquises par les différents capteurs (Landsat MSS, T.M. et Spot 1) constituent un vaste potentiel d'observations de la Terre pouvant être utilisé pour réaliser des études diachroniques relatives à l'évolution de phénomènes déterminés, soit en utilisant plusieurs données fournies par un même capteur, soit en analysant les données relatives à un même objectif, mais provenant de capteurs différents.

¹Laboratoire de Géochimie et Métallogénie (URA CNRS 196), U.P.M.C. Paris

²Centre d'Analyse et de Mathématiques Sociales (CAMS/EHESS, U.M CNRS 38001 7), Paris.

Une telle conception de recherche implique d'abord la maîtrise de la coordination spatio-temporelle des données numériques fournies, lesquelles sont généralement constituées par des valeurs numériques dont la signification et la précision sont primitivement incompatibles entre elles, car elles sont liées aux caractéristiques technologiques propres du capteur dont elles sont issues ainsi qu'aux conditions physiques extérieures régnant à l'instant de leur acquisition.

Ainsi le premier objectif à atteindre concerne la transformation de ces données numériques primitives en mesures physiques contrôlables et, par là-même significatives, car ce sont ces dernières qui pourront assurer :

- 1°) la compatibilité des données par rapport aux différents systèmes d'acquisition dont elles sont issues ainsi que le contrôle de la répétibilité des mesures;
- 2°) l'étude et la validation des signatures spectrales obtenues ainsi que leur confrontation avec les résultats des mesures radiométriques de terrain ou de spectrophotométrie de laboratoire;
- 3°) enfin, l'utilisation conjointe de données issues d'un même capteur, obtenues à des dates différentes ou de données provenant de capteurs différents pour estimer, sur un même site, les variations physico-chimiques qui peuvent être décelées ou celles de la dynamique des différents systèmes (agro-système, éco-système, et.) qui le composent.

1- CHOIX DES UNITES PHYSIQUES DE REFERENCE

Compte tenu du domaine spectral dans lequel sont situés la plupart des canaux des capteurs MSS, TM et Spot, c'est à dire le visible et le proche infra rouge, le choix des unités de mesure physique permettant la comparaison entre les différentes données numériques se trouve limité.

Seules les mesures de luminance, d'absorbance ou de réflectance pourront être retenues car elles correspondent au principe même de la télédétection spatiale qui est basé sur la mesure de la variation des quantités d'énergie restituées ou réémises par les objets situés à la surface des zones observées.

Les courbes représentatives de ces variations constituent la signature spectrale d'un site déterminé. En particulier les zones d'absorption sont essentiellement liées à des notions physico-chimiques précises (transitions électroniques se produisant au sein d'éléments de transition situés au sein de structures cristallines, dans le visible; absorption d'énergie due à l'excitation des vibrations dans les liaisons fondamentales de groupes anioniques tels que OH, CO₃, SO₄, etc. dans l'I.R.) et permettent d'en caractériser les principaux composants (travaux de Hunt G.R. et Salisbury J.W. (1970-1971), Maquet et Cervelle et Gouet (1981, etc.).

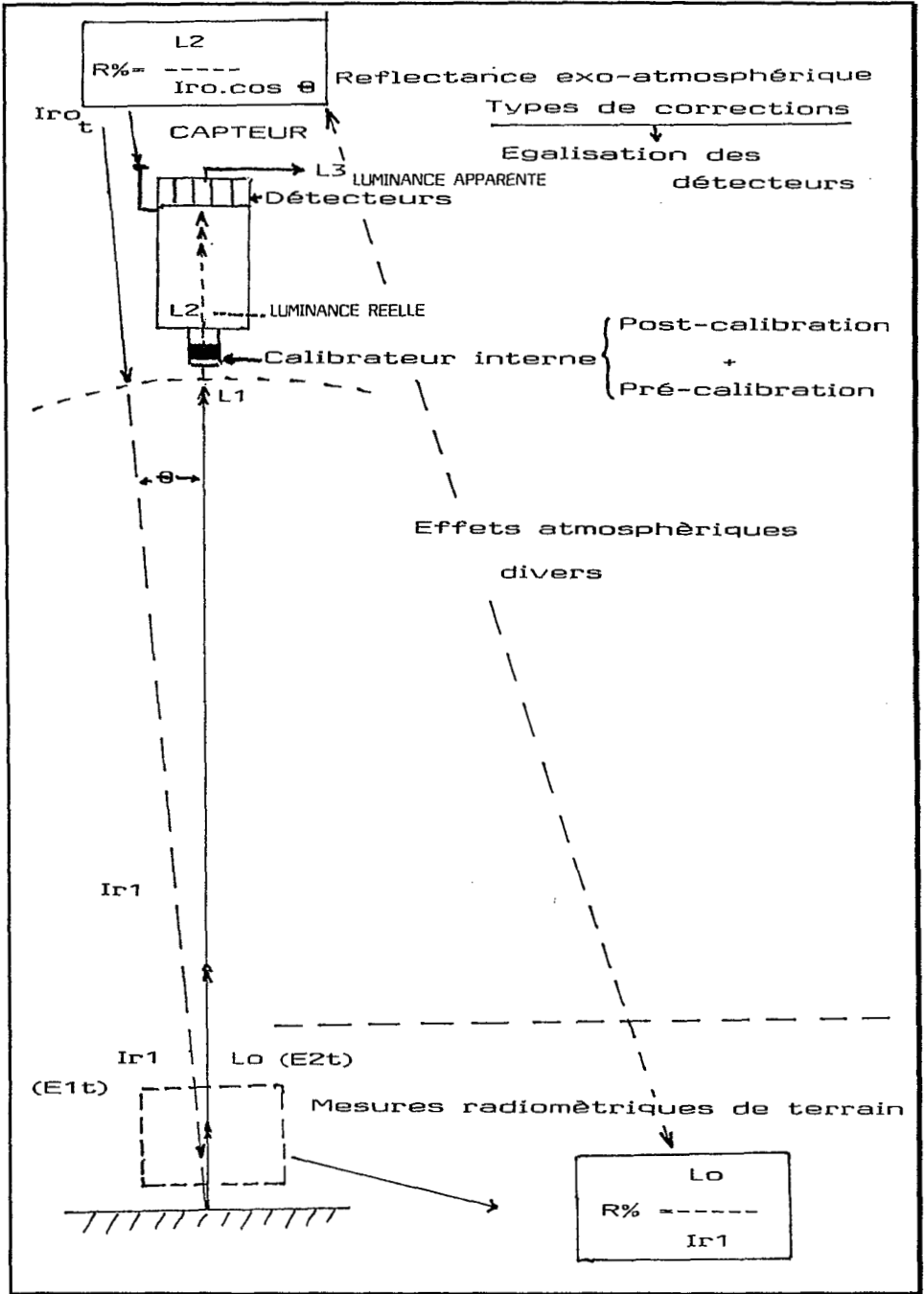


Figure n°1 : Schéma du principe de corrections

De plus les mesures radiométriques de terrain qui peuvent servir de référence pour l'étude d'un site test donné, ainsi que les analyses spectrométriques des échantillons qui y sont récoltés sont exprimés dans ces mêmes termes.

Ainsi, il apparaît clairement que pour une analyse significative des mesures conduisant à une quantification physique des données, les transformations des produits numériques primaires en termes de luminance ou réflectance est une nécessité.

Les diverses modalités de telles transformations ont fait l'objet de travaux récents qui convergent tous vers la même conclusion (Markhan B.L. et Barker J.L. (1987); Price J.C. (1987); Slater et al. (1987).

2- LES CONTRAINTES DE TRANSFORMATION

Toutes ces recherches visent à éliminer l'influence des diverses contraintes dues aux facteurs technologiques ou aux facteurs physiques (surtout atmosphériques) qui contribuent à la dégradation de la qualité de la mesure de luminance.

Pour ce qui concerne les contraintes liées aux facteurs technologiques il s'agit surtout, et dans tous les cas, de tenir compte des traitements effectués relatifs à la technique d'égalisation des détecteurs. De plus dans le cas d'utilisation de capteurs différents il sera nécessaire de tenir compte des caractéristiques de leurs pouvoirs de résolution spatiale et spectrale respectifs.

Le problème se pose donc de la manière suivante : (fig.1) :

Pour un canal donné, un objet X, observé par un capteur à l'instant t , reçoit une énergie E_{1t} , dont la valeur est différente de celle de l'irradiance I_0 mesurée hors atmosphère par le capteur. Cette différence d'énergie est due aux diverses réflexions et réfractions subies par le rayonnement au cours de son trajet dans l'atmosphère.

L'objet X réfléchit une énergie E_{2t} correspondant à sa luminance L_0 . Pour les mêmes raisons la valeur de cette luminance est aussi modifiée lors de son trajet retour vers l'optique du capteur L_1 . A ce niveau une première correction est effectuée. Ce type de correction est réalisée en appliquant des coefficients de calibration interne calculés lors de la pré-calibration et au cours du vol, où ils sont régulièrement réajustés grâce à des mesures précises effectuées sur le site de White Sands (P.N. Slater et al, 1987).

On estime généralement que cette calibration permet d'obtenir une valeur de luminance L_2 très proche de la valeur réelle de luminance de l'objet X car elles se trouve ainsi corrigée des effets atmosphériques (Figure n° 2) (J.C. Price, 1987; P.M. Teillet et al, 1990; M. Leroy et al, 1990; B. Guenthet et al, 1990; G. Begni et al, 1986).

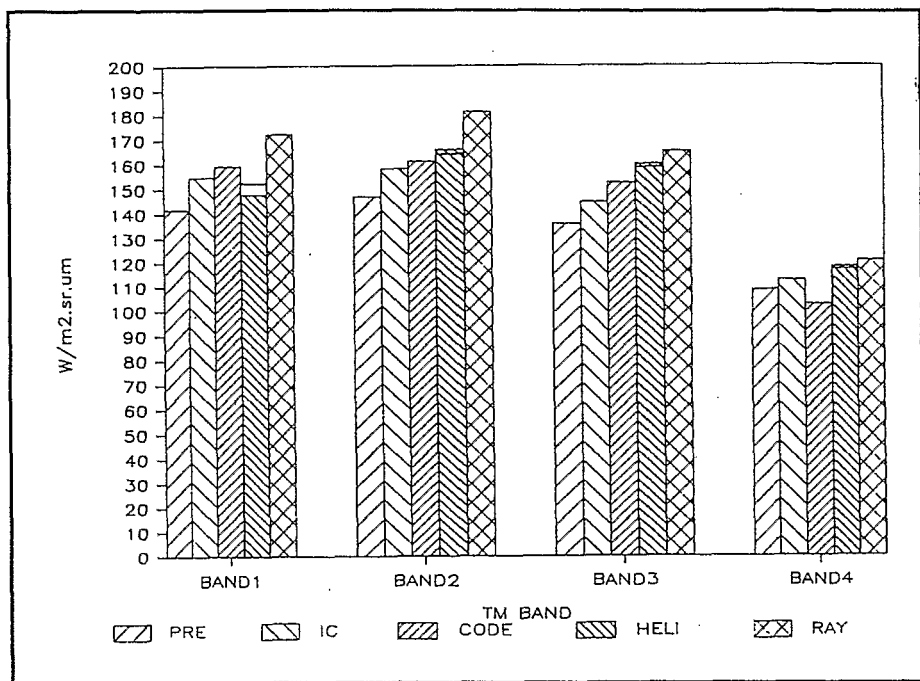


Figure n° 2 : comparaison des valeurs de luminance obtenues pour les 7 canaux TM en utilisant la précalibration (PRE), les valeurs déterminées au sol et corrigées par mesures atmosphériques (code Herman de transfert radiatif) (CODE), la calibration interne (IC), des mesures effectuées par hélicoptère (HELI), des valeurs calculées comme celles utilisées dans CODE mais en atmosphère Rayleigh (RAY) (in P.N. Slater et al, 1987).

L'énergie correspondant à la luminance L2 arrive ensuite sur les détecteurs. Ceux-ci, en nombre variable suivant le type de capteur (6 détecteurs dans chacune des quatre bandes pour MSS, 3000 détecteurs par canal pour Spot1), ne possèdent pas exactement les mêmes caractéristiques technologiques. Ceci explique que l'image d'une scène parfaitement uniforme se trouve affectée par deux phénomènes perturbants qui sont d'une part le bruit généré par le détecteur lui-même auquel s'ajoute, après numérisation, le bruit de quantification, et d'autre part, par les sensibilités différentes des détecteurs à l'énergie incidente, ainsi qu'au courant d'obscurité propre à chacun d'entre eux (M. Leroy, 1986). Il est donc nécessaire de procéder à une nouvelle correction dite d'égalisation. Après ces diverses opérations on procède à la quantification et à la calibration des données pour être distribuées aux utilisateurs (L3 ou luminance apparente).

Par rapport à ce schéma général les mesures radiométriques de terrain apparaissent comme d'excellents indicateurs des valeurs de réflectance d'un objet donné. En effet, sur le terrain, on mesure l'énergie incidente E1t et la luminance E2t qui ne sont pratiquement pas affectées par un effet atmosphérique supplémentaire puisque les radiomètres sont placés à quelques mètres au plus de la surface du sol.

De même au niveau du capteur la valeur de luminance L_2 peut être comparée à la valeur de l'irradiance I_0 et fournir ainsi une valeur de réflectance extra-atmosphérique compatible avec celle obtenue à terre, par radiométrie.

3- PRINCIPE DES CORRECTIONS

C'est ce schéma que nous avons retenu pour effectuer les corrections nécessaires pour rendre compatibles les données numériques provenant de capteurs différents. Mais il est nécessaire de souligner qu'on peut, théoriquement, aborder le problème d'une autre manière. Celles-ci consisterait à procéder à des corrections atmosphériques à l'aide de modèles de transferts radiatifs appliqués à la réflectance apparente afin de déterminer la luminance du site, hors atmosphère. Un tel modèle de calcul existe (logiciel "5S" en particulier, du Laboratoire d'Optique Atmosphérique de l'Université de Lille (D. Tanré et al., 1986).

Cependant en dépit d'une parfaite structuration, ce logiciel est difficilement applicable au niveau d'étude diachronique de secteurs plus ou moins isolés géographiquement car il nécessite, pour être précis, l'utilisation de nombreuses données relatives aux qualités physiques de l'atmosphère le jour de l'observation de la scène étudiée, qui sont actuellement extrêmement difficiles à obtenir.

Les opérations que nous avons effectuées pour transformer les données fournies (corrigées des "erreurs système") et exprimées en termes de luminance apparente, en termes de réflectance sont basées finalement sur le schéma suivant :

1°) Partant des valeurs de luminance apparente des bandes commercialisées, il est possible de recalculer la luminance réelle des pixels car les calculs d'étalonnage absolu, qui consistent à déterminer un coefficient de proportionnalité entre cette luminance et les données numériques corrigées par les coefficients d'égalisation, fournissent précisément ces coefficients.

On retrouve la valeur L_2 de luminance observée au niveau de la calibration interne. Les mesures de la valeur de l'éclairement solaire et de l'angle d'élévation du soleil étant également connus, pour la période d'observation, il est donc possible de calculer la valeur de la réflectance.

Pour les corrections relatives aux données Spot, nous nous référons aux travaux de M. Danguirard (1986) tandis que pour traiter les données Landsat MSS et T.M., nous utilisons celles préconisées par Brian L. Markham et John L. Barker (1987).

2°) Après transformation, il est possible de comparer les valeurs de réflectance calculées à celles relevées sur le terrain par campagnes radiométriques ainsi qu'à celles obtenues par mesures spectrophotométriques des échantillons récoltés.

Les exemples qui suivent montrent qu'il existe une très bonne corrélation entre les deux types de valeurs.

4- LIMITES DE VALIDITE DE LA METHODE

L'intérêt de telles transformations est de rendre compatibles des données fournies par des capteurs différents, puisque pour un même objectif, les valeurs des pixels sont exprimées dans la même unité physique de mesure : la réflectance.

Cependant de nombreuses précautions doivent être prises pour assurer la validité de ces traitements. Par exemple, la donnée de départ doit correspondre à une visée la plus verticale possible, l'expérience prouvant que la radiométrie des pixels est dégradée lorsqu'on utilise des données réalisées en visée latérale. La date de l'acquisition doit également être sélectionnée car pour conserver une signification précise aux valeurs traitées, il est nécessaire que celles-ci ne soient pas affectées par des ombres trop importantes ni par un abaissement de la luminance dû à une période pluvieuse récente par exemple. On choisira donc des données correspondant à des périodes climatiques sèches et à une élévation solaire la plus proche possible de la position zénithale.

Pour ce qui concerne les études réalisées à l'aide de données provenant de capteurs différents, en plus des facteurs énumérés ci-dessus, il est nécessaire de tenir compte des pouvoirs de résolution spatiaux des capteurs utilisés. Ceci implique que les sites dont on souhaite effectuer le suivi doivent être suffisamment étendus pour être couverts par des pixels MSS à l'intérieur desquels les pixels T.M. et Spot pourront être repérés.

Pratiquement, après avoir réalisé la conversion des données numériques de luminance apparente en réflectance, on peut procéder au rééchantillonnage des pixels d'une donnée à l'autre par la méthode du plus proche voisin puis effectuer les corrections géométriques nécessaires au recalage des images. Pour réaliser ces dernières, on calcule à partir d'amers la transformation de la trame qui permet la rectification (modélisation polynomiale de degré 5 au maximum basée sur l'estimation par moindre carré). Ainsi la superposition des données traitées en valeurs de réflectance est assurée; leur comparaison tant au niveau des aplats numériques qu'à celui des compositions colorées est facilitée.

L'influence des pouvoirs de résolution spectrale des capteurs doit aussi être prise en considération pour l'interprétation radiométrique des valeurs calculées et la comparaison de leurs termes d'une donnée à une autre ou avec des valeurs de référence (radiométriques ou spectrophotométriques). Par exemple il est commun de considérer que les canaux MSS4 et TM2 sont équivalents puisqu'ils couvrent des bandes spectrales allant respectivement de 500 à 600nm et de 520 à 600 nm. Or, lorsqu'on considère non pas les valeurs correspondantes aux bandes spectrales de ces canaux mais l'allure des courbes relatives aux réponses des filtres qui les constituent, on voit qu'elles ne sont pas identiques. Ceci explique les constantes différences qu'on observe pour les valeurs de réflectance obtenues relatives à un même objectif invariant, lorsqu'on les calcule soit à l'aide de données MSS, soit à l'aide de données TM. Par exemple les valeurs de réflectance calculées pour la végétation sont de l'ordre de 10 à 13% en moyenne pour MSS4 et de 8 à 10% sur la même zone observée avec TM2 (fig. n° 3). On peut mieux contrôler ces paramètres en calculant les moments radiométriques des bandes utilisées afin d'en définir les limites spectrales effectives (travaux de J.M. Palmer (1984)).

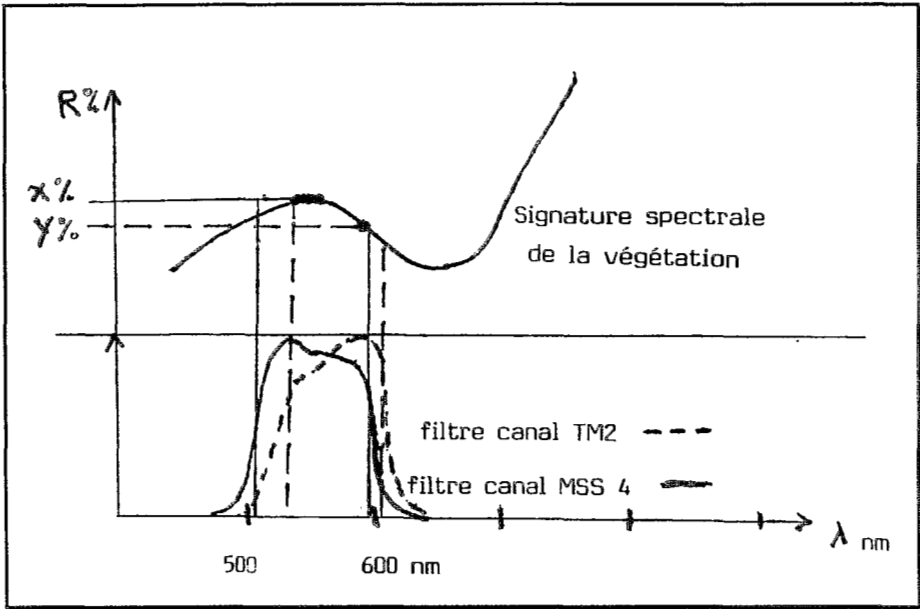


Figure n° 3 : Explication schématique de l'influence des filtres correspondant à un canal donné, sur les valeurs de réflectance mesurées.

Pour les mêmes raisons, il est également nécessaire de contrôler avec précision la réponse des filtres utilisés pour effectuer les mesures radiométriques de terrain si on souhaite utiliser ces dernières comme référence.

Enfin, le contrôle des domaines de saturation (sous saturation, sursaturation) des détecteurs utilisés, tant au niveau des appareils de terrain que de celui des capteurs satellitaires, doit être effectué le plus précisément possible. En effet, le phénomène de saturation des détecteurs conduit à obtenir des valeurs de luminance totalement erronées, non représentatives des réponses spectrales. A ce titre, le processus de correction appliqué aux données T.M et MSS est très satisfaisant puisqu'il tient compte des valeurs minima et maxima de luminance pouvant être réellement mesurées à l'aide des détecteurs relatifs à chaque canal.

5- EXEMPLES D'APPLICATIONS

Ce type de traitement permet de contrôler rapidement l'évolution dans le temps de certains phénomènes dans divers domaines. Voici, à titre d'exemples, les résultats que nous avons obtenus concernant l'évolution de zones d'exploitation minières, la localisation précise de cuirasses ferro-alumineuses, ou la localisation de salinisations temporaires de sols cultivables.

A. EVOLUTION DE L'EXPLOITATION DU MINERAI BAUXITIQUE DU ROCHELOIS (SUD D'HAITI)

Le plateau du Rochelois est une vaste surface calcaire karstifiée, sur laquelle ont été transportés des produits bauxitiques résultant du démantèlement de profils latéritiques formés par altération de basaltes tholéitiques chevauchant ce plateau. Par lessivage secondaire, ces produits latéritiques ont été "affinés" dans les dolines et les karsts, et, actuellement, une bauxite essentiellement gibbsitique et hématitique forme une épaisse couche (4 à 5 m d'épaisseur) très homogène dans sa composition minéralogique, qui recouvre une grande partie du secteur. Cette bauxite a fait l'objet d'une intense exploitation et le suivi de celle-ci peut être parfaitement réalisé par télédétection spatiale. Nous avons retenu ce site car il avait fait l'objet de nombreuses mesures tant minéralogiques que géochimiques (P. Bildgen, 1985) et radiométriques.

De plus, par sa superficie et son homogénéité, il constituait un site très favorable pour une étude diachronique expérimentale, à l'aide de données Landsat 2 MSS et de données Landsat 5 TM.

Après transformation des données de luminance apparente en valeurs de réflectance, nous avons procédé au rééchantillonnage de la fenêtre MSS en pixels 30 X 30 compatibles avec la donnée TM. L'extraction des valeurs de réflectance relatives au minerai d'une part et au faible couvert végétal qui se développe localement montre que (Fig. 4) :

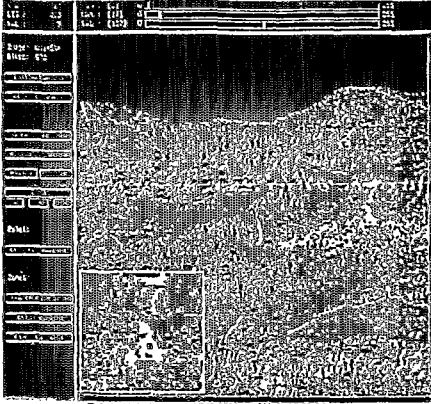
- les valeurs de réflectance de la donnée MSS (du 17.1.1979) et celles de la donnée TM (du 8.9.1986) relatives au minerai, sont en parfait accord avec celles mesurées sur le terrain et avec celles des mesures spectrophotométriques réalisées sur les échantillons de surface, récoltés au lieu même des mesures. On, notera qu'ici, compte tenu de la très faible, voire inexistante évolution actuelle de la composition minéralogique du minerai, il est possible de retenir les 9 valeurs de réflectance extraites des données MSS (4 canaux) et des données TM (5 premiers canaux étudiés).

Par rapport à la courbe spectrophotométrique de cette bauxite, on peut noter :

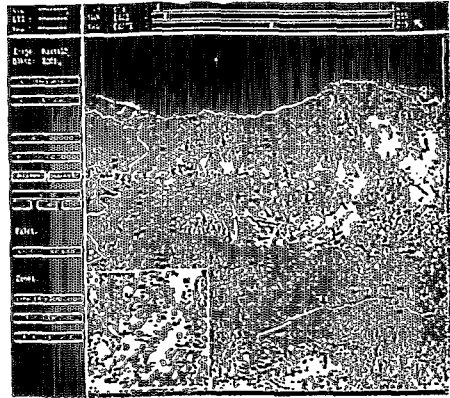
- 1°) que toutes les valeurs extraites sont très proches des valeurs de la courbe;
- 2°) que pour certains couples de canaux comme MSS4-TM2, MSS5-TM3, MSS7-TM4, on retrouve bien des valeurs radiométriques légèrement différents, ces différences étant dues aux variations des propriétés spectrales des filtres constituant ces canaux (voir aussi Fig. n° 3). Seules les valeurs de réflectance relatives au canal 5 sont inférieures à celles qui furent mesurées.

La même remarque peut être également appliquée aux valeurs de réflectance relatives à la végétation (qui elle aussi, ne subit pas non plus de véritables transformations). Enfin, on peut mettre en évidence l'évolution de la zone d'exploitation du site dont le front d'extraction a fortement progressé vers l'ouest, entre 1979 et 1986 (Fig. n° 4).

EVOLUTION DE L'EXPLOITATION DU MINERAL BAUXITIQUE DU ROCHELOIS (HAÏTI)



LANDSAT 2 MSS du 17/01/79 CANAL 5
Réflectance % , Réchantilloné en 30X30

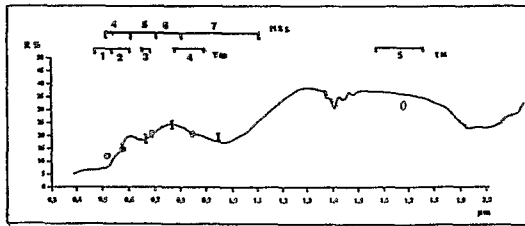


LANDSAT 5 TM DU 8/09/86 , CANAL 3
Réflectance %

CANAL	Valeurs des pourcentages de réflectance	
	le minéral	la végétation
TM 1	12 - 13%	10-11%
TM 2	12-13-14%	9-10%
MSS 4	12-13%	9-10%
TM 3	17-18-20-21%	9-10-11%
MSS 5	17-18-19-20%	7-8%
MSS 6	20-21-22-23%	11-12%
TM 4	18 - 19%	24 - 25%
MSS 7	15 - 16%	24 - 25%
TM 5	26 - 31%	17 - 19%

Comparaison des valeurs de réflectance du minéral et de la végétation qui l'entoure, obtenues pour 1979 et 1986. (La connaissance du terrain assure la très faible variation physique de ces deux cibles).

On peut seulement constater l'évolution de l'exploitation du site , dont le front d'extraction a été fortement déplacé vers l'Ouest, entre 1979 et 1986 (Figure n° 2)



Comparaison des valeurs des pourcentages de réflectance observés à l'aide des deux données satellitaires traitées, avec la réponse spectrale du minéral, étudiée par spectrophotométrie.
O = valeurs extraites de TM (1986)
I = valeurs extraites de MSS (1979)

Figure n°4

B. REPERAGE DES ZONES DE CUIRASSES FERRO-ALUMINEUSES DANS LE SECTEUR DE TUCURUI (ETAT DU PARA, BRESIL)

Situé sur la rive ouest du fleuve Tocantin, le site de Tukurui est une des zones amazoniennes ayant subi une intense déforestation. La ville est dominée par des collines localisées sur la bordure orientale du craton amazonien où les roches les plus anciennes sont représentées par des gneiss et des amphibolites. Sur ce socle repose, en discordance, un ensemble protozoïque moyen à supérieur dont la partie inférieure (Formation Caraïpe) est la seule à posséder un épais manteau d'altérites ferro-alumineuses, localement cuirassées à leur partie supérieure).

Cette zone fait actuellement l'objet de nombreuses études (B. Hiéronymus et al, 1989) et, pour compléter les données topographiques très sommaires qui existent ainsi que pour compléter les études de terrain, nous avons acquis des données Spot de ce secteur. Le traitement de ces données, en termes de réflectance, permet de localiser très précisément les zones de cuirasses ferro-alumineuses, notamment dans les secteurs non déboisés, où ces relais permettent de suivre l'extension du manteau d'altérites. En effet, ces aires sont assez dégagées, recouvertes localement de quelques zones d'herbe rase, et parsemées de quelques mares d'eau temporaire. Leur périphérie est marquée par une végétation arbustive secondaire qui forme une auréole caractéristique de faible largeur et la forêt primaire lui fait suite. Sur les premières compositions colorées que nous avons effectuées, la distinction de ces zones était très délicate (P. Bildgen et al, 1988). En revanche, le nouveau traitement utilisé permet de distinguer clairement ces diverses unités (Fig. n° 5) et d'extraire rapidement les réponses spectrales qui les caractérisent.

C. MISE EN EVIDENCE D'UN PHENOMENE TEMPORAIRE : LA SALINISATION DE SOLS AGRICOLES DANS LE DELTA DU RHONE

La connaissance ou le contrôle du déroulement des phénomènes qui interviennent dans les déséquilibres physico-chimiques ou socio-économiques de notre planète fait partie des objectifs prioritaires actuels de recherche. Dans ce cas l'outil télédétection présente de grands avantages car il permet souvent une approche régionale de l'étendue du phénomène à étudier. Le problème de la salinisation des sols, notamment dans les régions agricoles est typiquement l'un de ces cas. Dans le but de réaliser une modélisation de ce phénomène encore mal maîtrisé, nous avons choisi d'étudier le delta du Rhône, comme premier site test significatif. En effet, en dehors des zones de salinisation naturelle due aux influences maritimes localisées dans la partie la plus méridionale du delta (cordons littoraux, bordures de Vaccarès, salins naturels et artificiels de la région de Salin de Giraud) il existe en Camargue et en Crau des secteurs agricoles dont l'économie est perturbée par des phénomènes de salinisation temporaire dont l'origine fait encore l'objet d'hypothèses variées.

Pour aborder ce problème, nous avons travaillé sur des données MSS et TM correspondant d'une part à une période de salinisation (données MSS d'août 1977) et d'autre part à une période de non salinisation (données TM de juillet 1984). Après avoir procédé aux transformations nécessaires à la compatibilité de ces deux données (calcul des valeurs de réflectance, rééchantillonnage des pixels, corrections géométriques) nous avons sélectionné des fenêtres correspondant d'une part à des secteurs de salinisation constante servant de référence radiométrique (par exemple les zones de salins) et d'autre part aux secteurs les

plus sensibles aux salinisations temporaires. Parallèlement, des mesures de terrain ont été effectuées (campagnes radiométriques, récolte et analyse minéralogique des sols, analyses chimiques de leurs constituants) (P. Bildgen et al., 1988).

Les réponses spectrales des zones salines extraites de ces données sont comparées à celles obtenues par radiométrie de terrain. On définit ainsi les canaux les plus pertinents pour réaliser des compositions colorées spécifiques mettant en évidence ces zones de salinisation. De plus l'impact de la salinisation sur la réponse des zones de cultures a été également étudié (voir aussi communication sur la caractérisation des espaces agricoles, P. Bildgen et al., ce même volume) ainsi que l'influence de la salinisation sur les sols nus.

La mise en évidence des zones de salinisation temporaire qui apparaissent sur la donnée de 1977 montre que ce phénomène correspond à une remontée d'eau salée constituant un cône étendu depuis le littoral jusqu'aux abords d'Arles (Fig. n° 6 A et B). De plus, un traitement très récemment mis au point, permet la transformation des valeurs relatives fournies par le canal 6 TM (thermique) en valeurs de température exprimées en degrés centigrades.

L'examen de l'image thermique réalisée sur une fenêtre relative à la bordure littorale depuis les Saintes Maries de la Mer jusqu'à Marseille et couvrant une large partie du domaine marin permet d'observer la présence de poches d'eau froide dont l'origine peut être liée à la présence de résurgences sous-marines en liaison avec la réseau karstique des massifs calcaires bordant le delta (Fig. n° 6 C). Ainsi, une nouvelle hypothèse, que nous devons confirmer, semble pouvoir être proposée : la salinisation serait due à l'existence de vastes poches d'eau douce, fraîche, non miscible à l'eau de mer, qui permettraient la remontée de cônes d'eau salée vers l'intérieur des terres. Ce phénomène serait en étroite relation avec la pluviométrie de la région, comme tend à le prouver l'étude pluviométrique correspondant à la scène MSS du mois d'août 1977, qui indique une pluviométrie très abondante durant la période hivernale précédant la date d'observation.

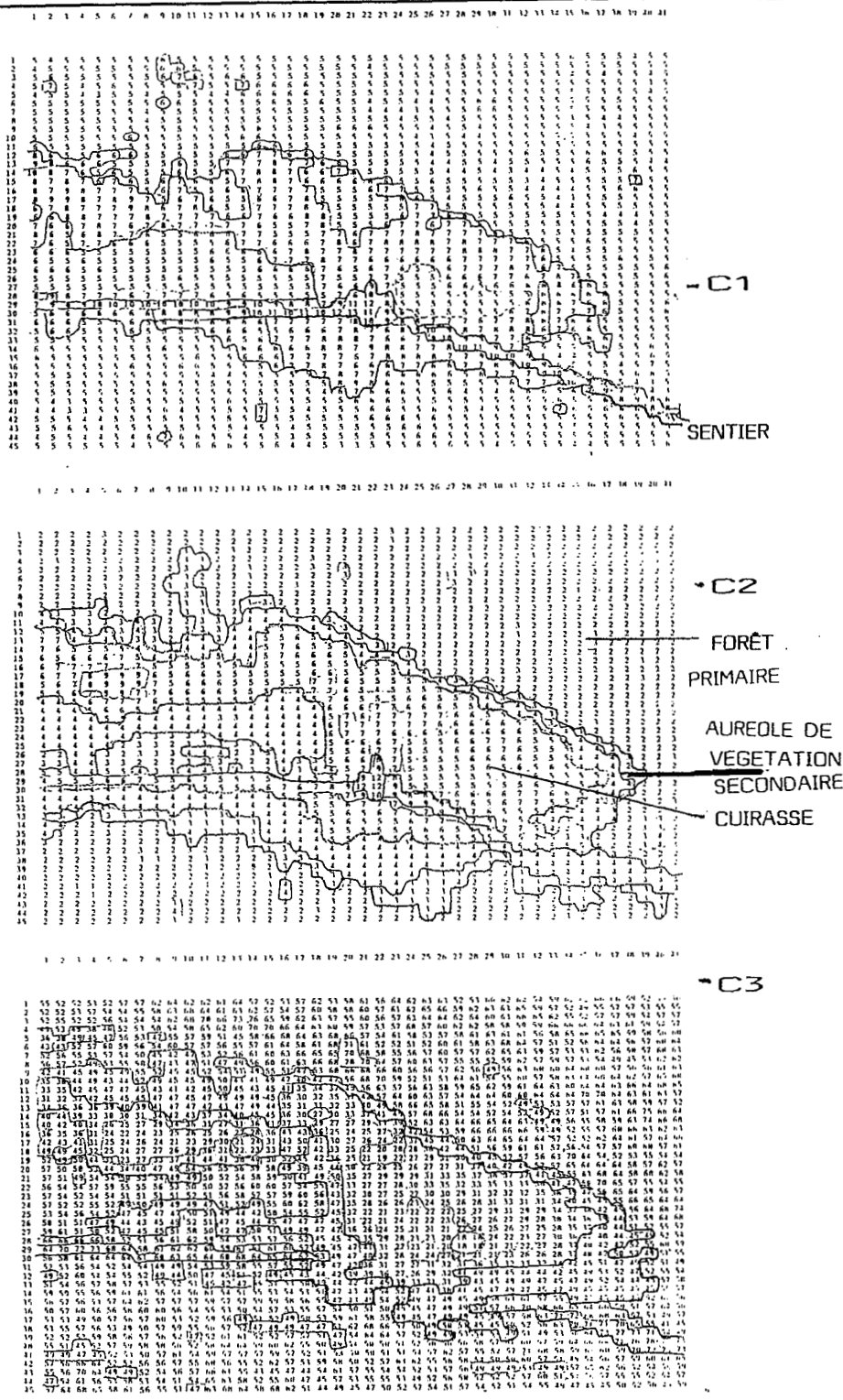
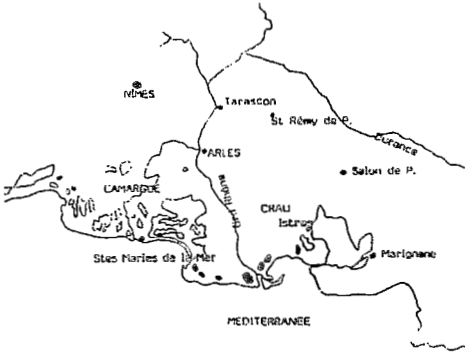


Figure n° 5 : Extrait de la donnée SPOT du 23/06/87, région N.O de TUCURUI. Canaux traités en pourcentages de réflectance

FIGURE N° 6

Localisation des zones salines d'après la donnée T.M du 14/07/84

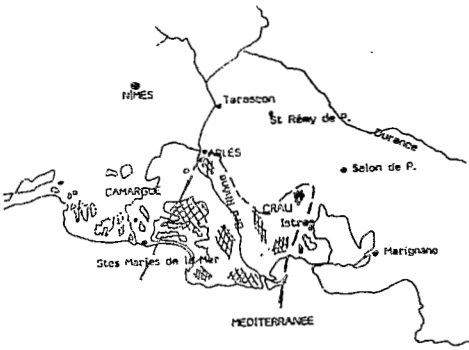
A Seules les salinisations naturelles marines ou artificielles (salins) sont présentes.



B Localisation des zones salines d'après la donnée MSS du 08/77

B Dans ce cas, les zones de salinisation naturelle marine ou artificielles sont retrouvées et les salinisations temporaires se dégagent nettement. Le Vaccares est plus salé.

---- limite supposée de la nappe saline, / / / salinisation



Représentation schématique de la répartition des zones salines en 1984 (A) et en 1977 (B) réalisée à partir des compositions colorées spécifiques.



C Image de la composition colorée (palette) du canal 6 (thermique) T.M corrigé en valeurs de températures réelles (degrés centigrades)

Figure n° 6

CONCLUSION

L'utilisation des données spectrales MSS, TM et SPOT, exprimées en termes de réflectance exo-atmosphérique, permet une souplesse de comparaison et une coordination entre ces données qui ne pouvait pas être réalisées facilement à l'aide des données primitives. Au niveau des compositions colorées réalisées avec ces nouvelles données, on constate que ces dernières sont, soit d'aussi bonne qualité que celles obtenues classiquement, soit même une amélioration sensible de leur visualisation.

Cependant, le but d'une telle transformation est avant tout d'obtenir une meilleure information au niveau de la signification physique de la mesure. Cet objectif semble largement atteint dans de nombreux cas et il est certain que l'amélioration sera encore plus sensible lorsqu'on disposera de données réalisées avec des générations de capteurs possédant des canaux plus étroits et plus nombreux.

Ce travail a été réalisé dans le cadre des recherches relatives au projet : " Essai d'utilisation simultanée des données Landsat MSS , T.M et SPOT , pour la comparaison des valeurs radiométriques des pixels " , avec le soutien financier de l'A.T.P. Télédétection spatiale 87.

BIBLIOGRAPHIE

- Begni G (1986 : "Le rapport signal/bruit". In Spot 1, premiers résultats en vol, Toulouse déc. 86, CNES, p. 57-61.
- Bildgen P. (1985) : "Etude de la genèse des formations bauxitiques de la presqu'île du sud d'Haïti (Grandes Antilles)". Thèse doct. Etat, UPMC, Paris, 179p.
- Bildgen P. et al. (1988) : "Etude de la réponse spectrale et classification des sols agricoles du département des Bouches du Rhône." 113ème Cong. Soc. Sav. Strasbourg, Télédétection, p. 45-59.
- Danguirard M. (1986° : "Etalonnage absolu et interbande", in Spot 1, premiers résultats en vol, Toulouse déc. 86, CNES, p. 71-78.
- Guenther B. and Mc Lean J. (1980) : "Comparison of CNES spherical and NASA hemispherical large aperture integrating sources. I- Using a laboratory transfer spectroradiometer. "Remote Sensing Env. 31, p. 85-95.
- Hiéronymus B. et al. (1989) : "Bauxites and laterites of the Serra de Trucara (State of Para, Brazil). Geological Survey and bauxitic evolution." Sci. Geol., Bull., 1, p. 3-14, Strasbourg 1989.

- Hunt G.R., Salisbury J.W., Lenhoff C.J. (1970-1971) : Visible and near-infrared spectra minerals and rocks:
I. Silicate minerals, *Modern Geology*, vol. 1, p. 283-300 (1970)
II. Carbonates, *Modern Geology*, 1971, vol 2, p. 23-30.
III. Oxides and hydroxides, *Modern Geology*, 1971, p. 195-205.
- Leroy M. (1986) : "Egalisation des détecteurs." In *Spot 1, premiers résultats en vol* Toulouse déc. 86, CNES, p. 63-69.
- Leroy M. et al., (1990) Comparison of CNES spherical and NASA hemispherical large aperture integration sources : II. Using the Spot 2 satellite instrument. *Remote Sensing Env.*, 31, p.97-104.
- Maquet M., Cerville B. et Gouet G. (1981) : *Mineralium Deposita*, 16, p. 357-373.
- Markham B.L. and Barker J.L. (1987) " Radiometric properties of US processed Landsat MSS Data." *Remote Sensing Env.*, 22, p. 39-71.
- Price J.C., (1987) "Radiometric calibration of satellite sensors in the Visible and Near Infrared : history and outlook. *Remote Sensing Env.*, 23, p. 3-9.
- Slater P.N. et al., (1987) : Reflectance and Radiance-based Methods for the in-flight Absolute Calibration of Multispectral sensors. *Remote Sensing Env.*, 22, p. 11-37.
- Teillet et al., (1990) : Three Methods for the absolute Calibration of the NOAA AVHRR sensors in flight. *Remote Sensing Env.*, 31, p. 105-120.