

**DE TELEDETECTIE,
FACTOR VAN
OVERZEESE
ONTWIKKELING**

**LA TÉLÉDÉTECTION,
FACTEUR DE
DÉVELOPPEMENT
OUTRE-MER**

SYMPOSIUM

Brussel, 7 december 1984

Bruxelles, 7 décembre 1984

**KONINKLIJKE ACADEMIE
VOOR
OVERZEESE WETENSCHAPPEN**

**ACADÉMIE ROYALE
DES
SCIENCES D'OUTRE-MER**

1986

**DE TELEDETECTIE,
FACTOR VAN
OVERZEESE
ONTWIKKELING**

**LA TÉLÉDÉTECTION,
FACTEUR DE
DÉVELOPPEMENT
OUTRE-MER**

SYMPOSIUM

Brussel, 7 december 1984

Bruxelles, 7 décembre 1984

**KONINKLIJKE ACADEMIE
VOOR
OVERZEESE WETENSCHAPPEN**

**ACADÉMIE ROYALE
DES
SCIENCES D'OUTRE-MER**

1986

KONINKLIJKE ACADEMIE
VOOR
OVERZEESE WETENSCHAPPEN

ACADÉMIE ROYALE
DES
SCIENCES D'OUTRE-MER

Defacqzstraat 1 bus 3
B-1050 Brussel (België)
Tel. : (02)538.02.11
Postrekening : 000-0024401-54
B-1050 Brussel

Rue Defacqz 1 boîte 3
B-1050 Bruxelles (Belgique)
Tél. : (02)538.02.11
C.C.P. : 000-0024401-54
B-1050 Bruxelles

De inrichting van het
Symposium en de uitgave
van dit boek hebben de
financiële steun genoten van :

L'organisation du Symposium
et la publication du présent
volume ont bénéficié de
l'aide financière de :

Ministerie van Onderwijs

Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek/
Fonds National de la Recherche Scientifique

Belfotop

Cogémin

Cometra Oil Company

Géomines

Sibeka

Sybetra

Union Minière

INHOUDSTAFEL

TABLE DES MATIÈRES

Voorwoord — Avant-Propos	5
P. RAUCQ, Opening van het Symposium — Ouverture du Symposium	7
J. D'HOORE, Algemene inleiding tot het thema : teledetectie en ontwikkelingssamenwerking	11
L. MARELLI, Remote sensing, factor of progress for developing countries : approach and methodology	25
R. GRÉGOIRE, La coopération entre pays industrialisés et pays en voie de développement dans le domaine de la télédétection	39
H. LADMIRANT, Quelques enseignements de récents congrès de télédétection	55
H. LADMIRANT, Télédétection aérospatiale et géologie dans le cadre de la coopération au développement	
J. WILMET, La télédétection au service de la géographie et de l'aménagement du territoire	93
A. COMBEAU, Télédétection et cartographie des sols et du couvert végétal en région tropicale : réflexions à partir de quelques exemples	115
B. N. KOOPMANS, Kaarteren van natuurlijke hulpbronnen in ontwikkelingslanden door middel van „side looking radar” van vliegtuig tot satelliet	123
M. FRÈRE, La télédétection en agrométéorologie opérationnelle	137
P. RAUCQ, Sluiting van het Symposium — Clôture du Symposium ..	147

VOORWOORD

Op initiatief van haar Klasse voor Natuur- en Geneeskundige Wetenschappen heeft de Koninklijke Academie voor Overzeese Wetenschappen een Symposium ingericht met als thema „De Teledetectie, Factor van Overzeese Ontwikkeling”.

De voorbereiding ervan werd verzekerd door het Comité van het Symposium 1984 voorgezeten door de H. P. Raucq.

Het Symposium werd gehouden op 7 december 1984 in het Paleis der Academiën te Brussel en talrijke deelnemers waren aanwezig.

Dit boek omvat de teksten van de mededelingen die bij deze gelegenheid werden voorgesteld en van de rapporten die ter kennis van de deelnemers werden gebracht.

De inrichting van het Symposium en de uitgave van zijn akten gebeurden met de financiële steun van het Ministerie van Onderwijs, het Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek, Belfotop, Cogémin, Cometra Oil Company, Géomines, Sibeka, Sybeta en de „Union Minière”. De Academie is er hen bijzonder dankbaar voor.

AVANT-PROPOS

A l'initiative de sa Classe des Sciences naturelles et médicales, l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer a organisé un Symposium sur le thème «La Télédétection, Facteur de Développement Outre-Mer».

La préparation en a été assurée par le Comité du Symposium 1984 présidé par M. P. Raucq.

Le Symposium s'est tenu le 7 décembre 1984 au Palais des Académies à Bruxelles et y a rassemblé de nombreux participants.

Le présent volume reprend les textes des communications présentées à cette occasion et des rapports portés à la connaissance des participants.

L'organisation du Symposium et l'édition de ses Actes ont été subventionnées par le «Ministerie van Onderwijs», le Fonds national de la Recherche scientifique, Belfotop, Cogémin, Cometra Oil Company, Géomines, Sibeka, Sybeta et l'Union Minière. L'Académie leur en est vivement reconnaissante.

Symposium
«De Teledetectie,
Factor van Overzeese Ontwikkeling»
(Brussel, 7 december 1984)
Koninklijke Academie voor Overzeese
Wetenschappen
pp. 7-9 (1986)

Symposium
«La Télédétection,
Facteur de Développement Outre-Mer»
(Bruxelles, 7 décembre 1984)
Académie royale des Sciences
d'Outre-Mer
pp. 7-9 (1986)

OPENING VAN HET SYMPOSIUM OUVERTURE DU SYMPOSIUM

DOOR PAR

Paul RAUCQ *

Excellences, Mesdames, Messieurs, chers Confrères,

En ouvrant ce Symposium, je tiens à saluer les personnalités qui nous font l'honneur d'y assister.

Excellenties, Dames, Heren, waarde Confraters,

Bij het openen van dit Symposium houd ik er aan de personaliteiten te begroeten die ons met hun aanwezigheid vereren, en in het bijzonder,

Messieurs les Représentants des Ambassadeurs du Burundi, du Gabon, d'Israël et de Tchécoslovaquie, Monsieur le Chef de la Maison Militaire du Roi, Madame le Représentant du Recteur de la Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux.

Cette assemblée a réuni plus de monde que je n'en attendais et, à ce point de vue, on peut déjà la considérer comme un succès. Pourtant, le thème de ce Symposium peut sembler ardu, et il l'est, dans une certaine mesure. Son titre est moins «accrocheur» que d'autres, qui mobilisent l'opinion et les foules, comme la malnutrition ou la faim dans le Tiers Monde, ou la désertification des régions intertropicales, ou l'écologie considérée comme une fin en soi. Ces thèmes, dont certains ont un caractère de grande acuité, et qui requièrent fréquemment des interventions d'urgence, sont en réalité la partie visible de l'iceberg, qu'il faut s'attacher à faire fondre par une action réfléchie, à long terme, pour en définir les éléments, les causes, les remèdes.

* Président du Symposium et de l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer ; rue Marie-Thérèse 37, B-1040 Bruxelles (Belgique).

La télédétection, ou plutôt les formes multiples qu'elle prend pour réunir des données indispensables au développement à moyen et à long terme et à la solution de ces problèmes, est précisément le but de nos réflexions de ce jour.

Je suis particulièrement heureux d'accueillir de nombreux jeunes et aussi plusieurs représentants des pays en développement, qui se consacrent à ces disciplines ou s'y intéressent.

Le Symposium de l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer, dont la première version a eu lieu en décembre 1980, est devenu une activité annuelle de notre Compagnie ; ce sera bientôt une tradition, si nous en avons les moyens. Il est organisé par les trois Classes de l'Académie, cette année par la Classe des Sciences naturelles et médicales ; ce serait normalement, en 1985, le tour de la Classe des Sciences techniques. Mais en cette année qui marquera le centième anniversaire de l'Acte de Berlin et de la naissance de l'État Indépendant du Congo sous la souveraineté de notre grand roi Léopold II, nous avons jugé utile d'en confier l'initiative à la Classe des Sciences morales et politiques, qui anime spécialement la Commission d'Histoire de l'Académie. Les choses reprendront leur cours normal par la suite.

Notre manifestation de cette année n'aurait pas été possible sans certaines subventions. Celles du secteur public ont été malheureusement moindres que par le passé ; je me plais néanmoins à souligner celles du Fonds National de la Recherche Scientifique et aussi du «Ministerie van Onderwijs», très substantielles ; nous aurions aimé des marques d'intérêt plus concrètes de la part d'autres institutions. Plusieurs sociétés privées ont accepté de nous aider dans notre entreprise, malgré la dureté des temps ; je tiens à les remercier chaleureusement : c'est là un geste qui relève du mécénat, bien rare de nos jours, et indépendant de toute préoccupation de profit ; presque toutes sont des entreprises qui ont, ou ont eu, des intérêts miniers au Congo belge — Zaïre. Je tiens à les nommer explicitement : Cogémin, Cometra Oil Company, Géomines, Sibeka, Sybeta et Union Minière.

La firme Belfotop a bien voulu participer à l'illustration du thème du Symposium par la décoration du hall d'accueil ; elle a également assorti d'un don cette participation. Qu'elle en soit remerciée.

Ces concours ont permis la réalisation matérielle de notre projet et, en particulier, la traduction simultanée des exposés, en trois langues, et leur publication. Nous aurions aimé que celle-ci pût se faire avant les séances pour en offrir le recueil aux participants dès leur entrée, mais l'impression des actes du symposium a, en réalité dû être différée pour des raisons techniques : nous espérons que le volume en sera bientôt disponible.

Vous avez bien reçu le programme détaillé de nos séances, en même temps que le résumé des communications. Je demanderai aux orateurs de bien vouloir respecter strictement leur temps de parole : une demi-heure pour les exposés du matin, 20 minutes seulement pour ceux de l'après-midi, avec, selon le cas, 15 minutes ou 10 minutes pour la discussion. Mais les textes préparés seront publiés intégralement, même si leurs auteurs sont amenés à les résumer quelque peu en séance.

Onze confrater Professor J. D'Hoore, die ons de algemene inleiding tot het thema van het Symposium zal voorleggen, heeft aanvaard de vergadering van deze namiddag voor te zitten : hij is meer bevoegd dan ik in de behandelde stof.

Maar ik geef hem nu onmiddellijk het woord voor zijn bijdrage, die getiteld is : Teledetectie en ontwikkelingssamenwerking.

Symposium
«De Teledetectie,
Factor van Overzeese Ontwikkeling»
(Brussel, 7 december 1984)
Koninklijke Academie voor Overzeese
Wetenschappen
pp. 11-24 (1986)

Symposium
«La Télédétection,
Facteur de Développement Outre-Mer»
(Bruxelles, 7 décembre 1984)
Académie royale des Sciences
d'Outre-Mer
pp. 11-24 (1986)

ALGEMENE INLEIDING TOT HET THEMA : TELEDETECTIE EN ONTWIKKELINGSSAMENWERKING

DOOR

J. D'HOORE *

SAMENVATTING. — In een eerste deel wordt de aandacht gevestigd op het ruime synoptische, multispectrale en multitemporale karakter van de geteledetecteerde informatie en op de gemakkelijkheid waarmee zij zich leent tot de interactieve numerische bewerking. Wij leggen de nadruk op de zeer multidisciplinaire aspecten van deze nieuwe benadering die door alle aardwetenschappen kan gebruikt worden. Er wordt vervolgens overgegaan tot een systematische schatting van de potentiële bijdrage die de teledetectiediensten eigen aan de ontwikkelingslanden — en meer bepaald die van Zaïre — hierbij zouden kunnen verlenen, alleen of in samenwerking met buitenlandse onderzoeksorganismen. Deze bijdrage schijnt ons het meest doeltreffend te zijn op het gebied van de verwerking van de primaire gebruiksproducten tot secundaire gegevens aangepast aan de studie van bijzondere onderwerpen, en op het gebied van de interpretatie, waarvoor controlecampagnes op het terrein onmisbaar zullen zijn.

RÉSUMÉ. — *Introduction générale au thème : télédétection et coopération au développement.* — Dans une première partie, l'attention est attirée sur le caractère largement synoptique, multispectral et multitemporal de l'information télédétectée et sur la facilité avec laquelle elle se prête au traitement interactif numérique. Nous insistons sur les aspects hautement multidisciplinaires de cette nouvelle approche, utilisable par toutes les sciences de la terre. Il est procédé ensuite à une évaluation systématique de l'apport potentiel que les services de télédétection propres aux pays en développement — plus particulièrement ceux du Zaïre — pourraient fournir en ces matières, seuls ou en collaboration avec des organismes de recherche extérieurs. Cet apport nous apparaît le plus efficace au niveau de la transformation des produits primaires d'utilisation en données secondaires, adaptées à l'étude de sujets particuliers, et au niveau de l'interprétation, pour lequel des campagnes de contrôle sur le terrain seront indispensables.

SUMMARY. — *A general introduction to the subject : remote sensing and co-operation to development.* — In the first part attention is drawn to the largely synoptic, multispectral and

* Lid van de Academie ; Katholieke Universiteit Leuven, Faculteit Landbouwwetenschappen, De Croylaan 42, B-3030 Heverlee (België).

multitemporal character of remote sensed information and on the ease with which it lends itself to numerical interactive treatment. We insist on superior multidisciplinary aspects of this new approach, available to all earth sciences.

This is followed by a systematic evaluation of the potential with which appropriate remote sensing services in developing countries — in particular Zaire — are able to contribute in these ways, singly or in collaboration with foreign research organisations. This potential appears to be the most effective at the level of transformation of the primary user products into secondary data, adapted to the study of the particular subjects and of the level of interpretation, for which campaigns on the ground will be indispensable.

*
* *

INLEIDING

Het opzet van deze inleidende voordracht is tweërlei. Vooreerst tracht ik zeer in het kort de moderne aardgerichte teledetectie voor te stellen, aandacht te trekken op haar originaliteit, op de nieuwe pluridisciplinaire dimensie die ze de studie van het aardoppervlak heeft bijgebracht. Meestal wordt naar de Landsat (NASA) satellietenreeks gerefereerd, het enige op aardobservatie afgestemde zonsynchrone systeem dat nu reeds twaalf jaar vrij voor algemeen civiel gebruik toegankelijk is. Dit sluit echter het belang niet uit van geosynchrone observatiesatellieten zoals de Meteosat (ESA) die naast meteorologische gegevens ook thermische informatie levert, zowel bij dag als bij nacht, over het gehele Afrikaanse kontinent. Ook meer kortstondige experimenten zoals de Heat Capacity Mapping Mission, de radaropnamen vanop Seasat en de Space shuttles, hebben belangrijke bijdragen geleverd. Wij mogen ook de betekenis niet onderschatten van de teledetectie vanuit vliegtuigen. En dan is er de teledetectie van de toekomst met o.m. de Franse Spot satelliet waarvan vanaf 1985, ook voor de ontwikkelingsgebieden zoveel wordt verwacht.

Vanop wereldomkransende banen geoogst zijn teledetectiegegevens in principe in dezelfde hoogwaardige kwaliteit beschikbaar over alle overvlogen streken, ontwikkelde zowel als niet ontwikkelde, en dit voor iedereen. Het universele nut ervan voor de zeer diverse gebieden van de geomorfologie, de geologie, de meteorologie, van de complexe studie van ongerepte natuurlijke ecosystemen of van terreinen door de mensen overbouwd, vergraven, aan erosie prijsgegeven of waar met wisselend succes aan landbouw wordt gedaan, wordt algemeen erkend.

Mutatis mutandis zou men ook ongeveer hetzelfde kunnen zeggen over andere, algemeen toepasbare verworvenheden van wetenschap en techniek. Wat moderne geneeskunde en landbouwtechnologie aan ontwikkelingslan-

den bieden kunnen, ligt voor de hand maar ondervinding leert hoe moeizaam en hoe schaars nuttige nieuwigheden dikwijls maar kunnen worden aangewend, hoe onverwacht er de gevolgen soms van kunnen zijn. Dat analoge caveats gelden kunnen voor het bevorderen van het teledetectieonderzoek overzee, voor het roekeloos aanwenden van de verworven nieuwe informatie hoeft hier geen betoog. Daarom zal ik in een tweede gedeelte trachten na te gaan hoe eigen teledetectiediensten in ontwikkelingslanden door onze materiële hulp en wetenschappelijk-technische samenwerking op efficiënte wijze tot wederzijds voordeel kunnen worden bijgestaan.

Mijn aandacht gaat hierbij in de eerste plaats naar Zaïre en dit om meerdere redenen. Eerder dit jaar kreeg ik de gelegenheid er de teledetectieproblematiek ter plaatse te beleven, kennis te maken met Zaïrese navorsers en technici die in goed uitgerust Europese en Amerikaanse laboratoria in het beoefenen van de teledetectie waren bijgeschoold, vertrouwd gemaakt met de geëigende apparatuur, de analyse- en interpretatietechnieken. In eigen land teruggekeerd bleken ze er echter moeilijk in te slagen de duur verworven kennis ten bate van het eigen land te nutte te maken, niet alleen vanwege het gebrek aan essentiële uitrusting en andere materiële middelen, maar ook vanwege het gemis aan wetenschappelijke ruggesteun.

Daartegenover staat dat in ons land nog zoveel terreinkennis, zoveel gevarieerde achtergrondinformatie betreffende Zaïre latent voorhanden is, die door uitblijven van tijdige benutting definitief verloren dreigt te gaan. Er is bij ons ook blijkbaar geen gebrek aan gemotiveerde jonge expertise die, alhier onbenut, niet beter vraagt dan zich voor wetenschappelijke studie van het tropische leefmilieu in te zetten na aan onze universiteiten hiertoe gevormd te zijn geweest, dan zich samen met hun collega's van overzee verder te bekwamen in het verwerken van geteledetecteerde informatie in de beoefening van hun wetenschap, zowel op het terrein als in het laboratorium.

Het bevorderen van dergelijke wetenschappelijke samenwerking zou zowel ons ontwikkelingsbeleid als ons wetenschapsbeleid tot eer strekken.

TELEDETECTIE : WEZEN EN BETEKENIS

Krachtvelden, stralingsenergieën waarnemen vanop afstand, hierdoor voorwerpen herkennen en situeren in de ruimte, is in wisselende mate een voortdurende bezigheid van al wat leeft. Ook wij zien en horen, voelen uitgestraalde warmte, stellen ons evenwicht in op centrifugale en gravitatie-nale krachtvelden. Hiervoor gebruiken wij de sensoren die onze zintuigen zijn, het dataverwerkend vermogen van ons zenuwstelsel, het interpretatie-

vermogen van ons verstand. De mens is er in de loop van de eeuwen in geslaagd dit waarnemingsvermogen op te drijven met behulp van een steeds vernuftiger instrumentarium, van een steeds meer verfijnde methodiek.

Teledetectie is een verdere grote stap vooruit op deze weg. Sensoren, dataverwerkers werden ontwikkeld, veel gevoeliger, nauwkeuriger en sneller reagerend dan deze van het zenuwstelsel. Zo kunnen energieën, naar aard en intensiteit ver buiten het rechtstreeks bereik van onze zintuigen gelegen, gemeten worden en, na omzetting tot afgeleide verschijnselen — zoals cijfers, klanken, kleuren, beelden — door onze zintuigen waarneembaar worden gemaakt.

Een zeer wijd veld van nieuwe observatiemogelijkheid wordt aldus opengesteld. Gravitationele, elektro- en magnetostatische velden, elastische trillingen — sonische, seismische... — kunnen immers alle vanop betrekkelijk grote afstand worden gemeten, kunnen betekenisvolle informatie leveren bv. over de plaats van oorsprong, de relatieve beweeglijkheid, de eigenschappen van het doorgangsmedium. Toch wordt het begrip aardgerichte teledetectie meestal begrensd tot het kwantitatief waarnemen van elektromagnetische trillingsenergie die door de aardkorst en haar bedekking wordt uit- of teruggestraald en voor zover deze met elektronische sensoren wordt gemeten. Theoretisch komt hiervoor het gehele elektromagnetische spectrum in aanmerking. Wanneer de observatie doorheen het atmosferische aerosol dient te geschieden is men echter beperkt tot de frekwentiebanden die er niet te sterk door worden geattenuëerd : het zichtbare gedeelte, enkele banden in het nabije en het thermische infrarood en het gehele mikrogolvengebied.

Er kan ook een onderscheid worden gemaakt tussen actieve en passieve teledetectie. Bij de actieve — in de praktijk tot het mikrogolvengebied beperkt — wordt elektromagnetische trillingsenergie met gekende intensiteit, frekwentie, polarisatierichting, naar het te onderzoeken oppervlak gericht, wordt de teruggestraalde energie gelokaliseerd, gekarakteriseerd en gemeten. De waargenomen wijzigingen blijken bepaald door de gerichtheid van het reflekterende vlak ten opzichte van stralings- en ontvangstantenne, maar ook door de complexe diëlektrische konstante van de materie van dit vlak. Bij de passieve teledetectie, tot nog toe de meest gebruikte, wordt temperatuur bepaalde emissie en gereflekteerde zonnestraling, uitgaande van het waargenomen vlak, gemeten. De radiantiekurve — die de verdeling weergeeft van de energieinhoud in functie van de golflengte — wijkt bij passief teledetecteerbare stralers duidelijk af van de referentiekurven. Dit zijn enerzijds de zwart lichaam emissiecurve, afgeleid uit de vergelijking van Planck en anderzijds de opgemeten curve van het zonnespektrum. Uit de verhouding van de eigen

kurve met deze referentiekurven kan een eigen emittantie — reflektantie — kurve worden afgeleid, ook wel spektrale signatuur geheten, waarvan de specificiteit de mogelijkheid tot passieve teledetecteerbaarheid bepaalt.

Passieve teledetectie speelt ook in op de fundamentele stralingswetten die reeds in 1760 in de Photometria van Johann Heinrich Lambert werden geformuleerd. Hieruit volgt immers dat de stralingsenergie die door een oppervlak diffuus wordt uitgezonden, vanop een willekeurige afstand kan worden opgemeten en uitgedrukt in Watt per cm^2 . Hiertoe dienen alleen gekend de opening van de ruimtehoek waarbinnen de straling door de sensor wordt gemeten en ook de hoek die de observatierichting vormt met de normale aan het geobserveerde vlak. Voor waarnemingen doorheen de atmosfeer dient hier nog een evenredigheidsfaktor aan toegevoegd. Kent men bovendien nog de afstand tussen vlak en sensor dan kan ook de werkelijke vorm en afmeting van het geziene oppervlak worden berekend.

Meestal tracht men dit oppervlak — ook wel de resolutie op de grond geheten — zo klein mogelijk te houden. Het waar te nemen landschap kan immers systematisch worden afgetast, opgedeeld in diskrete deeloppervlakten, beeldpunten of pixels, en de gemeten radiantiewaarden kunnen nadien in een tweeassig stelsel tot een geometrisch conforme beeldvormige voorstelling worden gerekonstrueerd. De geïntegreerde straling van elk deeloppervlak kan ook in meerdere spektrumbanden worden opgesplitst, bij voorkeur deze met de grootste informatie-inhoud, zoals uit specifieke signaturen kan worden afgeleid. Dit geeft dan evenveel afzonderlijke punt voor punt kongruente voorstellingen.

Lokalisatie van het geteledetecteerde in het aards koördinatenstelsel wordt uit orbiëtkarakteristieken en uit tijdmeting afgeleid. De waarnemingen zijn dus steeds zowel geografisch als chronologisch gekarakteriseerd. Ze zijn doorgaans ook breed synoptisch en de opnamen gebeuren nagenoeg synchroon: gebieden meerdere vierkante graden groot worden binnen de tijd van enkele seconden afgetast. De heliosynchrone banen van de Landsats werden bovendien zodanig gekozen dat elk punt van het aardoppervlak telkens aan de beurt komt bij dezelfde zonnetijd, dat beelden op verschillende tijden over eenzelfde gebied geregistreerd, geometrisch onderling nagenoeg conform zijn. Dit geeft dan aanleiding tot multitemporale of diachrone reeksen die toelaten het verloop van wijzigende landschapstrekken te volgen. Ook fenologisch bepaalde signatuurvariaties worden opgespoord en als bijkomend identifikatiemiddel aangewend.

Al deze breed synoptische, multispektrale of diachronische informatie wordt in eerste benadering dus meestal in de vertrouwde geografisch

conforme beeldvorm voorgesteld. Geometrisch geordende radiantiewaarden worden op de filmen in zwartingsgraden vertaald, informatie uit verschillende spektraalbanden of van verschillende tijden kan door kleurenkombinatie tot een polychroom verzamelbeeld worden verwerkt. Ze kunnen met bestaande kaarten, met ingeschetste terreinwaarnemingen worden vergeleken, puntwaarnemingen kunnen op verantwoorde wijze tot grotere gebieden worden uitgebreid, hypothetisch ingeschetste begrenzingen kunnen meer terreingetrouw worden bijgewerkt, vermoede structuren kunnen leiden tot nieuwe of betere werkhypothesen. Optische analyse van dergelijke beelden is meestal de eerste stap naar meer gevorderd onderzoek.

Al de gegevens waarvan voornoemde beelden worden afgeleid zijn immers ook verkrijgbaar in geordende numerieke vorm, geregistreerd op magneetband in formaten die op de gangbare ordinateuren kunnen worden verwerkt. Dit betekent dat wat het beeld ons overzichtelijk toont, ook onderzocht kan worden tot in het grensdetail, bepaald door de resolutie op de grond.

Men stelle zich nu even voor dat alle eerder vermelde radiantie-informatie, over een gegeven landschap verkregen in onderling compatibele formaten, in een random access geheugen zou zitten opgeslagen. Ook informatie op andere manieren over dit landschap verkregen, zou na numerisatie en formaataanpassing aan dit bestand kunnen worden toegevoegd. De mogelijkheid ligt nu wijd open om voor dit landschap in zijn geheel of voor zijn onderdelen de diverse numerieke gegevens eigen aan elk beeldpunt op een welhaast oneindig aantal wijzen onderling te verwerken, klassifikaties uit te voeren, statistische tabellen, histogrammen, beelden van min of meer ideële concepten op een beeldscherm te laten verschijnen of op een printer af te drukken. Ook de moderne methodes van patroonherkenning (pattern recognition) kunnen op dergelijke bestanden worden toegepast. De keuze van de uitgeteste funkties kan willekeurig, de resultaten ervan zinloos zijn. Laat men ze echter steunen op statistische analyse, dan kunnen bv. radiantiewaarden die voor de studie van bepaalde objekten relevant of irrelevant zijn, respectievelijk worden geëxalteerd of afgezwakt, kunnen sekundaire beeldvoorstellingen worden afgeleid die voor de natuurwetenschappelijk geschoolde gebruiker welsprekender zullen zijn dan de primaire. In de praktijk is de multispekturale informatie, op de standaardmagneetbanden vastgelegd, meestal alles wat in interactief bruikbare vorm voorhanden is. Hiermee kan echter reeds zeer veel worden gedaan, gebruik makend van bestaande uitgeteste algorithmen, en niets belet het uitwerken van nieuwe die misschien beter aan de te bestuderen onderwerpen zullen zijn aangepast. Vermelden we tenslotte ook

de inherente mogelijkheid tot oppervlaktemeting van geklasseerde eenheden via telling van spektraal-analoge pixels.

Geschikte algorithmen steunen echter niet uitsluitend op statistiek maar ook voor een belangrijk gedeelte op terreinkennis. Er dient rekening gehouden met het verband tussen de geteledetecteerde straling en deze welke in de onmiddellijke nabijheid van het stralend vlak wordt opgemeten, met de interactie van de materie van dit vlak met de invallende straling, met mogelijke interacties met de atmosfeer. Men verlieze ook niet uit het oog dat teledetectie ons strikt genomen enkel inlicht over stralingsgedrag, aard en gerichtheid van bidimensionele oppervlakken terwijl het vooral de identificatie is van de tridimensionele lichamen eronder die ons aanbelangt. Teledetectie biedt ons dienaangaande in eerste instantie alleen op het terrein verifieerbare aanwijzingen. Sommige landschapstrekken zoals water-land contrasten kunnen er meestal zonder veel moeilijkheden uit worden afgeleid, andere vergen ervaring, bekendheid met zekere koïncidenties zoals bv. de aanwezigheid van turgescence vegetatie die tijdens het droge seizoen door haar intense straling in het nabije I.R., in semi-ariede gebieden de ligging van het hydrografische net verraaft. Nog meer complexe verbanden tussen meteorologie, plantenfenologie en bodemaard werden in de literatuur beschreven.

We zagen ook dat toepassen van teledetectie ook het natuurwetenschappelijk beredeneerd extrapoleren impliceert van de puntwaarneming op het terrein naar het breed synoptische en in de tijd herhaalbare overzicht dat deze benaderingswijze eigen is. Daarin zit ook de mogelijkheid of moet ik zeggen de bekoring besloten tot beredeneerd vermoeden en tot voorspellen van oorzaken en gevolgen, tot technische inspraak en gedeelde verantwoordelijkheid op besluitvormend en uitvoerend niveau.

Dit alles illustreert het wellicht meest originele kenmerk van de landschapsteledetectie. Synoptisch, multispektraal, multitemporaal of diachroon, uitermate geschikt voor interactieve numerieke verwerking, is ze ook pluridisciplinair over de ganse lijn, van het verwerven, het verwerken, het verklaren, tot in de toepassing. Ze blijkt ook even bruikbaar te zijn voor alle wetenschappen van de aarde en vormt er als het ware het pluridisciplinaire verbindingssteken tussen. Ze groeide dan ook uit tot meer dan een verzameling technieken, ze werd een pluridisciplinaire wetenschapsbeoefening op zich zelf, ze werd een kunst.

TECHNISCH-WETENSCHAPPELIJK SAMENWERKEN
MET TELEDETECTIEDIENSTEN IN ONTWIKKELINGSLANDEN

Voortgaande op wat hierboven werd ontwikkeld, kan worden gesteld dat aardgerichte teledetectie vanuit de ruimte alleen doelmatig funktionieren kan binnen een geïntegreerd geheel van instellingen en infrastructuren, van gehiërarchiseerde denkwijzen en handelingen alle aangepast aan de fysische verschijnselen die door de gegeven soort teledetectie worden uitgebaat. De eindbedoeling zal wel steeds het verruimen van onze kennis van de aarde zijn maar ze kan ook meer pragmatisch worden geformuleerd als het bewarend te nutte maken voor de mens van de rijkdommen erin vervat, van de water- en landecosystemen die ze overdekken.

Zulke geïntegreerde stelsels kunnen in opeenvolgende trappen of fazen worden opgedeeld ieder met zijn eigen, voor het verdere verloop bepalende, subfinaliteit. Zo kan men voor het Landsat systeem onderscheiden :

- De eigenlijke observatie vanuit de ruimte, het opmeten en doorseinen van ruwe radiantie- en correctiegegevens naar de aarde ;
- Het kapteren en verwerken van deze ruwe gegevens tot primaire dataprodukten klaar voor optische of numerische analyse op de apparatuur van de gebruiker ;
- Het omzetten van primaire dataprodukten tot afgeleide dokumenten afgestemd op de studie van specifieke problemen ;
- Het interpreteren van primaire en afgeleide dokumenten, na konfrontatie met terreingegevens ;
- Het effectief maken van de interpretaties, het formuleren van gevolgtrekkingen en aanbevelingen.

Het zal wel meteen duidelijk zijn dat fases 1 en 2 in hun geheel, en voor een deel ook fase 3, tot het domein behoren van de fysikus, de ingenieur, de instrumentenbouwer, de informaticus. Vanaf de derde fase treedt terreinervaring van natuurwetenschappelijk geschoolden naar voor, versterkt door eigen vaardigheid of deskundige assistentie op het gebied van de dataverwerking. De vierde fase is vooral natuurwetenschappelijk en zelfs praktisch gefundeerd, terwijl zich op niveau vijf een duidelijk raakvlak aftekent met het landsbestuur.

Men kan nu trachten op elk faseniveau de potentiële inbreng af te wegen die eigen diensten in ontwikkelingslanden aankunnen, alleen of technisch-wetenschappelijk samenwerkend met buitenlandse onderzoeksinstituten, na te gaan hoe en met welke middelen de doelmatigheid van deze diensten op haalbare wijze kan worden opgevoerd. Binnen het korte bestek van deze

voordracht mag u van mij alleen een zeer schetsmatige benadering, geen omstandige taakbeschrijvingen of kostenramingen verwachten. Dit neemt niet weg dat dergelijke oefeningen zeker aan effectieve hulpverlening dienen vooraf te gaan.

De eigenlijke observatiefase vergt een gesatelliseerd ruimtetuig waarop de diverse apparaten nodig voor waarneming, registratie, datatransmissie, koerskorrektie e.a. staan gemonteerd. Dit zijn meestal prototypes, produkten van spitstechnologie amper uit het experimentele stadium getreden. De baan waarop het platform zich om de aarde beweegt moet nauwkeurig zijn gekend, moet dikwijls worden bijgestuurd, vermits de plaatsbepaling van het geziene op de aarde uit haar karakteristieken moet worden afgeleid. Voor dit alles zijn, buiten de lanceerapparatuur ook permanent actieve, wereldwijd verspreide volginstallaties nodig. Om al deze redenen moet deze eerste fase noodzakelijk aanleunen bij zwaar gefinancierd ruimtevaartonderzoek dat alleen grote technologisch gevorderde naties of groeperingen van naties aankunnen. Kleinere naties waaronder België verkiezen zich op het niveau van deze fase meestal te beperken tot samenwerking met de groteren, tot deelname in voorstudies en ontwerpen, tot uitvoering van randapparatuur en onderdelen. In de meeste ontwikkelingslanden zullen bij het plannen en financieren van eigen wetenschappelijk onderzoek zeker andere projecten primeren op het zelf vanuit de ruimte observeren van het eigen grondgebied. De observatie en transmissieapparatuur van Landsat bv. kan immers op verzoek worden ingeschakeld, zij het tegen royaltybetaling via de ontvangststations.

Deelname aan de tweede fase is voor grote landen met ontwikkelingsgebieden binnen de eigen grenzen bijzonder aangewezen, dit echter in zoverre de niet zo geringe kosten van installatie, onderhoud en personeel kunnen gedragen worden. Ze vangt aan met het kapteren van de ruwe gegevens. Hiertoe moet de satelliet zich binnen het gezichtsveld van de parabolische antenne bevinden. Voor geosynchrone observatoria zoals Meteosat, die zich schijnbaar stabiel op 36 000 km hoogte boven het snijpunt van de meridiaan van Greenwich met de Evenaar bevindt, kan een vast gerichte antenne volstaan. Voor de heliosynchrone quasi-polaire Spot en Landsat banen, zijn echter zeer beweeglijke, nauwkeurig richtbare volgantennes nodig. Deze zijn duur in aanschaf en onderhoud, moeten om gelijke tred te houden met de vooruitschrijdende techniek binnen korte termijnen worden omgebouwd of vervangen. Toch werden dergelijke min of meer prestigieuze installaties geacht binnen de mogelijkheden te liggen van sommige ontwikkelingslanden. Vermits het gezichtsveld van deze antennes meestal groot genoeg is om

meerdere buurstaten te bedienen wordt doorgaans gestreefd naar beheer en exploitatie in internationale samenwerking. Dit is ten andere ook het geval met de grondinstallaties te Fucino en te Kiruna die via het Earthnet programma door het Europese ruimteagentschap ESA worden beheerd.

Dank zij het reeds geïnstalleerde net van grondstations kan via Landsat het grootste gedeelte van de wereld-landmassa „real time” worden geobserveerd hoewel, omwille van de zeer beperkte registratiecapaciteit aan boord, nog grote gebieden ongezien of althans zelden bekeken blijven. Dit is o.m. het geval voor het grootste gedeelte van Afrika dat vanuit Fucino gezien wordt tot ongeveer 14°N en vanuit Johannesburg tot ongeveer 6°S.

Het opstellen van bijkomende delikate ontvangstapparatuur, soms in weinig herbergzame oorden, om deze lakunes op te vullen wordt de jongste tijd echter minder dringend. Men hoopt immers binnenkort over een wereldomspannende krans van geosynchrone relayerende satellieten te beschikken waarlangs de observerende satellieten op heliosynchrone baan hun gegevens doorlopend naar een centraliserend aardstation kunnen doorzenden (T.D.R.S.S.). Anderzijds wordt bij toekomstige systemen zoals Spot de registratiecapaciteit aan boord in belangrijke mate opgevoerd. De informatie opgeslagen over niet „real time” observeerbare gebieden kan dan periodisch naar een beperkt aantal grondstations worden doorgespeeld.

Ruwe gegevens uit de ruimte bevatten naast radiantiewaarden ook gegevens betreffende zonnetijd, ligging van het observatorium ten opzichte van de nadirlijn, sensorparameters, enz. Hiermee rekening houdend kan het geometrisch en radiometrisch gekorrigeerd en van aardse coördinaten voorzien produkt worden vervaardigd verenigbaar met de apparatuur van de gebruikers : monospektrale beeldvoorstellingen, multispektrale kleurkomposieten, numerieke registraties op magneetband.

De kwaliteit van dergelijke produkten kende de jongste jaren een merkwaardige verbetering dank zij de vooruitschrijdende ontwikkeling van hardware, software, reproducerende randapparatuur en zeker niet in het minst door de groeiende expertise van het bedienend personeel. Het blijft echter een dure bezigheid waar vele, ook ontwikkelde, landen zich van onthouden wanneer de dataprodukten meestal tegen redelijke prijzen elders kunnen worden aangeschaft. Men mag bovendien verhoppen dat zowel datarelayering als verhoogde registratiecapaciteit aan boord tot schaalvergroting leiden zal van een beperkt aantal dataproducerende centra, gelegen in gebieden waar de ermee betrokken steeds verbeterende spitstechnologie gemakkelijk toegankelijk is.

Ook op het niveau van deze tweede fase blijkt de inbreng van eigen diensten in minder ontwikkelde landen, enkele uitzonderingen niet te na

gesproken, eerder gering te zijn. Met het oog op recente ontwikkelingen blijkt promotie ervan aldaar ook minder aangeraden. Bij de gegevensverwerking kan echter van buitenuit op efficiënte wijze worden tussengekomen door reservatie van observatiedatums, wat royaltybetaling impliceren kan, door hulp bij keuze en aankoop van dataprodukten. Bij deze keuze gaat het niet zozeer om eigenschappen inherent aan de produkten zoals bewolgingsgraad of kwaliteit, beide meestal vermeld op catalogi. Het gaat vooral om het selekteren van de meest geschikte observatietijden steunend op gewogen kennis van veel achtergrondgegevens, van fenologische, meteorologische of algemeen geografische aard.

Indien wat stroomopwaarts van hier gebeurde — van het observeren tot het vervaardigen van gebruiksprodukten — grotendeels buiten het bereik en het beheer van kleine of van minder ontwikkelde landen viel, dan geldt dit niet meer vanaf de derde fase waar uit gekorrigeerde primaire data secundaire worden afgeleid, afgestemd op specifiek gebruik. Veel van wat doorgaat voor teledetectie onderzoek ontzegt zich de voordelen van deze fase, beperkt zich tot oppervlakkig bekijken van het gestandaardizeerde beeldmateriaal. Projekteren van deze beelden — zwart-wit monospektrale of kleurenkomposieten — op basiskaarten voorzien van gelokaliseerde eigen terreininformatie is meestal reeds een grote stap vooruit, een eerste voorbereiding op meer diepgaande analyse. Men kan hiertoe ook experimenteren met eigen kleurenkombinaties in multispektrale of diachrone kompositie, gebruik makend van co-projektie, diazokopie of kleurfotografische procédés. Na meerdere fotografische manipulaties kunnen de beelden echter reeds veel van hun oorspronkelijke resolutie hebben ingeboet.

De informatieinhoud van de overeenstemmende magneetband ligt meestal minstens een grootteorde hoger dan deze van het beeld. Vanaf deze numerieke bestanden kunnen dan ook veel betere vergrotingen en komposieten worden afgeleid dan deze langs fotografische weg verkregen. Ook ideële voorstellingen kunnen aldus in beeld worden gebracht: wij hebben hoger reeds de interactieve numerieke dataverwerking vermeld, het uittesten in nauwe samenspraak met natuurwetenschappelijk gevormden, individueel of in pluridisciplinair verband, van radiantiefuncties allerhande.

Een uitgebreide numerieke analyse die veel ingewikkelder is en merklijk duurder uitvalt dan de optische, vergt ordinatorkapaciteit, databestanden, aangepaste software, randapparatuur om de secundaire gegevens tot bruikbare documenten uit te schrijven. Ze vereist ook nauwe samenwerking met gespecialiseerd personeel in staat bestaande algoritmen toe te passen, te verbeteren of te herschrijven. Wil men de numerieke informatie ten volle

doen renderen, dan zijn hiervoor betrekkelijk zware uitrustingen nodig die veelal nog ten dele experimenteel zijn, voortdurend dienen bijgewerkt en verbeterd. Inplanten van dergelijke delikate apparatuur kan daarom voorbarig lijken in minder ontwikkelde gebieden waar onderhoud, herstelling, vernieuwing en bemanning onvermoede problemen scheppen kunnen. Centrale opstelling in België met gemakkelijke toegang voor gebruikers van hier en van overzee, die er in nauwe samenwerking met het bedienend personeel hun problemen komen uitwerken, verdient hier dan ook aanbeveling.

De jongste jaren werd echter ook lichtere interactieve apparatuur ontwikkeld met meer bescheiden mogelijkheden dan de zware. Naast het voordeel van de lagere kostprijs biedt ze ook dit van de bedienbaarheid door natuurwetenschappelijk gevormden zonder bijzondere specializatie in de informatica. Hun technische betrouwbaarheid blijkt bovendien zodanig dat ze kunnen worden aanbevolen om in vele overzeese teledetectielaboratoria de optische uitrusting te vervolledigen. Inplanting van het geheel in daartoe geschikte lokalen met klimaatregeling in of nabij een stedelijk milieu met betrouwbare electriciteitsvoorziening lijkt ons echter een essentiële vereiste.

Op dit naar onze mening werkelijk cruciale derde werkniveau is daadwerkelijke hulp van buiten uit belangrijk, zoniet essentieel. Zo geldt zowel de aankoop en het onderhoud van uitrusting, het opleiden en bijscholen van personeel, het verzekeren van toegang tot centraal opgestelde analysecapaciteit als het tijdelijk ter beschikking stellen van buitenlandse expertise, het uitwerken en bijsturen van efficiënte samenwerkingsmodaliteiten.

De vierde fase betreft de interpretatie van de gegevens en blijkt de zwakste schakel in de teledetectieketen te zijn. Er ligt immers een grote discrepantie tussen het aanbod, in dure overvloed, van hoogwaardige informatie vanuit de ruimte en het schaarse gebruik dat ervan wordt gemaakt. Overwegend beelden worden aangekocht, meestal bestemd voor oppervlakkig bekijken, voor illustratieve of zelfs publicitaire doeleinden. Optische analyse kent gelukkig een stijgende belangstelling terwijl numerieke analyse nog veel te weinig wordt beoefend, ook in ontwikkelde landen.

Veel natuurwetenschappelijk geschoolden, ook verantwoordelijken voor natuurbeheer, ontwikkeling en onderwijs, konden slechts langzaam worden overtuigd van de waarde van de nieuwe benadering. De meest originele facetten — het multispektrale, het multitemporale, het numeriek interactief verwerkbaar — waren ten andere dikwijls niet zomaar direct bruikbaar. Vooraleer besluiten te kunnen trekken aangaande meer complexe landschapstrekken dan bv. land-water contrasten moesten de vanuit de ruimte

opgemeten spektrale signaturen met de „ground truth” of de waarheid op het terrein worden geconfronteerd.

De meest revelerende signaturen zijn bovendien afkomstig van het plantenkleeft in zijn fenologisch variërende verscheidenheid. Al dan niet turgescent, verdroogd, brandend of recent verkoold is plantaardig materiaal ook voor geomorfologen, geologen, hydrologen, meteorologen en uiteraard ook voor botanici en landbouwkundigen een bijzonder welsprekende indikator voor wat zij zoeken. Systematisch onderzoek op het terrein van dit radiantiegedrag dringt zich dus op, is essentieel om geteledetecteerde informatie naar de werkelijkheid toe te kunnen interpreteren.

Over de vochtige intertropische gebieden met hun rijke natuurlijke flora, met de in samenstelling en in fenologisch aspect evoluerende bestanden die eigen zijn aan de zwerflandbouw, is desbetreffend nog niet veel bekend. Dit is dan ook een bijzonder interessant werkterrein voor origineel wetenschappelijk onderzoek. Representatieve testgebieden waar minstens gedurende één kalenderjaar of één fenologische cyclus alle voor afstandwaarneming relevante grondgegevens zouden worden geregistreerd en al naargelang de mogelijkheid van observatie vanuit de ruimte — of eventueel vanuit de lucht — met deze laatste zouden worden gekorreleerd, zouden zeker een bron van nuttige informatie zijn, niet alleen voor het eigen land maar voor de intertropen van de gehele wereld. Koördinatie tussen metingen op het veld, in laboratoria en in teledetectiecentra, onderling doorgeven van vers verworven informatie zal hier zeker belangrijk zijn. Op dit niveau mag hulp van buitenuit zich dan ook niet beperken tot toelevering van vervoermiddelen, van velduitrusting en meetapparatuur. Ook literatuurstudie, opzoeken van onuitgegeven achtergrondgegevens, (verrichtingen die in ons land meestal gemakkelijker uit te voeren zijn dan overzee) kunnen een belangrijke bijdrage leveren. En natuurlijk staat ook op dit vierde werkniveau het gelijktijdig kollegiale inzetten, ook en vooral op het terrein, van eigenlandse en buitenlandse navorers primordiaal.

En dan is er ook nog de fase vijf, het effectief maken van de aanbevelingen voortvloeiend uit de systematische confrontatie van teledetectie en terreinwaarneming. Hieruit blijkt meestal spoedig op welke vragen teledetectie voorlopig het antwoord schuldig blijft, maar ook welke terreinaspekten er duidelijk door herkenbaar zijn, volgbaar in hun periodische, accidentele of door de mens versnelde evolutie. Men denke hier aan wijzigingen in het landgebruik, aan versnelde verstedelijking, massale ontbossing en erosie, aan verdroging, overstuiving, aanslibbing, verzilting, overstroming, aan het effect van bos- en grasbranden, enz. Het volgen van dergelijke wijzigingen

kan ongetwijfeld bijdragen om tendensen, oorzaken, projecties naar de toekomst toe nauwkeuriger te omlijnen, en maatregelen om zonodig af te remmen of bij te sturen kunnen door argumenten, uit geïnterpreteerde teledetectieinformatie afgeleid, bijkomend worden gemotiveerd. Vergeten we ook niet dat het sterk vergemakkelijkt opsporen door teledetectie van niet vernieuwende of al te kwetsbare vernieuwende natuurlijke hulpbronnen vlug kan ontaarden in verkwistende overexploitatie. Ook hiervoor kan wijs aangewende teledetectie, door goed uitgeruste en bemande eigenlandse diensten, tijdig waarschuwen, helpen bij het reserveren van gebieden waaraan niet of ten hoogste zeer omzichtig mag worden geraakt.

Bij de uiteindelijke beslissingen komen uiteraard nog andere dan zuiver natuurwetenschappelijk gefundeerde argumenten aan bod. Toch willen we hier de vrome wens verwoorden dat technische raadgevers bij de besluitvormende instanties, eigenlands of buitenlands, zich beter van de mogelijkheden en beperkingen van de teledetectie zouden op de hoogte stellen, zich overtuigen van de waarde van deze nieuwe informatiebron. En deze wens geldt niet alleen voor de besluitvorming in de minder ontwikkelde gebieden zelf, maar ook voor deze in de organen waar overzeese ontwikkelingsprojecten worden geëvalueerd, waar middelen worden toegekend. Zonder begrip en hulp van deze laatste blijft het meeste van wat hierboven aanbevolen werd, voorlopig illusoir.

Symposium
«De Teledetectie,
Factor van Overzeese Ontwikkeling»
(Brussel, 7 december 1984)
Koninklijke Academie voor Overzeese
Wetenschappen
pp. 25-38 (1986)

Symposium
«La Télédétection,
Facteur de Développement Outre-Mer»
(Bruxelles, 7 décembre 1984)
Académie royale des Sciences
d'Outre-Mer
pp. 25-38 (1986)

REMOTE SENSING, FACTOR OF PROGRESS FOR DEVELOPING COUNTRIES : APPROACH AND METHODOLOGY

BY

L. MARELLI *

SUMMARY. — The need for improving the management of natural resources has become a priority issue in the whole world. Developing countries are particularly concerned with this problem because, in most cases, available information about their territory is not sufficiently accurate and timely. Remote sensing techniques represent a very valuable tool for assessing and monitoring natural resources : for this reason, this technology has been used more and more in recent years. Until 10-15 years ago, the primary source of remotely sensed data were imaging instruments mounted on aircrafts such as cameras, scanners and radiometers operating in the visible and infrared portion of the electromagnetic spectrum. More recently the same type of instruments were also mounted on-board satellites providing repetitive and synoptic views of the earth. This paper describes the salient characteristics of modern remote sensing systems with special reference made to spaceborne ones, and outlines the methods commonly used to exploit data generated by such systems for the purpose of resource management.

RÉSUMÉ. — *La télédétection, facteur de développement Outre-Mer : approche et méthodologie.* — La nécessité d'améliorer l'exploitation des ressources naturelles est devenue une priorité mondiale. Les pays en développement sont particulièrement concernés par ce problème étant donné que dans la plupart des cas, les données valables concernant leur territoire ne sont pas toujours disponibles et suffisamment précises. Les techniques de télédétection représentent un outil très valable dans le domaine de l'évaluation et du contrôle des ressources naturelles : c'est pourquoi cette technologie est de plus en plus utilisée au cours des dernières années. Jusqu'il y a 10-15 ans, les premières sources d'information en matière de télédétection étaient constituées d'appareils visuels tels que des caméras, des radars et des radiomètres ; ils étaient montés à bord d'avions et fonctionnaient dans le segment infrarouge visible du spectre électromagnétique. Plus récemment, le même type d'appareils, installés à bord de satellites, fournissaient des images répétitives et synoptiques de la terre. Ce texte décrit les caractéristiques principales des systèmes de télédétection modernes et plus précisément

* Head of the EPO ESRIN ; Via Galilei, C.P. 64, I-00044 Frascati (Italy).

ceux nés de la technique spatiale ; il esquisse aussi les méthodes généralement utilisées pour le traitement des données fournies par de tels systèmes et destinées à l'exploitation des ressources naturelles.

SAMENVATTING. — *De teledetectie, factor van overzeese ontwikkeling : benadering en werkwijze.* — De noodzaak om de ontginning van de natuurlijke bronnen te verbeteren is een wereldprioriteit geworden. De ontwikkelingslanden zijn in het bijzonder hierbij betrokken doordat juiste informatie over hun grondgebied in de meeste gevallen niet tijdig en dikwijls onnauwkeurig verstrekt wordt. De teledetectietechnieken vertegenwoordigen voor het schatten en het controleren van de natuurlijke bronnen een kostbaar werktuig : daarom worden zij de laatste jaren meer en meer gebruikt. Tot tien à vijftien jaar geleden bestonden de eerste inlichtingsbronnen over de teledetectie uit visuele toestellen zoals cameras, radar- en radiometers aangebracht op vliegtuigen. Deze apparatuur werkte in het zichtbare infrarood gedeelte van het electromagnetisch spectrum. Onlangs werden gelijkaardige toestellen aan boord van ruimtetuigen gemonteerd ; zij verstrekten synoptische en herhalende beelden van de aarde. Deze tekst beschrijft de voornaamste eigenschappen van de moderne teledetectiesystemen en in het bijzonder deze ontstaan uit de ruimtevaarttechnieken ; hij schetst eveneens de algemeen gebruikte methodes voor de verwerking van de gegevens die door zulke systemen verschaft worden en die dienen voor de ontginning van de natuurlijke bronnen.

*
* *

1. INTRODUCTION

Men have always been interested in the exploration of the world and have kept as a record of their experiences, maps describing the salient features of the places they visited. Through the centuries, cartography developped into an elaborate scientific discipline which made use of increasingly sophisticated instruments and methodologies.

Furthermore, over the same time span, the world around us changed considerably under the pressure of natural events like earthquakes, volcanic eruptions, thunderstorms, fires, floods and droughts as well as from man-made modifications such as deforestation and agricultural activities.

Mapping is a long, laborious and intensive task, therefore up until very recently, only a rather small portion of the world land masses were accurately mapped.

For a long time, i.e. up until a few decades ago, men lived under the impression that world resources were basically unlimited and were there for men to use. In the last century however, under the pressure of industrialization and the impressive growth of the world population, it became clear that the Earth as a system has clear limits to its resources and cannot indefinitely absorb the modifications to the environment induced by men's activities.

In order to understand Earth as a system, it was necessary to study it on a global basis with instruments more powerful than those cartographers had at their disposal. These are the reasons why photogrammetry, and now remote sensing, are being used more and more often throughout the world as tools for monitoring and management of natural resources and of the environment.

2. GENERAL PRINCIPLES OF REMOTE SENSING

A man can be seen as a typical remote sensing system : in fact, it includes a mobile and pointable platform (the head) placed at some height from ground and equipped with two pointable sensors (eyes) operating in stereo, sensitive to the visible portion of the electromagnetic spectrum, capable of automatic focusing from near to far range. The stereo colour images sensed by the eye can be stored on short, and sometimes on a long term basis, into the brain.

Men have several drawbacks in performing remote sensing : their natural height and mobility are limited and their recording system does not convert easily into manageable information. In order to arrive at a viable remote sensing system, it was necessary to overcome both limitations referred to herewith.

As regards mobility, technology offered at first balloons, later aircrafts and today spacecrafts : sensors can therefore look at the earth from heights ranging from hundreds of metres to thousands of kilometres and travel at speeds ranging from a few metres to several thousands of kilometres per hour.

As regards ways of recording information, film cameras offered a first solution to the problem ; today modern electronics and telecommunication techniques allow for conversion of the sensed information into a digital bitstream, its transmission to ground, recording, archiving and processing.

Without attempting to be rigorous, one can define remote sensing as the technique of measuring, from an appropriate platform, the electromagnetic energy reflected from and/or radiated by the area of interest in one or several windows of the electromagnetic spectrum.

Today a large number of instruments are available to remote sensing ; they can be broadly classified as passive and active sensors. In the first category one can include : cameras, radiometers, optical mechanical scanners, pushbroom scanners, spectrometers, image tubes (Vidicon) etc. In the second category can be listed : different types of radars (real aperture side

looking radar SLAR, synthetic aperture radars SAR, radar scatterometers, radar altimeters, etc.) operating in the microwave part of spectrum, and laser based sensors (i.e. Lidar, doppler lidar, etc.).

All sensors listed above have been used for earth observation purposes on aircrafts and spacecrafts to observe the atmospheres, land, ocean, ice, etc.

Figures 1, 2 and 3 show typical products generated by remote sensing instruments.

Each one of the instruments referred to above is sensitive to different characteristics of the target being surveyed. We shall attempt in the remainder of this note, however, to concentrate on those instruments which have reached an operational status and that could be particularly useful for helping progress of developing countries.

3. REMOTE SENSING REQUIREMENTS OF DEVELOPING COUNTRIES

Developing countries include a large variety of states around the world ; they have very different social, economical and environmental characteristics. The majority of them are located in tropical/equatorial areas (i.e. $\pm 30^\circ$ of latitude) which include most of the rain forests and large deserts of the world.

Many developing countries lack several of the basic infrastructure available in the industrialized countries such as accurate maps and updated inventories of their natural resources, an efficient communication network and transportation system, irrigation systems, efficient administrations, etc.

Often they are pressed by growing population coupled with insufficient food production and even human resources with the required know-how to optimally exploit local possibilities.

Developing countries requirements include :

- Up-to-date inventory of natural resources, both renewable and non-renewable ;
- Tools for optimal management of available water resources ;
- Forecast of agricultural production yield ;
- Info required to monitor key environmental processes such as deforestation, desertification, urbanization processes around large cities, etc. ;
- Info to support fishing activities in coastal waters ;
- Weather forecast information, particularly for hazard warnings (hurricanes, floods) as well as rainfall.

Data should become available in a timely fashion in order to be usefully exploited and utilized.



FIG. 1. — Heat Capacity Mapping Mission — HCMM — DAY-INFRARED image of Switzerland. Data recorded by Earthnet at Lannion Station, France on 16 Sept. 1979.

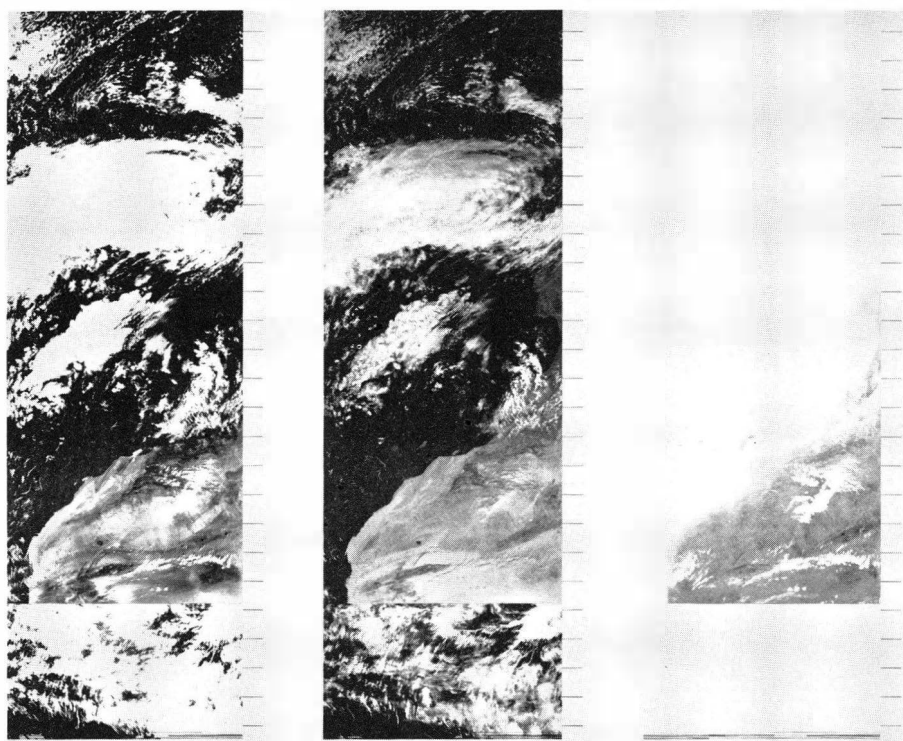


FIG. 2. — NIMBUS — 7 data recorded at Earthnet Maspalomas Station on 15 Oct. 1981.



FIG. 3. — SEASAT-1 SAR data over Frankfurt-Wiesbaden area in Germany. Data recorded at Earthnet Oakhanger Station, UK.

4. POSSIBLE CONTRIBUTIONS OF REMOTE SENSING

Remote sensing is a technique aimed at providing information concerning the surface of the earth : it is clear therefore that remote sensing can only provide inputs to decision makers on status, requirements and possible actions needed for resource management.

We shall attempt in the following chapters to outline the type of sensors and systems which are in operation today and which could be of value for fostering progress of developing countries. We shall not elaborate on experimental research tools being developed since, for developing countries today, only operational systems can be of real value.

The remote sensing instruments available today have already been alluded to in point 2 ; their performance is associated with the specific implementation, the platform on which they are mounted as well as the auxiliary information provided.

We have mentioned that the bulk of remote sensing surveys is still carried out through airborne campaigns : cameras, multispectral scanners, radiometers as well as SLAR's and SAR are being extensively used around the world and specifically in developing countries for survey and resource management.

We shall concentrate on spaceborne systems which are either in operation or will become available in the near future, only because they are more limited in number and easier to describe ; it should be clear however, that the majority of the considerations applying to space remote sensing systems are equally valid for airborne ones.

The only exceptions to the above statements are :

- Airborne surveys require local infrastructure to operate (i.e. airfields with fuel and mechanical support) ;
- Airborne systems have better ground resolution but significantly lower coverage due to lower flight altitude. This implies that to survey the same area a longer time has to be allocated ;
- Aircrafts are not always a stable platform particularly in the presence of bad weather, turbulence, etc. : in rough weather conditions flights may not be possible (as regards platform stability, high altitude systems can overcome this problem but at significant extra costs) ;
- Today's international standard prices of spaceborne remote sensing imagery is significantly lower compared with equivalent airborne ones. It is however very difficult to anticipate whether the same policy will continue to apply in the future.

5. SPACEBORNE REMOTE SENSING SYSTEMS

The best known space remote sensing system is certainly the Landsat programme which originated from NASA [1] * in 1972 and has now reached operational status and is operated by NOAA [2] though it might shortly be transferred to the private sector.

Figure 4 shows the salient characteristics of the mission while Figures 5 and 6 describe the two main sensors embarked on the Landsat 4 & 5 satellites which are the systems presently in operation. Figures 7 & 8 show typical examples of MSS [3] and TM [4] imagery.

A Landsat satellite comprises :

- A platform which carries a power generation system with solar array capable of providing approximately 1 kW in sunlight ;
- The 3 axes stabilization system with high pointing accuracy ;
- The data handling and transmission subsystem for Housekeeping and Payload data transfer to ground, both via direct read-out and through data relay satellite (TDRSS) [5] the two payload instruments, i.e. MSS and TM.

The orbit selected is sun synchronous with equator crossing time at approximately 9.30 a.m. ; the orbit is designed such that it repeats itself every 16 days (18 days in the case of Landsat 1, 2, 3) and during this cycle the instruments can image any area of the world. The field of view of the instruments are 185 km with a ground resolution of approximately 80×80 m for MSS and 30×30 m for TM (120 m for the thermal IR channel).

The spectral resolution is 4 channels in the visible (VIS) and near infrared (IR) for MSS and 7 channels in the VIS and IR for TM.

Landsat data are usually collected in real time by ground stations around the world. It is worth recalling that since Landsat 4/5 launch data over a large portion of the world data can be collected using a data relay satellite link.

The Landsat satellite can nominally operate providing up to 450 MSS scenes and 250 TM scenes per day each scene having a size of 185×185 km. Clearly not all data acquired are usable due to cloud cover problems. To date, nearly 2 million MSS scenes and several dozen thousand TM scenes have been collected worldwide.

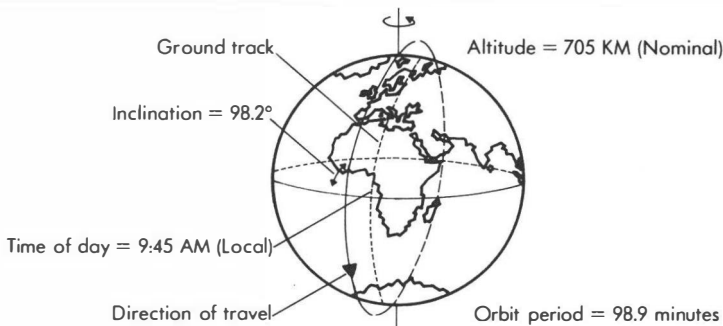
* The numbers in square brackets [] refer to the notes p. 38.

LANDSAT orbital parameters

Orbital Parameter	Value
Semi-major Axis (km)	7086.127
Inclination (deg.)	98.252
Period (min.)	98.940
Time of Descending Node	
Equatorial Crossing (local time)	9:39 AM
Coverage Cycle Duration	16 days (233 revs)
Distance Between Adjacent Ground Tracks at Equator (km)	171.5

Satellite transmission bands

Band	Frequency (GHz)
P	0.3 - 1.0
L	1.0 - 2.0
S	2.0 - 4.0
C	4.0 - 8.0
X	8.0 - 12.5
Ku	12.5 - 18.0
K	18.0 - 26.5
Ka	26.5 - 40.0
V (mid-range)	50



The MSS and TM sensors are aligned. They scan the same geographical area. The swath width is approximately 185 km for both instruments.

FIG. 4. — The Landsat spacecraft characteristics.

The Multispectral Scanner

The MSS on LANDSAT 4/5 is similar to that flown on previous LANDSAT missions.

The ground pixel resolution is 80 by 80 meters. The four spectral bands are identified by a new numbering system but the spectral coverage remains unchanged.

LANDSAT 1-2-3

LANDSAT 4/5

Band 4	→	Band 1
Band 5	→	Band 2
Band 6	→	Band 3
Band 7	→	Band 4

Comparison of LANDSAT TM and MSS sensor characteristics

TM spectral data			MSS (Multi-Spectral Scanner) data	
Band	Spectral range, μm	Radiometric resolution, NE_{ρ}	Spectral range, μm	Radiometric resolution NE_{ρ}
1	0.45-0.52	0.8%	0.5-0.6	0.57%
2	0.52-0.60	0.5%	0.6-0.7	0.57%
3	0.63-0.69	0.5%	0.7-0.8	0.65%
4	0.76-0.90	0.5%	0.8-1.1	0.70%
5	1.55-1.75	1.0%		
6	10.4-12.5	0.5 K NETD		
7	2.08-2.35	2.4%		

NE_{ρ} = Noise equivalent reflectance

NETD = Noise Equivalent Temperature Difference

FIG. 5. — The Multispectral Scanner Sensor on board Landsat 4-5 plus the comparison between MSS and TM.

The Thematic Mapper

The TM sensor collects radiometric data in seven spectral bands. It offers a ground resolution of 30 by 30 meters in the six bands of the visible and the infrared, and of 120m by 120m in the thermal IR channel.

TM main applications

Band	Spectral range	Application
1	0.45 - 0.52 μm	Water body penetration, coastal water mapping, differentiation of soil from vegetation.
2	0.52 - 0.60 μm	Measurement of visible green reflectance peak of vegetation for vigor assessment.
3	0.63 - 0.69 μm	It is a chlorophyll absorption band useful in discriminating vegetation.
4	0.76 - 0.90 μm	Determination of biomass content. Delineation of water bodies.
5	1.55 - 1.75 μm	Determination of vegetation moisture content and soil moisture. Differentiation of snow from clouds.
6	10.40 - 12.50 μm (thermal infrared)	Vegetation stress analysis. Soil moisture discrimination, thermal mapping.
7	2.08 - 2.35 μm	Discrimination of rock types. Hydrothermal mapping.

FIG. 6. — The Thematic Mapper Sensor onboard Landsat 5.

Towards the end of 1985 the first European remote sensing satellite called SPOT is scheduled for launch, and is a result of the cooperation between France, Sweden and Belgium. Figure 9 provides the salient characteristics of this mission.

Compared to Landsat, SPOT will offer improved spatial resolution, i.e. 20 m in the multispectral mode and 10 m in the panchromatic mode : the sensor also has a pointing capability which allows for generation of stereo pairs and higher revisit times if required. Spectral resolution in the multispectral mode is limited to three bands in the visible and near infrared region. SPOT has an on-board recording capability on top of the standard real-time downlink. An extensive set of ground stations, partly using the present Landsat network, will be in place to acquire and process SPOT data.

Other opportunities for space remote sensing are offered by the U.S. Space Shuttle and the Spacelab developed by Europe. Typical examples of missions adapted to Shuttle are SIR-B/C [6], Metric Camera, Microwave Remote Sensing Experiment (MRSE), MOMS [7], etc. These sensors however, can only be operated on a short-term campaign aimed at validation of technology or for specific applications on an opportunity basis.

The European Space Agency has recently started a new remote sensing mission called ERS-1, aimed primarily at ocean and ice applications. Within the sensor complement, there is a Synthetic Aperture Radar (SAR) with a high resolution, all-weather/all time capability, i.e. 30 m over an 80 km



FIG. 7. — Multispectral Scanner Image of an area in Turkey from Landsat 4. Data recorded on 16 Sept. 1982.



FIG. 8. — Landsat 4 Thematic Mapper view of Cairo and the Nile River in Egypt. Data recorded on 12 Dec. 1982.

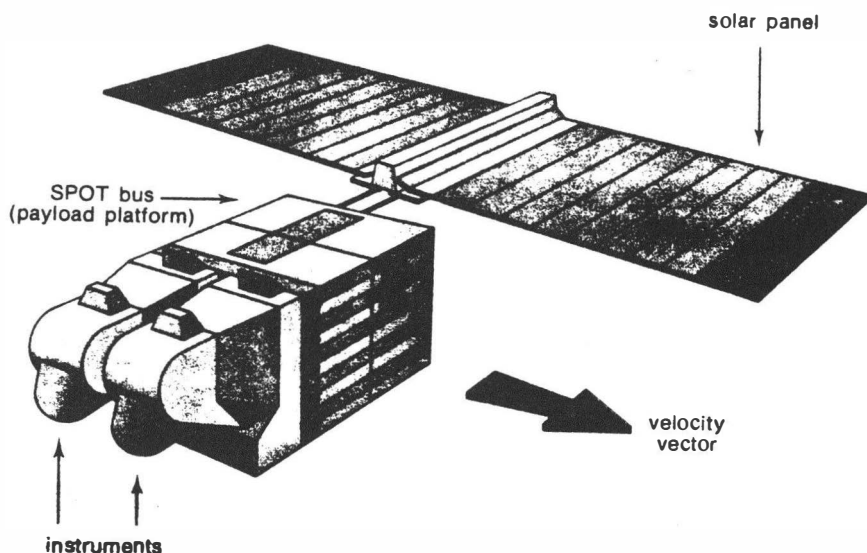


FIG. 9. — The SPOT mission characteristics.

The SPOT satellite consists of two parts : the SPOT "bus", a standard multipurpose platform, and a payload.

SPOT bus :

The various subsystems of the SPOT bus perform such essential functions as :

- precision control of the orbit ;
- three-axis stabilization ;
- electrical power supply ;
- housekeeping telemetry transmission ;
- command reception ;
- monitoring and programming of the payload through an onboard computer with a memory that is loaded by ground control.

The SPOT bus design, which is compatible with a variety of Earth observation payloads, offers the possibility of launching other satellites of similar type without incurring the expense of developing a new platform.

Payload

The payload is mounted on one of the side panels of the bus ; it includes the Earth observation instruments and the mission telemetry package. The payload of the first SPOT satellite consists of two identical high resolution visible (HRV) imaging instruments and a package comprising two magnetic-tape data recorders and a telemetry transmitter.

Satellite

The complete satellite which will weigh approximately 1750 kg at the start of its life, will operate in a circular sunsynchronous near-polar orbit (inclination : $98,7^\circ$) at an altitude of 832 km. SPOT will be launched by the Ariane launcher. Characteristic dimensions are $2 \times 2 \times 3,5$ m for the satellite body, and 15,60 m for the overall length of the deployed solar panel.

swath. (Figure 10 gives the ERS-1 mission specifications and a sample of a SAR image). This sensor, though not optimized for land applications, will also be operated over land and will probably prove very useful as a complement to standard VIS-IR sensor data, particularly in those tropical countries where cloud cover and high atmospheric turbulence make standard Landsat/SPOT type data of limited value.

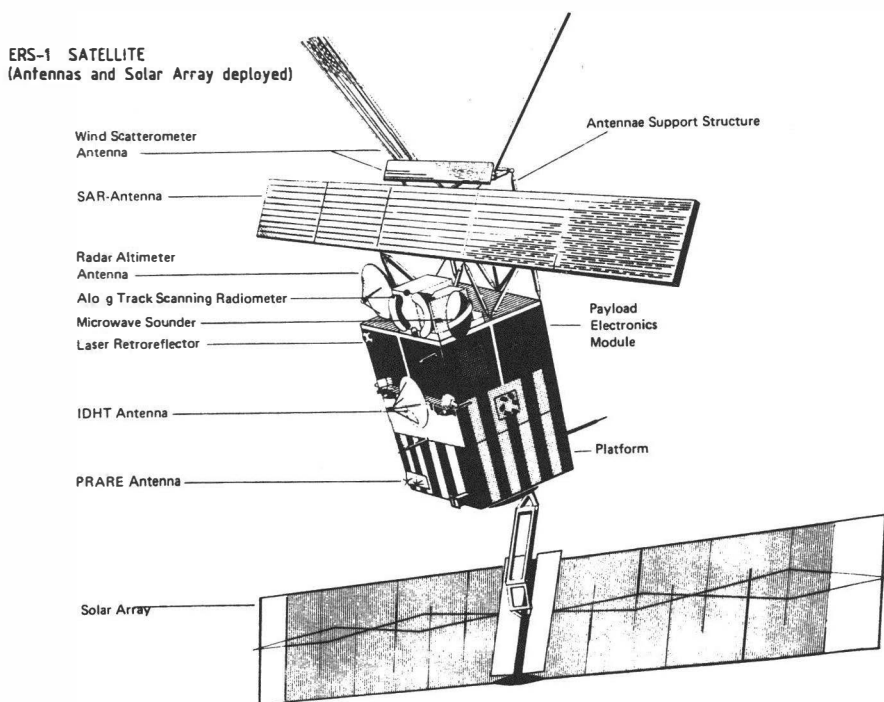


FIG. 10. — The ERS-1 (European Remote Sensing Satellite) spacecraft and the main characteristics.

Mean elements and derived parameters of the ERS-1 baseline orbit

epoch	1988/06/21	mean altitude (km)	778
	$12^{\circ}0'0''$	revolutions per day	14 1/3
semi-major axis (km)	7153.14	orbital period (min)	100.5
eccentricity	0.0010	local solar time at desc. node (hr)	10.4
inclination (deg)	98.52	track repetition period (day)	3
r.a. ascending node (deg)	247.07	equatorial spacing of adjacent tracks (km)	932
arg. perigee (deg)	90.0		
mean anomaly (deg)	0.0		

<i>ERS-1 altimeter parameters</i>		<i>ERS-1 AMI SAR mode characteristics</i>	
Frequency	13,5 GHz	Spatial resolution	30 m×30 m
Bandwidth	400 MHz	Swath width	80 km *
Pulse length	20 μ s	Radiometric resolution	2,5 dB
Peak RF power	50 W	at min σ_0 of	- 18 dB
PRF	1,0 kHz (approx.)	Orbital height (nominal)	777 km
Antenna diameter	1.2 m	Incidence angle (nominal)	23°
Significant wave height		RF frequency	5.3 GHz
Measurement range	1 m to 20 m	RF peak power	4.8 kW
Measurement accuracy	0.5 m or 10%	RF mean power	300 W **
Attitude-measurement		Pulse length	37 μ s
accuracy	10 cm (1 σ , 1 s)	Compressed pulse length	64 ms
Backscatter coefficient		Bandwidth	19 MHz
accuracy	± 1 dB (1 σ)	PRF (nominal)	1700 Hz
Tracking window	64 gates \times 2.5 ms	Antenna length	10.0 m
(ocean mode)	each	Antenna height	1.0 m
Tracking window	64 gates \times 10 ms	Raw data quantisation	51 + 5Q
(ice mode)	each		

* There is a goal to increase this to 100 km.

** At output of power amplifier.

Main characteristics of the multi-mission platform (PFM)

- Compatibility with Sun-synchronous, circular orbits at altitudes between 600 km and 1200 km.
- Compatibility with local time of satellite passes (ascending and descending node : 0800 to 1600 h).
- Available power : 1.9 kW (beginning-of-life) provided by a solar generator.
- Power-storage capacity : 4×23 Ah.
- Attitude-control performance :
 - pointing towards Earth centre with yaw-steering capability
 - stability on yaw : 1.1×10^{-3} °/s
 - pitch and roll : 7×10^{-4} /s
 - accuracy : 0.15° for all axes
- Attitude measurement accuracy : better than 0.15°.
- Orbit control :
 - parallel and perpendicular to the orbit plane
 - maximum capability 580 000 Ns (300 kg of hydrazine)
- Satellite management : by on-board computer with 20 kwords (16 bit) memory available for the payload management.
- Communications with ground :
 - telemetry and telecommand via an S-band transponder compatible with ESA and NASA networks
 - transmitted power : up to 200 mW
 - data rate : 2 kbit/s

6. REMOTE SENSING DATA UTILIZATION

As indicated in the previous chapters, remotely sensed data are recorded either on film or in digital form on appropriate support such as computer compatible tapes (CCT's), disks etc. The first category of sensors includes cameras and microwave sensors flown on aircrafts as well as on Shuttle/Spacelab which are the only presently available space platform which allows instrument and film retrieval from space: the case of the Metric Camera (ESA/FRG), Large Format Camera (U.S.) and SIR-A are typical examples of this kind of mission.

Films, once recovered, are developed and to the extent necessary, processed [8]; thereafter they can be reproduced and made available to users for direct utilization.

Interpretation is carried out by specialized personnel (photo-interpreters), making use of more or less sophisticated photogrammetric equipment (i.e. analytical digital plotters). Through this procedure it is possible to generate maps, visual classifications, etc.

The second category of instruments (typically all instruments flying on civilian free-flier satellites like Landsat, SPOT, Seasat, etc.) generate digital data which is received and archived on ground. As a first step, the data set of interest are preprocessed to correct for sensor and platform-induced distortion and in order to annotate them accurately; such data products can thereafter be written on a film support and be handled as products of the first category of sensors mentioned above. They can otherwise be kept in digital form and processed on modern image analysis systems.

This mode of operation is becoming increasingly popular for a variety of applications which are not strictly cartographic in nature and particularly when quantitative information need to be extracted from the data set for further use in decision making.

Within this paper only a few general concepts related to data processing and interpretation will be touched upon since other speakers will address the topic of utilization of remote sensing for specific applications.

It is only worth recalling that remote sensing consists of measuring the energy reflected or radiated by the earth surface in one or several windows of the electromagnetic spectrum. It is well known that each type of earth cover, this being rocks or vegetated land, water, ice or forest has a well identified spectral response to such energy sources as sunlight or the electromagnetic field generated by an active radar.

The response could be quite univocal in case the whole spectrum were sampled adequately: this however, would represent too much of a burden

from the viewpoint of instrumentation and volume of data to be handled. For this reason, multispectral scanner provide only measurements in a limited number of windows of the electromagnetic spectrum which take account of atmospheric absorption and the specific spectral curves of the type of surface covers which one aims at evaluating.

The multispectral imagery therefore can be processed to identify classes of land features whose spectral response can be identified with a high level of confidence. Using this method it is also possible to identify quantitatively the percentage of the surface of a specific region or nation which represents forest, water, agricultural land, rangeland, urban areas, etc. It is also possible to identify some agricultural cultures and estimate the stage in their phenological cycle that they were at the time of sensing.

In this fashion, a variety of land information can be derived and made available within a reasonably short time. The effectiveness of the methodologies referred to above is improving as more performant instruments become available (i.e. TM/SPOT) and as more mature and powerful processing systems come to the market at accessible prices. Last but not least, one should mention that progress is also due to an increased level of understanding of the background mechanisms which influence the sensing process that originate from the significant research work carried out over the years around the world.

7. CONCLUSIONS

Some general considerations on the remote sensing techniques and their value for developing countries have been presented. It is clear that remote sensing is still in an evolutionary stage, therefore, it is not possible to draw definitive conclusions upon its value and impact for the progress of developing countries. We have attempted to highlight the many potential advantages that remote sensing offers as a tool for resource management.

It would be unreasonable not to mention some of the problems to be faced with space remote sensing and particularly the advanced technology required to take full advantage of its potential as well as the need for training and cooperation.

In conclusion, we can say that remote sensing has shown the real dimension of the Earth and the large interdependence between natural and human activities throughout the world : remote sensing has also provided a tool to better understand those intricate relationships and these ambitious objectives could very well be the challenge for the '90's.

NOTES

- [1] NASA : National Aeronautics and Space Administration.
- [2] NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration.
- [3] MSS : Multispectral Scanner.
- [4] TM : Thematic Mapper.
- [5] TDRSS : Tracking and Data Relay Satellite System.
- [6] SIR-B/C : SIR = Shuttle Imaging Radar.
- [7] MOMS : Modular Optoelectronic Multispectral Scanner.
- [8] In the case of SAR, the return signal can be recorded on film as a hologram and then be processed through an optical branch to obtain the high resolution image of the target sensed.

Symposium
«De Teledetectie,
Factor van Overzeese Ontwikkeling»
(Brussel, 7 december 1984)
Koninklijke Academie voor Overzeese
Wetenschappen
pp. 39-53 (1986)

Symposium
«La Télédétection,
Facteur de Développement Outre-Mer»
(Bruxelles, 7 décembre 1984)
Académie royale des Sciences
d'Outre-Mer
pp. 39-53 (1986)

LA COOPÉRATION ENTRE PAYS INDUSTRIALISÉS ET PAYS EN VOIE DE DÉVELOPPEMENT DANS LE DOMAINE DE LA TÉLÉDÉTECTION

PAR

R. GRÉGOIRE *

RÉSUMÉ. — Parmi les principaux problèmes auxquels sont confrontés actuellement la plupart des pays en voie de développement, on peut citer les difficultés croissantes à satisfaire les besoins alimentaires essentiels de leurs populations et la dégradation rapide de leur environnement. La Communauté européenne, dans sa politique de coopération avec le Tiers Monde a, pour sa part, donné une grande priorité à la lutte contre la faim et contre la destruction des facteurs naturels de production que sont l'eau, la terre, le microclimat pour ne retenir que les principaux. La télédétection apparaît comme un des outils à utiliser dans cette lutte qui se caractérise, avant tout, par son ampleur et sa pérennité dans le temps. Mais l'efficacité des techniques de télédétection dépendra d'une collaboration très étroite entre pays européens industrialisés et pays en voie de développement. Elle passera obligatoirement par la prise en compte, dans les programmes d'intervention, des principales contraintes auxquelles se heurtent et se heurteront encore longtemps les pays en voie de développement : sous-administration, difficultés de communication, insuffisance de compétence technique, environnement socio-économique souvent défavorable. Une attention toute particulière devra être portée aux possibilités d'utilisation effective de la masse d'informations que la télédétection est à même de fournir. Aussi est-il primordial de développer très largement la formation en matière de télédétection dans les pays industrialisés et mieux encore dans les pays en voie de développement eux-mêmes.

SAMENVATTING. — *De samenwerking tussen geïndustrialiseerde landen en ontwikkelingslanden op het gebied van de teledetectie.* — Twee van de belangrijkste problemen waarmee de meeste ontwikkelingslanden vandaag te kampen hebben zijn : de steeds aangroeiende moeilijkheden om aan de hoofdbehoeften aan voedingsmiddelen van hun bevolkingen te voldoen en de snelle afbraak van hun omgeving. De Europese Gemeenschap heeft wat haar betreft, in haar samenwerkingspolitiek met de Derde Wereld, een grote prioriteit gegeven aan de strijd tegen de honger en tegen de vernieling van de natuurlijke productiefactoren te weten het water, de aarde, het microklimaat om er maar de voornaamste van op te noemen. De

* Administrateur principal à la Direction générale du Développement, C.E.E. — Bureau 1018, Berlaumont, Rue de la Loi 200, B-1049 Bruxelles (Belgique).

teledetectie blijkt één van de mogelijke werktuigen te zijn in deze strijd, die vooral gekenmerkt wordt door zijn omvang in de ruimte en zijn voortbestaan in de tijd. Maar de doeltreffendheid van de teledetectietechnieken zal afhangen van een heel nauwe samenwerking tussen Europese geïndustrialiseerde landen en ontwikkelingslanden. Zij zal onvermijdelijk gepaard gaan met het in acht nemen, in de tussenkomstprogramma's van de voornaamste belemmeringen waarmee de ontwikkelingslanden vandaag en nog lang zullen te kampen hebben : onderadministratie, communicatiemoeilijkheden, onvoldoende technische bekwaamheid, een vaak ongunstige socio-economische omgeving. Er zal heel in 't bijzonder moeten gelet worden op de mogelijkheden om de massa informaties die de teledetectie in staat is te leveren, op een wezenlijke manier te gebruiken. Daarom is het ook primordiaal de formatie op het gebied van de teledetectie op grote schaal te ontwikkelen in de geïndustrialiseerde landen en beter nog in de ontwikkelingslanden zelf.

SUMMARY. — *The cooperation between industrialized countries and developing countries concerning remote sensing.* — Two of the main problems with which most of developing countries are nowadays confronted are : the increasing difficulties to satisfy the essential needs for food of their populations and the fast degradation of their environment. The European Community as far as it is concerned, has given, in its cooperation policy with the Third World, a great priority to the fight against hunger and against destruction of natural production-factors of which main of them are : the water, the earth, the microclimate. Remote sensing appears to be one of the tools which can be used in this fight mainly characterized by its space-extent and its time-perenniality. But the efficiency of remote sensing technics will depend on a very close collaboration between industrialized European countries and developing countries. It necessary will take into account, in the intervention programmes, the main constraints into which developing countries run and will run still for a long time : underadministration, communication difficulties, technical competence insufficiency, often unfavourable social-economical environment. A most particular attention has to be drawn to the possibilities of effective use of the information mass which remote sensing is able to give. Therefore it is primordial to develop in a very large way the formation in matters of remote sensing in the industrialized countries and better still in the developing countries themselves.

*
* *

1. LES PROBLÈMES AUXQUELS SONT CONFRONTÉS ACTUELLEMENT LES PAYS EN VOIE DE DÉVELOPPEMENT

La plupart des pays en voie de développement sont actuellement confrontés à de très graves problèmes qui sont, pour ne citer que les plus importants d'entre eux :

- La sous-alimentation quand ce n'est pas la disette qui frappe leur population ;
- La destruction des grands équilibres écologiques ;
- La surexploitation des réserves halieutiques ;
- Un exode rural qui se traduit en particulier par une urbanisation anarchique et excessive.

Depuis une vingtaine d'années, les effets de ces phénomènes sont accentués par différentes causes :

- La crise économique mondiale ;
- La sécheresse qui sévit en de nombreuses régions ;
- Une véritable explosion démographique qui touche l'ensemble des pays en voie de développement ;
- Un accroissement excessif des troupeaux domestiques en zone subaride en particulier ;
- Enfin une diffusion sans doute trop rapide de techniques d'exploitation de la biosphère, certes performantes, mais aussi souvent trop agressives pour un milieu écologique insuffisamment préparé à les recevoir.

2. LA COMMUNAUTÉ ÉCONOMIQUE EUROPÉENNE FACE À CETTE SITUATION

La Communauté Économique Européenne, de par ses relations privilégiées avec la plupart des pays en voie de développement notamment au travers de la Convention de Lomé, mais aussi par le passé colonial de ses membres, par tous les liens économiques et culturels qui se sont tissés au fil des ans, tout particulièrement avec l'Afrique, ne doit, et d'ailleurs ne peut pas se désintéresser de ces problèmes fondamentaux.

C'est ainsi que parallèlement à l'aide alimentaire qui doit encore se poursuivre pour répondre à des besoins immédiats à satisfaire, c'est au travers de deux axes de sa politique en matière de coopération avec les pays en voie de développement que la Communauté entend concrètement manifester son intérêt majeur pour ces problèmes : les «Stratégies alimentaires» et les «Actions thématiques».

Enfin, dans les accords de coopération qu'elle est en train de renouveler avec les États «ACP» dans le cadre de la 3^{ème} Convention de Lomé, la lutte contre la sousalimentation et la protection de l'environnement sont au nombre des objectifs fondamentaux de la convention et nombreuses sont les références à ces deux problèmes tout au long des textes qui comprennent même un chapitre particulier traitant de la lutte contre la désertification.

3. LA RECHERCHE EN COMMUN DE SOLUTIONS ET LES CONTRAINTES DU CONTEXTE LOCAL

Si d'une part l'on assiste donc à une prise de conscience très nette de la gravité de ces problèmes et de l'urgence qu'il y a à leur apporter remède, tant au niveau des pays industrialisés qu'à celui des dirigeants des pays en voie de développement, l'on constate malheureusement, par ailleurs, que

plusieurs conditions locales nécessaires à la réussite des interventions se détériorent chaque jour davantage : sous-alimentation, difficultés de communication, insuffisance de compétence technique, environnement socio-économique défavorable, populations rurales accablées par la sécheresse, etc.

D'autre part, les conséquences tragiques de ces situations vont s'aggravant très rapidement. Dans la course qui se joue, entre l'extension de ces phénomènes et la lutte menée pour les arrêter, voire les faire regresser, l'homme est actuellement perdant car ses réactions sont trop dispersées, trop lentes, ses moyens financiers trop limités, sa mobilisation sur le terrain très insuffisante.

Comment remédier à cette situation ? Problèmes gigantesques qui vont s'aggravant, pays de plus en plus accablés par la situation présente alors que la mise en œuvre des solutions demande des décennies d'intervention, nécessité d'une mobilisation massive à tous les échelons, depuis la conception des actions et leurs financements jusqu'à leur réalisation sur le terrain alors que les actions sur le terrain restent ponctuelles et le fait d'un petit nombre.

Avec ces objectifs, et dans ce contexte, les techniques de télédétection peuvent-elles être valablement utilisées ?

4. LA TÉLÉDÉTECTION PEUT-ELLE CONTRIBUER À APPORTER DES SOLUTIONS ?

Les techniques de télédétection spatiale permettent une vue d'ensemble de certains phénomènes terrestres ainsi que des ressources naturelles ; en outre, la répétitivité de ces informations permet d'avoir une vision dynamique des phénomènes observés, ce qui peut être parfois d'une extrême importance.

Elles répondent donc tout particulièrement à certaines caractéristiques des problèmes posés par la lutte contre la sous-alimentation et la dégradation des facteurs naturels de production.

Domaines d'intervention.

Leurs applications très diverses peuvent être regroupées, en ce qui concerne le sujet traité, en quatre grands secteurs :

- La connaissance du milieu naturel et des ressources, renouvelables ou non, qu'il offre à l'homme : hydrologie des rivières pérennes avec notamment suivi des crues pour une utilisation optimale de leur capacité au point de vue irrigation, force motrice, fourniture d'eau à la population et aux animaux domestiques ; inventaire et suivi des mares pérennes ou non en zone steppique ; recherche des sources d'eau douce dans la frange littorale des mers et océans ; connaissance des stocks halieutiques et de

leurs déplacements ; inventaire des zones forestières : état sanitaire de la végétation arborée et analyse de la productivité ; inventaire et évolution des superficies boisées, en pâturage, cultivées ou en jachère, pour une écologie ou un terroir donné ; suivi et contrôle des feux de brousse ; repérage des prédateurs à grands déplacements tels que les criquets ; analyse dynamique de la phytomasse et de la charge en bétail souhaitable ; suivi, au long de leur cycle végétatif, des principales productions agricoles avec état sanitaire et prévision des récoltes ; connaissance de la faune sauvage et de ses déplacements ; géologie, géomorphologie, prospections minières ; identification et suivi de zones à haut risque d'érosion.

- La connaissance des phénomènes météorologiques dans leur relation avec une bonne gestion du milieu où vit l'homme : la prévision des disponibilités en eau de crue des fleuves ; une meilleure planification des calendriers de mise en culture que ce soit sous pluie, par submersion ou par irrigation ; une certaine prévision des productions permettant de mieux asseoir une politique alimentaire ; la prévision et l'évaluation des désastres naturels que sont les inondations, la sécheresse, les cyclones, etc. ; le bilan hydrique par zone écologique aussi homogène que possible.
- La cartographie : mise à jour rapide et économique des documents cartographiques nationaux rendue obligatoire par les déplacements de l'habitat humain, de l'occupation des sols, de l'infrastructure routière, etc. ; établissement de documents thématiques tels que pâturages, plaines d'inondation et éventuellement aménagements hydro-agricoles...
- La démographie : analyse dynamique des phénomènes de population tels que migration, urbanisation contrôlée et sauvage, nomadisme et amorce de sédentarisation ; identification précise des zones dans lesquelles un échantillonnage doit être fait pour un recensement valable de la population.

Conditions d'application.

Les avantages pratiques, que ces nouvelles techniques peuvent apporter dans ces différents domaines, postulent que les projets d'application soient menés de bout en bout ; les données analysées doivent être transmises à l'utilisateur final et celui-ci doit effectivement les utiliser.

Or, l'utilisation opérationnelle de la télédétection spatiale suppose de disposer :

- Des plates-formes d'acquisition des données multispectrales : les satellites ;
- Des stations au sol pour la réception de ces données, le prétraitement et la mise en forme des données brutes ;

- Du réseau de distribution à échelle régionale ;
- Des structures nationales spécialisées dans le domaine des techniques de télédétection et servant d'interface à l'utilisateur final ;
- Des utilisateurs thématiciens.

A l'exception de l'Inde, aucun pays du Tiers Monde ne dispose de ses propres satellites et même ne participe effectivement à l'élaboration des programmes de travail confiés à ces capteurs. En outre, pour plusieurs régions, et c'est particulièrement le cas en Afrique de l'Ouest, Centrale et de l'Est, aucune station au sol n'existe – ou n'existait au moins jusqu'en juin 1984 et encore n'intéresse-t-elle qu'une partie de l'Afrique de l'Ouest – pour recevoir directement les données qui doivent pouvoir être enregistrées dans les satellites, et retransmises au sol dès que possible. Les images acquises ainsi sont peu nombreuses et le délai séparant la prise de vue de la réception de l'image par l'utilisateur est de l'ordre de 3 à 4 mois au minimum. C'est le cas actuellement des images Landsat du type MSS [1] *. Ce sera encore le cas pour SPOT [2] mais avec sans doute des délais plus courts entre la prise de vue et la réception de l'image par l'utilisateur.

La distribution de l'imagerie-satellite postule une structure régionale spécialisée et une structure nationale au niveau de chaque pays qui regroupe les demandes émanant des utilisateurs nationaux et les adresse à la structure régionale : un exemple de celle-ci fonctionnant correctement est le Comité de Gestion Régional (C.G.R.) du Centre Régional de Télédétection de Ouagadougou (C.R.T.O.) qui regroupe une douzaine de pays du Magrheb, de l'Afrique de l'Ouest et de l'Afrique Centrale. Mais cette efficacité est encore fonction d'un soutien en moyens (personnel et financier) en provenance des pays industrialisés qui devra être maintenu encore longtemps.

Les activités du C.R.T.O. s'articulent autour de 5 pôles :

- Vulgarisation des potentialités des techniques de télédétection auprès des utilisateurs nationaux ou régionaux ;
- Formation technique des utilisateurs ;
- Assistance aux utilisateurs déjà familiarisés avec ces techniques ;
- Archivage et distribution des images ;
- Traitement analogique des images.

Quant à la structure nationale, elle a cinq fonctions indispensables :

- La diffusion des documents de télédétection (imageries) et éventuellement même un archivage de ces documents ;

* Les chiffres entre crochets [] renvoient aux notes p. 52.

- Le conseil aux utilisateurs ; les techniques évoluant très vite, l'utilisateur thématique ne peut ou n'a pas le temps de suivre en permanence l'évolution des techniques ; il faut donc qu'il puisse soumettre ses objectifs propres à des spécialistes qui le conseilleront dans le type d'images et le mode d'exploitation appropriée ;
- Traitement et mise en forme des images : l'imagerie fournie par le centre régional de diffusion n'est souvent pas directement exploitable par l'utilisateur. Il faut alors modifier le document, ce qui implique équipement et personnel spécialisés, toutes choses assez onéreuses qui s'opposent à la dissémination de l'imagerie initiale au niveau des services utilisateurs : passage du négatif au positif, changement d'échelle en fonction des documents cartographiques disponibles, composition colorée, traitement diazoïque ou simplement reproduction de l'image... ;
- Valorisation de la formation des spécialistes en les insérant dans une structure où leurs capacités techniques puissent trouver à s'appliquer et même à se développer... c'est rarement le cas ;
- La coordination à l'échelon national des programmes de télédétection.

Derniers éléments indispensables pour une mise en œuvre efficace des techniques de télédétection, les utilisateurs thématiques. Ils existent, au moins potentiellement, dans beaucoup de pays d'outre-mer au niveau du ministère du plan, des ministères économiques et techniques et même aux plus hauts niveaux politiques. Il a d'ailleurs été indiqué plus haut combien les domaines d'intervention de la télédétection recouvrent les préoccupations essentielles des pays d'outre-mer.

Malheureusement par manque d'informations, les techniques de télédétection sont généralement comprises ou, au moins, mal comprises par les décideurs politiques et techniques du développement, soit qu'ils les considèrent comme un luxe et les jugent trop sophistiquées pour les pays en voie de développement, soit qu'ils y voient une solution miracle à tous les maux.

5. EXEMPLES D'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION

AU TITRE DE LA COOPÉRATION

COMMUNAUTÉ ÉCONOMIQUE EUROPÉENNE /

PAYS EN VOIE DE DÉVELOPPEMENT

Voyons comment cela se passe dans la réalité à partir de projets financés par la Communauté européenne et mettant en œuvre des techniques de télédétection spatiale.

Le problème posé était le suivant : dans le cadre de l'effort que le Mali fait pour satisfaire ses besoins céréaliers, une meilleure maîtrise de l'eau par submersion contrôlée dans les plaines d'inondation du fleuve Niger plantées en riz devrait à la fois augmenter la production totale annuelle et surtout en atténuer les variations interannuelles suite à une pluviométrie irrégulière. D'où un programme important d'aménagements hydro-agricoles décidé par le gouvernement malien et financé par le Fonds Européen de Développement.

Malgré l'aménagement de superficies importantes, les résultats étaient loin d'atteindre les espérances en partie à cause du manque d'informations locales fiables sur la pluviométrie, les superficies, le régime de la crue, etc., ce qui entraînait un gaspillage d'inputs annuels très important et un mauvais emploi des investissements réalisés. Parallèlement, l'impossibilité devant laquelle on se trouvait de prévoir le volume — même approximativement — de la récolte de riz, empêchait d'organiser correctement son stockage et sa distribution et de programmer en temps utile l'aide alimentaire extérieure.

Compte tenu du contexte local, l'on s'est tourné vers les techniques de télédétection pour, à titre expérimental, d'une part, connaître le plus tôt possible la crue du fleuve afin d'en déduire les emblavures à mettre en riz et donc de programmer, en temps utile, tous les inputs nécessaires pour les cultures, et d'autre part, essayer d'appréhender ce que pourra être le volume de la récolte à partir d'une meilleure connaissance des superficies mises en riz et des paramètres culturaux tels que variétés de riz, état de vigueur, densité...

Le projet intitulé «Prévisions de productions rizicoles dans la vallée du Niger en amont du delta central du Niger» a permis en quatre campagnes, à partir des imageries Landsat, des vols de simulation SPOT et des opérations continues au sol de «vérité terrain», de mettre sur pied avec une précision suffisante, une méthode de prévision précoce des crues à partir d'une série de réservoirs hydrologiques pouvant servir d'indicateurs de la crue et de prévisions de la récolte, par une bonne connaissance des superficies en les principales variétés de riz dressé et flottant, et par discrimination de la végétation naturelle non rizicole. Si bien que l'on pourrait songer, à l'issue de la phase actuelle dont l'objet est la mise au point des méthodes, de passer ultérieurement à une phase opérationnelle.

Mais pour l'instant, l'on ne dispose que de très peu d'images et pas toujours aux moments les plus parlants en matière de prévision. En outre, les délais d'obtention des imageries restent très longs alors que pour que les informations soient opérationnelles il faut les avoir pratiquement en temps

réel. Or l'Afrique de l'Ouest n'est pas couverte par une station de réception des satellites d'observation de la terre ; d'où la décision, après accord de la NOAA [3], de demander à l'ASE [4], qui gère la station de réception de Mas Palomas aux Iles Canaries chargée de capter les informations fournies, dans le domaine maritime, par les satellites Nimbus, de compléter les équipements pour pouvoir capter les Landsat, et peut-être demain SPOT. C'est chose faite pour Landsat depuis juin 1984. Les imageries, après prétraitement sur place, sont ensuite transportées par avion au Centre ASE de Frascati qui effectue la mise en forme des données et en assure la diffusion auprès des utilisateurs chargés du projet, en l'occurrence le CCR [5] à Ispra en collaboration avec des laboratoires européens spécialisés. Parallèlement est assurée, par des stages au CCR à Ispra et prochainement au Centre régional de télédétection de Ouagadougou, la formation de cadres africains en télédétection (Guinéens et Maliens), donc des deux pays directement concernés par le projet.

Les premiers résultats obtenus ont paru suffisamment prometteurs au Comité Interétats de lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS) pour qu'il demande l'extension du projet, à compter de 1984 à la fois sur le plan thématique par inclusion du mil et du sorgho comme cultures céréalières sèches de l'Ouest africain et sur le plan géographique par extension du projet au Sénégal, au Niger et au Burkina Faso.

Notons aussi que parallèlement à ce projet, et grâce à la mise à hauteur de la station de Mas Palomas pour recevoir les satellites Landsat, onze études confiées à sept instituts européens de recherche sont en cours d'exécution pour mieux caractériser les phénomènes de désertification autour du Sahara et tout particulièrement au Sahel dans des domaines aussi divers que la démographie, le bilan hydrique, les formations végétales naturelles, l'hydrographie de surface ou souterraine à faible profondeur, etc.

Il importe toutefois de noter que contrairement au projet précédent, ainsi qu'à son extension en cours qui sont financés sur les programmes régionaux au titre du Fonds Européen de Développement dans le cadre de la Convention de Lomé II, donc à l'initiative des pays bénéficiaires et sur les crédits qui leur sont réservés, ce projet d'études périsahariennes ainsi que la mise à hauteur de la station de Mas Palomas sont financés sur des fonds propres de la Communauté. Et la tentation fut grande, ne serait-ce que pour des raisons de facilité, de n'en faire qu'une affaire européenne. Mais l'obligation de vérifier au sol des observations obtenues à partir des satellites a amené, bien évidemment, les services de la Commission à associer les responsables nationaux des pays concernés après une information appro-

fondie sur les motivations de ce projet et les buts recherchés par cette action. De même, il a fallu justifier l'installation de réception du satellite Landsat à Mas Palomas, donc en pays espagnol, donc européen industrialisé et non à Ouagadougou au Burkina Faso, pays en voie de développement comme cela était envisagé depuis longtemps, car le schéma technique et le montage financier de la future station de Ouagadougou n'étaient pas au point, alors qu'il était urgent de pouvoir disposer des informations en temps réel. Compte tenu de l'urgence et aussi des moyens limités dont disposait la Communauté, la seule solution réaliste était la mise à hauteur de la station de Mas Palomas, à titre provisoire et en attendant la réalisation de la station de Ouagadougou dont le diamètre de couverture terrestre est par ailleurs très supérieur à celui de la station de Mas Palomas.

Dans les deux cas, et pour le projet de prévisions rizicoles depuis plusieurs années, des techniciens africains viennent se former en Europe afin de mieux connaître les techniques de télédétection et ainsi pouvoir les utiliser dans leurs pays d'origine. Malheureusement, ils ne retrouvent pas, la plupart du temps, tous les instruments dont ils ont besoin, et peut-être encore plus un capital d'intérêt pour ces techniques qui leur permettraient de valoriser leurs connaissances. Si bien que très vite, ils vivent en vase clos, incompris ou pas suivis par leur entourage et les retombées de leurs formations spécifiques tendent vite vers zéro.

Il faut que l'on soit conscient que tous ces échanges d'informations n'ont tout de même pas entièrement levé la suspicion et les a priori que les responsables des pays d'outre-mer ont envers la télédétection, toujours soupçonnée — et non sans raison parfois — d'espionnage de la part des pays industrialisés, et par les connaissances ainsi accumulées, de la possibilité ultérieurement de faire pression sur leur politique nationale.

6. LES RÔLES RESPECTIFS DE L'EUROPE ET DES PAYS EN VOIE DE DÉVELOPPEMENT EN MATIÈRE D'EMPLOI DES TECHNIQUES DE TÉLÉDÉTECTION

Ces deux exemples, même simplement survolés, mettent bien en évidence les possibilités ainsi que les limites techniques de l'emploi de la télédétection. Mais ils peuvent, par leur vécu pratique servir de base à ce que pourrait être, à ce que devrait être, la coopération entre pays en voie de développement et pays industrialisés en matière d'emploi des techniques de télédétection.

Notons tout d'abord que les techniques de télédétection spatiale peuvent être des outils efficaces dans le développement des pays en voie de développement et qu'elles doivent donc avoir leur place dans l'éventail des moyens que les pays industrialisés peuvent mettre au service de ces pays.

A une exception bien connue, l'Inde, la plupart des pays en voie de développement, seuls ou groupés, ne seront pas à même, avant longtemps, de développer leurs propres lanceurs et leurs satellites d'observation de la terre. Ceux-ci sont donc, au moins pour le proche avenir, un des apports essentiels des pays industrialisés. Mais il faut prévoir à moyen terme d'aider au développement de cette télédétection endogène en assumant les conséquences graves que cela peut avoir dans les pays industrialisés sur les plans politique et commercial.

En attendant cette phase ultérieure de collaboration, il importe, dès à présent, de faire participer les pays en voie de développement à l'élaboration des programmes d'investigation par satellite, comme cela a été le cas cette année, à l'occasion du programme d'évaluation préliminaire des données de SPOT (P.E.P.S.) où, à la suite d'un appel des services du CNES [6] et de SPOT Image, les propositions d'études émanant de plusieurs dizaines de pays serviront de base au futur programme SPOT après analyse et étude par un comité scientifique international où figure un chercheur d'un pays en voie de développement. Ceci devrait aider à atténuer les craintes de certains pays et à démystifier les espoirs exagérés de certains autres.

Mais ceci ne dispense pas, bien au contraire, au-delà de la sphère des spécialistes de la question dans les pays en voie de développement, de mener une campagne d'information et de sensibilisation auprès des décideurs politiques et des responsables de haut niveau, économiques, financiers et techniques pour faire connaître les possibilités et les limites, au moins actuelles, de la télédétection. Ce rôle revient encore, pour l'essentiel, aux pays industrialisés mais il faut être conscient que le risque est grand de donner à cette «information» une allure de publicité à dominante commerciale, tant ces techniques mettent en jeu des moyens scientifiques et financiers très importants que l'on songe évidemment à rentabiliser au mieux. Ce peut être aussi une occasion supplémentaire de manifester la compétition acharnée qui s'instaure entre grandes puissances industrielles pour la conquête des marchés, compétition qui ne fait souvent que peu de cas de la réalité des pays en voie de développement. Les problèmes que posent les futures installations de stations de réception de satellite à Ouagadougou et à Nairobi en sont des exemples parlants. Un des objets de cette sensibilisation et non des moindres devrait être de constituer un milieu d'accueil plus favorable aux spécialistes

nationaux de la télédétection formés dans les pays industrialisés et en Europe tout particulièrement, ce qui augmenterait les effets positifs de nos programmes de formation dont les retombées sont pour l'instant extrêmement limitées.

La formation est en effet un des grands secteurs de collaboration possible et nécessaire entre pays en voie de développement et pays industrialisés. Elle doit se poursuivre en Europe comme cela est par exemple déjà le cas au CCR d'Ispira, au CNES en France ou chez ITC [7] en Hollande. Mais il faut surtout qu'elle se développe dans les pays en voie de développement (CRTO à Ouagadougou par exemple ou à Nairobi pour citer deux exemples africains) afin que la formation dispensée soit plus fortement marquée qu'elle ne l'est actuellement, par le contexte local.

Mais, en tout état de cause, les spécialistes formés seront en nombre insuffisant. Il y a donc place pour une assistance technique débarrassée autant que possible de toute préoccupation commerciale. Elle devra en particulier participer à l'identification et à la réalisation de programmes pilotes préparatoires à des actions plus opérationnelles, comme cela est le cas actuellement pour le projet de prévision rizicole cité plus haut.

Au-delà de ces grands secteurs de collaboration possible en matière de techniques de télédétection et si l'on veut qu'elles soient effectivement facteurs de développement des pays en voie de développement, il faut que les pays industrialisés assument un certain nombre d'engagements.

D'abord assurer la garantie de la continuité dans la fourniture de l'information, donc accès sans réserve aux satellites, mise en place et fonctionnement d'un réseau de stations au sol de réception de l'information, place suffisante des problèmes spécifiques aux pays d'outre-mer dans les programmes d'études ; ceci permettant en particulier l'obtention de l'information en temps réel, ce qui est essentiel pour les prévisions de récolte.

L'obtention de l'information, le traitement des images et la mise en forme des informations pour les utilisateurs sont encore beaucoup trop onéreux pour la plupart des pays en voie de développement. Cette charge financière doit donc être encore pour longtemps supportée par les pays industrialisés et ce d'autant que l'on a souvent intérêt à combiner les informations provenant de plusieurs satellites.

L'évolution rapide des techniques et la recherche de performances accrues, au niveau de la résolution par exemple, sont souvent de peu d'intérêt, au moins dans l'immédiat, pour les pays en voie de développement. Par ailleurs la masse grandissante des documents fournis ne fait que creuser le fossé entre les potentialités offertes par la télédétection et le faible usage

que peuvent en faire ces pays. Parfois même les effets peuvent en être vraiment négatifs, comme dans le cas du repérage et du suivi des bancs de poissons qui ne bénéficient qu'à la grande pêche industrielle, et accentuent la surexploitation des réserves halieutiques des pays en voie de développement côtiers.

Il s'avère donc nécessaire que soient aussi menées par les pays industrialisés, même si cela ne les concerne pas directement, des recherches sur des techniques simples d'emploi de la télédétection mettant en œuvre du matériel moins performant certes mais qui serait plus proche de la capacité locale d'utilisation. Ainsi, dans la plupart des cas, seule l'imagerie sous forme de photographie peut être valablement utilisée au niveau des services nationaux qui, par ailleurs, disposent généralement d'un bon laboratoire de photographie, permettant la reproduction avec changement d'échelle. La participation de chercheurs des pays en voie de développement à ces recherches pourrait aider à les ancrer dans la réalité des futurs pays bénéficiaires.

7. CONCLUSION

Ces quelques réflexions n'ont évidemment fait qu'effleurer le problème de la collaboration possible des pays industrialisés européens et des pays en voie de développement dans une gamme de techniques appelées certes à un grand avenir à l'échelon planétaire mais aussi à jouer un rôle important comme outil dans la lutte contre le sous-développement.

Toutefois il faut garder présent à l'esprit qu'elles sont par ailleurs le prototype de ces techniques de pointe qui ont besoin, pour mobiliser toutes leurs potentialités, d'une assise technico-économique très solide que bien peu de pays en voie de développement peuvent offrir actuellement et ce, sans aucun doute, encore pour longtemps.

Objet d'une concurrence sévère entre pays industrialisés, elles peuvent être facilement sans merci pour des pays qui ne représentent qu'une faible partie du marché solvable et qui, de ce fait, risquent de ne pas avoir le droit à la parole au moment de l'élaboration des programmes, ce qui les marginalisera tout au long de leur mise en œuvre.

Exigeantes en matière grise, onéreuses, elles impliquent obligatoirement, si l'on veut les utiliser efficacement dans les pays en voie de développement, un engagement important et pérenne des pays européens sinon elles ne feront que susciter outre-mer des espoirs qui resteront sans lendemain.

On voit combien, dans cette collaboration souhaitable entre pays industrialisés — notamment européens — et pays en voie de développement,

le poids de ceux-là est grand, et faible celui de ces derniers. Ce serait pourtant une erreur grave que d'en déduire qu'il n'est pas nécessaire d'associer vraiment les pays en voie de développement dans l'étude et l'application de ces techniques. Ainsi sans une prise en compte permanente de la «vérité terrain» sous toutes ses formes, la télédétection perd beaucoup de son intérêt pratique ; et cette vérité terrain, seuls les pays en voie de développement peuvent la procurer.

Enfin sur un plan plus général, sans une mise en commun de tous les atouts — et la télédétection peut en être un, à certaines conditions décrites ci-dessus — le monde actuel ne pourra relever le double défi auquel il est confronté : la malnutrition grandissante et la dégradation rapide du patrimoine naturel, phénomènes qui frappent aujourd'hui de plein fouet de nombreux pays en voie de développement mais qui obligatoirement demain marqueront aussi les pays industrialisés. A ce titre, l'utilisation de la télédétection apparaît comme un bon placement pour l'avenir aussi bien pour les pays en développement que pour les pays industrialisés.

NOTES

- [1] MSS : Multispectral Scanner.
- [2] SPOT : Satellite probatoire d'observation de la terre.
- [3] NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration.
- [4] ASE : Agence Spatiale Européenne.
- [5] CCR : Centre Commun de Recherche.
- [6] CNES : Centre National d'Études spatiales (France).
- [7] ITC : Institut international de levés aériens et sciences de la terre — International Training Center.

BIBLIOGRAPHIE

- BERG, A. 1984. La télédétection : le projet Joliba en Afrique de l'Ouest. — *Le Courrier* (Bruxelles), mars/avril 1984, pp. 70-72.
- FERRARI, G. M. & GRÉGOIRE, J. M. 1983. Analyse de mesures radiométriques au sol sur le site rizicole de Tamani (Rép. du Mali). Influence de certains paramètres de rendement sur le comportement spectral. — *In* : Deuxième Colloque international sur les signatures spectrales d'objets en télédétection (Bordeaux, 13-16 septembre 1983).
- FONTANEL, A. 1984. Programme d'évaluation préliminaire des données SPOT. — *Nouvelles de SPOT*, juillet 1984, 5, SPOT image, Toulouse.

- GRÉGOIRE, J. M. 1983. Apport des techniques de télédétection pour l'inventaire des superficies cultivées en riz dans le bassin du Niger en amont du delta central nigérien. — *Agronomie* 1983, pp. 1019-1026, I.N.R.A.
- GRÉGOIRE, J. M. 1984. Critères d'opérationnalité pour la télédétection spatiale appliquée à la surveillance des ressources naturelles en Afrique de l'ouest. — CCR, Ispra.
- MARTIN, H. 1983. Perspectives d'utilisation des techniques spatiales pour certains pays en voie de développement. — CEE, Bruxelles.

Symposium
«De Teledetectie,
Factor van Overzeese Ontwikkeling»
(Brussel, 7 december 1984)
Koninklijke Academie voor Overzeese
Wetenschappen
pp. 55-63 (1986)

Symposium
«La Télédétection,
Facteur de Développement Outre-Mer»
(Bruxelles, 7 décembre 1984)
Académie royale des Sciences
d'Outre-Mer
pp. 55-63 (1986)

QUELQUES ENSEIGNEMENTS DE RÉCENTS CONGRÈS DE TÉLÉDÉTECTION

PAR

Henri LADMIRANT *

RÉSUMÉ. — L'auteur rapporte quelques idées récoltées à l'occasion de récents Congrès de télédétection, notamment le «Symposium sur les signatures spectrales» tenu à Bordeaux en 1983 et le 18^{ème} Symposium international sur l'Observation de la Terre (ERIM) tenu à Paris en 1984.

SAMENVATTING. — *Enkele lessen te trekken uit recente teledetectiecongressen.* — De auteur stelt enkele ideeën voor die hij opgedaan heeft ter gelegenheid van recente teledetectiecongressen, nl. het «Symposium sur les signatures spectrales» gehouden te Bordeaux (1983) en het 18^{de} Internationale Symposium Teledetectie (ERIM) gehouden te Paris (1984).

SUMMARY. — *Some lessons drawn during recent congresses on remote sensing.* — The author presents some ideas gathered during recent congresses, a.o. the «Symposium sur les signatures spectrales» held in Bordeaux (1983) and the 18th International Symposium on Remote Sensing (ERIM) held in Paris (1984).

*
* *

INTRODUCTION

La plupart des idées exposées ici ont été glanées au cours de récents congrès de télédétection. Seules des idées qui nous ont paru générales, originales, ou en relation avec les pays en voie de développement ont été reprises, c'est dire la subjectivité de notre sélection.

* Musée royal de l'Afrique centrale (Tervuren), Section de Cartographie et de Photo-interprétation, Leuvensesteenweg 13, B-1980 Tervuren (Belgique).

1. LE «DEUXIÈME COLLOQUE INTERNATIONAL SUR LES SIGNATURES SPECTRALES D'OBJETS EN TÉLÉDETECTION

Tenu à Bordeaux en septembre 1983 et organisé par le CNES * et l'INRA sous les auspices de la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection, ce colloque a réuni quelque 250 participants qui ont pu assister à une centaine d'exposés. Les Actes de ce colloque ont été publiés dans le courant de 1984 ; ils comprennent un millier de pages.

Ce colloque avait pour but de rassembler des spécialistes en télédétection appartenant à des disciplines diverses : agronomes, forestiers, géologues, hydrologues, océanographes, géographes, physiciens, tous préoccupés par une même approche des problèmes, c'est-à-dire l'analyse des propriétés de surface des objets et par leur corrélation avec les caractéristiques des différents domaines du spectre électromagnétique. L'établissement de ces corrélations est indispensable au choix des techniques et des méthodes les mieux appropriées à l'étude d'un phénomène donné et à l'élaboration des clés d'interprétation qui serviront à décrypter les informations fournies par les capteurs des satellites.

L'organisation des journées était basée sur des bandes «naturelles» de fréquences des ondes électromagnétiques.

A. *Courtes longueurs d'ondes (des ultra-violets aux infrarouges réfléchis).*

Une seule communication a traité de l'U-V par procédé actif au Lidar (pinceau laser). Par mesure de la différence de temps entre la réflexion sur la surface de l'eau et sur celle du fond, il est possible de dresser un profil du fond jusqu'à une profondeur générale de 5 m, et exceptionnellement de plusieurs dizaines de mètres dans les eaux claires tropicales. Ce procédé est appliqué par hélicoptère.

Le système, appliqué aux nappes de pétrole, permet, par fluorescence déclenchée, d'identifier les hydrocarbures.

Dans le visible et le proche infrarouge, plusieurs études ont porté sur la réflectance pseudo-lambertienne en fonction de l'angle de vue, de l'angle d'éclairage, des types de structure fine dans les couverts végétaux, du rayonnement diffus.

Un nouveau radiomètre, placé sous la Navette spatiale, permet la prise d'images avec 128 bandes spectrales. On se demande d'ailleurs quel est l'intérêt pratique d'un tel raffinement si l'on pense que ce système produit

* La liste des sigles est reprise p. 63.

130 Mb/s, c'est-à-dire environ le double des informations qui peuvent être traitées par la navette.

Des communications ont traité des étalonnages relatifs et absolus effectués après chaque ligne de balayage. Pour le Thematic Mapper de Landsat D, on a mesuré qu'après une vingtaine d'orbites, la perte d'énergie captée était de l'ordre de 7%. Cette perte est due à un dépôt de fines gouttelettes (de 1 micron) sur les surfaces des miroirs et des détecteurs, phénomène dû aux produits de dégazage.

Une étude géologique intéressante a porté sur les mesures de réflectances de matériaux géologiques des zones d'oxydation au Groenland. La signature, de 0,45 à 0,9 micron correspond à deux minéraux : hématite et goethite. La détection des zones d'oxydation est nette par l'utilisation des ratios. Les zones d'oxydation sont géologiquement importantes car elles peuvent indiquer la présence possible de corps minéralisés en profondeur.

B. Infrarouge thermique.

L'infrarouge thermique est prometteur en géologie en raison de l'absorption sélective des minéraux par les vibrations d'étirement de la liaison Si-O notamment.

Les diagrammes d'inertie thermique en fonction de la longueur d'onde permettent une nette distinction de certaines roches.

Il n'existe pas de bon capteur pour la fenêtre atmosphérique de 8 à 14 microns, ce qui explique le petit nombre d'études sur cette zone.

C. Hyperfréquences.

Les études actuelles portent sur la rétrodiffusion du couvert et du sol ainsi que sur leurs interactions. Les propriétés géométriques et diélectriques du couvert, essentiellement végétal, sont analysées en détail selon l'orientation du champ électrique et les polarisations. L'eau aurait une forte influence sur l'atténuation du signal, phénomène qui pourrait être utilisé pour une estimation quantitative de l'eau du sol.

La recherche de modèles atmosphériques, et notamment de l'action de l'atmosphère sur le phénomène de polarisation, doit être poursuivie mais en évitant d'introduire des artefacts par complexification.

Une confrontation des données verticales et obliques et l'analyse de leur association sont des thèmes d'étude proposés.

On a enregistré le regret de ne pas entendre assez de communications traitant d'applications et d'accumuler trop de travaux théoriques dont on se

demande s'ils sont tous bien justifiés. Mais nous avons déjà entendu déplorer le manque de données concrètes d'applications lors du Symposium de Photo-interprétation tenu à Delft (Pays-Bas) en 1963 sous les auspices de la Société Internationale de Photogrammétrie.

La réunion de Bordeaux a mis en évidence une opposition de l'approche méthodologique entre l'École américaine et l'École européenne (M. C. GIRARD). Alors que l'École américaine tente de retrouver en vérité-sol la compréhension des informations issues de traitements sophistiqués d'images, l'École européenne s'attache plus à l'étude en laboratoire et dans la nature, des phénomènes spectraux au niveau du sol en vue de les intégrer ensuite aux données des capteurs satellitaires. Il semblerait que la méthode européenne soit plus «cartésienne», ce qui ne signifie pas nécessairement qu'elle soit meilleure. Les deux approches se complètent très vraisemblablement.

2. LE «18^e SYMPOSIUM INTERNATIONAL SUR L'OBSERVATION DE LA TERRE» [3]

Ce symposium était organisé à Paris, du 1 au 5 octobre 1984, par l'Environmental Research Institute of Michigan (ERIM).

L'importance de cette manifestation se dégage des quelques chiffres suivants : 700 inscriptions provenant de 40 pays, 60 communications orales et 205 présentations par voie d'affichage, 37 stands commerciaux, participation massive d'organisations importantes : NASA, NOAA, CNES, GDTA, BRGM, CEE, UNESCO notamment.

A l'inverse du Colloque de Bordeaux, cette réunion de Paris couvrait de nombreux créneaux : études de simulation, capteurs et techniques diverses d'observation, applications cartographiques et thématiques diverses, programmes futurs pour l'observation des océans, prévision de catastrophes, méthodes statistiques, développement économique, rôle de l'industrie, aspects commerciaux, le futur considéré dans le segment bord et dans le segment sol.

A. *L'aide aux pays en voie de développement.*

Si la télédétection est bien la source fondamentale qui doit fournir des données de base aux preneurs de décisions, encore faut-il que ceux-ci acceptent ces informations et... prennent des décisions.

Quelques représentants africains se sont plaints de ce que les projets mettent souvent beaucoup trop de temps à démarrer car on leur envoie des experts ignorant le contexte général du projet (infrastructure routière, approvisionnement en aliments, en eau, en carburant, en recrutement de

main-d'œuvre, etc.). Il se passerait souvent plus d'un an avant la réelle mise en route d'un projet, notamment dans le domaine des cultures. Les organismes d'aide aux pays en développement devraient mieux se préoccuper de la logistique locale, aussi bien que des sources de financement et de l'intervention des universités.

Plusieurs délégués d'Afrique Noire, du Maroc, d'organismes internationaux ont fortement défendu l'idée selon laquelle un projet ne devrait pas être conçu pour une durée inférieure à 5 ans. En tous cas il ne convient pas de passer à des investissements en appareils avant deux ans ; il faut d'abord savoir si le personnel national est capable d'utiliser ce matériel.

On parle beaucoup d'un développement très rapide de la technologie mais, pour les pays en développement, l'évolution et les bienfaits de cette technologie sont plutôt symboliques.

Les bienfaits ne se feront sentir que dans les pays où les gens comprendront ces technologies ; les programmes de formation paraissent actuellement négligés (SELLMAN).

Si les ressortissants nationaux désirent participer aux projets et prendre en charge leurs propres problèmes, ils n'en sont pas moins intéressés par un stage débouchant sur un diplôme qui leur procurera une situation sociale meilleure.

Un aspect négatif des pays en développement est constitué par la précarité des paiements. Le personnel qui a acquis une certaine qualification n'est pas assuré que son travail durera et il sera souvent à l'affût d'un passage dans le secteur privé. Les bourses de formation devraient être assorties d'un contrat d'engagement à travailler un certain nombre d'années dans le pays. Mais ici se pose le problème de la légalité de semblable clause.

On estime que, pour la fin du siècle, il faudrait former quelque 100 000 spécialistes en télédétection, pour n'en conserver finalement que 10 000.

L'ITC (International Training Center), organisme hollandais de longue tradition et de renom international pour la formation en cartographie et en télédétection est un modèle du genre, d'où le regret de quelques-uns de ne pas voir d'ITC se créer en Afrique.

L'importance du développement des capacités linguistiques, à l'intérieur de sa propre langue mais aussi vis-à-vis des langues étrangères, a été mise en évidence.

L'Afrique possède deux centres importants de télédétection. Le Centre Régional Est-Africain de Télédétection, à Nairobi, est opérationnel depuis 1979 et a formé jusqu'à présent 600 stagiaires (stages plus ou moins longs : 1 à 3 semaines ou plusieurs mois) (ODEMYA). Ce centre, qui dispose de

10 000 images Landsat à l'échelle du millionième, est un service d'assistance aux utilisateurs dans les projets des pays est et sud-africains. Malgré un effectif relativement réduit (16 personnes de niveaux différents), il a pleinement réussi et n'est plus à même de faire face à toutes les demandes.

Un centre analogue, situé à Ouagadougou, fonctionne depuis 1977 et a organisé 400 stages.

B. *De futurs satellites.*

D'intéressants projets ont été proposés dont, pour certains, l'étude de faisabilité est déjà terminée. Citons :

- Le projet MOMS (Modular Optoelectronic Multispectral Scanner), développé par Messerschmitt sous contrat du Centre allemand de recherche aérospatiale, est conçu pour réaliser des images à possibilité stéréoscopique par «prises de vue» avant et arrière. Ce système permettrait d'obtenir les informations stéréoscopiques au cours d'une même trace, c'est-à-dire plus rapidement que SPOT. Les capteurs, travaillant sur deux canaux, ont été testés au cours de deux vols de la navette spatiale en 1983 et en 1984. La résolution moyenne au sol est de 20 m (BODECHTEL).
- Le projet TERS (Tropical Earth Resources Satellite), conçu par l'Indonésie et les Pays-Bas, est un système visant à contourner les effets négatifs de la couverture nuageuse qui couvre la zone intertropicale humide. L'utilisation du SAR (radar à ouverture synthétique) étant très coûteuse, les promoteurs envisagent une prise d'images par capteurs conventionnels (visible étendu) placés sur un satellite à orbite équatoriale qui, à une altitude de 1000 km, décrirait 4 orbites par jour. Par un dispositif de pointage vers les zones les plus dégagées, les capteurs couvriraient la zone comprise entre les latitudes 10° Nord et 10° Sud (HAEKE *et al.*). Ce satellite pourrait être lancé dans les années quatre-vingt dix.
- Le projet ERS-1 de l'ESA, dont l'Allemagne est le maître d'œuvre, aboutira à lancer, en 1989, un satellite de 2000 kg sur une orbite de 780 km d'altitude. Ce satellite est spécialement conçu pour l'étude des océans. Les informations devraient pouvoir être livrées dans les trois heures (DUCHASSIS).
- Le projet SPOT reste à l'état de projet pour un an encore, la mise sur orbite étant programmée pour le 1^{er} octobre 1985. SPOT-2, identique à SPOT-1 serait lancé en 1987 ou 1988 ; SPOT-3, prévu pour 1989 ou 1990, disposerait de deux bandes supplémentaires dans l'infrarouge. Seules les stations réceptrices de Toulouse et de Kiruna (Suède) pourront

recevoir les données enregistrées. Chacune des deux stations sera capable de recevoir 700 à 800 scènes par jour ; ces scènes seraient disponibles dans les 24 heures mais la capacité de pré-traitement serait seulement de 10% des scènes reçues. La société SPOT-Image est chargée de la diffusion des images et se dispose à travailler sur une base commerciale par une adaptation des produits à la demande et par l'organisation d'un service permettant à tous d'avoir accès, par ligne téléphonique, au catalogue central numérique de Toulouse. Des imagerie (Quick-look) seront disponibles sous la forme analogique, mais aussi sur vidéocassettes.

C. Archivage.

Un problème préoccupant est celui du stockage des données, celles-ci devenant pléthoriques, voire redondantes. L'utilisation du disque à lecteur au laser s'imposera d'ici peu mais il sera de toute façon nécessaire d'opérer un tri.

Un centre américain étudierait un procédé de transformation de l'image pour n'en conserver que les informations «non ubiquistes».

D. Droits d'auteur.

A partir du moment où la délivrance des images s'effectue sur un mode commercial, la protection des droits de reproduction prend une importance considérable et fait l'objet de difficiles mises au point.

E. Et les prix ?

La bande magnétique d'une scène Landsat CCT (Computer Compatible Tape) du système MSS (Multispectral Scanner) coûte, fin 1984, la somme de 30 000 F. Pour 1985 on annonce des prix pratiquement doublés.

Pour une scène SPOT, la bande magnétique est annoncée à environ 1000 dollars, ce qui correspond au même ordre de grandeur.

Actuellement le film négatif d'une scène Landsat MSS (en une seule bande spectrale), au 1/1 000 000, coûte 2860 F.

La bande magnétique d'une scène en Thematic Mapper (Landsat 4 ou 5) coûte 153 000 F, fin 1984.

Notons au passage que le prix d'une station de réception d'images satellite coûte, selon son degré de sophistication, de 2 à 10 millions de dollars (COLVOCORESSES).

3. LA «10^e CONFÉRENCE RÉGIONALE DE CARTOGRAPHIE DES NATIONS UNIES» *

Au cours de la 10^e Conférence régionale de Cartographie des Nations Unies tenue à Bangkok en janvier 1983, M. S. Kibria, secrétaire exécutif de la Commission économique et sociale pour l'Asie et le Pacifique, a souligné l'importance de la cartographie, au sens large, c'est-à-dire étendue à la géodésie, à la télédétection, aux levés cadastraux et hydrographiques, pour servir de substrat indispensable à tout programme de recherche.

De nombreux pays d'Afrique, d'Asie et du Pacifique, non seulement ne possèdent pas une couverture cartographique de base, mais encore n'ont pas les connaissances techniques nécessaires à sa réalisation. En vue de rendre une douzaine de pays autosuffisants dans ce domaine, le PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement) a entrepris des activités de coopération technique couvrant toute la gamme des disciplines cartographiques.

Parmi les conclusions, cette conférence [1] a recommandé notamment :

- Que les pays qui ont besoin d'assistance, en ce qui concerne l'utilisation, pour le développement de leurs ressources naturelles, des données obtenues par télédétection, aient recours aux programmes de coopération technique des Nations Unies afin d'obtenir la formation nécessaire ;
- Que les pays situés dans des zones sismiques actives mettent à profit les techniques avancées de levé géodésique et de localisation par satellites aux fins de prévoir les tremblements de terre ;
- Que soient créés des groupes d'experts en levé cadastral, celui-ci n'existant pratiquement pas dans les pays en développement, sans oublier le problème de la normalisation et de la stabilisation des noms géographiques.

RÉFÉRENCES

- [1] *ONU Chronique* (mars 1983), 20 (3), ONU, New York.
- [2] Archives internationales de la Société internationale de Photogrammétrie et de Télédétection. — Actes du Symposium International de la Commission VII (Toulouse, sept. 1982).

* L'auteur n'a pas assisté personnellement à cette Conférence.

- [3] Auteurs du «18^e Symposium international sur l'Observation de la Terre» (Paris, 1-5 octobre 1984) : FONTANEL ; BERG ; ROCHON ; BAUDOUIN ; WELCJ ; BODECHTEL ; CHAVEZ ; COLVOCORESSES ; DUCHASSIS ; SELLMAN ; ODEMYA ; VOÛTE ; VOGEL ; MALINGRAU ; MORPHY ; BENARD *et al.* ; MARINA ; DRURY ; CHAMPETIER DE RIBES ; HAEKE *et al.*.

SIGLES

CNES	Centre national d'études spatiales (France).
ERIM	Environmental Research Institute of Michigan (U.S.A.).
GDTA	Groupeement pour le Développement de la Télédétection aérospatiale (France).
BRGM	Bureau de Recherches géologiques et minières (France).
CEE	Communautés économiques européennes.
INRA	Institut national de Recherches agronomiques (France).
ITC	International Training Center (Pays-Bas).
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (U.S.A.).
SPOT	Système probatoire d'Observation de la Terre (France).
ESA	Agence spatiale européenne.
ERS	Earth Resources Satellite.

Symposium
«De Teledetectie,
Factor van Overzeese Ontwikkeling»
(Brussel, 7 december 1984)
Koninklijke Academie voor Overzeese
Wetenschappen
pp. 65-92 (1986)

Symposium
«La Télédétection,
Facteur de Développement Outre-Mer»
(Bruxelles, 7 décembre 1984)
Académie royale des Sciences
d'Outre-Mer
pp. 65-92 (1986)

TÉLÉDÉTECTION AÉROSPATIALE ET GÉOLOGIE DANS LE CADRE DE LA COOPÉRATION AU DÉVELOPPEMENT

PAR

Henri LADMIRANT *

RÉSUMÉ. — L'auteur commence par définir les champs d'action propres à la photogéologie et à la télédétection spatiale, puis montre quelques exemples d'application. Suit un résumé des réalisations belges d'avant 1978 ainsi que des programmes les plus importants menés actuellement par le Musée royal de l'Afrique centrale sur l'Afrique de l'Est. Il s'agit de la continuation de la cartographie géologique systématique du Rwanda et du Burundi, de l'étude globale de la chaîne kibarienne et de la participation à des projets internationaux de télédétection patronnés par l'UNESCO et l'Union internationale des Sciences géologiques (projets GARS et PEPS). Le Musée organise également différents enseignements de télédétection pour les ressortissants de pays africains. Après avoir donné quelques suggestions pour l'organisation des études géologiques applicables aux pays en voie de développement, l'auteur termine par quelques considérations sur les perspectives d'avenir de l'intervention de la télédétection aérospatiale pour les projets considérés.

SAMENVATTING. — *Aerospatiale teledetectie en geologie in het kader van de ontwikkelingssamenwerking.* — De auteur vangt aan met het bepalen van het actieveld eigen aan de fotogeologie en aan de spatiale teledetectie en toont vervolgens enkele voorbeelden van toepassing. Daarop volgt een samenvatting van de Belgische realisaties die 1978 voorafgingen, evenals van de belangrijkste programma's waarvan het Koninklijk Museum voor Midden-Afrika nu de leiding heeft voor Oost-Afrika. Het betreft de voortzetting van de systematische geologische kartering van Rwanda en van Burundi, de globale studie van de Kibara-keten en de deelneming aan internationale teledetectieprojecten gesteund door de UNESCO en de Internationale Vereniging voor Geologische Wetenschappen (projecten GARS en PEPS). Het Museum richt eveneens verschillende cursussen in over teledetectie voor onderhorigen van Afrikaanse landen. Na enkele suggesties over de organisatie van geologische studies op ontwikkelingslanden, eindigt de auteur met enkele beschouwingen over de verdere vooruitzichten van de tussenkomst van de aerospatiale teledetectie in de beschouwde projecten.

* Musée royal de l'Afrique centrale (Tervuren), Section de Cartographie et de Photo-interprétation, Chaussée de Louvain 13 — B-1980 Tervuren (Belgique).

SUMMARY. — *Remote sensing from space and geology related to cooperation for development.* — After having defined the proper action field of photogeology and remote sensing from space, the author gives a few examples of applications of blind and semi-controlled photogeology and of remote sensing. Then comes a short list of Belgian realizations prior to 1978 together with some of the more important programmes currently run in East Africa by the Royal Museum for Central Africa. More precisely the latter encompass the ongoing systematic geological mapping of Rwanda and Burundi, the global survey at the Kibara belt and the participation in international projects of remote sensing sponsored by UNESCO and the International Union of Geological Sciences (GARS and PEPS Projects). The Museum furthermore organizes several courses on remote sensing for students from African countries. The author then makes some suggestions concerning the organization of geological surveys which are of interest for developing countries. He concludes with some considerations as to the future chances of remote sensing from space intervening with the mentioned projects.

*
* *

INTRODUCTION

L'évolution économique des pays en voie de développement est étroitement liée à la découverte et à la mise en valeur des richesses minérales contenues dans leur sous-sol. Par opposition à la faune et à la flore, ces richesses sont aujourd'hui plus généralement appelées ressources non renouvelables.

Jusqu'il y a un quart de siècle, la plus grande proportion des zones minéralisées connues étaient localisées dans les zones tempérées. Les régions intertropicales et les régions adjacentes de conditions climatiques semblables, dans lesquelles sont situés la plupart des pays en développement et où vit une importante proportion de la population mondiale, pouvaient paraître défavorisées en ressources minérales. Cependant les études géologiques ont montré que ces régions étaient constituées de roches analogues à celles des autres parties du Globe ; on y retrouve les mêmes compositions lithologiques et des formations de tous âges, depuis les vieux socles cristallins précambriens jusqu'aux recouvrements cénozoïques et récents.

La cause de cette disproportion doit dès lors être recherchée dans des facteurs extérieurs. A l'immensité des territoires considérés et à la difficulté d'y circuler, il faut ajouter les conditions climatiques particulières caractérisées par des extrêmes de température et d'humidité responsables d'obstacles à de bonnes observations sur le terrain.

Dans la zone équatoriale on se heurte à la couverture de grandes forêts, les « enfers verts » du Brésil et du Zaïre notamment, tandis que dans d'autres régions, la roche est désagrégée et altérée sur une épaisseur pouvant dépasser dix mètres, ou bien encore est masquée par le développement de sols latéritiques.

En plus de ces obstacles naturels, il faut tenir compte du petit nombre de spécialistes nationaux et aussi du défaut d'organisation (DORR *et al.* 1972).

La reconnaissance de gisements minéraux est la facette économique de la recherche géologique en général. Le temps est dépassé où les prospections minières, poursuivies laborieusement sur le terrain, étaient orientées seulement vers une ressource minérale bien déterminée, négligeant délibérément la connaissance géologique d'ensemble. Suivant cette ancienne méthode, toute nouvelle recherche d'une autre valeur minérale ne pouvait s'appuyer sur les travaux précédents et les études repartaient à zéro.

Les méthodes de prospection modernes, les plus rapides et les plus efficaces pour établir l'inventaire des richesses naturelles minérales d'un pays, sont basées sur l'étude d'ensemble de vastes régions, étude visant à la compréhension de la lithologie et de la structure par l'établissement de cartes géologiques de base. Ces connaissances de géologie régionale permettent, dans la plupart des cas, de tirer des conclusions importantes relatives à l'ensemble des richesses minérales éventuelles et d'orienter rationnellement les études détaillées ultérieures ainsi que les travaux sur le terrain (GÉRARDS & LADMIRANT 1963).

Dès la fin de la dernière guerre mondiale, d'immenses progrès ont pu être réalisés dans l'exploration géologique grâce à l'apparition d'un outil puissant : la réalisation des photographies aériennes et leur interprétation.

L'interprétation photogéologique était la technique la mieux appropriée à de telles études car elle était la seule à pouvoir fournir, en un minimum de temps et avec les frais minima, une vue d'ensemble suffisamment explicite.

Un quart de siècle plus tard naquit la télédétection spatiale, plus souvent appelée télédétection, qui comprend l'étude des images obtenues à partir de satellites artificiels.

1. QUELQUES ASPECTS DE LA TÉLÉDÉTECTION AÉROSPATIALE

A. La photogéologie.

La photogéologie étudie les photographies aériennes prises d'avions, c'est-à-dire à une altitude relativement basse ne dépassant généralement pas 10 000 mètres, et selon la technique des couvertures aérophotographiques systématiques qui implique un recouvrement d'au moins 60% entre photos voisines à l'intérieur d'une même bande.

Le fait qu'il s'agisse de photos *sensu stricto* confère aux documents une grande finesse de grain et, par conséquent, une excellente résolution au sol,

souvent de l'ordre du mètre. Le recouvrement permet l'examen de toute une région avec l'appréciation du relief avec un facteur d'exagération indispensable.

Ce sont là les deux atouts majeurs des photographies aériennes par rapport aux images de satellites.

L'analyse photogéographique consiste donc à étudier les paysages en analysant les formes, aussi bien dans le plan horizontal montrant par exemple le dessin du réseau hydrographique, que dans les trois dimensions qui contiennent les expressions topographiques. Ces dernières sont les éléments les plus importants car ils sont le résultat des effets conjugués des forces tectoniques et de l'érosion sur les matériaux géologiques. D'autres éléments interviennent : les tonalités ou grisés, la structure et la texture des plages, la distribution et les caractéristiques de la végétation. Ajoutons encore un aspect souvent oublié, les photos aériennes autorisent des mesures de différences de hauteurs du sol ; ce qui permet, notamment, le calcul de pendanges.

L'imagerie spatiale et son cortège d'innovations se sont seulement développées, mais de façon explosive, à partir de 1972, année du lancement du premier satellite américain de la série Landsat.

La séparation entre la photogéologie et la télédétection spatiale n'est pas toujours nette et des recouvrements sont inévitables, c'est la raison pour laquelle on les réunit souvent sous l'expression de télédétection aérospatiale.

La télédétection aérospatiale ne peut certes prétendre se substituer aux méthodes habituelles de la géologie dite classique ; elle s'y intègre et les complète heureusement.

Nous nous proposons ci-après, d'abord de montrer quelques aspects des méthodes employées en photogéologie et en télédétection spatiale, d'exposer ensuite l'essentiel des travaux réalisés pour les pays en développement par la Belgique, et enfin d'émettre quelques réflexions sur l'application de la télédétection pour la cartographie géologique.

La photogéologie contrôlée est l'interprétation des photos soutenue et guidée par la connaissance d'observations de terrain. C'est la pratique géologique la plus courante, la plus accessible, la plus précise et la plus rentable. Elle est basée principalement sur les mécanismes d'interpolation et d'extrapolation.

La photogéologie à blanc est l'interprétation des photos menée à partir des documents photographiques exclusivement. Cette pratique convient seulement pour l'étude de régions vierges.

Le fondement de la photogéologie à blanc repose sur l'application interactive des processus de déduction et d'induction.

B. *La télédétection.*

A l'encontre des photographies aériennes, les images de télédétection spatiales sont prises à partir de satellites artificiels et sont enregistrées par scanners sous forme numérique. Dans la plupart des cas, plusieurs images sont réalisées simultanément, chacune dans une zone bien déterminée du spectre électromagnétique. La gamme des longueurs d'ondes utilisées va de 0,3 micromètre (ultraviolet) jusqu'aux ondes radar (hyperfréquences dont la longueur d'onde va, en pratique, jusqu'à 25 cm), en passant par le spectre visible, l'infrarouge réfléchi et l'infrarouge thermique.

Une image Landsat couvre une surface de 33 000 km² et la résolution au sol atteint maintenant une quarantaine de mètres ; c'est ce cadre synoptique qui apporte au géologue des éléments nouveaux parmi lesquels la continuité de certains caractères.

Ces caractéristiques principales différencient les images de télédétection des photographies aériennes. Mais il y a aussi des avions qui prennent des images radar (donc sous forme numérique) et des satellites (navette) qui prennent des photographies !

Le caractère numérique des images autorise des traitements informatiques remarquablement complexes. Jusqu'à présent les images de satellites ne permettaient pratiquement pas l'usage de la vision stéréoscopique si précieuse au géologue, mais cette situation sera, dans une certaine mesure, modifiée par l'intervention du satellite SPOT à partir de 1986.

Les études géologiques sur images portent essentiellement sur l'analyse des réflectances (signatures spectrales) et des structures (fractures, linéaments, etc.).

Le concept de signature spectrale dans le domaine du visible étendu n'est de rigoureuse application que dans les cas particuliers où la roche est mise à nu. Il s'agit notamment des régions désertiques pour autant que les matériaux ne soient pas recouverts de sable et qu'il n'y ait pas une homogénéisation des réflectances par le développement d'une interface d'altération. Les pays à climat glaciaire, lorsqu'ils ne sont pas enneigés, présentent une surface rocheuse assez fraîche et souvent dépourvue de végétation qui convient parfaitement à la réalisation d'importants travaux de recherche sur les réflectances (FAVARD & SCANVIC 1982).

Mais ceci nous entraîne plus loin.

L'analyse des réflectances est cependant largement utilisée par l'examen d'images ayant subi un traitement d'amélioration qui consiste d'abord à répartir différemment la dynamique des gris puis à développer la méthode des ratios.

Ces méthodes, partiellement réalisables par voie chimique, n'apportent un réel intérêt que par traitement interactif sur une console de visualisation en couleurs ; ceci suppose un matériel de laboratoire déjà important.

Des anomalies de réflectances, de forme circulaire à elliptique, peuvent être centrées sur l'apex non affleurant d'un massif de type granitique dont la périphérie présente des anomalies géochimiques liées à des concentrations de minéraux d'étain, de wolfram, d'arsenic, d'or, de beryllium, de cuivre, de molybdène.

Des anomalies linéaires, habituellement liées à de grands accidents ou à des dykes constituent souvent des indices intéressants pour la prospection de minéralisations en Ba, F, Cu par exemple.

Depuis quelques années, la littérature de télédétection est envahie par des études structurales basées sur le relevé de linéaments et sur leur traitement statistique subséquent. Cette vogue des analyses de linéaments est due à deux raisons. Tout d'abord le relevé des linéaments est une opération relativement simple, qui se fait sur photographies, qu'elles proviennent d'images multispectrales de type Landsat, ou d'images radar, ou encore qu'il s'agisse de photographies aériennes, ou encore d'un dessin de ces linéaments ; ensuite l'étude de linéaments a montré l'étroite association de ces alignements, et plus spécialement de leurs intersections avec des minéralisations. Diverses études statistiques (SCANVIC 1983) ont montré, qu'en moyenne, 70% des gîtes métallifères étaient situés sur un linéament. Encore faut-il s'accorder sur la définition du linéament. Ce concept, datant des balbutiements de la photogéologie, recouvrait tous les alignements, de teintes, de reliefs, de végétations, d'affleurements observables sur les photos aériennes. Actuellement les linéaments sont plutôt limités aux traces d'une certaine longueur, supérieure à cinq km, et vraisemblablement liés à des «discontinuités» crustales qui auraient joué et qui auraient favorisé le cheminement de substances particulières.

Les linéaments, associés aux photofractures, sont numérisés puis traités statistiquement et traduits en histogrammes ou diagrammes en rose, représentant généralement par secteurs, la fréquence, la longueur cumulée, la longueur moyenne, etc.

De telles études permettent d'établir une hiérarchisation des linéaments, de caractériser des unités géologiques, de situer des zones de «shear», de déterminer des cibles de prospection par intersection, d'établir les relations chronologiques relatives des fractures, de faire des cartes de densités de fracturation, etc.

En raison de l'illumination oblique inhérente au système, les radargra-

phies sont particulièrement aptes à la mise en évidence des linéaments liés aux variations même faibles du relief.

Les linéaments, *sensu lato*, relevés dans les pays en voie de développement sont pratiquement tous valables géologiquement et sont dégagés d'artefacts (LADMIRANT *et al.* 1984).

Les structures circulaires présentent un intérêt minier reconnu. De l'ordre d'une dizaine de km, ces structures sont liées à la géologie ou à la morphologie. De telles structures ont été observées en Guinée, en liaison avec des minéralisations aurifères, ou encore au Zaïre avec des gîtes primaires de cassitérite.

De semblables structures peuvent refléter l'occurrence de pipes de kimberlites (diamant), de massifs basiques ou ultrabasiques (Pt, Cr, Ni, Cu), de formations diapiriques (dômes de sel).

Les études photogéologiques avaient conduit, il y a une vingtaine d'années, à la conception d'une «auréole» des gisements de pétrole, mais nous n'en avons plus entendu parler.

L'analyse de la répartition des photofractures présente un intérêt certain pour les études hydrologiques, les études de risques séismiques, la détermination de zones stables pour l'édification de bâtiments, de barrages, de routes, ponts, etc.

C. Exemple d'informations obtenues par photogéologie à blanc.

Photographie aérienne n° 59/17/110 du vol Opienge. Échelle de l'original : 1/40 000. Émulsion infrarouge. Institut géographique du Zaïre. Situation 0°45' lat. N et 28°10' long. E (Photo 1).

Cette photo aérienne montre un paysage situé en pleine forêt équatoriale dense, le long de la Lenda, affluent droit de la Lindi, en République du Zaïre.

Bien que nous ne possédions pas d'observations de terrain, la morphologie, suffisamment bien exprimée, met en évidence une structure plissée soulignée par la trace d'un niveau dur vraisemblablement quartzitique (Q). Les caractéristiques des fermetures sont peu nettes, mais il est probable que le «coin» central (S) de la photo corresponde à une fermeture périclinale en raison de la dissymétrie des pentes, plus fortes vers l'extérieur (P), qui est observable par examen stéréoscopique. Des fractures (F), marquées par des traces en creux répercutées sur la végétation ont une direction grossièrement parallèle à l'axe du synclinal. D'autres fractures, de direction perpendiculaire aux précédentes constituent de petites failles provoquant de faibles décalages (D) dans le banc dur.

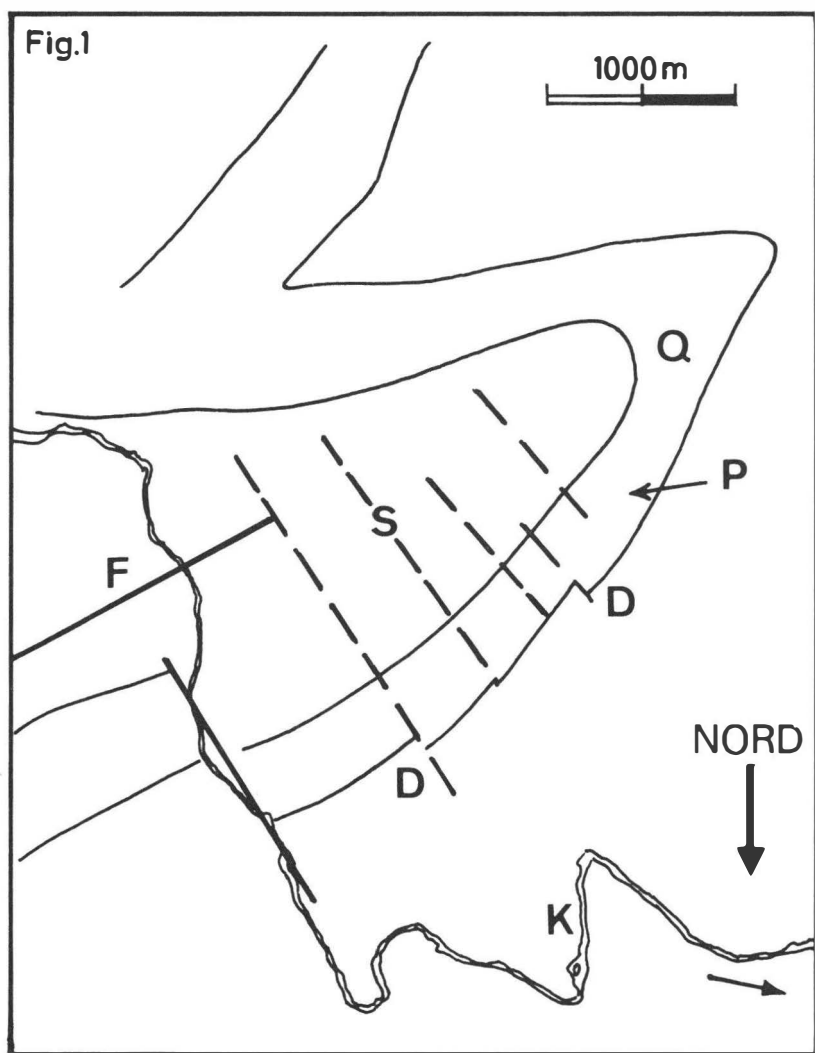


Fig. 1. — Interprétation géologique de la photo 1.



Photo 1. — Photo aérienne n° 59/17/110 du Nord-Est du Zaïre montrant une structure plissée bien exprimée en forêt équatoriale.



Photo 2. — Image radar prise par la navette spatiale Columbia en 1981 sur le Mali (Adrar des Iforas).

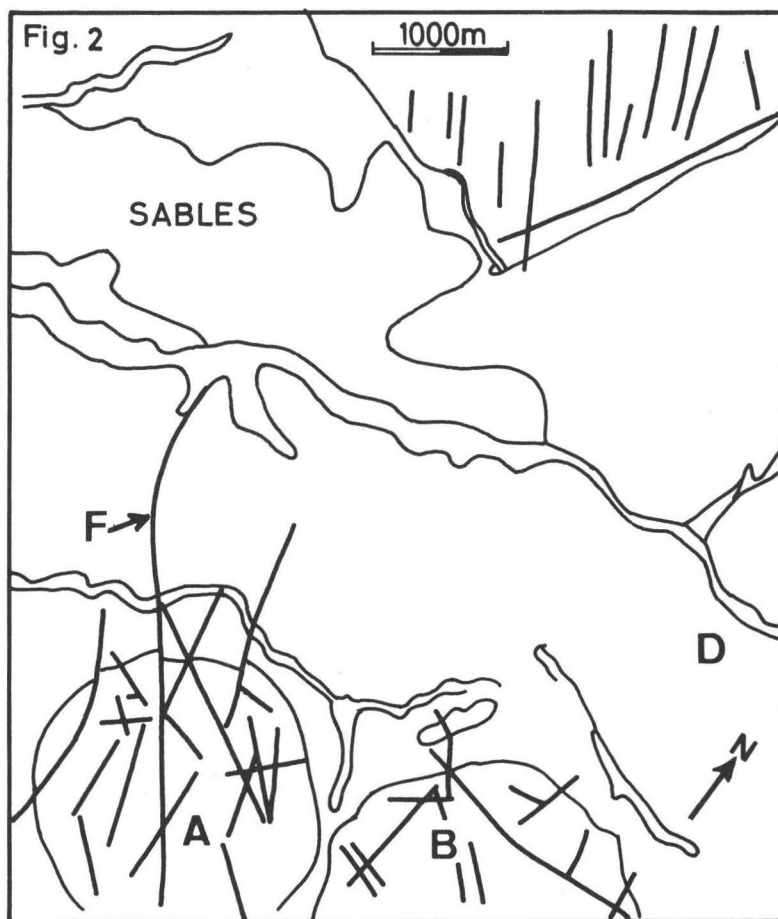


Fig. 2. — Interprétation géologique de la photo 2.

La Lenda coule vers le nord ; son tracé obéit à une disposition très générale et traverse les niveaux durs perpendiculairement à leur direction. A sa sortie de la zone plissée, empruntant une fracture plus importante, la rivière s'étale dans la plaine en décrivant des méandres, tandis que sa largeur a presque doublé (K).

Le contexte géologique est représenté par l'Ituri, formation de base du Lindien (Précambrien postérieur à 1000 Ma) dont la partie inférieure est constituée d'arkoses, de quartzites et de conglomérats (LEPERSONNE 1974).

Il est donc possible d'envisager, comme hypothèse de départ, que cette structure représente la base de l'Ituri, reposant sur un socle (Kibalien ?) pénéplané.

Combien de pénibles journées de prospection sur le terrain n'aurait-il pas fallu pour reconnaître et cartographier cette structure si nette sur photo et qui couvre une surface d'environ 20 km² ?

La photo a été disposée volontairement avec la direction du nord vers le bas de façon à diriger les ombres vers le lecteur, ce qui permet une meilleure perception du relief.

D. Exemple d'informations obtenues sur radargraphie.

Radargraphie prise par la navette spatiale américaine Columbia, en 1981, sur l'Adrar des Iforas (Rép. du Mali). Angle de pointage : 47° N, altitude 260 km, longueur d'onde de 23 cm (bande L), polarisation horizontale, Data take 28, Experience OSTA-1 de la NASA (CIMINO & ELACHI 1982) (Photo 2).

L'image originelle a une largeur de 12 cm correspondant à 50 km au sol. On reconnaît d'emblée l'aspect typique des photos radar à leurs forts contrastes.

A la partie inférieure on remarque deux plages (A et B) à forte brillance dans la zone externe, d'aspect grossièrement grumeleux et de contour contrasté bien net. Ils correspondent à des massifs granitiques à rattacher au «Magmatisme anorogénique» et comprennent différents types de granites, granite grossier à aëgyrine à la périphérie et granite à perthites dans la partie centrale (FABRE 1982).

Le massif A est manifestement lardé de cassures confirmées par les décalages de la limite par lesquels passent une fine trace sombre. Une faille de plus grande extension traverse le massif A de part en part, se poursuit vers le nord puis oblique progressivement vers l'est (F) (LADMIRANT & WALEFFE 1984). Cet accident, non repris sur la carte géologique (FABRE 1982) n'est

pas décelable sur photo aérienne, ni sur image Landsat, ni sur le terrain. Le tracé est mis en évidence sur l'image radar en raison de l'effet de pénétration des ondes radar (bande L) dans le sable sec de déflation qui recouvre la plus grande partie de la région (KOOPMANS 1983). Cette faille permet d'expliquer l'occurrence d'une zone mylonitique identifiée dans ce massif A par l'examen pétrographique d'échantillons de roches (LIÉGEOIS 1984).

Les minces cheveux blancs (D), apparaissant en faisceaux, représentent des filons de microdiorites, microsyénites, microgranites. Ces filons nombreux, seulement schématisés sur la carte géologique, peuvent être cartographiés en grand détail sur l'image radar (WEECKSTEEN 1983).

E. Exemple d'informations obtenues par images du satellite Landsat.

L'image Landsat prise le 6 juillet 1981 (scène n° 22357-07550) à 900 km d'altitude couvre la région située dans l'entre Sankuru-Lubefu, au nord de Lusambo, dans la Région du Kasai oriental (République du Zaïre). Il s'agit d'un plateau de relief uniforme, d'altitude moyenne de 700 m, couvert d'une forêt dense de type équatorial humide aux essences très variées ; les arbres peuvent y atteindre cinquante m de hauteur.

L'examen de la composition colorée (photo 3) a permis de reconnaître une série de bandes rectilignes, parallèles, apparaissant en gris clair dans un contexte nettement plus sombre. Ces bandes sont orientées Nord 60° Est ; leur largeur moyenne est d'environ 1500 m et leur espacement de l'ordre de 2000 m. Elles traversent le Sankuru sans changer de direction et se prolongent vers le sud-ouest sur une distance de quelque 250 km (fig. 3) visible sur les scènes de l'orbite 190, rangs 63 et 64.

Sur les images noir et blanc agrandies au 1/500 000, les bandes claires suggèrent un sol à l'aspect de savane.

La région est couverte par des photographies aériennes de type Fairchild, au 1/33 000, sur émulsion infrarouge, dont la qualité laisse quelque peu à désirer par un piqué insuffisant et une zone floue en bordure (Bloc Mwaka-Lusambo, 1953, Inst. géogr. Congo belge).

Les mosaïques photographiques contrôlées, réalisées au 1/50 000 à partir de ces photos ne montrent que de la forêt homogène, sans traces de bandes plus claires.

Ce présumé champ de dunes fossiles représenterait un épisode désertique d'âge vraisemblablement plio-pléistocène.

Ces observations permettent d'illustrer différents aspects de la télé-détection.

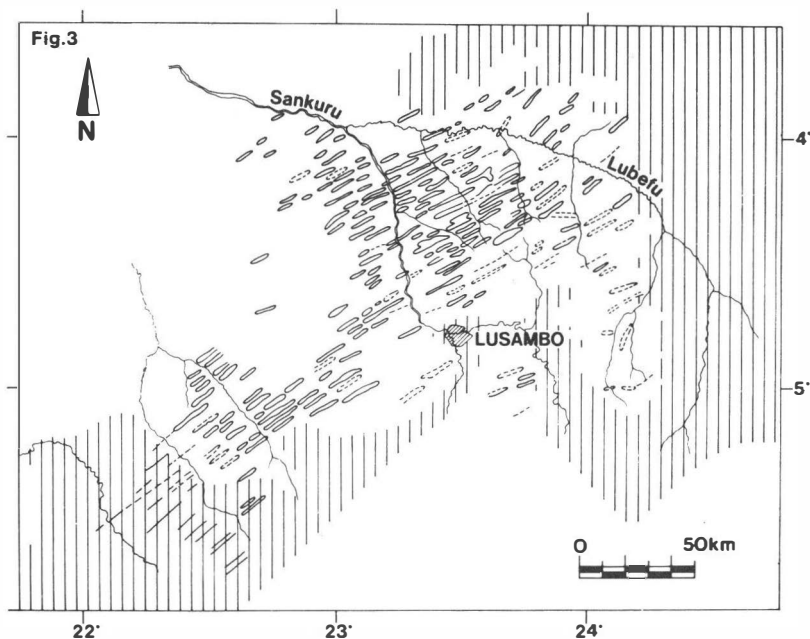


Fig. 3. — Schéma montrant l'étendue et l'orientation des présumées dunes fossiles dans la région de Lusambo.

Les bandes claires n'ont pu être décelées que :

- Par l'utilisation des bandes spectrales infrarouges (de 0,8 à 1,1 micron de longueurs d'onde) que seuls les capteurs électroniques peuvent analyser, contrairement aux émulsions photographiques qui ne dépassent pas 0,9 micron ;
- Par la vue synoptique, couvrant 185 km et permettant d'observer non seulement *une* direction, mais aussi un *champ* de directions.

Les photographies aériennes, utilisées isolément ou assemblées en mosaïques ont été incapables de mettre en évidence les bandes claires. Cependant leur utilisation conjointe avec les images de satellite a apporté des éléments nouveaux : d'une part les zones claires ne sont pas dénudées mais bien couvertes de forêt particulière, d'autre part elles se présentent en faible relief. Ces faits montrent la complémentarité des informations aériennes et spatiales. Enfin l'exemple considéré met en évidence une étroite liaison entre la lithologie et le couvert végétal, concept accepté mais pas souvent utilisé par les géologues.



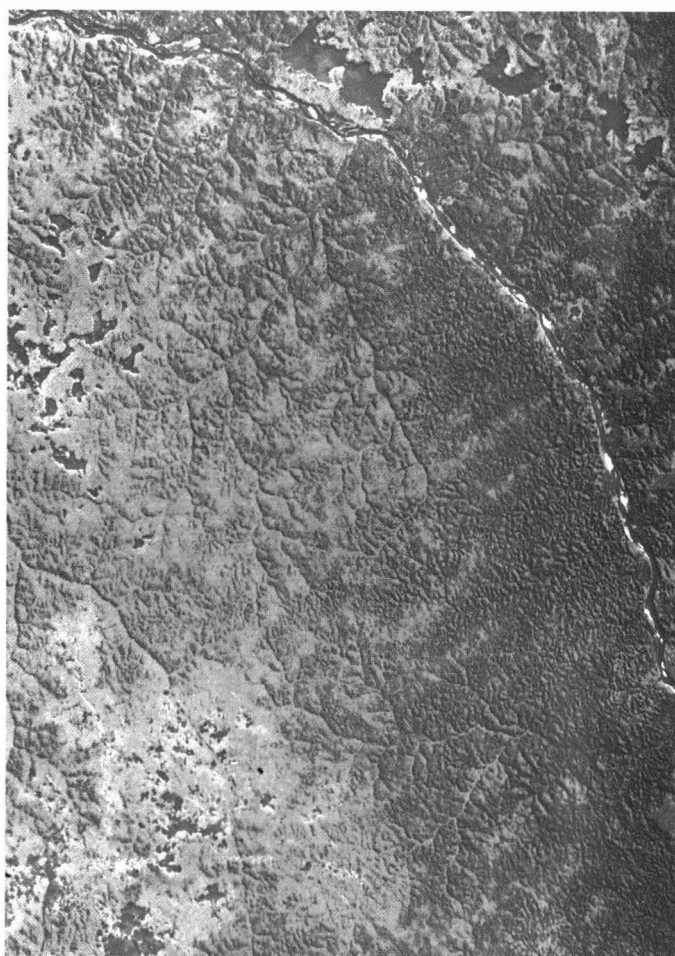
15 Km

Photo 3. — Composition colorée (couleurs soustractives) d'une scène Landsat relative à l'entre Sankuru-Lubefu (Zaire) montrant des alignements clairs rapportés à des dunes fossiles.



15 Km

Photo 4. — Composition colorée de même type que celle de la photo 3 avec, en supplément, la bande 6 traduite en gris, ce qui a pour effet d'augmenter les contrastes dans la végétation forestière.



10 km

Photo 5. — Composition colorée (couleurs additives) d'une scène Landsat à l'Ouest du Sankuru (Zaire), montrant des alignements clairs rapportés à des dunes fossiles.



Photo 6. — Photographie aérienne n° 53/88/122 située dans l'angle Sankuru-Lubefu, montrant que les zones «claires» ne sont pas déforestées mais correspondent à des essences arbustives différentes.

L'observation stéréoscopique des photos, par contre, a permis, à partir de localisations sur images Landsat, de retrouver ces bandes claires. Marquées par un faible relief et un découpage hydrographique moins dense que dans les parties sombres, ces bandes sont en réalité couvertes de grands arbres dont la couronne est piquetée de petites taches blanchâtres (photo 6).

Le sous-sol de la région est constitué par des formations crétaciques sub-horizontales : grès feldspathiques peu ou pas argileux surmontés de grès argileux avec intercalations d'argilites (niveau C1) passant, à l'ouest du Sankuru, à des sables fins avec passées d'argilites (LEPERSONNE 1974).

Interprétation.

Les bandes claires, dont la forme et la disposition excluent le reflet de la stratification et l'influence anthropique, correspondent manifestement à une caractéristique du couvert forestier qui traduit une cause lithologique. Selon R. DECHAMPS (communication orale, 1984) qui a étudié en détail le peuplement forestier du Kasai nord-ouest (LEBACQ & DECHAMPS 1967), il pourrait s'agir de *Julbernardia seretii* et/ou d'*Hymenostegia mundungu* que l'on rencontre sur les parties élevées et sableuses (avec toutes les réserves qu'impose un diagnostic fait sur seules photos aériennes !).

Les dimensions, largeur, espacement, longueur, associées à un faible relief, permettent de supposer que ces bandes claires sont les témoins d'un champ important de dunes linéaires fossiles (fig. 3).

Selon des études morphoscopiques, dans la région de Dibaya située à environ 150 km au sud de Lusambo, «toutes les surfaces en plateau sont couvertes d'un manteau fort homogène. Il s'agit d'un sable non stratifié, légèrement argileux, de grain assez fin, en grande partie bien arrondi, souvent vernissé et éolien» (RAUCQ, in DELHAL *et al.* 1966). Leur granularité est très uniforme et leur épaisseur peut atteindre 40 m. Les âges de ces formations et de l'aplanissement de 700 m n'ont pu être précisés jusqu'à présent.

La photo n° 3 est une composition colorée de type classique basée sur les couleurs soustractives (la bande 4 est traduite en couleur jaune, la bande 5 en magenta et la bande 7 en cyan). Afin d'analyser les différents types de végétations, nous avons ajouté la bande 6 en gris, à défaut de pouvoir la traduire en bistre ainsi que le conseille GUELLEC (1980). La photo n° 4 ainsi réalisée montre nettement l'augmentation de contraste entre les bandes de forêt de natures différentes.

Pour comparaison, la photo n° 5 est une composition colorée basée sur les couleurs additives (la bande 4 est traduite en bleu, la bande 5 en vert et

la bande 7 en rouge). Cette photo se rapporte à la zone située à l'ouest de l'image précédente, rive gauche du Sankuru.

Ces compositions colorées sont obtenues par le procédé très simple des films diazoïques développés à sec. Il s'agit, dans tous les cas, de fausses couleurs puisque, au départ, la bande spectrale du bleu, allant de 0,4 à 0,5 micron de longueur d'onde, fait défaut, choix délibéré en raison de la forte diffusion engendrée par l'atmosphère.

2. PARTICIPATION BELGE POUR LA GÉOLOGIE DES PAYS EN VOIE DE DÉVELOPPEMENT

A. Travaux photogéologiques réalisés avant 1978.

La plupart des travaux réalisés par la Belgique portent tout naturellement sur ses anciennes colonies et territoires assimilés, le Zaïre, le Rwanda et le Burundi, ainsi que, de façon moins systématique, sur d'autres pays africains : Burkina Faso, Mali, Guinée notamment.

Ces travaux sont principalement axés sur l'établissement d'une carte géologique de base dont les minutes sont souvent élaborées à l'échelle du 1/50 000.

La Belgique a suivi le mouvement général de l'après-guerre et c'est en 1947 que commença à se manifester l'intérêt des géologues pour les photographies aériennes.

C'est la même année, et sans concertation aucune, que furent réalisés les premiers vols photographiques en différents points du Zaïre : au Kasai, dans la région de la Bushimayi, au Kivu, au Bas-Zaïre oriental et au Shaba dans la région de Kamina.

Les photos réalisées servirent toutes à des études géologiques.

Ces premiers pas étant faits, il ne restait au Service géographique de Kinshasa qu'à commencer, en 1950, l'établissement de la couverture systématique du Zaïre, du Rwanda et du Burundi. Le Shaba sera, lui, photographié et cartographié par l'Institut géographique militaire belge à partir de 1948.

Dès la disponibilité des photographies aériennes, de nombreuses études de photogéologie à blanc furent réalisées (de 1950 à 1958), parmi lesquelles celles de THONNARD au Bas-Zaïre, au Kasai, au Zaïre septentrional, au Kivu (v. THONNARD 1965).

En tout une quinzaine de degrés carrés, soit quelque 200 000 km², furent ainsi dotés d'une esquisse photogéologique.

Des surfaces importantes furent cartographiées au Shaba, de 1948 à 1977, avec l'aide constante des photographies aériennes (DUMONT 1971, FRANÇOIS 1979).

La feuille Dibaya, couvrant un degré carré au Kasai, fut réalisée dès 1952 sous la direction de P. RAUCQ. C'est la première carte géologique régionale élaborée par l'exploitation des photographies aériennes conjointement aux levés de terrain systématiques.

De nombreux autres travaux de géologie et de géomorphologie, plus limités dans l'espace et dans le temps, ont été réalisés dans diverses régions de l'Afrique.

L'intérêt et l'efficacité de la méthode photogéologique incitèrent L. Cahen, P. Fourmarier et J. Lepersonne à créer, en 1956, au sein de la Commission de Géologie du Ministère des Colonies, une cellule permanente de deux géologues destinée à appliquer systématiquement la photo-interprétation à la cartographie géologique du Zaïre, du Rwanda et du Burundi. Cette cellule fut intégrée au Musée royal de l'Afrique centrale en 1961 où elle constitue actuellement la Section de Cartographie et de Photo-interprétation.

Cette Section reprit, de 1956 à 1974, la cartographie géologique détaillée du Bas-Zaïre, du Kwango occidental, du Kasai septentrional et du Rwanda oriental par photogéologie pré-contrôlée. Les cartes couvrant une grande partie de ces régions sont publiées à des échelles variant du 1/50 000 au 1/200 000.

Il convient également de citer la seconde version de la carte géologique du Zaïre qui, publiée au 1/2 000 000, fut élaborée à l'échelle du 1/200 000 par J. LEPERSONNE en 1974. Cette œuvre complexe et de longue haleine nécessita l'étude de milliers de photos aériennes.

B. Travaux réalisés à partir de 1978.

Le Département de Géologie et de Minéralogie du Musée reprit, sous contrat de l'Administration Générale de la Coopération au Développement, la cartographie géologique systématique du Rwanda et du Burundi. Plusieurs cartes au 1/100 000 ont été publiées et les travaux, toujours en cours, sont réalisés par des géologues du Département secondés par des géologues de la Coopération au Développement et des géologues nationaux. Les importants travaux de terrain sont toujours précédés et suivis par une utilisation intensive de la photo-interprétation.

Des études, de caractère relativement ponctuel, sont poursuivies dans les différentes universités ; leur liste serait trop longue à reproduire ici.

Nous sommes mal informés sur les travaux qui seraient menés par des firmes privées.

Concernant les activités et les projets d'une certaine envergure, nous ne connaissons que ceux du Musée royal de l'Afrique centrale, sans doute parce que cette institution est la seule, en Belgique, à utiliser de façon systématique et intensive, la télédétection aérospatiale pour l'étude géologique des pays en voie de développement.

C. Programmes actuels.

Le Département de Géologie et de Minéralogie du Musée royal de l'Afrique centrale est impliqué dans plusieurs programmes internationaux en Afrique, faisant intervenir ou même se basant essentiellement sur l'interprétation des images spatiales.

Le Projet majeur de l'UNESCO : «La géologie au service du développement» a choisi la chaîne kibarienne comme thème principal de ses activités de recherche et de formation pour les régions orientale, centrale et méridionale de l'Afrique.

Pour ce programme, le Musée royal de l'Afrique centrale a réalisé une carte à l'échelle du 1/500 000 pour l'ensemble de la chaîne. Une des principales activités de ce programme est l'étude, à réaliser par différents pays, des effets structuraux de l'orogénèse kibarienne en utilisant les méthodes de télédétection. Le Musée est chargé de coordonner ce programme.

D'autre part, l'UNESCO vient de mettre sur pied avec l'Union internationale des Sciences géologiques le Projet GARS (Geological Application of Remote Sensing) ; ce programme vise à promouvoir les applications de la télédétection pour la cartographie géologique. Sur proposition du Musée, la chaîne kibarienne a été retenue comme zone test pour la réalisation de ce programme. Les résultats obtenus par les études de terrain effectuées ces dernières années par le Musée dans la portion de la chaîne kibarienne affleurant au Burundi et au Rwanda servent de base à cette étude. Plusieurs phases tectoniques ont en effet été mises en évidence dans cette région ainsi que leurs relations avec différents types d'intrusions magmatiques : une première phase de déformation horizontale liée à un décollement de la couverture sur son socle est contemporaine d'importantes intrusions de granites associés à des magmas basiques. La seconde phase de déformation est une déformation en plis redressés qui détermine la morphologie actuelle de la chaîne, de nouvelles intrusions granitiques sont liées à cette déformation. Une phase de cisaillement latéral est la dernière phase structurale

appartenant à l'orogénèse kibarienne ; des intrusions locales de granites subalcalins, mais surtout la mise en place de nombreuses masses basiques et ultrabasiques sont liées à cette phase de cisaillement. Ces dernières comportent des minéralisations en nickel, vanadium et platinoïdes.

L'objectif du projet GARS est d'utiliser l'analyse des images spatiales pour améliorer la cartographie géologique de parties moins connues de la chaîne kibarienne, tant du point de vue lithologique que structural, en se basant sur les données de terrain en provenance du Burundi et du Rwanda. La méthode sera notamment appliquée au Zaïre et à la Tanzanie. Étant donné qu'il s'agit de régions qui sont en continuité avec les régions mieux connues du Burundi et du Rwanda, les résultats obtenus dans ces dernières régions pourront y être directement extrapolés. Cette recherche présente un intérêt indéniable du point de vue économique, étant donné le contrôle structural de certains types d'intrusions telles que les massifs ultrabasiques auxquels sont liées les minéralisations en divers métaux. Le Département de Géologie et de Minéralogie du Musée royal de l'Afrique centrale est au centre de cette recherche pour ce qui concerne la partie géologique. Il participe avec d'autres laboratoires à la partie technique de cette étude qui concerne l'analyse des images spatiales provenant de différents types de satellites.

Parmi les études réalisées au Musée et qui sont limitées à des objectifs d'économie immédiate, nous citerons notamment celles qui se rapportent à :

- La localisation, par photogéologie, d'un niveau particulier du Schisto-calcaire en vue de l'implantation d'une usine de faïence au Bas-Zaïre ;
- La recherche, par photos, d'un tracé adéquat et de matériaux pour ballast destinés à la construction d'une ligne de chemin de fer au Zaïre ;
- La recherche de zone stable et de matériaux latéritiques pour la construction d'un aéroport au Zaïre ;
- La recherche de gîtes secondaires de cassitérite au Zaïre, par géomorphologie et télédétection ;
- La recherche de sites favorables à l'implantation de sondages pour l'approvisionnement en eau de plusieurs agglomérations au Cameroun ;
- La cartographie géologique de base, par photogéologie, d'une région de 6000 km² au Mali et de 25 000 km² au Burkina Faso ;
- La cartographie de massifs de carbonatite au Zaïre ;
- Des analyses de télédétection aérospatiales pour la prospection d'or en Guinée ;
- De nombreux travaux de cartographie planimétrique qui couvrent plus de 60 000 km² en Afrique et ont été réalisés à l'échelle du 1/50 000.

D. *Travaux de caractère méthodologique.*

Dans le but de familiariser ses chercheurs avec les nouvelles techniques de télédétection aérospatiale et avec les nouveaux types d'images qui seront prochainement réalisées de façon systématique, le Musée participe à diverses expériences, tant en Belgique qu'en Afrique.

— Simulation SPOT :

L'opération simulation SPOT consiste à réaliser, par avion volant à haute altitude, des images présentant les mêmes caractéristiques que celles qui seront prises par le futur satellite français SPOT, lequel devrait devenir opérationnel vers la mi-86. Dans le projet belge, orienté sur le thème géologique, c'est la partie extrême orientale du pays qui fut photographiée. La région choisie comprend la vallée de la Gueule dans laquelle d'importants gisements de Pb-Zn furent exploités jadis. Les images, réalisées par l'Institut géographique national français pour le compte de la Commission des Communautés européennes, sont en cours d'étude.

— SAR-580 (Synthetic Aperture Radar) :

Dans le cadre d'expériences organisées conjointement par l'Agence spatiale européenne et la Commission des Communautés européennes, un avion canadien, opérant sous contrat, a pris des images suivant une bande de vol joignant Arlon à Namur. Cette bande, choisie par le groupe s'intéressant au thème géologique, a été «imagée» par radar latéral à ouverture synthétique, en longueur d'onde de 2,3 cm (bande radar X), en polarisations parallèles et croisées, et en aller et retour. Une première étude de linéaments a été réalisée sur ces images (LADMIRANT *et al.* 1984).

Les études se rapportant à des expériences faites en Belgique sont poursuivies en collaboration avec le Service géologique de Belgique et l'Université Libre de Bruxelles.

— SIR-A (Shuttle Imaging Radar) :

Organisée par la NASA en 1981, cette expérience avait pour objet de réaliser des images radar à l'occasion du deuxième vol de la navette spatiale Columbia. Prises d'une altitude de 260 km, en vision latérale vers le nord (47°), les images sont matérialisées par des bandes de photos qui couvrent une largeur au sol de 50 km et dont la longueur peut atteindre 20 000 km ! Plusieurs bandes traversent l'Afrique occidentale et centrale de part en part. Réalisées selon la technique de l'antenne synthétique, avec une longueur

d'onde de 23 cm (bande radar L), les images sont d'excellente qualité et capables d'apporter aux géologues des importantes informations originales, plus particulièrement dans les zones arides et intertropicales humides (LADMIRANT & WALEFFE 1984).

L'expérience SIR-B, réalisée en été 1984, a pour but, notamment, d'«imager» d'autres régions, le Shaba et le Burundi méridional, ce qui nous permettra de tester correctement les images radar en les confrontant aux connaissances déjà acquises par diverses études antérieures. Des améliorations sont prévues : la résolution moyenne au sol serait diminuée de moitié et atteindrait 25 m, des variations d'orientation de l'antenne permettraient la réalisation de stéréogrammes à partir d'orbites voisines.

– PEPS (Programmes d'Évaluation Préliminaire SPOT) :

Ces projets ont pour but d'évaluer l'importance et l'intérêt des images SPOT pour leur application dans différents domaines thématiques.

Ils ne pourront prendre place qu'environ deux mois après la mise sur orbite du satellite, dont le lancement est programmé pour le 1^{er} octobre 85.

Un sujet, proposé par le Musée et supporté par des organismes internationaux dont l'UNESCO, se rapporte à l'étude d'une image, de 60 km × 60 km prise sur une région test située au Burundi.

Il s'agit de confronter ces informations aux connaissances déjà détaillées obtenues au cours de travaux antérieurs de photogéologie et d'importantes campagnes de lever sur le terrain, puis de comparer ces informations à celles d'autres satellites, ensuite d'effectuer des traitements d'images et des analyses structurales et enfin de tenter l'extrapolation des données ainsi obtenues aux régions moins bien connues, mais constituées des mêmes formations de Tanzanie. Ce programme s'intègre naturellement au projet GARS.

Dans la mesure où cette expérience montrera la validité de ces informations, l'étude globale de chaîne kibarienne pourra s'appuyer sur les images du satellite SPOT.

E. L'Enseignement.

Conscient de l'impérieuse nécessité, pour les pays en développement, de disposer de cadres et de techniciens nationaux, le Musée royal de l'Afrique centrale, en collaboration avec la Coopération au Développement et l'ONU, organise depuis plus de vingt ans déjà des stages annuels de formation géologique destinés à des ressortissants africains. A cette occasion un enseignement élémentaire de photogéologie et de cartographie est dispensé chaque année à un groupe de huit étudiants.

Le Musée organise également des stages individuels de six à douze mois orientés uniquement vers la spécialisation en télédétection aérospatiale et destinés à des Africains ayant déjà une formation géologique.

Il contribue également à la formation de cadres nationaux en donnant un cours de télédétection dans l'enseignement organisé à l'Université de Bujumbura par l'UNESCO (cours d'été).

Ajoutons enfin des cours de télédétection aérospatiale donnés dans le cadre de l'Enseignement interuniversitaire de 3^e cycle organisé sous les auspices du Fonds National de la Recherche Scientifique, et dans la Maîtrise interuniversitaire de la Géologie des terrains superficiels organisé par l'Université de Liège sous les auspices de l'Administration Générale de la Coopération au Développement, ce dernier enseignement étant particulièrement destiné aux ressortissants de pays en voie de développement.

3. SUGGESTIONS POUR L'ORGANISATION DES PROJETS

Un schéma d'organisation des projets géologiques ne saurait être fixé de prime abord ; il doit conserver une certaine flexibilité permettant son application aux pays en voie de développement car ceux-ci se trouvent à des degrés plus ou moins avancés de développement. Certains pays disposent de moyens financiers et d'un personnel de cadre suffisamment expérimenté pour leur permettre la mise en œuvre des procédés sophistiqués de la télédétection ; d'autres pays sont encore très démunis.

Les autorités de décision qui prendront les options pour l'orientation et l'organisation générale d'un projet auront intérêt à tenir compte de l'avis d'experts, que ceux-ci relèvent d'organismes internationaux, d'institutions gouvernementales ou de firmes du secteur privé. Si le projet réclame la réalisation de vols nécessitant l'emploi de matériel très coûteux, comme par exemple les avions à prise d'images radar, documents indispensables pour les régions non photographiées en raison des conditions atmosphériques, il sera obligatoire de traiter avec une firme spécialisée. Il n'en existe que quelques-unes au monde.

L'image de la surface terrestre captée par le satellite ou l'avion est avant tout l'image du sol (au sens pédologique) et de la couverture végétale qui en recouvre la plus grande partie. Un projet de géologie devrait donc comporter des spécialistes en agronomie, en pédologie, en morphologie... La télédétection est fondamentalement pluridisciplinaire et il serait certainement plus profitable d'envisager des études intégrées plutôt que monothématiques (COUZI 1979, AUBOIN & VERGER 1982). C'était déjà vrai pour la photo-géologie (UNESCO, 1968).

Les géologues sont les plus grands consommateurs d'images Landsat, mais les géologues miniers et les pétroliers entourent leurs activités d'un secret, partiellement compréhensible, qui leur est imposé par leur employeur ou par le Gouvernement national. L'Institut français du Pétrole, à lui tout seul, a procédé à l'analyse de cinq mille images Landsat sur une durée de 6 ans ! (COUZY 1979).

Si certains tabous pouvaient être levés et la suspicion bannie, la diffusion des connaissances n'en serait que plus bénéfique pour tous.

Comme les formations géologiques ne s'arrêtent généralement pas aux frontières, les pays en développement, et les autres aussi, auraient tout avantage à s'associer pour réaliser l'étude cartographique globale d'une région géologique, d'un orogène, d'un ensemble lithologique.

La plupart des pays de la zone intertropicale sont couverts entièrement et même de façon diachronique par les images des satellites Landsat, pour ne citer que les plus répandues. On ne peut donc plus actuellement négliger délibérément ces sources d'information.

Un élément capital dont il faut tenir compte dans le déroulement d'un projet est le désir légitime qu'ont les nationaux de participer eux-mêmes à la recherche de leurs propres ressources, avec leur propre personnel et leur propre équipement.

Aidés d'experts, ils orienteront donc d'abord leurs efforts vers l'étude des images de satellite.

On parle beaucoup des études compliquées de traitements numériques d'images car elles sont spectaculaires ; et l'on parle beaucoup moins des importants travaux d'application qui, actuellement encore, sont réalisés le plus souvent sur documents analogiques c'est-à-dire sur de simples tirages photographiques sur papier, en noir et blanc.

D'importantes études mathématiques relatives au mélange des images numériques ont conduit son auteur à mettre en garde les thématiciens contre l'utilisation d'espace à un trop grand nombre de dimensions. «On s'est gargarisé avec les méthodes d'analyse de données (analyses factorielles et classifications) qui ont un succès fou...» (RIGUIDEL 1982).

Sans exclure l'utilisation de traitements numériques, l'efficacité des traitements optiques est soulignée par CHOROWICZ & RANGIN (1982).

De très intéressantes manipulations photographiques, par exemple des agrandissements, des améliorations de contrastes, des modifications de la dynamique des gris, des tirages en isodensité, ou encore la préparation de compositions colorées, peuvent être obtenues dans un simple laboratoire photographique dont l'aménagement est bon marché et la technique aisément assimilable.

L'étude des différentes bandes spectrales reproduites sur photos noir et blanc fournit déjà d'intéressantes indications sur les réflectances lithologiques ; il en va de même des compositions colorées observées sur une visionneuse analogique ou même si elles sont tirées suivant la technique simple du développement à sec des matériaux diazoïques.

Remarquons dès à présent que ces études analogiques se font au départ de documents très peu coûteux. En effet, c'est pour moins de 2000 F belges que l'on peut, aujourd'hui, se procurer le film Landsat, noir et blanc, positif ou négatif, de format 18 cm × 18 cm, ce qui correspond à l'échelle du millionième.

Une part importante des études géologiques en télédétection est constituée par l'analyse structurale. Fractures, linéaments, directions de couches sont relevés sur les photos, puis numérisés en vue de leur traitement statistique, opération qui nécessite une table à numériser et un ordinateur, lequel peut être un micro-ordinateur, de prix modeste.

A ce stade il est déjà possible d'élaborer un premier document synthétique, lithologique et structural, augmenté des renseignements de terrains glanés dans la littérature, et confronté aux résultats des traitements numériques d'images, en ordre principal les classifications, les renforcements d'images, les rapports de bandes.

Le pas suivant consiste à étudier systématiquement les photos aériennes dont les apports originaux, haute résolution, stéréoscopie et échelle plus grande, sont indispensables à l'établissement d'une esquisse géologique, structurale et géomorphologique de base au 1/100 000 ou au 1/200 000.

C'est également l'étude des photos qui permettra de préparer les travaux de terrain par la localisation d'affleurements et le choix d'itinéraires adéquats.

Il est possible que dans le courant de l'année 1986, la fourniture opérationnelle des images SPOT simplifiera les premières phases en fusionnant l'étude des images de satellite et la photogéologie.

L'examen de cette première esquisse permet également d'éliminer de la recherche certains minéraux et certains types de gisements, et d'orienter la suite des investigations vers des régions jugées plus favorables tant par la situation géologique que par l'exposition des matériaux et les conditions d'accessibilité.

Cette première partie est combinée avec la formation permanente de spécialistes nationaux. Ils apprendront «sur le tas», en vivant des cas concrets, et seront d'autant plus motivés qu'il s'agit de leur pays et de son intérêt économique.

La deuxième phase comprend les travaux sur le terrain qui seront nécessairement menés par l'équipe ayant travaillé à la première phase.

Les informations recueillies, que l'on désigne généralement par «vérité-sol» (ou «vérité-terrain»), serviront à contrôler les travaux de la phase préliminaire, en autorisant notamment la réalisation de classifications supervisées et en réajustant les données provenant de la photogéologie.

La poursuite itérative de ces étapes essentielles conduit progressivement à la connaissance plus précise de la situation géologique.

La télédétection n'étant pas une panacée, la mise en œuvre d'autres techniques d'investigation, aéroportées ou au sol devra intervenir aux moments les plus judicieux et compléteront les informations.

4. L'AVENIR DE LA COOPÉRATION EN GÉOLOGIE TECHNIQUE ET MÉTHODE

A. *Technique.*

Parmi toutes les perspectives d'évolution technique, que nous ne pouvons détailler ici, relevons seulement quelques aspects qui pourraient apporter des éléments positifs aux géologues.

En ce qui concerne la prise d'images, on souhaitera la généralisation des radargraphies qui, utilisées de jour comme de nuit, par temps brumeux ou nuageux, réalisent un complet affranchissement des paramètres atmosphériques et sont, de ce fait, particulièrement adaptées aux pays tropicaux humides. Les perfectionnements toujours possibles sont l'augmentation de leur résolution spatiale et la mise au point d'une pseudo-multispectralité par variation d'orientation de l'antenne et par le jeu des polarisations.

Les enregistrements en infra-rouge thermique sont très prometteurs en géologie en raison des anomalies qu'ils peuvent manifester et qui sont liées à la nature des roches par l'absorption sélective des minéraux.

Les procédés utilisant le domaine de l'ultra-violet et la lumière cohérente sont encore au stade expérimental.

Dans l'ensemble, les deux points forts restent la haute résolution et la multi-spectralité, non pas multipliée à plaisir, mais bien sélectionnée de façon à ne retenir que les fréquences dont les pics d'absorption, de réflexion ou d'émission sont significatifs pour la détection de matières minérales.

En ce qui concerne la technique de traitements d'images, les systèmes actuels de matériels et de logiciels ont atteint un haut degré de complexité et il est bien mal aisé d'entrevoir l'évolution que prendra un système interactif à résolution de 1024 pixels.

Compte tenu de la quantité toujours croissante des informations fournies par la multiplication des satellites, il sera nécessaire de développer les

performances des ordinateurs afin de pouvoir absorber et traiter ces informations. Les perfectionnements obligés iront dans le sens de l'automatisation dans la reconnaissance des formes et dans la cartographie robotisée.

Ces éléments contribueront certes à atteindre rapidement à une connaissance détaillée de la géologie des pays en voie de développement comparable, sur le plan de la cartographie, à celle des pays développés.

Mais tout ceci relève de technique de pointe et ne paraît guère compatible avec les capacités actuelles des pays en développement.

Dans les conclusions d'un symposium de télédétection, organisé en 1982 par la Société géologique de France, les auteurs suggèrent en ce qui concerne la France, qu'un matériel standard minimum soit défini et diffusé dans les entreprises et dans les universités, en réservant les traitements de bandes numériques d'images à des centres spécialisés, en raison même de la complexité et du coût de ces traitements (AUBOIN & VERGER 1982).

En effet, si les images de satellites ne coûtent pas cher, par contre les systèmes de traitement d'images comprennent des appareils sophistiqués et très coûteux, aussi bien à l'achat qu'à la maintenance. Ces systèmes impliquent notamment l'utilisation d'ordinateur et de personnel hautement qualifié pour l'utiliser. Ces appareils supportent mal les écarts de température et les conditions d'humidité qui règnent sur une grande partie des régions intertropicales. Leur installation et leur fonctionnement nécessitent tout un contexte logistique qu'on ne peut aisément trouver dans la plupart des pays en voie de développement.

Pour permettre à ces derniers d'accéder aux techniques élaborées de la télédétection, il est nécessaire de produire des systèmes de traitement adaptés à leurs besoins et de prix modeste. Simples à employer, à entretenir et à réparer, ils doivent être de type léger, résistants à la chaleur et à l'humidité.

De tels systèmes n'en devraient pas moins présenter les caractéristiques requises pour les travaux «de routine» en télédétection. C'est à la mise au point, dans un but industriel, d'un tel système, performant mais de bas prix, que s'attache le Service Systèmes Logiques et Numériques (Faculté des Sciences appliquées, Université Libre de Bruxelles) en collaboration avec la Section de Cartographie et de Photo-interprétation du Musée royal de l'Afrique centrale. Ce système est centré sur un ordinateur Micro SYS-02 avec disque dur de 10 Mbytes et comprend un terminal Televideo 914, un moniteur couleurs Barco, une caméra vidéo ; l'image est de 512×512 pixels, en 256 couleurs. Le système est conçu en construction modulaire de façon à permettre l'addition ultérieure de divers composants et de périphériques. Les logiciels permettent les traitements classiques d'images, notamment les

histogrammes, détection de texture, modifications de niveaux gris, zoom, surfaçage, opérations sur plans d'images, classifications, etc.

La mise en route opérationnelle est prévue pour juin 1986, date à laquelle le prototype sera installé au Musée. Sa réalisation est rendue possible grâce à la compréhension et au soutien financier du Ministère de l'Éducation nationale.

B. *Méthode.*

En photogéologie classique, la part de la technique est relativement réduite et sa méthodologie s'est développée de façon assez libre, ce qui, selon d'aucuns, apparenterait l'interprétation des photos à un art plutôt qu'à une technique !

Il est possible aux couvertures aérophotographiques de pouvoir bénéficier de certains développements techniques satellitaires. Si des traitements par manipulations électroniques d'images peuvent s'appliquer aux photographies aériennes, il ne faut cependant pas perdre de vue que la gamme du spectre électromagnétique utilisable en photographie est étroite et limitée par les longueurs d'onde de 0,4 à 0,9 micromètre.

En raison de leur échelle relativement grande, et par conséquent du nombre de documents à traiter, les photos aériennes se prêtent mal aux traitements automatiques.

Les photographies en couleurs sont très coûteuses et n'ont guère été réalisées de façon systématique ; les charges atmosphériques des régions tropicales se prêtent mal au rendu des couleurs par la forte dispersion dans le bleu.

La seule certitude que l'on ait est que l'interprétation photogéologique telle qu'elle est pratiquée actuellement de façon universelle, sur base de couverture aérienne réalisée en noir et blanc et sur émulsion panchromatique, n'est pas près de disparaître.

Elle restera, durant de nombreuses années encore, l'outil nécessaire, facile d'emploi et bon marché, pour les travaux de cartographie géologique générale, ainsi que pour des études à plus grande échelle, des pays en voie de développement.

Quant à la télédétection spatiale, son existence même et son essor sont essentiellement liés aux progrès réalisés, à allure galopante, dans divers domaines techniques. Les dépenses et les efforts considérables consentis par l'Homme dans des desseins militaires sont à la base de la mise au point des satellites qui servent à l'étude pacifique de la surface terrestre et à la prospection des ressources minérales.

La mise en œuvre de projets de travaux géologiques dans les pays en voie de développement se doit de faire appel à la télédétection aérospatiale, mais celle-ci ne pourra atteindre toute son efficacité que par une collaboration entre thèmes (morphologie, pédologie, foresterie, ...), entre méthodes (géo-chimie, géophysique, terrain, ...), entre nations (dialogue Nord-Sud) mais aussi entre les pays en développement eux-mêmes.

C'est dans ce dernier cadre que les exhortations suivantes revêtent toute leur signification.

«Projetée en pleine compétition politique, économique et culturelle, dotée d'abondantes ressources naturelles et humaines, l'Afrique, en s'inspirant de son héritage longtemps méconnu mais aujourd'hui réhabilité, devrait pouvoir apporter une contribution décisive à l'édification d'une civilisation panhumaine. C'est avant tout aux Africains, et singulièrement à la jeunesse africaine, qu'il appartient de relever le défi historique» (SENGHOR 1979).

BIBLIOGRAPHIE

- AUBOIN, J. & VERGER, F. 1982. Conclusions. — *In* : Télédétection et Sciences de la Terre. *Bull. Soc. géol. France* (7), 24 (1) : 143-144.
- CHOROWICZ, J. & RANGIN, Cl. 1982. Essai de cartographie géologique de la Basse Californie obtenue à partir de l'analyse des images spatiales ; méthodes et résultats. — *Bull. Soc. géol. France* (7), 24 (1) : 139-143.
- CIMINO, J. B. & ELACHI, C. 1982. Shuttle Imaging Radar-A (SIR-A) Experiment. — Jet Prop. Lab. publ., 82-77, California Institute of Technology.
- COUZI, A. 1979. Principales conclusions de la mission OPIT d'avril 1979 en Amérique du Nord, applications cartographiques de la télédétection. — Pp. 14-20.
- DELHAL, J., LEPERSONNE, J. & RAUCQ, P. 1966. Carte géologique à l'échelle du 1/200 000. Notice explicative de la feuille Dibaya. — Rép. du Congo, Min. Terres, Mines et Energie, Direction du Service géologique, p. 51.
- DORR, J. *et al.* 1972. The application of geochemical, botanical, geophysical and remote sensing minerals prospecting techniques to tropical areas. — Office of Science and Technology, Agency for International Development, 74 pp., Washington D.C. TA/OST 72-13.
- DUMONT, P. 1971. Le Plateau des Bianco, les phases précoces de l'orogénèse katanguienne. — Thèse de doctorat (inédit.), Université Libre de Bruxelles.
- FABRE, J. 1982. Carte géologique de l'Adrar des Iforas, 1/500 000 ; Rép. du Mali. — Direction nationale de la Géologie et des Mines.
- FAVARD, J. C. & SCANVIC, J. Y. 1982. Le Groenland oriental, un exemple d'application du traitement interactif des données de télédétection à la

- cartographie géologique et à la recherche minière. — *Chronique de la Recherche minière*, n° 464 (janv.-févr. 1982) : 27-45.
- FONTANEL, A. & RIVEREAU, J.-C. 1979. Les images Landsat en exploration pétrolière : 6 ans d'expérience. — *In* : Traitement et exploitation cartographique des images spatiales. 3^e Coll. intern. du G.D.T.A., (Toulouse), pp. 27-30.
- FRANÇOIS, A. avec la collaboration de LEPERSONNE, J. 1979. Carte géologique de la région de Kolwezi-Kalukundi (Shaba). 1/100 000. 2 feuilles. — Mus. roy. Afr. centr., Tervuren.
- GÉRARDS, J. & LADMIRANT, H. 1962. Rapport sur l'application de la photogéologie «pré-contrôlée» à l'Afrique centrale. — Symposium international de photo-interprétation ; Transactions de la Commission VII, Groupe 2 (Géologie), (Delft, Pays-Bas), 9 pp.
- GÉRARDS, J. & LADMIRANT, H. 1963. La photogéologie au service des travaux préliminaires à la mise en valeur des ressources minérales. — Conférence des Nations Unies sur l'application de la science et de la technique. Point A. 521 de l'ordre du jour, Genève, 12 pp.
- GUELLEC, J. 1980. Possibilités d'utilisation d'images Landsat améliorées, à l'échelle de 1/200 000 pour la connaissance des forêts. — *Bois et Forêts des Tropiques*, 193, sept.-oct.
- KOOPMANS, B. N. 1983. Spaceborne imaging radar, present and future. — *I.T.C. Journal*, 3 : 223-231.
- LADMIRANT, H. 1970. Field work techniques in geology and mineralogy. — Field manual for museums, Museums and Monuments, XII, UNESCO, pp. 123-144.
- LADMIRANT, H. 1972. Photographies aériennes et géologie. — Mus. r. Afr. centr., Tervuren, 128 pp.
- LADMIRANT, H., TRÉFOIS, Ph. & VANDEVEN, G. 1984. Essai d'interprétation de linéaments sur images radar (SAR-580) dans la région de Dinant, Belgique. — *Bull. Soc. belge Géol.*, 93 (1-2), pp. 161-171.
- LADMIRANT, H. & WALEFFE, A. 1984. Test d'analyse géologique de radargraphies aérospatiales. — *Bull. Soc. belge Géol.*, 93 (1-2) : 179-186.
- LEBACQ, L. & DECHAMPS, R. 1967. Contribution à un inventaire de forêts du Nord Kasai. — *Ann. Mus. r. Afr. centr.*, série in 8°, Sc. Econ., n° 5, p. 497.
- LEPERSONNE, J. 1974. Carte géologique du Zaïre, échelle 1/2 000 000. Rép. du Zaïre, Commissariat d'État aux Mines, Service géologique. 2 Feuilles, notice, Tervuren, Belgique.
- LEPERSONNE, J. 1974. Carte géologique du Zaïre au 1/2 000 000, et notice explicative. — Rép. du Zaïre, Commissariat d'État aux Mines, Service Géol.
- LIÉGEOIS, J.-P. 1984. Communication orale.
- RIGUIDEL, M. 1982. Réflexion sur le mélange des images. — *Bull. Soc. géol. France* (7), 24 (1) : 23-31.

- SENGHOR, L. S. 1979. — *In*: d'ALMEIDA-TOPOR, H. *et al.*, Afrique, continent méconnu. Sélection du Readers's Digest, Paris, 319 pp.
- THONNARD, R. L. G. 1965. Cartes volcanologiques des Virunga au 1/50 000. — Centre National de volcanologie (Belgique), 3 feuilles.
- UNESCO, 1968. Exploration aérienne et études intégrées. — Actes de la conférence de Toulouse, 575 pp.
- UNESCO, 1984. Corrélation et conclusions. — *In*: La géologie au Service du Développement. *Bull.* 3, p. 100.
- WEECKSTEEN, G. 1983. Évolution de l'apport des radargraphies SIR-A en géologie : comparaison avec les images Landsat et les photographies aériennes. — *Bull. Soc. franç. de Photogram. et Télédétec.*, 82 : 43-62.
-

Symposium
«De Teledetectie,
Factor van Overzeese Ontwikkeling»
(Brussel, 7 december 1984)
Koninklijke Academie voor Overzeese
Wetenschappen
pp. 93-113 (1986)

Symposium
«La Télédétection,
Facteur de Développement Outre-Mer»
(Bruxelles, 7 décembre 1984)
Académie royale des Sciences
d'Outre-Mer
pp. 93-113 (1986)

LA TÉLÉDÉTECTION AU SERVICE DE LA GÉOGRAPHIE ET DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

PAR

J. WILMET *

RÉSUMÉ. — La cartographie générale et thématique constitue une application importante de la télédétection outre-mer. Toutefois, la cartographie topographique utilisera encore longtemps l'outil incomparable représenté par la photographie aérienne, surtout aux moyennes et grandes échelles. Par contre, l'inventaire thématique est de plus en plus souvent réalisé à partir de documents numériques provenant d'enregistrements satellitaires. L'avantage de ces enregistrements réside à la fois dans leurs caractéristiques multispectrales et dans leur périodicité. En outre, la comparaison de documents provenant de systèmes différents d'enregistrements navigant à des altitudes variées favorise, elle aussi, une interprétation plus complète d'une zone donnée. En milieu rural, une application intéressante réside dans la recension des surfaces mises en valeur par l'agriculture traditionnelle, car un tel survey agricole est de plus en plus difficile à réaliser par des techniques conventionnelles de recensement dans de nombreux pays tropicaux. Une autre utilisation intéressante des enregistrements satellitaires mise en œuvre par des géographes est l'étude de la déforestation périurbaine. Celle-ci a pris des proportions réellement inquiétantes, non seulement dans les régions équatoriales, mais aussi dans les pays péri-sahéliens. En outre, le diachronisme des enregistrements permet de suivre à la fois la dynamique de la croissance urbaine et celle de la déforestation.

SAMENVATTING. — *De teledetectie ten dienste van de aardrijkskunde en de ruimtelijke ordening.* — De algemene en thematische kartografie is een belangrijke toepassing van de teledetectie overzee. Evenwel zal de topografische kartografie nog lang dit onvergetelijk werktuig benutten dat vertegenwoordigd wordt door de luchtbeelden, vooral voor het opmaken van kaarten op middelbare en grote schaal. Daarentegen is de thematische inventaris veel vaker verwezenlijkt vanuit digitale documenten afkomstig van satellietopnamen. Het voordeel van deze opnamen bestaat in hun multispektrale en multitemporale eigenschappen. De vergelijking van documenten die door verschillende systemen met afwisselende orbitale hoogten opgenomen worden, begunstigt daarenboven een grondigere interpretatie van een

* Professeur à la Faculté des Sciences ; Laboratoire de Télédétection et d'Analyse régionale, Université Catholique de Louvain, Place Louis Pasteur 3, B-1348 Louvain-la-Neuve (Belgique).

gegeven gebied. In de landelijke omgeving vormt het tellen van de door traditionele landbouw bezette oppervlakten, een interessante toepassing van de teledetectie. Want zulk een landbouwkundig survey is steeds moeilijker te verwezenlijken in talrijke tropische landen aan de hand van conventionele recensietechnieken. Een andere interessante toepassing van de satellietopnamen die door geografen uitgevoerd wordt, is de studie van de ontbossing van de voorsteden. Deze ontbossing heeft zorgwekkende afmetingen aangenomen, niet alleen in de equatoriale gebieden maar ook in de landen rond de Sahel. Daarenboven kan met behulp van multitemporele opnamen, tevens de groei van de steden en van de ontbossing op een dynamische wijze waargenomen worden.

SUMMARY. — *Remote sensing at the service of geography and country planning.* — The general and thematic cartography appears overseas as an important application of the remote sensing. For the needs of the topographic cartography however, the use of that outstanding tool, that is the aerial photographs, will still remain for a long time, the most accurate method. On the other hand, the thematic surveys are nowadays more and more often conducted with digital documents issued from orbital registrations. The great advantage of space borne data consists in their multispectral and multitemporal characteristics. Furthermore, the comparison between documents achieved from multisensor and multiplatform systems orbiting at several altitudes allows a more comprehensive and accurate interpretation over a given territory. In the rural regions, an interesting application of spaceborne remote sensing lies in the inventory of the areas devoted to traditional agriculture because such a survey becomes more and more difficult to be achieved by conventional techniques in numerous tropical countries. Another fruitful application of orbital data, in tropical geography, is the study of deforestation in peri-urban areas. This is getting now a tremendous importance not only in equatorial regions, but also in subsahelian countries. Furthermore, the multitemporal approach allows a dynamic observation of both the urban growth and the fast expanding bush clearings.

*
* *

1. TÉLÉDÉTECTION ET CARTOGRAPHIE GÉNÉRALE

On ne peut traiter de télédétection en géographie sans envisager tout d'abord l'utilité de cette technique dans la représentation cartographique de la surface terrestre. Nul projet d'aménagement, en effet, ne peut se passer de ce support, de ce «modèle analogique» de la réalité spatiale, pour reprendre l'expression de P. Haggett.

La mise en valeur des pays neufs, et notamment des anciens empires coloniaux, a exigé l'établissement de cartes d'une précision acceptable. Lorsqu'on examine les types de cartes élaborées durant cette période, on peut les classer en deux grandes catégories :

- Des cartes topographiques à échelle petite, voire très petite (du 1/200 000 au 1/1 000 000), couvrant la totalité ou des parties notables du territoire colonisé. Ces cartes peuvent être considérées comme des documents de

reconnaissance et servir à une planification à l'échelle de la nation ou de la grande région ;

- Des cartes à grande échelle, spécialement dressées pour étayer un projet précis, localisé. Cette cartographie est loin de couvrir la totalité de ces pays.

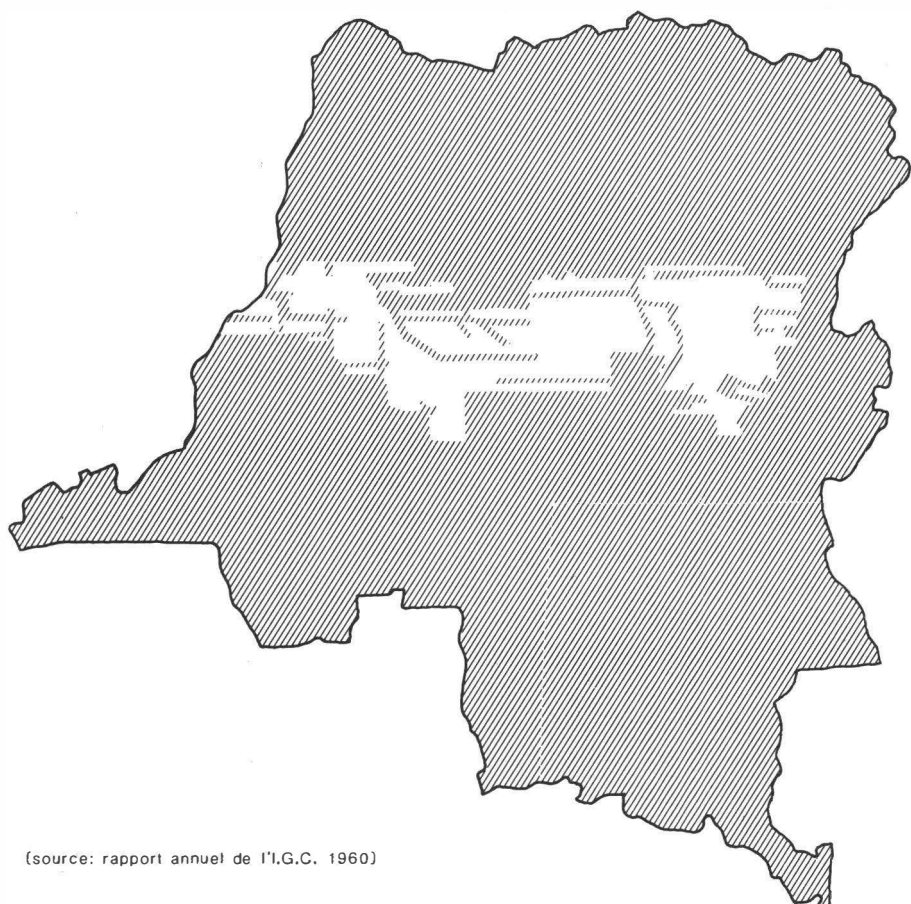
Par contre, les cartes à échelle moyenne avoisinant le 1/50 000 représentent encore des surfaces très restreintes dans la plupart des nouveaux États. Ces échelles sont pourtant nécessaires aux projets d'aménagement régional.

Autre remarque importante, l'inégale valeur des documents produits : certaines cartes sont très exactes des points de vue planimétriques et parfois altimétriques, d'autres sont de simples schémas de repérage ou des documents provisoires sans grande prétention d'exactitude. Beaucoup ont été levées par voie terrestre : ce sont souvent de vieilles éditions sommairement mises à jour par compilation. D'autres ont été rédigées grâce à la stéréophotogrammétrie aérienne. Ce sont ces dernières qui seront prises en considération ici.

Les levés aériens poursuivent deux finalités : d'une part, fournir la matière première de mosaïques, c'est-à-dire d'assemblages de photos aux échelles régulières du 1/50 000 et de stéréorestitutions au 1/100 000 ou au 1/200 000 ; d'autre part, servir à la restitution détaillée de zones restreintes à des échelles du 1/5 000 au 1/20 000. Les avions photographiques normalement utilisés pour ces missions ont un plafond altimétrique limité. Compte tenu des distances focales des chambres photogrammétriques emportées, les échelles des couvertures aériennes dites « régulières » des pays tropicaux varient souvent entre 1/40 000 et 1/60 000. L'échelle du 1/50 000 est la plus courante. Ces échelles permettent la réduction au 1/100 000 ou même au 1/200 000 ainsi que la confection de mosaïques photographiques contrôlées ou de photoplans par réduction, redressement et assemblages des clichés. Ces mosaïques permettent de tracer des canevas planimétriques.

Certaines colonies avaient procédé à des levés aériens très importants en surface. A titre d'exemple, la fig. 1 montre quelle était à la veille de l'indépendance du Congo belge, l'extension des couvertures aérophotogrammétriques effectuées par l'Institut géographique du Congo belge. On note :

- L'étendue considérable couverte par les levés : environ 85% du territoire congolais, soit quelque 200 000 clichés ;
- La correspondance entre zones non photographiées et une partie de la Cuvette centrale.



(source: rapport annuel de l'I.G.C. 1960)



Les zones du Zaïre couvertes par la photographie aérienne à l'aube de son indépendance

Fig. 1. — Couvertures aérophotogrammétriques du Congo belge à la veille de son indépendance.

Cette lacune provient de la nébulosité quasi permanente qui caractérise les zones équatoriales de forêt dense ombrophile. Cet inconvénient affecte aussi, bien entendu, la plupart des enregistrements par satellite, à l'exception des missions utilisant le radar. Il en sera question ci-dessous.

En dehors de ces zones équatoriales où la saison sèche se marque seulement par un allongement de la période comprise entre deux pluies

successives, il faut opérer durant les mois sans précipitations. Or, l'inconvénient majeur de cette période sèche pour la prise de vues aériennes consiste dans la rapide formation d'un épais voile atmosphérique. Tout d'abord, celui-ci réduit les contrastes dans la partie basse du spectre. Ensuite, la dispersion et l'absorption du rayonnement réfléchi gagnent les longueurs d'onde du vert et même du rouge rendant ainsi le sol invisible pour les émulsions dites panchromatiques.

C'est pourquoi, depuis 1950 environ, la photographie aérienne tropicale utilise des émulsions infrarouges mises au point et utilisées avec succès au cours de la seconde guerre mondiale. Grâce à un filtre rouge foncé qui coupe pratiquement tout le rayonnement visible, le film infrarouge enregistre surtout la lumière réfléchie dans ces longueurs d'ondes plus élevées. Comme les limbes foliaires renvoient particulièrement bien ce type de rayonnement, la végétation tropicale est représentée avec beaucoup de contrastes sur le film infrarouge. La réflectance dépend, dans ces longueurs d'onde, de la richesse et de l'état physiologique du tissu mésophyllien ; l'émulsion infrarouge conviendra donc spécialement pour reconnaître les espèces végétales et leur état de santé ou de jeunesse.

Le géographe, comme d'autres scientifiques, trouve dans la photo-aérienne infrarouge un outil d'un intérêt incontestable. Nous avons signalé plus haut, l'utilité de cette émulsion pour la cartographie générale par temps brumeux de saison sèche. En effet, les balisages signalant les points d'appui, repères ou signaux géodésiques, utilisés en aérotriangulation, sont peu nombreux à cause de l'accessibilité médiocre de l'hinterland. Par conséquent, il est très utile, pour mettre en place les clichés ou effectuer les redressements géométriques éventuels, de pouvoir repérer sur ceux-ci tout point singulier susceptible d'être retrouvé sur d'anciennes cartes ou des levés d'itinéraire : croisements de pistes, arbres isolés, affleurements rocheux, confluences de rivières, villages permanents. Les émulsions infrarouges, qu'il s'agisse de noir et blanc ou de films fausses couleurs, sont, à cet égard, supérieures à tout autre support photographique pour les motifs précédemment énoncés : meilleur transfert de l'énergie lumineuse et du contraste général dans les longueurs d'onde correspondantes.

Certains chercheurs ont préconisé l'utilisation d'autres méthodes de télédétection pour la cartographie des pays en développement : scanners multispectraux montés à bord de satellites, radars aéroportés ou opérant eux aussi à partir de plate-formes orbitales.

Cependant, il faut s'entendre sur l'acception donnée au mot «cartographie». On peut la définir au sens habituel d'opérations conduisant à la

production d'un document représentant fidèlement à l'échelle les contours des objets et figurant le relief par des courbes de niveaux. Il est alors certain que le pouvoir de résolution de tous les systèmes actuellement ou prochainement placés à bord des satellites est nettement inférieur à celui des émulsions photographiques des films aériens pour une cartographie aux échelles du 1/50 000 ou du 1/100 000. Les satellites conventionnels sont équipés de systèmes d'enregistrement dont la résolution géométrique au sol est actuellement de 30 m et atteindra 10 m avec le satellite français SPOT. Cette résolution correspond à la dimension de la tache élémentaire d'information appelée encore *pixel* par les auteurs anglo-saxons. Or, pour permettre un tracé cartographique au 1/50 000 comparable à celui qui peut être obtenu à l'aide des plus mauvaises émulsions aériennes (20 paires de lignes/mm), la taille du *pixel* devrait descendre à moins de 2 mètres (LEBERL 1982). Il en va de même du radar latéral dont la résolution géométrique, même à partir d'un avion, ne descend guère sous les trois mètres pour des utilisations conventionnelles et des distances moyennes (middle range). Et que dire de la précision dans la détermination des hauteurs, où la photographie aérienne s'avère inégale !

Ainsi la cartographie «classique» par satellite demeure encore limitée aux petites échelles de l'ordre du 1/250 000 à 1/500 000. Cependant, on peut s'interroger sur la nécessité prioritaire d'une cartographie générale de grande précision dans les pays en développement. L'utilisation de celle-ci ne doit-elle pas être limitée à des zones particulières où l'exploitation de certaines ressources naturelles et l'urbanisation, par exemple, exigent la confection de documents détaillés et précis ?

Dès lors une nouvelle approche ne doit-elle pas être envisagée à l'échelle de la région ou du pays ?

2. TÉLÉDÉTECTION ET CARTOGRAPHIE THÉMATIQUE

En effet, font cruellement défaut des cartes représentant, par exemple, la répartition actuelle des villages, du réseau des pistes carrossables, des étendues cultivées ou des types de couverture végétale : en d'autres mots, des cartes thématiques. Or, de telles cartes même à des échelles de l'ordre du 1/100 000, ne requièrent pas la précision géométrique relevée ci-dessus. Dès lors, la carte numérisée, confectionnée à partir d'enregistrements satellitaires, s'avère à la fois peu coûteuse dans son élaboration et très utile pour la planification et l'aménagement du territoire.

A. Les inventaires ou études intégrées.

Pour le géographe, une telle carte peut représenter tout d'abord le résultat d'un inventaire d'un espace terrestre. Cet inventaire sera plus ou moins détaillé selon l'ampleur du projet. Il y correspondra donc un ordre de grandeur de la zone envisagée, donc une échelle de représentation. Celle-ci justifiera l'utilisation de l'outil de télédétection le plus approprié.

Ainsi l'observation et la cartographie d'ensembles continentaux, commandent l'utilisation de satellites munis de détecteurs à faible résolution mais possédant plusieurs canaux de réception comme les satellites géostationnaires du type de METEOSAT ou NOAA (pouvoir de résolution de 5 à 10 km). Ces satellites peuvent aussi convenir pour un examen à l'échelle du sous-continent ou d'ensembles pluri-régionaux, comme le Maghreb, le Rift Oriental ou les plateaux du Deccan (échelle du 1/500 000). On peut utiliser aussi des documents radar provenant d'expériences telles que SIR-A ou -B.

A l'échelle régionale, ces satellites ont encore une certaine utilité. Toutefois, les régions figurent le plus opportunément sur des documents au 1/200 000 ou au 1/100 000. Leur analyse exige un pouvoir de résolution plus grand qui est caractéristique des scanners multispectraux tels qu'on les trouve à bord des satellites de la génération LANDSAT-1 à 3 (avec une résolution-sol de 80 m).

L'échelle sous-régionale (du 1/100 000 au 1/50 000) est celle des documents fournis par les satellites LANDSAT-4 et -5 équipés du Thematic Mapper, scanner multispectral (du visible à l'infra-rouge thermique) possédant une résolution de 30 m ainsi que le futur satellite français SPOT (20 et 10 m de pouvoir de résolution).

Enfin, à l'échelle locale (1/25 000), la photographie aérienne demeure actuellement le meilleur outil d'analyse et d'inventaire. Toutefois, à celle du terroir, l'utilisation du satellite à haute résolution pourra être aussi précieuse dans un très proche avenir. L'avantage de l'enregistrement par satellite consiste essentiellement dans sa périodicité. Ainsi, dans une certaine mesure, l'interprétation d'images numériques multi-temporelles compense la plus faible résolution de l'instrument satellisé. La résolution accrue des instruments embarqués à bord des nouveaux satellites se combinera aux vertus de la pluralité temporelle des images pour accroître le rendement de l'interprétation.

La recension des études réalisées par des géographes et appartenant à cette catégorie des «inventaires» régionaux conduit aux constatations suivantes :

- 1) L'efficacité de l'interprétation satellitaire dépend d'une bonne connaissance préalable du terrain. Les techniques dites «supervisées» ou de «préassistance» (VERGER 1982) utilisant la radiométrie au sol ou, au moins, une bonne visualisation des paysages, sont les plus rentables. A cet égard, les clichés aériens, même anciens, peuvent jouer en partie ce rôle, surtout en milieu rural. Ces observations au sol ou ces déterminations sur photos effectuées dans des zones-tests permettent de constituer sur les images des classes d'entraînement. Celles-ci seront extrapolées aux zones voisines ;
- 2) L'interprétation satellitaire de l'affectation du sol exige une classification multispectrale des données enregistrées. En effet, il n'est pas toujours possible de distinguer chaque type d'utilisation du sol par une valeur de radiance déterminée, mais le plus souvent, par le profil de ses valeurs de radiance dans les divers canaux d'enregistrement : c'est ce qu'on appelle la «signature spectrale» de cette affectation ;
- 3) En outre, les ambiguïtés ou les erreurs résiduelles seront corrigées pour une part importante, grâce aux comparaisons diachroniques : pour les inventaires régionaux, on utilise généralement une séquence d'images de saison sèche et de saison des pluies ;
- 4) Certains auteurs (p. ex. BARDINET & MONGET 1980) ont également recours à des enregistrements effectués à partir de satellites différents (LANDSAT, NOAA, METEOSAT). On joue ici à la fois sur les différences d'échelle et de capteurs ; à cette technique, appelée «multiplatforms» par les auteurs anglo-saxons, appartient aussi la comparaison des images LANDSAT avec les photos aériennes récentes de zones-tests des mêmes régions ;
- 5) Les résultats les plus intéressants ont été obtenus à partir des données numériques ; les images en compositions colorées ou monospectrales, ne se prêtent pas aux transformations numériques (composantes principales, rapports de canaux, ...) qu'il est possible de réaliser sur ordinateur à partir des bandes magnétiques originales. Pourtant, un assez grand nombre de chercheurs utilisent encore les images au 1/1 000 000 dérivées des enregistrements magnétiques. Il est vrai que ces images combinées en compositions colorées multispectrales offrent la possibilité d'une première analyse rapide ou d'une synthèse régionale (WILMET 1981).

En milieu rural, ces inventaires portent notamment sur la recension des zones cultivées. Pour les cultures modernes d'extension généralement importante et à parcellation régulière, l'identification des espèces et la mesure des surfaces ne posent guère de problèmes ; seule la différenciation des variétés

cultivées requiert une bonne radiométrie de terrain et l'utilisation de séquences d'enregistrements diachroniques (MALINGREAU 1980). Par contre, l'agriculture itinérante sur brûlis et en général, la petite culture sèche individuelle posent au chercheur des problèmes insurmontables, compte tenu de la faible résolution des satellites LANDSAT de la première génération. Tout au plus peut-on, comme d'ailleurs sur les photos aériennes de saison sèche au 1/40 000 ou 1/50 000, identifier les zones défrichées, champs et jachères récentes en groupes de parcelles contiguës. On peut effectuer les mêmes constatations au sujet de l'inventaire des lieux habités. Seuls les villages importants sont nettement repérables. Les hameaux ou les cases isolées en brousse passent inaperçus ou sont confondus avec d'autres formes d'affectation du sol.

A cette catégorie des inventaires s'apparentent les enquêtes intégrées (integrated surveys). Ce type d'investigation préparatoire à un aménagement régional requiert à la fois la mise en commun de tous les moyens d'étude terrestres, aériens et satellitaires mais aussi un effort de travail interdisciplinaire de géographes et de spécialistes des sciences connexes. La télédétection fait naturellement partie des techniques mises en œuvre pour de tels projets. Cette catégorie de recherche appliquée est effectuée généralement en étroite collaboration avec les institutions ou services ministériels des pays en développement. Souvent, à cette occasion, se pose le problème du choix d'une technologie adaptée aux moyens financiers, humains et techniques de ces pays. Cette question du transfert technologique est débattue dans une publication du Département de Géographie de l'Université de Zürich, à propos d'un «survey» de la région de Ta'izz-Turbah en République Arabe du Yémen (SCHOCH 1982). Le point de vue exprimé par l'auteur est le suivant :

La télédétection est souvent dans ces pays le seul outil d'investigation précis en ce qui concerne l'inventaire des ressources naturelles, de l'utilisation du sol ou de la croissance urbaine. En effet, les moyens dont ces États disposent ne leur permettent pas l'organisation de telles enquêtes sur une large échelle par des méthodes conventionnelles.

Dès lors, le choix des techniques de télédétection dépend grandement des conditions locales : il doit être étudié cas par cas. Les carences majeures relevées dans l'organisation des services d'aménagement de ces États en vue de l'utilisation du «Remote Sensing» proviennent bien plus souvent d'une absence de personnel formé que d'un manque d'équipement. On peut idéalement former le personnel sur l'équipement installé sur place ; toutefois, le pourcentage d'échecs est considérable : plus de 50% pour la République du Yémen.

La solution retenue est d'adapter de manière souple l'équipement aux connaissances pratiques des utilisateurs locaux. Les coopérants s'efforceront

aussi d'organiser non seulement des enseignements pratiques de formation avancée pour les fonctionnaires et chercheurs locaux travaillant au projet, mais encore des conférences ou séances d'information au profit des administrateurs ou directeurs des institutions gouvernementales concernées.

L'auteur estime, en effet, que les «responsables locaux» de la politique d'aménagement doivent être suffisamment familiarisés avec la télédétection pour en intégrer les applications à leurs projets de développement et d'aménagement. Ces considérations me semblent parfaitement justifiées. Je voudrais cependant les compléter sur deux points :

- 1) Une sélection doit être opérée parmi les meilleurs des spécialistes locaux. Les candidats retenus doivent, à mon avis, suivre des stages de formation dans les meilleurs laboratoires de télédétection des pays à technologie avancée : ceci dans le but de créer un noyau de chercheurs capable de maîtriser dans l'avenir un équipement plus complexe et de former localement des spécialistes en télédétection. Ce potentiel de chercheurs de pointe permet de stimuler la recherche et de saisir toutes les occasions qui peuvent se présenter d'accroître la qualité de l'équipement et des techniques mises en œuvre ;
- 2) On constate souvent que bien des spécialistes de l'informatique de pointe sont de médiocres photo-interprètes. Dès lors, on observe une tendance chez certains à pratiquer l'art pour l'art. Ce danger guette aussi certains laboratoires à équipement avancé des pays en développement. Parfois aussi un matériel de très haut niveau et, par conséquent très coûteux, dort sous la poussière, faute de posséder un spécialiste apte à s'en servir. Or, comme on l'a dit plus haut, spécialistes et matériel de télédétection doivent pallier, dans ces pays, les insuffisances des méthodes traditionnelles d'investigation et de recensement. Il est donc indispensable de développer chez ces personnes un esprit pratique et réaliste ainsi qu'un sens aigu d'observation du terrain. J'insiste sur ce dernier point, car bien peu de fonctionnaires des pays tiers acceptent encore de se rendre dans l'hinterland en vue d'y effectuer des enquêtes objectives sur des sites-tests.

Dans un projet de télédétection, le budget de terrain ne doit donc pas être sous-estimé ; pas plus que la formation pratique en interprétation, des spécialistes de la classification numérique.

B. Les applications aux études thématiques.

Elles sont les plus nombreuses et couvrent des domaines variés des sciences géographiques.

Les études de géographie physique utilisent tout l'arsenal des techniques de télédétection, depuis la photographie aérienne classique jusqu'au radar latéral aéroporté. Tantôt les clichés aériens sont utilisés comme l'une des techniques d'investigation des formes du relief, tantôt la télédétection par satellite ou aéroporté est l'outil essentiel de la recherche et les résultats obtenus sont présentés comme une démonstration de son utilité scientifique. La photographie aérienne classique a été largement utilisée par les géomorphologues ou dans des chapitres de géographie physique d'études régionales. Il n'est que de parcourir la revue française *Photo-Interprétation* pour en trouver de nombreux exemples sur tous les continents. Je voudrais mentionner à titre d'exemple, les travaux de J. TRICART sur l'Amérique Centrale ou le Venezuela, les travaux de H. Th. VERSTAPPEN et de l'École néerlandaise d'Enschede sur l'Indonésie et le Suriman, du regretté C. TROLL sur le Mexique, le Gabon ou la Zambie. Nombreuses furent les recherches qui permirent de perfectionner les méthodes d'interprétation aérienne.

De ces types de travaux, les Belges ne furent pas absents et l'on trouve des exemples d'interprétation morphologiques, par exemple, dans les thèses de H. NICOLAI (1963) sur le Kwilu ou de S. ALEXANDRE-PYRE (1971) sur le plateau des Bianco. Bien entendu, les arguments géomorphologiques furent exploités par les photogéologues mais mon collègue et ami, H. LADMIRANT, a analysé déjà cette contribution dans le cadre de ce Symposium. Toutes ces recherches montrent que, en géomorphologie, la photo aérienne remplit trois fonctions :

- Comme en géologie, elle permet de repérer plus facilement et plus rapidement les affleurements ou les sites à visiter sur le terrain ;
- Elle facilite l'identification des formes de relief caractéristiques de processus morphoclimatiques actuels ou anciens ; des types de végétation liés à des contextes pédogénétiques précis ;
- Elle possède enfin un effet de synthèse permettant de distinguer divers stades ou cycles morphogénétiques à travers toute une région.

Les nouvelles techniques non photographiques trouvent cependant d'autres applications spécifiques en géographie physique. Un remarquable exemple d'utilisation du satellite américain LANDSAT nous est fourni par les travaux de M. MAINGUET sur les grandes masses sableuses du Sahara. Ces travaux sont alimentés par l'observation des images des satellites NOAA-3, LANDSAT ainsi que des photographies aériennes au 1/50 000 et au 1/60 000. Ils aboutissent à des conclusions tout à fait remarquables :

- 1) Le Sahara fonctionne comme un système morphodynamique. Il est composé de deux ensembles dunaires séparés par une série de noyaux

montagneux. Cependant ces deux ensembles sont mis en relation par des courants éoliens de transport alimentant les zones d'accumulation constituées par les ergs. Ces courants peuvent être individualisés ;

- 2) Les formes anciennes nées des paléo-alizés montrent que ce vaste système connaît depuis une très longue période des conditions analogues d'érosion et des directions assez voisines de transport sableux. A l'heure actuelle, où le drame de la désertification de certaines zones périssahariennes émeut les diverses instances locales et internationales, de tels travaux fondamentaux sont particulièrement utiles parce qu'ils contribuent à expliquer la dynamique de l'approvisionnement en sable des accumulations récentes ou de la mobilisation des formations anciennes.

Le radar latéral aéroporté a lui aussi fait l'objet d'applications du plus haut intérêt. Son utilisation en cartographie a déjà été mentionnée avec, par exemple, les travaux de CRANDALL (1969) sur Panama ou en phytogéographie avec ceux de LEWIS & MAC DONALD (1972) sur les mangroves (et les formes littorales) de la même région ou de SICCO-SMIT (1978) sur la classification des forêts tropicales semi-décidues. Mais en géomorphologie, c'est à TRICART (1973) que l'on doit les travaux les plus significatifs sur l'emploi du radar latéral pour l'étude des levées alluviales et des dépôts sableux dans le bassin amazonien. Utilisant le radar aéroporté GEMS qui servait à la cartographie de ces zones presque toujours couvertes de formations nuageuses importantes et donc inaccessibles à la photo aérienne classique, il a pu mettre en évidence :

- 1) Le modelé de dissection topographique. Cependant, l'auteur attribue cette possibilité d'observer le relief à un «pouvoir de pénétration» des ondes radar à travers la forêt équatoriale ; à la vérité il s'agit d'une conséquence de la faible résolution du faisceau-radar qui ne permet pas de distinguer individuellement les arbres. Au contraire, il révèle les grands mouvements du relief dont la fréquence spatiale est mieux perçue par des trains d'onde en bandes X et K (SABINS 1978). Ce modelé de dissection est en grande partie hérité (climat plus sec que l'actuel) ;
- 2) L'analyse des levées alluviales telles qu'elles apparaissent sur les mosaïques-radar suggère que l'édification de celles-ci a dû s'effectuer dans des conditions hydrologiques différentes de celles qui règnent aujourd'hui avec, en particulier, un niveau de base inférieur à l'actuel (régression pré-flandrienne). Comme on peut le constater, ces différents résultats sont le fruit d'observations effectuées à un niveau de synthèse plus élevé que celui que permet la photo aérienne classique ou, a fortiori, l'observation de terrain.

En géographie tropicale, l'utilité de la télédétection n'est pas moindre, particulièrement en matière d'aménagement des espaces ruraux ou urbains. En ce qui concerne l'aménagement des campagnes, deux applications nous paraissent importantes : l'étude du peuplement et les recherches agraires et agricoles. Il faut en effet souligner l'importance que devrait revêtir dans un plan d'aménagement rural une enquête préparatoire approfondie sur l'organisation des terroirs ruraux traditionnels. La plupart des échecs encourus dans le transfert des technologies modernes, tant en Afrique que dans le reste du Tiers Monde, trouvent pour une bonne part leur origine dans une profonde méconnaissance des formes locales d'agriculture traditionnelle et de leur évolution récente. D'une manière plus générale, les structures techniques, sociales et même les facteurs physiques qui commandent l'organisation régionale de l'espace nous sont souvent demeurés étrangers. Or, dans un milieu coutumier, tous les éléments techniques qui président à cette organisation sont unis par de multiples relations d'interdépendance : habitat, réseau de desserte, parcellaire foncier et cultural, aménagement de la végétation semi-naturelle, utilisation des types de sols et des formes topographiques du relief, des eaux superficielles et de la nappe phréatique, tous ces éléments divers concourent à structurer *hic et nunc* un système spatial permettant la survie ou l'épanouissement des collectivités locales (WILMET 1958, 1963, 1974 a et b ; HURAUULT 1963, 1965). Les profonds déséquilibres qui se manifestent à l'heure actuelle dans les sociétés rurales africaines, se traduisent spatialement par des formes de déprise agricole ; la désorganisation sociale résultant de pressions administratives ou de l'exode rural se reflète dans la déstructuration des noyaux d'habitat ou le déplacement forcé des villages vers des sites peu adéquats. Une étude diachronique à partir des photos aériennes anciennes permet de suivre cette évolution. Un excellent exemple nous en est donné par l'étude de CHAMPAUD (1975) sur le paysage rural des Bamiléké du Cameroun.

L'usage des photographies aériennes se justifie pleinement en géographie agraire et agricole, pour l'élaboration de monographies de terroirs. Aussi trouve-t-on dans la littérature, notamment d'expression française, un grand nombre de contributions traitant de ce sujet. A cet égard, il faut signaler l'«Atlas des Structures agraires au sud du Sahara», collection dirigée par le professeur Sautter depuis 1967. La photographie aérienne, et particulièrement l'émulsion infra-rouge, possède un certain nombre d'avantages pour la cartographie des parcellaires, notamment dans les régions d'agriculture itinérante ou de riziculture irriguée : fidélité dans la reproduction générale des contours de blocs parcellaires, figuration des pistes d'accès et

de nombreux détails de l'environnement. Néanmoins, les couvertures aériennes dont disposent les géographes ou les agronomes présentent les inconvénients suivants :

- 1) Ces photos sont souvent vieilles et ne correspondent plus, sauf exception (voir *supra*), à l'organisation actuelle des terroirs (surtout en agriculture itinérante sur brûlis et dans le cas de couvertures de l'époque coloniale) ;
- 2) L'échelle est généralement trop petite pour effectuer des levés de détail. En effet, le 1/40 000 ou le 1/50 000, même après agrandissement ou sous binoculaire à fort grossissement, ne permet pas d'observer toutes les limites parcellaires, mais seulement celles qui présentent le meilleur contraste. Ces clichés conviennent donc pour la délimitation des blocs de cultures ou des zones de contact entre jachères d'âge suffisamment différent pour être révélées par des stades bien marqués de recrû herbacé ou arbustif ;
- 3) Ces photos sont prises au début de la saison sèche ; par conséquent, un grand nombre d'espèces cultivées à cycle annuel peuvent déjà être récoltées ou, en passe de l'être, et risquent d'être confondues avec les chaumes des jachères herbacées environnantes. La date de prise de vue est donc critique à cet égard ;

Il en résulte que les couvertures aériennes anciennes peuvent être utilisées, soit pour préparer un canevas général d'utilisation du sol grâce aux nombreux repères qu'elles contiennent, soit pour analyser de manière diachronique l'évolution spatiale d'un parcellaire par comparaison avec un levé actuel effectué suivant les méthodes traditionnelles au sol.

Cependant certains chercheurs (Off. Rech. Scient. Techn. Outre-Mer, 1972) préconisent l'utilisation de photographies verticales ou obliques réalisées à bord d'avions légers pour cartographier des échantillons de parcellaires qui seront ensuite étendus par cheminement au sol. Le coût de ces opérations serait relativement abordable pour des institutions modestes, à condition de trouver une piste d'atterrissage à proximité de la zone à cartographier. Ce problème de l'échantillonnage demeure important, car en l'absence de cartes à grande échelle et de cadastre, les levés au sol ne peuvent souvent couvrir que des espaces restreints. Le choix du terroir-échantillon peut cependant être facilité grâce à l'observation de la couverture aérienne ancienne à petite échelle et, bien entendu, moyennant une connaissance suffisante de la région. En effet, ces photos aériennes permettent d'analyser la structure générale et d'apprécier l'importance des divers terroirs agricoles régionaux. Ainsi, il est souvent possible non seulement de caractériser un groupe humain par l'organisation spatiale de son agriculture, mais encore de

choisir (ou de tirer au sort) les échantillons représentatifs des terroirs ruraux appartenant à ce groupe en vue d'une étude approfondie sur le terrain (WILMET 1958, HURAUULT 1961 et 1965).

Cependant, à l'heure actuelle, dans de nombreuses régions de pays en développement, l'absence ou la précarité des voies de communication, tendent à limiter le travail de terrain à des zones limitées encore accessibles en toute saison. Dès lors se pose un grave problème de tenue à jour des données statistiques concernant les productions et les surfaces agricoles coutumières ainsi que des connaissances se rapportant aux structures agraires et à leur évolution. C'est ici qu'intervient la télédétection par satellite : il est en effet beaucoup moins coûteux d'acheter et de traiter des images ou des bandes magnétiques sur un ordinateur que d'organiser un survol aérien de zones étendues. Toutefois, il convient de se poser la question de l'efficacité comparée des deux solutions. Il faut alors envisager la notion de «résolution-sol» du satellite : pour le scanner multispectral de LANDSAT, elle est d'environ 64 ares, soit le double environ de la taille moyenne d'une parcelle de champ coutumier au Kasai, par exemple. Il est donc exclu d'effectuer un levé parcellaire à l'aide des données de cet instrument. Tout au plus, pourra-t-on, dans le meilleur des cas, observer des blocs parcellaires suffisamment importants. En outre, la taille même de la cellule d'image élémentaire crée à la périphérie des objets des marges d'interférence avec les affectations voisines : le pourcentage de ces «pixels impurs» sera d'autant plus important que le bloc parcellaire est petit. Certes, s'il existe d'autres enregistrements effectués sur la même zone à des saisons différentes, on pourra par des techniques de comparaison diachronique et en tenant compte de la phénologie des végétaux cultivés, améliorer quelque peu la précision du levé. Mais il ne faut pas s'illusionner sur le gain de précision ainsi réalisé.

Il sera donc possible, à partir des enregistrements satellitaires, de délimiter les zones mises en valeur et, moyennant un bon échantillonnage radiométrique de terrain, de déterminer les espèces cultivées les mieux représentées (en culture pure ou éventuellement en association). Cependant, la détermination des principales cultures annuelles exige l'obtention d'enregistrements effectués en fin de saison des pluies ou en tout début de la saison sèche. Cette condition n'est pas toujours réalisée, il s'en faut, par suite de la nébulosité encore importante à cette époque. On le voit, l'étude à partir d'enregistrements satellitaires présente de sérieuses limitations. Elle mérite cependant d'être prise en considération, pour les motifs suivants :

- 1) Il n'existe plus, à l'heure actuelle, dans certains pays en développement, de statistiques agricoles valables sur lesquelles une planification pourrait s'appuyer ;

- 2) Le satellite fournit, pour l'agriculture traditionnelle, des ordres de grandeurs acceptables de surfaces mises en valeur ;
- 3) Les futurs satellites d'observation terrestres, et déjà LANDSAT-4 et -5, grâce au «Thematic Mapper», présentent des résolutions-sol nettement meilleures (9 ares au lieu de 64) et sont susceptibles de fournir des données plus précises. Le futur satellite français SPOT pourra, grâce à un enregistreur de bord, engranger ses informations quelle que soit la position de la zone observée sur le globe. Quant au «Thematic Mapper», il conviendrait, soit d'équiper les stations de réception couvrant les pays tiers, particulièrement l'Afrique, de moyens propres à enregistrer ses données, soit de relayer ses émissions en utilisant un satellite ancillaire (TDRSS). En effet, LANDSAT-4 et -5 ne sont pas pourvus d'enregistreurs opérant au profit du «Thematic Mapper».

Parmi les études thématiques entreprises par les géographes à l'aide d'enregistrements par satellite, il en est une qui mérite une certaine attention : il s'agit de la déforestation causée par la croissance urbaine à la périphérie des grandes villes africaines notamment. Cette étude qui a débuté en Afrique centrale (WILMET 1980 ; WILMET & SOYER 1982 ; SOYER & WILMET 1983) a été étendue récemment aux zones sahéliennes dans le cadre d'une recherche multidisciplinaire sur les processus de désertification de ces zones, sous les auspices des Communautés européennes.

En effet, le phénomène incontrôlé d'urbanisation qui caractérise à notre époque le Tiers Monde et particulièrement les pays africains, a des conséquences catastrophiques sur l'environnement des villes. Si l'autoconstruction a progressé en vagues à la périphérie des vieux quartiers urbains, la fabrication du charbon de bois et l'agriculture d'appoint, parfois même l'agriculture de subsistance, ont opéré d'énormes défrichements dans la végétation environnante. A Kinshasa, par exemple (fig. 2), la vague de déforestation a largement dépassé l'Inkisi vers le sud-ouest et traversant la Nsele, le long de laquelle une mince galerie subsiste, a détruit la forêt jusqu'au pied des plateaux Bateke vers l'est. A Lubumbashi, cette progression s'est faite plus ou moins en auréole autour de la ville et la zone dégradée possède à présent un rayon de 30 km (SOYER & WILMET 1983). A Kinshasa, cette déforestation a déjà eu des conséquences dramatiques : érosion accélérée des sols sur les collines sableuses entourant la capitale zaïroise. Cette érosion a provoqué à plusieurs reprises la formation de coulées boueuses lors de violentes averses ; celles-ci dévalant les ravines ou empruntant les vallons des affluents du Pool ont entraîné la destruction d'habitations et la mort de certains de leurs occupants.

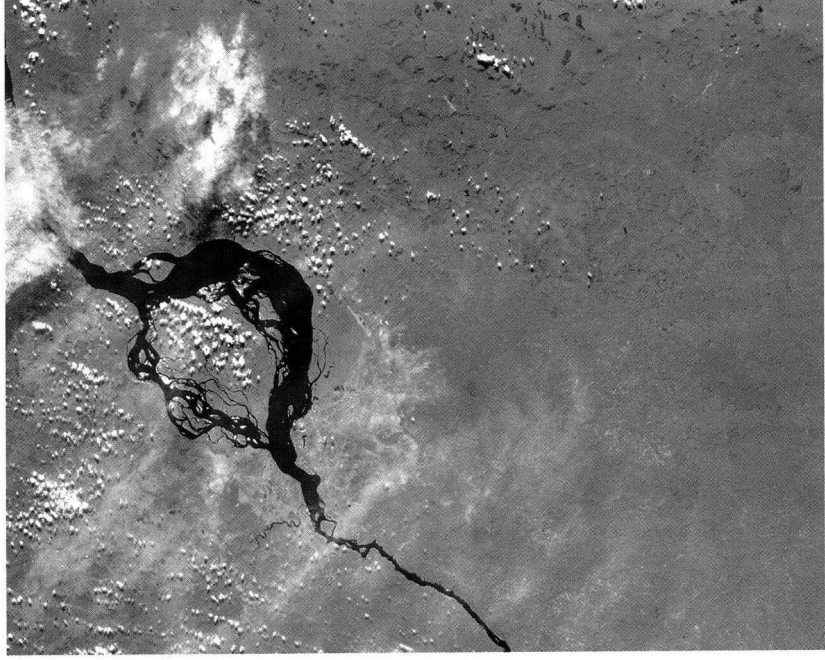
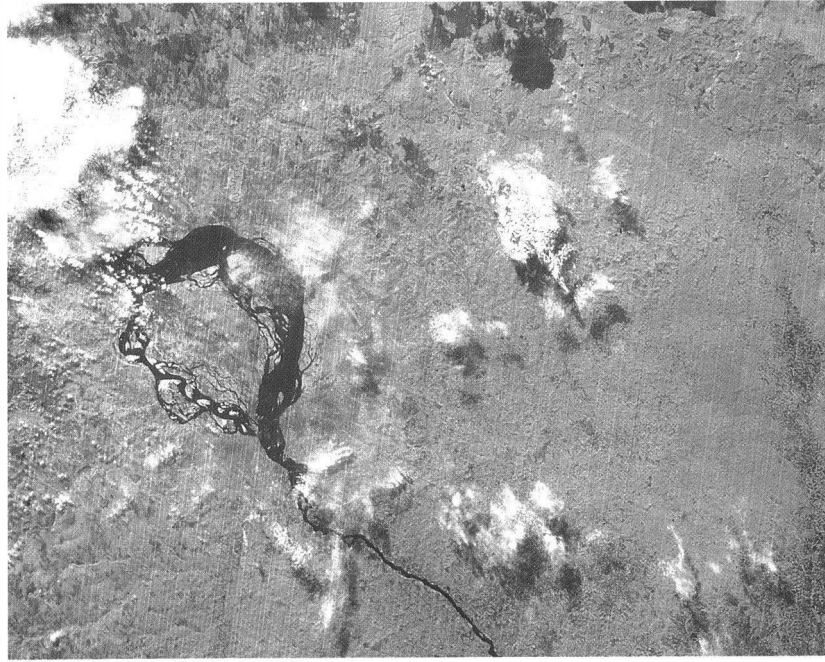


Fig. 2. — Comparaison diachronique entre deux compositions colorées des images des canaux 5, 6 et 7 du satellite LANDSAT sur la région de Kinshasa (14/08/1978 et 19/03/1979, soit en saison sèche et en saison des pluies). On remarque l'extension des déboisements le long de la voie ferrée et de la route de Matadi, particulièrement à la traversée de l'Inkisi au sud-ouest et les vastes brûlis sur les plateaux Teke (à l'est, sur la composition colorée d'août 1978, particulièrement).

A Lubumbashi, les conséquences sont moins dramatiques. Il est cependant troublant de constater avec LEBLANC & MALAISSE (1978) qu'outre la formation de tourbillons de poussière sur les sols dénudés ou faiblement couverts par la végétation, le passage d'un microclimat forestier (de forêt claire) à celui de savane provoque une hausse de la température moyenne annuelle de près de 2° C ! Que dire des sols cuirassés sur lesquels certains quartiers de la ville sont construits ! Les enregistrements de LANDSAT sont particulièrement bien adaptés à l'étude de ce phénomène de déboisement. En effet, l'extension des zones déboisées peut être assez aisément mesurée sur des enregistrements successifs depuis le lancement du premier satellite de ce type en 1972. Par ailleurs, certains faciès de dégradation possèdent une signature spectrale caractéristique qui permet de les identifier. Enfin, certains algorithmes de traitement des données et notamment l'indice de végétation de VINOGRADOV (1977) permettent de mesurer le recul global du tapis végétal (SOYER & WILMET 1983).

Mais l'étude de la croissance urbaine concerne aussi les étendues bâties proprement dites. Dans ce cas aussi, le pixel du scanner multispectral de LANDSAT s'avère de dimension trop grande pour permettre l'étude détaillée des quartiers. D'ailleurs, la classification d'ANDERSON *et al.* (1976), fréquemment utilisée pour fixer les postes d'une légende d'affectation des sols à partir des données de LANDSAT, ne retient que cinq termes pour les surfaces bâties : résidentielles à haute et basse densité (de construction), non résidentielles affectées aux industries et commerces, transports et surfaces non bâties enclavées entre les bâtiments. Cependant, cette classification s'avère mal adaptée à la structure des espaces urbains en pays sous-développés. Ainsi elle ne tient pas compte des éléments suivants que nos études ont pu mettre en évidence (BEGUIN, DO-TU & WILMET 1980 ; WILMET & SOYER 1982) :

- 1) Les quartiers d'auto-construction nés après l'indépendance du Zaïre se distinguent nettement des autres établissements urbains grâce à la réflectance élevée de leurs toitures de tôle et surtout des sols nus qui les environnent. Ils ont donc une signature spectrale spécifique. Cette signature évolue avec l'établissement d'une végétation arbustive ou arborescente à l'intérieur des parcelles. L'analyse diachronique permet donc d'observer la frange d'occupation pionnière sur les enregistrements successifs (SOYER & WILMET 1983) ;
- 2) L'analyse texturale (pattern analysis) permet de mettre en évidence certains éléments de la structure interne d'un quartier dans la mesure où celle-ci présente une certaine régularité ; ainsi certaines avenues de

l'ancienne cité Wangermée à Lubumbashi, construite suivant le modèle colonial en échiquier ont pu être observées après transformation des données par filtrage numérique.

Il est évident que de telles analyses texturales seront favorisées par la résolution-sol accrue des satellites de la nouvelle génération. Enfin, il faut ajouter que l'étude d'une ville tropicale en pays tiers doit tenir compte des espaces vides intra-urbains ou péri-urbains et affectés notamment à l'agriculture d'appoint. L'analyse numérique montre également que les cités-jardins des anciennes villes coloniales possèdent une signature spectrale intermédiaire entre les valeurs des surfaces urbaines proprement dites et celles de la végétation semi-naturelle environnante (SOYER & WILMET 1983).

Une dernière application retiendra notre attention à propos des villes des pays en développement : l'évaluation de la population urbaine à partir des surfaces occupées. On peut en effet mesurer celles-ci sur les écrans de numérisation ou les listages d'ordinateur. L'École américaine de télédétection y a consacré plusieurs travaux (TOBLER 1969, LO & WELCH 1977). Le modèle général est fourni par la loi biologique de croissance allométrique (NORDBECK 1965). Ce modèle a été testé de manière assez satisfaisante pour les villes chinoises. Il s'exprime de la manière suivante :

$$\log P = C_1 + C_2 \log A$$

où P = population d'une ville appartenant à la série d'agglomérations d'une région donnée ;

A = surface de la ville mesurée d'après les données du satellite LAND-SAT ;

C₁ et C₂ sont des coefficients valables pour la série de villes considérée.

3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES D'AVENIR

L'exposé qui précède montre la grande variété d'applications géographiques de la télédétection aux pays en voie de développement. En particulier, l'utilité de la télédétection par satellite est indéniable à l'heure actuelle :

- Pour des inventaires à l'échelle régionale ;
- Pour des études thématiques prenant en considération des phénomènes dynamiques (crues, croissance urbaine, ...) ;
- Pour des études macrostructurales géomorphologiques, hydrographiques, agricoles ou urbaines.

La seconde génération de satellites ouvre de nouvelles perspectives :

- 1) Pour l'étude de l'affectation du sol ; elle permettra à la fois une taxinomie

élargie des postes de la légende et une précision plus grande dans le calcul des surfaces ;

- 2) Pour les études agricoles et agraires ; sur la base des données déjà fournies par le «Thematic Mapper» et des simulations opérées sur sites-tests pour le futur satellite SPOT, on peut légitimement penser qu'il sera possible d'observer un nombre suffisant de limites parcellaires afin de révéler les traits essentiels de la structure spatiale d'un terroir en agriculture itinérante ou en riziculture irriguée ;
- 3) Pour les études urbaines ; l'effet attendu d'une meilleure résolution-sol concerne essentiellement :
 - La structure interne des quartiers de la ville tropicale et notamment des vastes zones de squatting ;
 - La répartition périphérique des zones de friches et de cultures d'appoint ainsi qu'une meilleure différenciation des types de dégradation forestière.

Ainsi la télédétection apparaît de plus en plus comme un outil indispensable aux recherches géographiques fondamentales et appliquées dans des zones où la précarité voire l'absence d'infrastructures et de moyens de transport constitue un grave handicap pour les actions de développement.

BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDRE-PYRE, S. 1971. Le plateau des Biano. (Katanga). Géologie et géomorphologie. — *Mém. Acad. r. Sci. d'Outre-Mer*, Cl. Sci. nat. méd., nouv. sér. in-8°, 18 (3), Bruxelles, 151 pp.
- ANDERSON, J. R., HARDY, E. E., ROACH, J. T. & MITMER, R. E. 1976. A landuse and land-cover classification system for use with remote sensor data. — *U.S. Geol. Survey, Prof. Paper*, n° 964, 28 pp.
- BARDINET, Cl. & MONGET, J.-M. 1980. Lanchad. Télédétection et géographie appliquée en zone sahélienne du Tchad. — Coll. Ec. Norm. Sup. de J.F., n° 12, Paris, 543 pp., 1 atlas h.t.
- BEGUIN, H., DO-TU, H. & WILMET, J. 1980. Comparison of classification methods for urban images interpretation. — *Int. Arch. Photogrammetry*, 5, 23 (7) : 84-91.
- BOZET, M., DO-TU, H., INSTALLÉ, M. & WILMET, J. 1980. Filtrage spatial des données LANDSAT en vue de la cartographie urbaine. — *Ann. des Mines* (Paris), pp. 122-129.
- CHAMPAUD, J. 1975. Transformations de l'habitat et transformation des paysages agraires en pays bamiléké (Cameroun). — *Photo-Interprétation*, 2 (5) : 28-34.
- CRANDALL, Cl. J. (1969). Radar mapping in Panama. *Photogram. Engin.*, 35 (7) : 641-648.

- DE PLOEY, J. & STERCKX, J. 1973. The Ndola-Mweru Wantipa Strip (Zambia, Zaire). — Kath. Univ. Leuven, Lab. voor Exper. Geomorf. en Trop. Str., Rep. on Lake Tchad and Zaire Basins and Surrounding Areas, NASA, User Id. F 085, Rep. n° 1.
- HURAUULT, J. 1963. Applications de la photographie aérienne aux recherches de sciences humaines dans les régions tropicales : E.P.H.E., Paris, 6^e section, Mém. de *Photo-Interprétation*, n° 1, 111 pp., 1 album de photos h.t.
- HURAUULT, J. 1965. Les principaux types de peuplement du sud-est du Dahomey et leur représentation cartographique. — Inst. Géogr. Nat., Paris, Études de photo-interprétation, n° 2, 79 pp.
- LEBERL, F. W. 1982. The applicability of Satellite Remote Sensing to Small and Medium Scale Mapping, Proceed. of an EARSEL-ESA Symposium (Igls, Austria), ESA SP-175, 81-85.
- LEBLANC, M. & MALAISSE, F. 1978. Lubumbashi, un écosystème urbain tropical. — Univ. Nat. du Zaïre, Centr. Int. de Sémiologie, 166 pp.
- LEWIS, A. J. & MAC DONALD, H. C. 1972. Mapping of mangrove and perpendicular-oriented shell reefs in Southeastern Panama with side-looking radar. — *Photogrammetria*, 28 (6) : 187-200.
- LO, C. P. & WELCH, R. 1977. Chinese urban population estimates. — *Annals Ass. Amer. Geogr.*, 67 (2) : 246-253.
- MAINGUET, M. & GUY, M. 1974. Apport des images par satellites météorologiques (NOAA-3) dans l'observation des grands courants de matériels éoliens et dans les relations de dépendance des ergs du Sahara. — *Photo-Interprétation* (Paris), 4 : 1-53.
- MAINGUET, M., CALLOT, Y. & GUY, M. 1974. Silks, Obstacles, Siks, Barkhanes, Nappages, Ghourds. — *Photo-Interprétation* (Paris), 2 : 1-51, 7 fascicules.
- MAINGUET, M. 1976. Les photographies aériennes et les images de satellites au service de l'étude des relations homme-milieu naturel. — *Photo-Interprétation* (Paris), 2 : 1-7.
- MAINGUET, M. & CANON, L. 1977. L'action du vent dans les paysages arides d'Afrique Nord-Équatoriale vue par les satellites, G.D.T.A. — In : Journées de Télédétection, St Mandé, pp. 307-318.
- MAINGUET, M., CANON, L. & LE MERRER, J. Y. 1976. Recherches sur les photographies aériennes et les images-satellite d'indices de désertification dans le Sahel, à l'est du Niger. — *Photo-Interprétation* (Paris), 3 : 31-40.
- MALINGREAU, J. P. 1980. The wetland rice production and its monitoring using Remote Sensing in Indonesia. — Univ. of California, Davis, Ph. D. Thesis, Ann Arbor, Univ. microfilms Intern.
- NICOLAI, H. 1963. Le Kwilu. — CEMUBAC, Bruxelles, 472 pp., 4 c. hors tome.
- NORDBECK, St. 1965. The law of allometric growth. — Michigan Inter-Univ. Community of Math. Geogr., Disc. Pap., Ann Arbor, Dept. of Geography, Univ. of Michigan, 7 pp.

- Off. Rech. Scient. Techn. Outre-Mer (Ed.) 1972. Les petits terroirs ruraux. Problèmes de méthode. — C.R. des Journées consacrées à l'étude des terroirs (1969), 177 pp.
- SCHOCH, R. 1982. Land-cover studies and crop acreage estimates from aerial photography and satellite imagery. — Univ. of Zürich, Dept. of Geography, vol. 5, 251 pp.
- SICCO-SMIT, G. 1978. SLAR for forest type classification in a semi-deciduous tropical region, *ITC-Journal*, 3 : 385-401.
- SOYER, J. & WILMET, J. 1983. Étude de l'environnement de Lubumbashi de 1973-1981 à l'aide de la télédétection par satellite : Croissance urbaine et déboisement. — *Geo-Eco-Trop*, 7 (1-4) : 67-81.
- TOBLER, W. 1969. Satellite confirmation of settlement size coefficient. — *Area*, 3 : 30-33.
- TRICART, J. 1973. Étude de l'évolution morphogénique récente d'un secteur de l'Amazonie sur des mosaïques — radar latéral (W. d'Obidos, Brésil). — *Photo-Interprétation* (Paris), 5 : 32-40.
- TRICART, J. 1975. Quelques aspects de l'utilisation des images multispectrales du satellite LANDSAT-1 dans l'étude écologique des pays tropicaux (Mali, Colombie, Venezuela). — *In* : Télédétection et Environnement tropical, CEGET, Bordeaux, pp. 79-121.
- TRICART, J. 1976. La région d'Obidos (Amazonie brésilienne) sur les images LANDSAT. Comparaison avec les mosaïques-radar. — *Photo-Interprétation* (Paris), 2 : 4-5.
- VERGER, F. 1982. L'observation de la terre par les satellites. — Press. Univ. Fr., Paris, 128 pp.
- VINOGRADOV, B. V. 1977. Remote sensing in ecological botany. — *Remote Sensing of Environm.*, 6 (2) : 83-94.
- WILMET, J. 1958. Essai d'une écologie humaine au Territoire de Luiza (Kasai, Congo belge). — *Bull. Soc. belge Ét. géogr.* (Louvain), 27 (2) : 307-363.
- WILMET, J. 1963. La répartition de la population dans la dépression des rivières Mufuvya et Lufira (Haut-Katanga). — *Mém. Acad. r. Sci. d'Outre-Mer*, Cl. Sci. nat. et méd., nouv. sér. in-8°, 14 (2), 248 pp., 2 h.-t.
- WILMET, J. 1974 a. Influence de l'homme sur la végétation en milieu sub-équatorial. — *Photo-Interprétation* (Paris), 5 (2) : 8-14.
- WILMET, J. 1974 b. Deux modes différents d'organisation de l'espace en milieu équatorial. — *Photo-Interprétation* (Paris), 5 (2) : 15-21.
- WILMET, J. 1981. Télédétection par satellite et espaces régionaux. — *L'Espace géographique* (Paris), 2 : 89-98.
- WILMET, J. 1982. L'interprétation des données LANDSAT dans les zones urbanisées d'Afrique Centrale. — *Centr. nat. Rech. scient., Centr. Études Réal. Cart. Géogr.*, pp. 121-127.
- WILMET, J. & SOYER, J. 1982. Lubumbashi et le Sud-est du Haut Shaba. Interprétation des données LANDSAT. — *Bull. Soc. belge Ét. géogr.* (Louvain), 1 : 87-99.

Symposium
«De Teledetectie,
Factor van Overzeese Ontwikkeling»
(Brussel, 7 december 1984)
Koninklijke Academie voor Overzeese
Wetenschappen
pp. 115-121 (1986)

Symposium
«La Télédétection,
Facteur de Développement Outre-Mer»
(Bruxelles, 7 décembre 1984)
Académie royale des Sciences
d'Outre-Mer
pp. 115-121 (1986)

TÉLÉDÉTECTION ET CARTOGRAPHIE DES SOLS ET DU COUVERT VÉGÉTAL EN RÉGION TROPICALE : RÉFLEXIONS À PARTIR DE QUELQUES EXEMPLES

PAR

A. COMBEAU *

RÉSUMÉ. — Illustration des possibilités et des limites de la télédétection dans le domaine de la cartographie des sols et du couvert végétal en région tropicale, à partir d'exemples choisis dans des régions soumises à des climats différents.

SAMENVATTING. — *Teledetectie en karteren van de bodem en van de plantengroei in tropische gebieden : overdenkingen op grond van enkele voorbeelden.* — Toelichting van de mogelijkheden en de beperkingen van de teledetectie op het gebied van de kartering van de bodem en van de plantengroei in tropische gebieden, op grond van voorbeelden uit gebieden met verschillend klimaat.

SUMMARY. — *Remote sensing and cartography of the soil and vegetation in tropical areas : remarks out of a few examples.* — Elucidation of the possibilities and the limits of remote sensing concerning cartography of the soil and vegetation in tropical areas, using examples of areas subjected to different climates.

*
* *

L'une des applications possibles de la télédétection à l'inventaire des ressources naturelles dans les régions tropicales réside dans l'aide que l'imagerie satellite peut apporter à la cartographie des sols et du couvert végétal.

L'objet du présent exposé est d'essayer de montrer, sur quelques exemples choisis en région tropicale, les possibilités actuelles de cette

* Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), 70-74, route d'Aulnay, F-93140 Bondy (France).

technique nouvelle, mais aussi d'en percevoir les limites d'application et d'envisager ensuite les perspectives d'avenir.

Le milieu intertropical est extrêmement varié, de sorte qu'il apparaît indispensable de distinguer plusieurs cas : celui des zones semi-arides, sub-désertiques, sahéliennes, sans couvert végétal permanent ; celui des régions équatoriales à tropicales humides, à couvert forestier permanent dense ; celui des zones intermédiaires semi-humides, à végétation de savanes plus ou moins denses, et souvent localement dégradées. Nous envisagerons successivement quelques exemples empruntés à ces trois types de zones : Nord Cameroun et Sénégal pour les régions semi-arides, République Centrafricaine pour le milieu tropical semi-humide, Venezuela pour les régions tropicales très humides.

1. NATURE DE L'INFORMATION RECUEILLIE PAR TÉLÉDÉTECTION

Avant d'aborder quelques exemples concrets, il est bon de faire un bref rappel concernant la nature de l'information recueillie à partir de l'imagerie satellite, dans le cas du satellite Landsat par exemple. Chaque point élémentaire de l'image (ou *pixel*) est caractérisé par quatre valeurs de luminance, qui, associées les unes aux autres, constituent la signature spectrale de ce point. Les diverses associations possibles de valeurs de la luminance sont donc susceptibles de discriminer des milieux différents. En réduisant ce problème au cas le plus simple de la combinaison de deux canaux généralement plus performants que les autres, les canaux 5 et 7 de Landsat, on observe une ségrégation dans le plan 5-7 des points d'une image selon des plages caractérisant des milieux définis. Cette ségrégation reflète la présence ou l'absence de végétation, la densité et, dans une certaine mesure, le type de cette végétation éventuelle, et dans le cas des sols nus, elle résulte de plusieurs facteurs parmi lesquels figurent surtout la teinte du sol, la rugosité de sa surface, et l'humidité de ce sol. La prise en compte d'un ou de deux canaux supplémentaires ne fait qu'accentuer le pouvoir de discrimination des données recueillies.

L'imagerie satellite nous fournira par conséquent une information globale, résultant de l'interaction entre les caractéristiques de la surface des sols (couleur, structure de la couche superficielle, nature des façons culturales appliquées) lorsque ceux-ci ne sont pas couverts de végétation, et les caractères propres à la végétation recouvrant le sol (type de végétation, structure du toit, densité du couvert végétal). Naturellement, lorsqu'une végétation colonise imparfaitement un sol, la signature spectrale du milieu ainsi constitué sera intermédiaire entre celles de ses deux composantes.

Il n'est donc pas possible, dans l'état actuel des choses, d'espérer pouvoir obtenir de façon simple, à partir des données satellitaires, une carte pédologique au sens strict, puisque la perception du milieu se borne à enregistrer un aspect global de la surface du sol, ou l'existence d'un couvert végétal plus ou moins diversifié. Par contre, si les types de sols sont en corrélation plus ou moins étroite avec l'aspect de leur surface ou encore avec des végétations caractéristiques détectables sans ambiguïté, alors l'imagerie nous apportera une aide, parfois considérable, dans l'inventaire ou la cartographie du milieu sol.

2. QUELQUES EXEMPLES

A. Zone semi-aride.

— Nord Cameroun : nous choisirons un exemple dans une région comprise entre les latitudes 10 et 11° N et les longitudes 14 et 15° E, centrée sur la ville de Maroua. Pluviométrie annuelle de l'ordre de 800 mm.

La comparaison des images Landsat et des cartes pédologiques à 1/100 000 d'après BARBERY & GAVAUD (1980), SEGALIN (1962), SIEFFER-MANN (1963) et à 1/500 000 d'après BRABANT & GAVAUD (sous presse), montre que les frontières de certaines unités cartographiques sont parfaitement visibles sur l'image satellite et superposables aux cartes (argiles noires tropicales, zones sur alluvions récentes, dans certains cas sols sodiques, sols des systèmes dunaires du sud de Yagoua, ...). Mais elle montre également que certaines confusions sont possibles entre des unités pédologiques différentes (par exemple confusion entre des sols différents situés sur un même matériau : alluvions sableuses récentes occupées soit par des sols peu évolués, soit par des sols salés). Elle fait apparaître également les difficultés liées à la manifestation des feux de brousse.

En ce qui concerne l'échelle cartographique, l'étude du delta fossile de Dargala montre sans ambiguïté que l'image satellite Landsat (à l'échelle de départ du 1/1 000 000) est susceptible d'améliorer le tracé de certaines limites pédologiques d'un document établi à 1/100 000.

— Nord Sénégal : la zone observée correspond au pseudo-delta du fleuve Sénégal et à la partie nord du Sénégal (latitude 15°30' à 16°30' N, longitude 15°30' à 16°30' W). Pluviosité annuelle de la région de St Louis : 300 mm environ.

La comparaison des images Landsat et de la carte pédologique à 1/1 000 000 d'après MAIGNIEN *et al.* (1965) révèle un bon parallélisme des

deux documents. Parmi les sols représentés figurent des sols salés à structure dégradée sur alluvions argileuses, des sols hydromorphes minéraux à pseudo-gley, des sols hydromorphes humifères sur colluvions sableuses, des sols isohumiques bruns et brun-rouge, des sols ferrugineux tropicaux.

Comme dans le cas précédent, certaines limites des unités pédologiques cartographiées sont en parfaite coïncidence avec celles perceptibles sur l'imagerie Landsat. D'autres, par contre, sont peu visibles. On note en particulier qu'une certaine adaptation du traitement photographique peut accentuer la signature spectrale de la végétation et faire ressortir des limites par ailleurs peu visibles (par exemple : entre sols isohumiques et sols ferrugineux tropicaux). On observe également que la présence d'une végétation cultivée dense (canne à sucre, riz) peut occulter totalement la signature spectrale des sols (par exemple : sols hydromorphes humifères des abords du lac de Guiers). Enfin, certaines différences de nature des sols, importantes sur le plan des caractéristiques pédologiques, peuvent ne pas apparaître tout au moins à certaines saisons : c'est le cas par exemple des différences liées à la présence ou à l'absence de sels solubles dans les sols sableux par ailleurs évolués.

En ce qui concerne la précision, il apparaît nettement que l'image satellite est de nature à simplifier fortement la cartographie des unités de paysage dans le pseudo-delta, milieu tout particulièrement hétérogène de par sa constitution. On peut également noter que, dans l'exemple choisi, la turbidité des eaux en saison pluvieuse est aisément perceptible.

B. Zone tropicale semi-humide.

Il s'agit d'une zone située au Sud-Est de la République Centrafricaine, dans la région de Dembia (longitude 24°30 E, latitude 5°15 N). Pluviosité annuelle : 1500-1800 mm.

Il s'agit d'une zone dans laquelle, malgré une pluviosité relativement élevée, la végétation forestière ne peut s'installer et subsister que si la cuirasse ferrugineuse généralisée qui recouvre les formations basiques du Précambrien est démantelée ou discontinue. Les sols de cette zone, d'après BOULVERT (1976), s'ordonnent selon une toposéquence d'ordre kilométrique comportant quatre éléments distincts : sommet de buttes cuirassées tabulaires dénudées, partie supérieure de l'escarpement boisée à sols ferrallitiques remaniés, glacis cuirassé dénudé à maigre savane herbeuse, entaille récente de fond de vallée à galerie forestière sur formations mal drainées.

Ces quatre éléments du paysage apparaissent nettement sur l'imagerie satellite, ce qui ressort de la comparaison entre une partie de l'image et une

photographie aérienne du même secteur. Il s'agit là d'un exemple typique de l'aide apportée à la cartographie pédologique semi-détaillée dans le cas où la liaison sol-végétation est étroite.

C. Zone équatoriale.

L'exemple choisi est celui d'une région peu accessible de l'extrême sud du Venezuela (Coordonnées : longitude 66° W, latitude 2° N), dans la zone de jonction des bassins de l'Orenoque et de l'Amazone, sous une pluviosité annuelle de 2700 à 3500 mm. La morphologie de cette région correspond à trois faciès géomorphologiques distincts : massifs montagneux entre 800 et 3000 m d'altitude, pénéplaine de transition, plaine du Rio Manapiare et du Rio Carucito. La végétation s'apparente à deux types bien différents, d'après SIEFFERMANN (1980) :

- Des savanes comportant 3 faciès : savanes sèches arbustives, savanes graminéennes inondées 2 à 3 mois par an sous 1,5 m d'eau et savanes inondées 4 à 8 mois, parfois sous 5 m d'eau ;
- Des forêts comportant aussi 3 faciès : forêts bien drainées sur socle, forêts plus sèches des bordures d'inselbergs et forêts denses des formations alluviales de bas-fonds.

La composition des luminances des canaux 5, 6 et 7 permet d'identifier :

- Les cours d'eau ;
- Les forêts bien drainées ;
- Les forêts humides des formations alluviales ;
- Les savanes à longue inondation ;
- Les savanes graminéennes ;
- Les savanes sèches.

A chacun de ces types de milieux caractérisés par un ensemble de conditions géomorphologiques et phyto-géographiques déterminées correspondent des sols bien définis, étudiés par SIEFFERMANN, d'où une corrélation apparente assez étroite entre signature spectrale et types de sols.

3. LES PERSPECTIVES

Les exemples précédents ont été acquis grâce aux satellites Landsat en service depuis 12 ans maintenant. Une nouvelle génération de satellites doit nous fournir sous peu des documents bénéficiant d'une résolution spatiale

meilleure : 30×30 m pour Landsat-5, 20×20 m pour Spot par exemple. De plus, la répétitivité théorique d'obtention des images sera beaucoup améliorée, et, dans le cas de Spot, la perception stéréoscopique du relief sera rendue possible grâce au dépointage des visées.

Le gain de précision attendu dans la corrélation des différentes unités radiométriques est perceptible sur une comparaison entre image Landsat et une simulation Spot réalisée au Burkina Faso dans la région de la mare d'Oursi, d'après LORTIC (1982). En règle générale, les documents Landsat peuvent difficilement être agrandis à des échelles plus détaillées que 1/100 000 ; il semble que Spot supportera au contraire sans grand problème 1/25 000. Des essais de sorties sur imprimante à l'échelle de 1/15 000 se sont même avérés satisfaisants.

Par ailleurs, on peut s'attendre à ce que les satellites d'observation de la Terre des générations suivantes soient équipés de capteurs permettant de prospecter d'autres domaines du spectre électro-magnétique.

4. CONCLUSION

Les satellites d'observation de la Terre apportent une aide appréciable aux travaux d'inventaire et de suivi des milieux, qu'ils soient naturels ou anthropisés. Ils nous fournissent une image globale, synthétique, des unités de paysage et nous renseignent sur la nature et la densité du couvert végétal, mais aussi sur l'aspect de la surface des sols dépourvus de végétation. Ils sont donc utiles au pédologue-cartographe dans la mesure où les unités pédologiques sont en corrélation avec les propriétés de surface des sols (couleur, rugosité, humidité, battance...), ou avec les types de végétation, en particulier lorsque celle-ci a un caractère pérenne. L'imagerie satellite ne répond toutefois pas à toutes les questions, et elle peut ne pas laisser apparaître certaines limites d'unités de paysage. Elle peut également faire apparaître des limites artificielles (feux de brousse p. ex.). C'est donc un outil qui doit être utilisé avec précautions et qui nécessite un contrôle au sol.

La résolution spatiale, qui est actuellement encore une limitation sérieuse à l'emploi de cette technique, subira dans un avenir proche, une amélioration considérable qui en fera un instrument très performant. Tous les travaux d'inventaire et de suivi du milieu sol et de la végétation en bénéficieront, et les potentialités de la technique seront encore accrues avec la mise au point de nouveaux capteurs.

Il semble bien que les pays en voie de développement soient appelés à se classer parmi les premiers bénéficiaires de ces progrès.

BIBLIOGRAPHIE

- BARBERY, J. & GAVAUD, M. 1980. Carte pédologique du Cameroun. — Feuille Bogo-Pouss à 1/100 000. Notice explicative n° 88, Off. Rech. Scient. Techn. Outre-Mer, Paris, 58 pp.
- BOULVERT, Y. 1976. Type de modelé cuirassé — Intérêt morphopédologique des lakéré. Finesse, précision de la Télédétection — Relations avec le tapis végétal. — *Photo-Interprétation*, 4 (3-4 a).
- BRABANT, P. & GAVAUD, M. Les sols et les ressources en terre du Nord Cameroun — Feuille Garoua-Maroua-Kousseri 1/500 000. — Off. Rech. Scient. Techn. Outre-Mer, Paris, 370 pp. (en préparation).
- LORTIC, B. 1982. Création de nouveaux canaux par méthodes photographiques. — *In* : Symposium Commission VII SIPT (Toulouse, 13-17 septembre 1972), GDTA, pp. 173-184.
- MAIGNIEN, R. *et al.* 1965. Notice explicative. Carte pédologique du Sénégal au 1/1 000 000. — Off. Rech. Scient. Techn. Outre-Mer, Dakar, 64 pp.
- SEGALEN, P. 1962. Notice sur la carte pédologique à 1/100 000 de Maroua. — Off. Rech. Scient. Techn. Outre-Mer, Yaoundé, 67 pp. multigr.
- SIEFFERMANN, G. 1963. Carte pédologique du Nord Cameroun à 1/100 000 — Feuille Kalfou. — Off. Rech. Scient. Techn. Outre-Mer, Yaoundé, 79 pp. multigr.
- SIEFFERMANN, G. 1980. Un nouvel outil pour le pédologue : l'analyse des données satellites. — Off. Rech. Scient. Techn. Outre-Mer, Paris, 5 pp. multigr.

Symposium
«De Teledetectie,
Factor van Overzeese Ontwikkeling»
(Brussel, 7 december 1984)
Koninklijke Academie voor Overzeese
Wetenschappen
pp. 123-135 (1986)

Symposium
«La Télédétection,
Facteur de Développement Outre-Mer»
(Bruxelles, 7 décembre 1984)
Académie royale des Sciences
d'Outre-Mer
pp. 123-135 (1986)

KAARTEREN VAN NATUURLIJKE HULPBRONNEN
IN ONTWIKKELINGSLANDEN
DOOR MIDDEL VAN „SIDE LOOKING RADAR”
VAN VLIEGTUIG TOT SATELLIET

DOOR

B. N. KOOPMANS *

SAMENVATTING. — Zijwaartskijkende radar deed zijn intrede bij het kaarteren van natuurlijke hulpbronnen in ontwikkelingslanden in 1967 over de Darienprovincie in Panama. In het volgende decennium is deze techniek toegepast bij uitgebreide geïntegreerde exploratie en verkenningsskaarteringen over grote gebieden van de vochtige tropen. De nog bestaande witte plekken op de wereldkaart zijn aan de hand van deze kaarteringen in korte tijd ingekleurd. In de eind zeventig, begin tachtiger jaren is de aandacht verschoven van vliegtuigradar naar satellietradar, waarbij de voordelen van een synoptische beeldvorming, van een hoge temporele resolutie tengevolge van de weersonafhankelijkheid van het systeem, en van digitale beeldverwerking, het herhaald waarnemen en volgen van dynamische processen mogelijk zullen maken. Aan de hand van voorbeelden van een waterbeheersingsstudie in het Magdalenabekken (Columbia) met behulp van vliegtuigradarbeelden en een kuststudie in een getijde gebied aan de hand van de ruimteveerradar (SIR B), wordt de bruikbaarheid van beeldvormende radar voor het controleren en volgen van morfodynamische veranderingen en het snel kaarteren hiervan aangetoond.

RÉSUMÉ. — *Cartographie des ressources naturelles dans les pays en développement au moyen de radars à détection latérale de l'avion au satellite.* — Le radar à détection latérale fit son apparition lors de la cartographie de sources naturelles dans les pays en développement en 1967 sur la province de Darien au Panama. La décennie suivante, cette technique a été appliquée à l'exploration intégrée étendue et à la cartographie de reconnaissance de vastes régions des tropiques humides. Les taches blanches qui subsistaient encore sur la mappe-monde ont été complétées en peu de temps d'après ces cartographies. A la fin des années soixante-dix, début des années quatre-vingts, l'attention s'est portée des radars montés sur avion à des radars montés sur satellite, grâce auxquels les avantages d'une formation d'image synoptique, d'une résolution hautement temporelle à la suite de l'indépendance météorologique du système et d'un traitement digital, permettent d'observer de manière répétée et de

* Internationaal Instituut voor Luchtkartering en Aardkunde (ITC), 350 Boulevard 1945, postbus 6, NL-7500 AA Enschede (Nederland).

suivre des processus dynamiques. D'après des exemples d'une étude de maîtrise de l'eau dans le bassin de Magdalena (Colombie) faite à l'aide d'images de radar aérien et d'une étude de la côte dans une région à marées, à l'aide du radar spatial (SIR B), on démontre l'utilité du radar à images pour contrôler et suivre des changements morphodynamiques et pour leur cartographie rapide.

SUMMARY. — Mapping of natural resources in developing countries using side looking radar by aeroplane and satellite. — Side looking radar was introduced for the mapping of natural resources in 1967 in the province of Darien in Panama. In the following decade this technique has been applied to extensive integrated exploration and reconnaissance mapping of vast regions of the humid tropics. The blank spots still existing in the mapped world have been filled by this mapping in short time. At the end of the seventies and beginning of the eighties attention was directed away from aeroplane to satellite mounted radar thanks to which the advantages of the formation of a synoptic image, a high temporal resolution, and those that follow from the meteorological independence of the system and digital data handling permit to observe repeatedly and to follow dynamic processes. The examples of a study of water control in the Magdalena Basin (Colombia) made with the help of space radar (SIR B) demonstrates the utility of radar images for controlling and observing the changing morphodynamics and for their rapid mapping.

*
* *

1. INTRODUCTIE

De radargeschiedenis gaat terug tot het jaar 1889, toen Heinrich Hertz tot de conclusie kwam dat vaste objecten interfereerden met radiogolven en deze gedeeltelijk terugkaatsten. Echter pas na een veertigtal jaren werd de term RADAR ingevoerd voor een instrument dat met behulp van radiogolven objecten ontdekte en metingen betreffende hun afstand mogelijk maakte (RADio Detection And Ranging).

In 1953 kwam het concept van een „Side-Looking Airborne Radar” (SLAR) tot stand. Tengevolge van het belang van zo'n zijwaartskijkende radar voor militaire doeleinden bleef veel van de research in deze eerste toepassingsfase van SLAR geheim. Een jaar later, in 1954, ving het eerste theoretische onderzoek aan naar de mogelijkheid van een „Synthetic Aperture Radar” (SAR) o.l.v. VIVIAN, CUTRONA & LEITH (1954). De eerste SLAR-beelden kwamen in 1957 ter beschikking voor burgerdoeleinden van een door de militairen vrijgegeven AN/APQ 56 SLAR-systeem, ontwikkeld voor de luchtmacht van de V.S.

Het eerste grote topografische kaarteringsproject dat gevlogen werd met een zijwaartskijkende Westinghouse-radar vond plaats in 1967 over de Darien provincie in Panama. Dit gebied is bijna gedurende het gehele jaar

door wolken bedekt, zodat er geen luchtfoto's of kaarten van beschikbaar waren. Daar zijwaartskijkende radar voor een groot deel onafhankelijk van weersomstandigheden opereert en, afhankelijk van de gebruikte frequentie, voor een belangrijk deel door het wolkendeek heen kan kijken, is dit systeem het teledetectiesysteem bij uitstek voor een snelle verkenningsskartering.

„Aeroservice Corporation” kwam in 1971 op de markt met een „synthetic aperture radar” van het Goodyear-Aerospace-systeem, welke specifiek geoptimaliseerd was voor terreinkarteringen.

Sinds laat zestig jaren en de eerste helft van de zeventig jaren van deze eeuw zijn grote gedeelten van Latijns Amerika (fig. 1) en in mindere mate van Afrika en Azië door SLAR of SAR-kaarteringen bedekt.

Het Braziliaanse RADAM-project is het beste bekend en tevens het grootste qua omvang (4,5 miljoen km²). Deze kaartering werd later uitgebreid tot de volledige bedekking van het Braziliaanse landoppervlak (8,5 miljoen km²) (DE MOURA 1971).

Oliemaatschappijen en in mindere mate mijnbouwmaatschappijen hebben eveneens gebruik gemaakt van zijwaartskijkende radarkarteringen. Tussen 1970 en 1974 is meer dan een half miljoen km² van het grondgebied van Indonesië met radar bedekt, onder contract voor olie- of erts-exploratie, waarvan 25% voor ertsexploratie (FARGANI 1975). Gedurende deze kaarteringen is een enorme hoeveelheid praktische ervaring opgedaan in het gebruik van SLAR of SAR-beelden voor de kaartering van de natuurlijke hulpbronnen.

Met de eerste oceanografische radarsatelliet (SEASAT) in 1978 is er een nieuwe stimulans ontstaan voor verdere radaronderzoekingen. De ontwikkeling van digitale correlatie methoden voor data verkregen van de „synthetic aperture radar” (MACDONALD DETTWILER 1978), in plaats van optisch gecorreleerde beelden, maakt digitale verwerking en manipulatie mogelijk en opent nieuwe perspectieven op toepassingsgebieden in combinaties met andere teledetectiebeelden.

De SAR 580-campagne van de „European Space Agency” (ESA), welke gedurende de zomer van 1981 gevlogen is over een aantal gebieden in Europa heeft onderzoekingen mogelijk gemaakt op verschillende toepassingsgebieden. In Nederland is het voornamelijk het ROVE-team, dat zich met metingen van verstrooiing en terugkaatsing van microgolffenergie van gewassen en bodemoppervlak bezig houdt. Deze experimenten zullen speciaal de evaluatie mogelijk maken van het gebruik van meerdere banden in het microgolfbereik en van de toepassing van polarisaties. Het „Internationaal Instituut voor Luchtkartering en Aardkunde” te Enschede heeft zich

in de loop der jaren actief bezig gehouden met de toepassing van zijwaartskijkende radar in kaarteringsactiviteiten in ontwikkelingslanden (Brazilië, Colombia, Ecuador, Indonesia, Nigeria). Het „Shuttle Imaging Radar” (SIR A)-experiment van de tweede ruimtependelmissie heeft een aantal radarstrips opgeleverd over zeer gevarieerde klimaatzones in de L. band (fig. 2).

De geologische structuren bestaan uit geplooid miocene en pliocene sedimenten, voornamelijk van de Red Fars formatie. De term „Kavir” betekent „playa” of droge zoutvlakte, welke als donkere zones op het beeld voorkomen. De lichtere zones representeren zoutvlaktes, waar door oplosings- en korstvormende verschijnselen een zeer onregelmatig ruw oppervlak gevormd is.

Voor landkaartering was de invalshoek die bij dit experiment gebruikt werd gunstiger dan die gebruikt bij de SEASAT-missie, respectievelijk 47° en 20° (ELACHI 1982).

Het SIR-programma met de ruimtependel heeft zijn vervolg met de SIR B-missie (oktober 1984), waarbij met variabele invalshoek geëxperimenteerd wordt, wat eveneens stereo-radar mogelijk zal maken. Een SIR C-experiment is voorzien voor 1987 met een multifrequentie- en een multipolarisatieradar.

Verschillende semi-operationele satellietprogramma's, waarbij zijwaartskijkende radar in het instrumentariumpakket is opgenomen, zijn voorzien voor de tweede helft van de tachtiger jaren en begin negentiger jaren, zoals de „European Space Agency Satelliet ERS 1”, het Japanse MOS 2-programma, en het Canadese RADARSAT-concept.

2. ZIJWAARTSKIJKENDE RADAR VOOR KLEINSCHALIGE KAARTERING VAN NATUURLIJKE HULPBRONNEN

Een van de voordelen van zijwaartskijkende radar ten opzichte van andere teledetectiesystemen is de mogelijkheid dat het onder bijna alle weersomstandigheden ingezet kan worden. Het systeem is een actief systeem, dat zijn eigen electromagnetische golven in het microgolfbereik uitzendt en dus onafhankelijk van zonlicht werkt. Zodoende kan het dag en nacht worden ingezet. Het penetratievermogen van het wolkendek, vooral met de langere golflengten, maakt dit systeem bijna onafhankelijk van weersomstandigheden en daarom zeer goed inzetbaar voor kaarteringen van gebieden in de humide tropische regionen waar luchtfotografie moeilijk te vliegen is en de kosten hiervan zeer zeker hoog liggen.

Gebieden zoals de Darienprovincie in Panama, de West-pacifische kustgebieden van Columbia en het Amazonebekken waren alle gebieden waarvan geen of weinig luchtfoto's gemaakt waren. Dientengevolge waren

topografische of thematische kaarten in de zestiger jaren niet beschikbaar. Aan de andere kant nam de politieke druk toe om deze ongekaarteerde en onbekende gebieden in versneld tempo te ontwikkelen en een inventarisatie te maken van de natuurlijke rijkdom van het tropische bosareaal. Bovendien nam de spontane kolonisatie van deze natuurgebieden een zodanige vlucht dat uitgebreide roofbouw gepleegd werd en een verstoring dreigde van het natuurlijke milieu en de toekomstige economische ontwikkeling van het gebied. Een algemene geïntegreerde thematische kaartering werd zeer urgent. Een conventionele kaartering waarvoor luchtfoto's gevlogen dienen te worden onder moeilijke weersomstandigheden en ongunstige geografische ligging ver van een bruikbaar vliegveld, kan zeer veel tijd in beslag nemen en tot extreem hoge kosten oplopen. De verdere procedures voor fotogrammetrische kaartcompilatie en thematische interpretatie van vele duizenden luchtfoto's zal jaren vergen, nog afgezien van het feit of er al dan niet een geschikte infrastructurele organisatie voor bestaat. Om de ontwikkeling van een onbekende regio te kanaliseren is de beschikking over enige topografische gegevens een allereerste vereiste. In zo'n stadium bestaat er geen vraag naar grote precisie of detail. Ongecontroleerde of semi-gecontroleerde radarmozaiëken kunnen daartoe dienst doen. Op een later stadium kan aan de hand van grondcontrolepunten, verkregen per geo-ontvanger van transit-satelliet, alsnog een gecontroleerd radarmozaiëk samengesteld worden. Hierbij kan een precisie verkregen worden van 95% van de punten binnen een absolute plaatsbepaling van 0,6 km voor vlak terrein. De relatieve precisie van de mozaïeken is veel hoger. Voor een ongecontroleerd mozaïek doet de relatieve precisie niet veel onder voor die van een gecontroleerd mozaïek, de absolute precisie ligt echter in de orde van 1,2 km. In een gebied zoals de Amazone is een absolute fout in plaatsbepaling zoals hierboven genoemd van weinig betekenis voor een verkenning- of exploratiekaartering, zolang de relatieve locatieverhoudingen maar juist zijn (fig. 3a, 3b, 3c).

Het radarmozaiëk kan fungeren als functionele basiskaart, temeer daar een dergelijk mozaïek gemakkelijker te lezen is door een gemiddelde kaartgebruiker dan een luchtfotomozaiëk, tengevolge van een duidelijke reliëfinformatie (fig. 4).

Indien wij de tijdsfactor in beschouwing nemen voor ontwikkelingsplanning, is de zijwaartsijkende radar het teledetectieinstrument „par excellence” voor een relatief snelle kleinschalige kaartering over uitgebreide arealen met een ongunstige weersgesteldheid.

BITTENCOURT NETTO (1979) vatte de doelstellingen van het Braziliaanse RADAM-project met de volgende zin samen : „to update and organize data

concerning Brazilian Amazonia, with a view to provide rational guidance for its settlement and exploration". Aan de hand van de „radar survey", beperkte beschikbaarheid van infrarood luchtfoto's en multiband fotografie en een geïntegreerde terreinkaartering zijn, in 1978, 18 delen verschenen van het RADAM-project met thematische kaarten op geologisch, geomorfologisch, bodemkundig, vegetatie en potentieel landgebruik en regionale planning. Honderd zeventien kaarten waren op schaal 1/1 000 000 en 285 kaarten op schaal 1/250 000.

Deze kaarten en rapporten zijn het beste bewijs voor de grote waarde die zijwaartskijkende radar heeft gehad voor de kaartering van uitgebreide, bijna onbekende gebieden. Met het Proradam-project van Columbia in 1972, het CODESUR-project van Venezuela, de radarkaarteringen van het Amazonegebied van Ecuador, Peru en Bolivia is de grootste nog bestaande witte vlek op de wereldkaart ingevuld, dank zij deze relatief snelle radarkaartering op kleinschalig formaat.

3. KAARTEREN VAN DYNAMISCHE PROCESSEN MET RADAR

Naast geïntegreerde regionale kaarteringen vindt zijwaartskijkende radar ook zijn toepassing in monitoring en studie van dynamische processen.

Het feit dat radar onafhankelijk van het weer werkt maakt opnamen mogelijk tijdens wolkenbedekking of in het nachtelijk duister.

Ook het synoptische karakter van de beelden heeft zijn voordeel indien een momentopname vereist is over een zeer uitgebreid gebied.

Hieronder zijn twee voorbeelden aan de hand waarvan deze voordelen van een zijwaartskijkende radarkaartering worden aangetoond.

3.1. *Voorbeeld van radartoepassing voor een hydro/agrarische studie in het Magdalenagebied, Columbia.*

Het beneden-stroomgebied van de Magdalenarivier in Columbia omvat een uitgestrekt laag deltagebied dat jaarlijks te lijden heeft van uitgebreide overstromingen. Het lokale reliëf is niet veel meer dan 10 m en ten gevolge van verhoogde waterstanden in de rivier van 3 tot 5 m overstromen al gauw een 20 000 tot 30 000 km². Specifiek het gebied bij de samenlopen van de Cauca-, Magdalena- en San Jorgerivieren is gevoelig voor overstromingen maar is tegelijkertijd ook van agrarisch belang (fig. 5).

De Magdalenarivier is 1500 km lang en draineert met zijn zijrivieren een stroomgebied van 256 622 km². Het stroomdebiet bij de monding van de Magdalenarivier varieert van 1850 m³/s tot 10 000 m³/s.



Fig. 1. — Radarmosaïek (x-band) van een geplooid zone langs de Rio Ucumacinta (Guatemala). Een duidelijke karstmorfologie maakt deductie mogelijk dat we hier met uitgebreide kalksteenafzettingen te maken hebben.

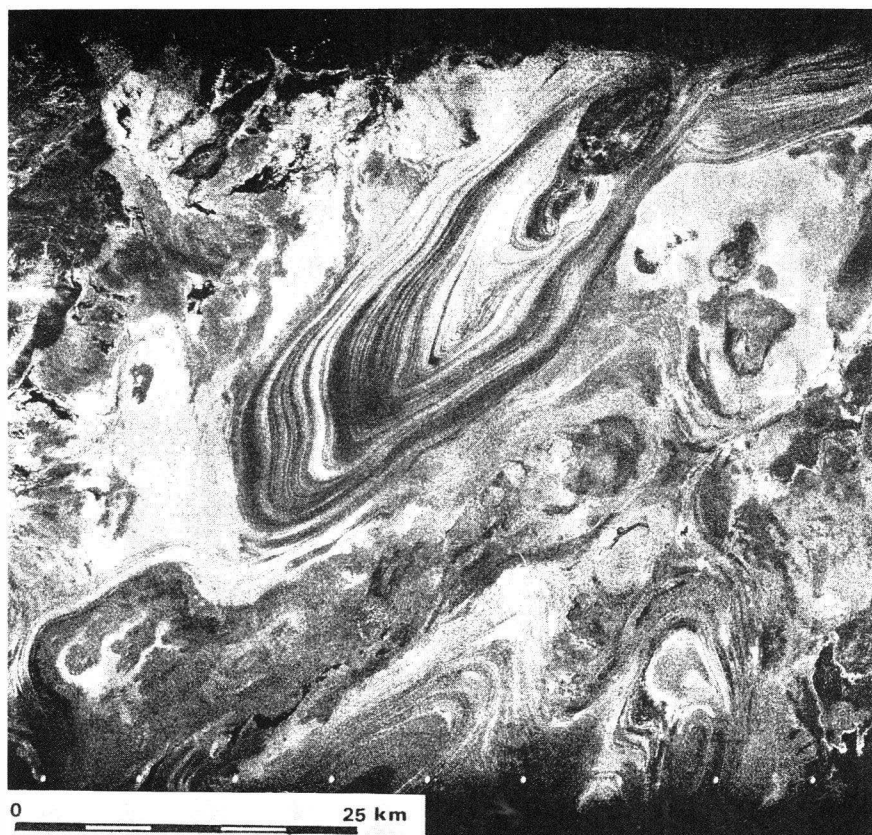


Fig. 2. — Radarbeeld verkregen door het ruimteveer „Colombia” (SIR A) van de Dash I-Kavir, Iran.

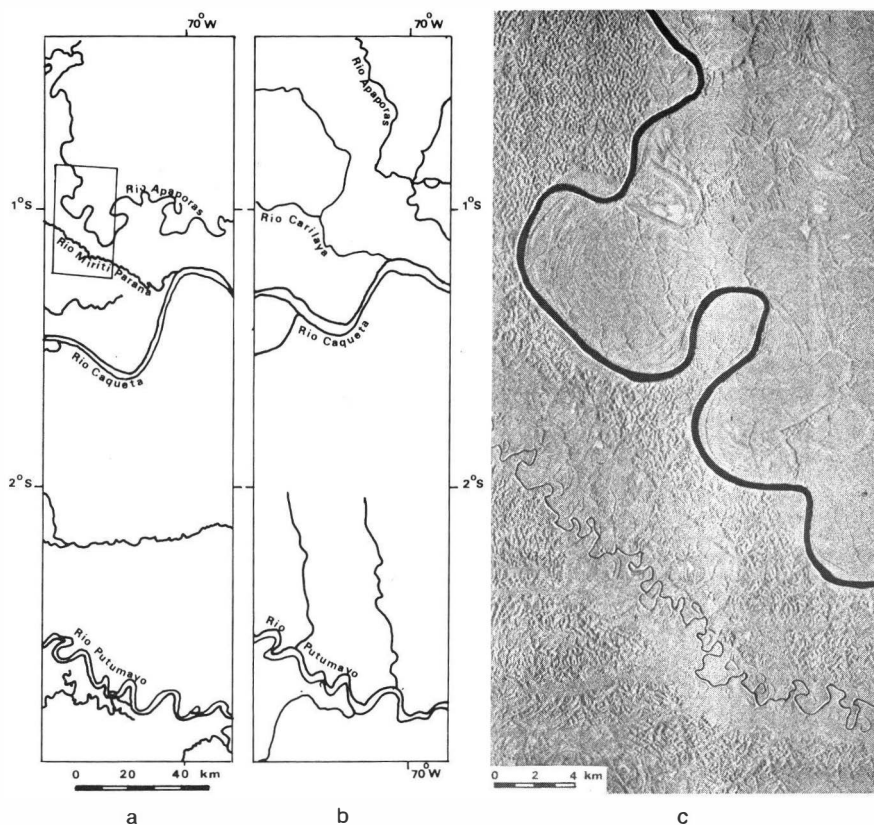


Fig. 3a. — De voornaamste rivierlopen in een deel van het Columbiaanse Amazonegebied in kaart gebracht aan de hand van radarbeelden (1975).

Fig. 3b. — De rivierlopen voorkomende op de topografische kaarten van voor de radarkaart-tering (1968). De NNO-SSW-loop van de Rio Caqueta is meer dan 15 km te kort, terwijl de loop van de Rio Apaporas, met een rivierbreedte van 200 tot 300 m, op de oorspronkelijke kaarten vele tientallen kilometers fout ligt.

Fig. 3c. — Een radarbeeld van een deel van de Rio Apaporas en Rio Miriti Parana. Het laag versneden heuvellandschap (onder tertiair) vormt een duidelijk morfologisch contrast met de alluviale riviervlakten, waar oude meanderbogen, oeverwallen en kronkelwaarden onder een bedekking van het tropische regenwoud zichtbaar zijn.

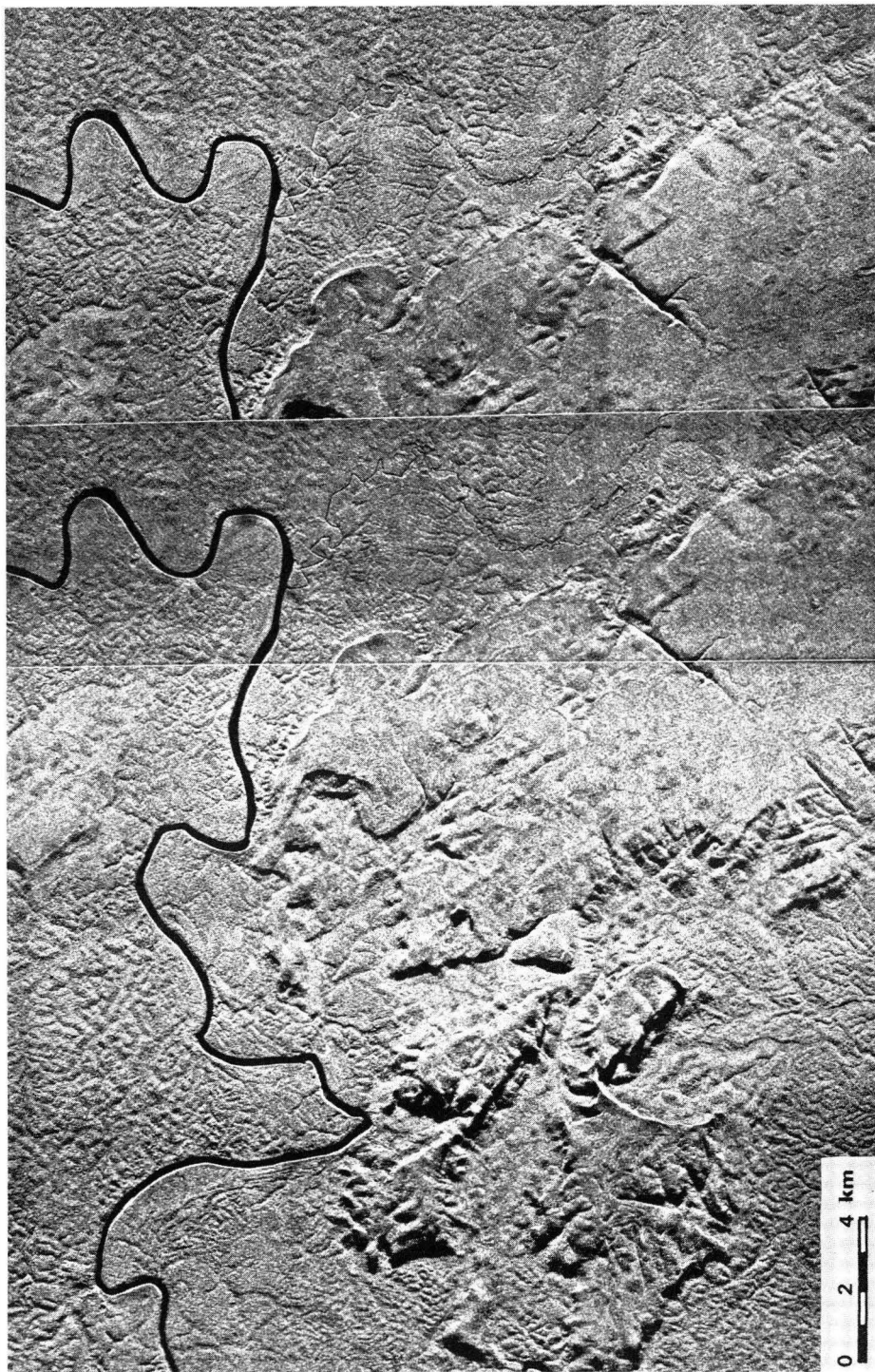


Fig. 4. — Stereo-radarbeeld van Rio Vaupes, Columbiaans Amazonegebied, west van Mitu. De tafelbergen worden gevormd door de paleozoïsche Araracuara formatie. Het omringende lage heuvellandschap bestaat uit tertiaire afzettingen van het boven tertiair. Breuken komen als duidelijke vallei- of steilhangvormende elementen uit op het radarbeeld.

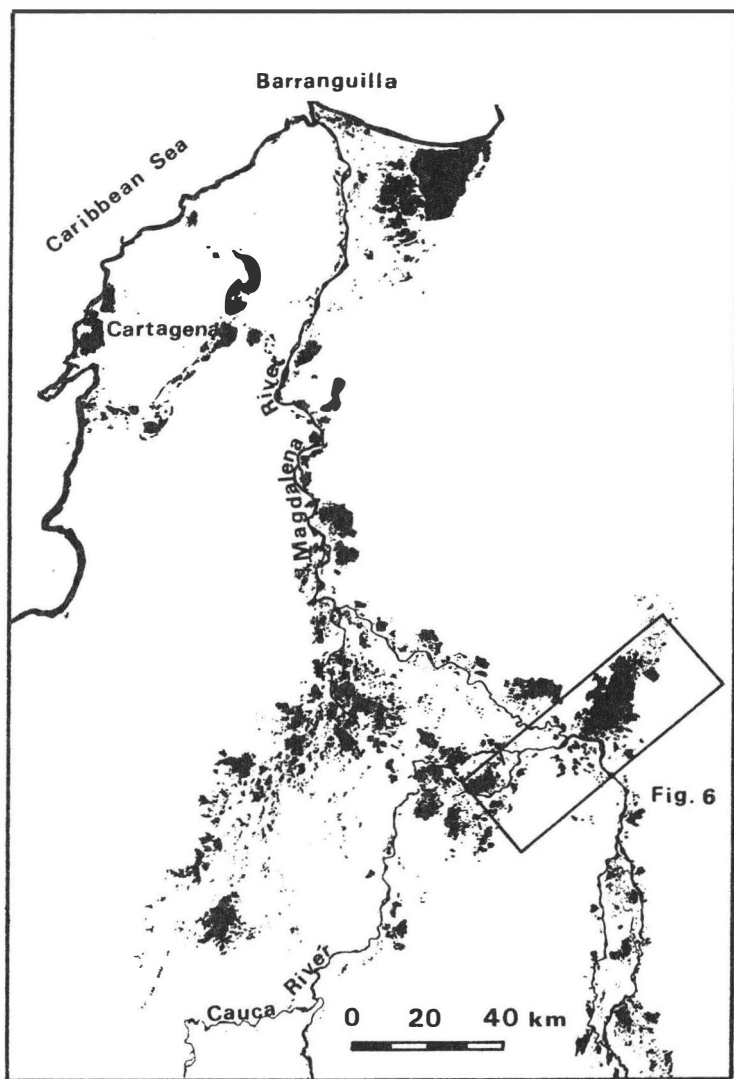


Fig. 5. — Kaart van overstroomde gebieden van het beneden-Magdalena en Caucabekken, gebaseerd op Landsat MSS-beelden (januari 1973) (VAN Es 1976).

Om tot een verantwoorde studie van de waterbeheersing van dit gebied te komen, waren topografische kaarten vereist met een hoge nauwkeurigheid wat betreft de verticale data. Over een hoogtelijnenprecisie van 25-75 cm werd gedacht om tot een globale berekening te komen van het waterbergend vermogen van de lage komgronden welke uitgebreide gebieden van stilstaand water omvatten, de zogenaamde „cienagas”. Het waterniveau in deze „cienagas” varieert sterk ten gevolge van rivieroverstromingen en lange periodes van verdamping en droogte. Met behulp van verbindingskanaaltjes tussen de „cienagas”, dijkes en sluizen, zou men tot een betere regulatie van de vloedwaters kunnen komen en de bergingscapaciteit van deze lage komgronden voor het vloedwater verhogen, tegelijkertijd het gehele jaar bruikbaar landareaal voor landbouw vergrotend. Voor een dergelijke studie waren topografische kaarten beschikbaar, gedeeltelijk op schaal 1/25 000 en gedeeltelijk op 1/100 000, met een hoogtelijnenprecisie van 20-50 m.

De vereiste hoogtenauwkeurigheid voor een berekening van de bergingscapaciteit van de komgronden sloot het gebruik van deze kaarten uit. Overwogen werd om een nieuwe 1/10 000 luchtfotobedekking over het 35 000 km² grote studiegebied te vliegen. Een fotogrammetrische hoogtelijnkaartering van de 21 000 benodigde luchtfoto's zou echter een jarenlang project op zich betekenen.

Gezien de beperkte tijdsduur beschikbaar voor de studie werd besloten een semi-kwantitatieve berekening te maken van de bergingscapaciteit van de „cienagas” aan de hand van verschillende waterstanden en oppervlakteberekeningen van waterareaal, verkregen van luchtfoto's of andere teledetectiebeelden, genomen op verschillende data met hoge en met lage waterstand.

De benodigde relatief-lange tijdsduur van zestig dagen (berekend aan de hand van klimaat en praktijkervaring) voor het vliegen van een volledige 1/10 000 luchtfotobedekking en de dynamiek van het waterregiem (variaties van waterhoogten van 15 cm per dag), lieten niet toe om aan de hand van dergelijke luchtfoto's een homogeen beeld te krijgen van de waterstand in het gebied, als zijnde een „momentopname”.

Dit kon echter wel verkregen worden met zijwaartskijkende radar waarbij de opnameduur voor het gehele gebied in de orde van 1 à 2 dagen ligt. Onafhankelijk van weersomstandigheden kon deze kaartering bij de ideale hoogwaterstand gevlogen worden, waarbij de waterstand over het hele gebied als meer of minder constant beschouwd kon worden. Aan de hand van deze radaropnamen en Landsatopnamen bij hoge en lage waterstanden konden berekeningen gemaakt worden betreffende de bergingscapaciteit van de „cienagas” (fig. 6).

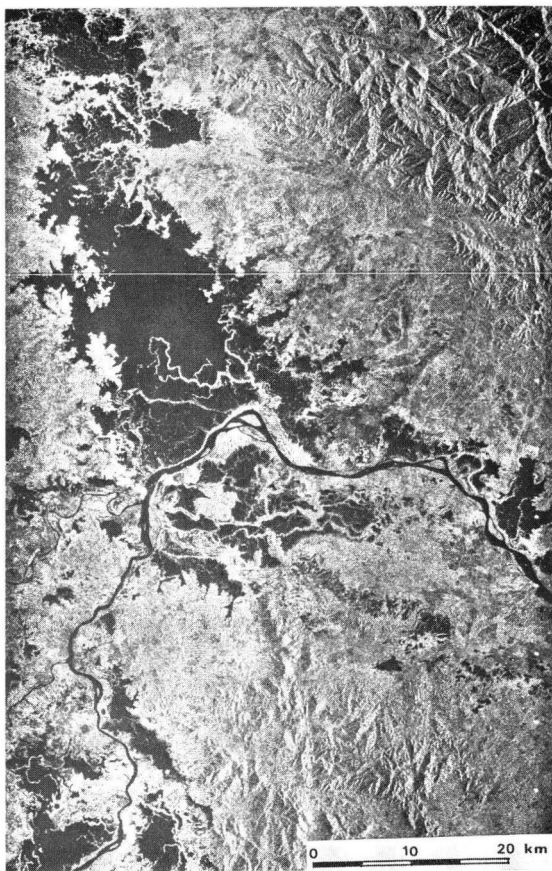
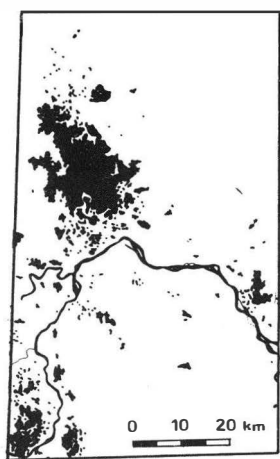


Fig. 6. — a. Overstroomd gebied op 1 januari 1973 ;
 b. Overstroomd gebied op 6 februari 1973 ;
 c. Radarbeeld van het ruimteveer (SIR A) van het overstroomde gebied op 14 november 1981.



Fig. 7. — SEASAT-radarbeeld van de Westelijke Waddenzee, Nederland. Het eiland Vlieland ligt centraal boven. De drooggevallen platen hebben een zeer donkere toon tengevolge van de spiegelreflectie van de microgolven. Het stromingspatroon is duidelijk zichtbaar, hetgeen een weerspiegeling is van de bodemconfiguratie. Het kielzog van enkele vissersboten links boven markeert hun vaarrichting.

Bij een foutieve bepaling van één meter niveauverschil zal een berekeningsfout over bergingscapaciteit van 20-25% optreden. Indien de fout in de bepaling van het waterniveau teruggebracht wordt tot 25 cm, neemt de fout in de berekening van de bergingscapaciteit af tot 5 à 8% (VAN ES 1976). Hieruit blijkt ook het belang van het verkrijgen van „remote sensing” beelden die een min of meer homogene „momentopname” representeren over het gehele gebied.

Aan de hand van luchtfoto's, schaal 1/10 000, gevlogen over selectieve gebieden (5% van het totale gebied), kon een nauwkeurige interpretatie verkregen worden, welke extrapolatie naar de interpretatie van radar- en Landsat-beeld mogelijk maakte (dataverzameling op verschillende schaal-niveaus). Klassen van landgebruik en gevoeligheid voor overstroming konden geïnterpreteerd worden van de radarbeelden. Van het totaal van 2 077 000 ha terrein dat overstromingsgevoelig is, is 16% permanent wateroppervlak, 21% is uitsluitend voor korte perioden overstroomd (korter dan één maand), 14% tussen 1 en 3 maanden en agrarisch goed bruikbaar, 30% tussen 3 en 6 maanden en 19% van 6 tot 12 maanden. Van deze laatste categorie is de agrarische bruikbaarheid zeer gering tenzij een uitgebreid impolderingsproject verwezenlijkt kan worden (zie tabel 1) (PROYECTO CUENCA MAGDALENA-CAUCA 1977).

TABEL 1.

*Overstromingsduur per oppervlakte in ha
en percentage van het totale overstromingsgevoelige gebied*

Klasse	Tijdsduur van overstroming	Oppervlak (ha)	Percentage
Kort	minder dan 1 maand	430 000	21
	van 1 tot 3 maanden	299 000	14
Gemiddeld	van 3 tot 6 maanden	616 000	30
Lang	van 6 tot 12 maanden	403 000	19
„Cienagas”	permanent wateroppervlak	329 000	16
Totaal		2 077 000	100

Door middel van een project van waterbeheersing aan de hand van deze radarkartering zou een gebied van 800 000 ha van het bovengenoemde overstromingsgevoelige gebied aan het huidige landbouwareaal kunnen worden toegevoegd.

Dank zij de snelle opnametechniek van radar op elk gewenst tijdstip van de dag of nacht, tijdens perioden van regens (overstromingen) en duidelijke overzichtsbeelden, kon deze „survey” in betrekkelijk korte tijd uitgevoerd

worden met een relatief hoog informatierendement welke berekeningen van de bergingscapaciteit van de lage komgronden mogelijk maakte binnen aanvaardbare foutenmarge.

3.2. *Kaartering aan de hand van multitemporele satelliet-radarbeelden van een laagland kustgebied.*

Het Waddenzeegebied in Noord-Nederland is genomen als studieobject met het doel om de resultaten en de kaarteringsmethodologie later toe te passen in morfologisch gelijke gebieden in de ontwikkelingslanden.

De Waddenzee is een gebied van 8000 km² langs de kust van Noord-Nederland, Noordwest-Duitsland en Zuidwest-Denemarken. Het is één van de kustgebieden in de wereld dat constant aan veranderingen onderhevig is onder de invloed van het getijdenregiem.

Erosie en sedimentatie veroorzaken een voortdurende verandering van de bodemconfiguratie. Het volgen van zulke dynamische kustprocessen is van belang voor de natuurlijke kustverdediging, het onderhouden van veilige scheepvaartroutes, conservatie van visgronden en bewaken van de kraamkamerfunctie welk zulk een ondiep getijdegebied heeft voor vele commerciële vissoorten en het volgen van ecologische veranderingen in dit gebied.

De conventionele kaarteringsmethoden bestaan uit terrestrische waterpas-inmeten van raaien en het scheepsloden van profiellijnen. Weersomstandigheden en de zeegang zijn vaak een limiterende factor op technische en economische gronden. Hoogtelijnen worden geïnterpoleerd aan de hand van ingemeten punten langs profiellijnen in plaats van geкарteerd.

De effectiviteit van fotogrammetrische surveying-methoden wordt vaak belemmerd door weersomstandigheden in combinatie met de kaarteringsvereisten, waarbij een homogene getijdesituatie benodigd is. Fotogrammetrische hoogtelijnen bepalingen worden bemoeilijkt door het geringe hoogteverschil aanwezig in ondiepe getijde gebieden.

Voor een dergelijke kaartering is het essentieel om gebruik te maken van de fundamentele eigenschappen van zo'n gebied: de dynamiek van de getijdecyclus en de waterlijnen die hiervan een resultaat zijn. Hiertoe zijn meerdere luchtfoto-opnamen vereist met een gering maar regelmatig tijdsinterval tijdens de 12 uur durende getijdecyclus, met voorkeur voor het rijzende tij. Daar waterlijnen het beste vast te leggen zijn op grootschalige luchtfoto's zijn deze in de laatste decennia gebruikt door Duitse en Nederlandse onderzoekers (o.a. WEGENER 1979, VAN DER ZEE 1980). Getijdeveranderingen gedurende de fotovluchtmissie voor één bedekking beperken het te kaarteren gebied tot 50-100 km².

Het potentieel van Landsat-data, welke het gehele waddengebied in een momentopname vastleggen bij een bekende getijdestand, zijn onderzocht op hun bruikbaarheid maar werden niet praktisch bevonden voor systematische kaartering door :

- 1) Het lange tijdsinterval tussen opvolgende opnamen ;
- 2) De weersomstandigheden die vaak de opnamen nadelig beïnvloeden ;
- 3) Gebrek aan correlatie tussen bruikbare opnamen en getijdesituatie.

Radaropnamen kunnen aan deze onvolkomenheden tegemoet komen. Hiertoe is een radarproject opgezet gebruikmakende van de beeldvormende radar van de ruimtependel (SIR B-missie, oktober 1984). De volgende voordelen kunnen genoemd worden :

- 1) Het synoptische beeld door de satellietradar verkregen opent de mogelijkheid van kaarteren van een groot areaal van het waddengebied aan de hand van een momentopname ;
- 2) De onafhankelijkheid van het radarsysteem met betrekking tot de weersomstandigheden ;
- 3) Beeldopnamen gedurende opeenvolgende dagen hetgeen een directe correlatie met de getijdencyclus mogelijk maakt ;
- 4) Multihoek-inval van SIR B, hetgeen de studie mogelijk maakt van de invloed van bodemconfiguratie van de ondergelopen gebieden van het wad op de beeldvorming onder variabele invalshoek.

De resultaten van de SEASAT-beelden over het Waddenzeegebied (KOOPMANS & VOÛTE 1981) gaven zeer bemoedigende resultaten. De drooggevallen platen hebben een duidelijk verschillende radarsignatuur dan het wateroppervlak, tengevolge waarvan de waterlijnen zeer goed te kaarteren zijn (fig. 7). Of dit onder verschillende zeeomstandigheden en variabele invalshoek altijd het geval is zal nog uit de SIR B-missie moeten blijken.

De bodemconfiguratie komt duidelijk op het SEASAT-beeld uit. De stroomgeulen te interpreteren van de radarbeelden komen overeen met het gekaarteerde geulenpatroon. De fysische achtergronden voor deze beeldvorming zijn nog onderwerp van onderzoek. Een beter inzicht zal hopelijk worden verkregen betreffende invloed van golfpatroon en stroomsnelheden langs geulranden op het terugverstrooide radarsignaal.

Het gebruik van het weer-onafhankelijke teledetectie systeem welk een hoge frequentie aan beelden kan verschaffen met betrekking tot de getijdencyclus, kan een duidelijke verbetering betekenen voor de kaartering en waarneming van dynamische wijzigingen in aan getijden onderhevige kustgebieden. De methodologie toegepast in het Waddenzeegebied kan hopelijk

toegepast worden met toekomstige satelliet-radar-systemen in andere delen van de wereld met gelijke probleemstelling.

4. CONCLUSIES

Beeldvormende radar is van groot belang voor kaarteringen van de natuurlijke hulpbronnen in de ontwikkelingslanden voor exploratie en verkenningsdoeleinden. In disciplines zoals geologie (KOOPMANS 1983), bosbouw (SICCO SMIT 1983), landgebruik en in geïntegreerde kaartering zoals PROYECTO RADARGRAMMETRICO DEL AMAZONAS (1979) heeft deze snelle kaarteringsmethode zijn nut bewezen.

Waren deze kaarteringen uitgevoerd met een éénmalige bedekking door vliegtuigradar, de satellietbeeldvormende radar thans en in de toekomst maakt het nagaan en controleren van dynamische processen mogelijk. De onafhankelijkheid van het weer resulteert in een hoge temporele resolutie, ook in gebieden van de vochtige tropen.

Ondanks de korte levensduur heeft SEASAT in 1978 (106 dagen) de toepassing van satellietradar op oceanografisch gebied bewezen. De oppervlaktecondities van de zee konden tot een hogere nauwkeurigheid bepaald worden aan de hand van SEASAT-gegevens, dan op de conventionele manier door weerkaarten aan de hand van scheepsgegevens (ALLAN 1983).

Research op microgolfgebied neemt hand over hand toe met de huidige vliegtuigradar en satellietbeeldvormende radarexperimenten in Noord-Amerika en Europa. De SIR-experimenten met het ruimteveer (SIR-missies), waarbij radarbeelden verkregen zijn over een grote verscheidenheid van gebieden op aarde onder verschillende klimatologische omstandigheden, gaan een beter inzicht verschaffen in de interactie tussen microgolven en het natuurlijke oppervlak. Bevindingen in hyperaride gebieden (Soedan, Egypte) waar radarpenetratie het mogelijk maakt begraven rivierdalen van het Paleo Nijl-systeem te ontdekken, wijzen op nieuwe toepassingsmogelijkheden.

Tegen het einde van dit decennium en begin van de negentiger jaren kunnen we de eerste semi-operationele satellieten met een beeldvormend radarsysteem verwachten (ERS 1, European Space Agency 1987/88, MOS 2 National Space Development Agency of Japan, Radarsat Canada); deze zullen zowel voor oceanische als landtoepassingen gebruikt kunnen worden, in het laatste geval specifiek in landen van de derde wereld.

REFERENTIES

- ALLAN, T. D. (ed.) 1983. Satellite Microwave Remote Sensing. — Ellis Howard Ltd, 526 pp.
- BITTENCOURT NETTO, O. 1979. The mapping of natural resources by sidescan radar in Brazil. — *Mining Magazine*: 354-359.
- DE MOURA, J. M. 1971. Project Radam of the Ministry of Mines and Energy. — Rep. 16/ONU/INEP, Sao José dos Campos, Brasil.
- ELACHI, Ch. 1982. The SIR-A sensor and experiment. Digest vol. 2. — *In*: International Geoscience and remote sensing symposium (IGARSS), FA 6-5.
- ES, E. VAN: zie VAN ES.
- FARGANI, M. 1975. The role for side looking airborne radar (SLAR) for exploration mapping in Indonesia. — Joint UN-FAO reg. Sem. on Remote Sensing Applications (Jakarta).
- KOOPMANS, B. N. & VOÛTE, C. 1981. Off-shore and oceanographic applications of microwave remote sensing. — *In*: Proceedings Joint CCOP-NRMC Workshop on Remote Sensing (Manilla, Philippines, 21-25 November 1981).
- KOOPMANS, B. N. 1983. Side-looking radar, a tool for geological surveys. — *Remote Sensing Reviews*, 1: 19-69.
- MACDONALD DETTWILER (and Associated Ltd.) 1978. Manual for Real Time Airborne Synthetic Aperture Radar Processor, 3 Vols.
- MOURA, J. M. DE: zie DE MOURA, J. M.
- PROYECTO CUENCA MAGDALENA-CAUCA 1977. Himat. Convenio Colombo — Holandes. — Informe final vol. 1.
- PROYECTO RADARGRAMMETRICO DEL AMAZONAS, 1979. La Amazonia Colombiana y sus recursos. — Republica de Colombia, 5 vol.
- SICCO SMIT, G. 1983. The practical application of SAR imagery for forest type mapping. — Synthetic Aperture Radar principals and application to earth resources. — Ispra course (Ispra, Italy, 17-18 March 1983).
- VAN DER ZEE, D. 1980. Rapport over de stand van zaken met betrekking tot het waterlijnenkarteringsproject nr. 452: morphodynamiek van estuarium en getijde gebieden. — Afd. Geografie en geomorfologie, ITC, Enschede.
- VAN ES, E. 1976. Levantamientos para fines hidrologicos de la zona inundable de la Hoya del Rio Magdalena. — *Revista CIAF*: 11-39.
- VIVIAN, W. E., CUTRONA, L. J. & LEITH, E. N. 1954. A doppler technique for obtaining very fine angular resolution from a side looking airborne radar. — Eng. Research Inst., Univ. of Michigan, Rep. no. 2144.5-T.
- WEGENER, B. 1979. Rechner gestützte Erfassung und Beschickung von Wasserlinien in Verfahren der Wattvermessung. — Wissensch. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover, Nr. 91.

Symposium
«De Teledetectie,
Factor van Overzeese Ontwikkeling»
(Brussel, 7 december 1984)
Koninklijke Academie voor Overzeese
Wetenschappen
pp. 137-145 (1986)

Symposium
«La Télédétection,
Facteur de Développement Outre-Mer»
(Bruxelles, 7 décembre 1984)
Académie royale des Sciences
d'Outre-Mer
pp. 137-145 (1986)

LA TÉLÉDÉTECTION EN AGROMÉTÉOROLOGIE OPÉRATIONNELLE

PAR

Michel FRÈRE *

RÉSUMÉ. — La télédétection est utilisée par la FAO dans le double cadre de la lutte contre les acridiens (criquet pèlerin) et du suivi agrométéorologique pour la prévision des récoltes. Les images Meteosat permettent de situer les régions où des formations nuageuses importantes ont pu causer des précipitations. Les images NOAA-AVHRR permettent d'identifier d'une manière synthétique et cumulative les endroits où les précipitations ont permis le développement d'une biomasse appréciable.

SAMENVATTING. — *De teledetectie in operationele agrometeorologie.* — De teledetectie wordt door de FAO enerzijds gebruikt in de strijd tegen de sprinkhanen (treksprinkhaan) en anderzijds voor het agrometeorologisch nagaan van de vooruitzichten van de oogsten. De Meteosat-beelden maken het mogelijk de gebieden te situeren waar belangrijke wolkenvelden neerslag kunnen veroorzaken. De NOAA-AVHRR-beelden laten het toe op synthetische en cumulatieve wijze de gebieden te identificeren waar de neerslag de ontwikkeling van een noemenswaardige biomassa mogelijk maakte.

SUMMARY. — *Remote sensing in operational agrometeorology.* — Remote sensing techniques are used by FAO in relation with desert locust monitoring and control activities as well as for the agrometeorological crop monitoring and forecasting. Analysis of Meteosat Imagery permits the indication of areas where important rain-bearing clouds have developed. The NOAA-AVHRR permits the identification in a cumulative and synthetic way of the areas where precipitation has allowed the growth of an appreciable biomass.

*
* *

Je tiens à limiter le cadre de cette communication aux activités d'agrométéorologie opérationnelle telles qu'elles sont menées actuellement

* Service des Cultures et des Herbages, Division de la Production des Plantes, FAO, Via delle Terme di Caracalla, Roma (Italie).

par la FAO dans le double cadre de la lutte contre le criquet pèlerin et du suivi agrométéorologique des cultures utilisé pour la prévision des récoltes dans les régions d'Afrique les plus exposées aux aléas climatiques.

Nous examinerons tout d'abord l'utilisation de la télédétection pour la lutte contre le criquet pèlerin. L'aire de rémission de cet insecte couvre une zone désertique qui s'étend du Sénégal à l'Inde. L'aire d'invasion susceptible d'être atteinte par les essaims de sauterelles couvre un beaucoup plus grand nombre de pays au sud et au nord de la zone de récession et, en définitive, plus de 56 pays, représentant une superficie de 30 millions de km², sont intéressés par le criquet pèlerin. Depuis plus de 30 ans, une recherche systématique sur l'écologie du *Schistocerca gregaria* menée par la FAO, le «Centre for Overseas Pest Research» de Londres (COPR) et les pays intéressés a permis de dégager les paramètres écologiques conditionnant chaque phase de développement de l'insecte et d'en tirer quelques principes directeurs permettant la mise au point des moyens de lutte contre les essaims de sauterelles. Qu'il me soit permis de rappeler ici le rôle éminent joué dans cette opération par le Belge Hans Bredo.

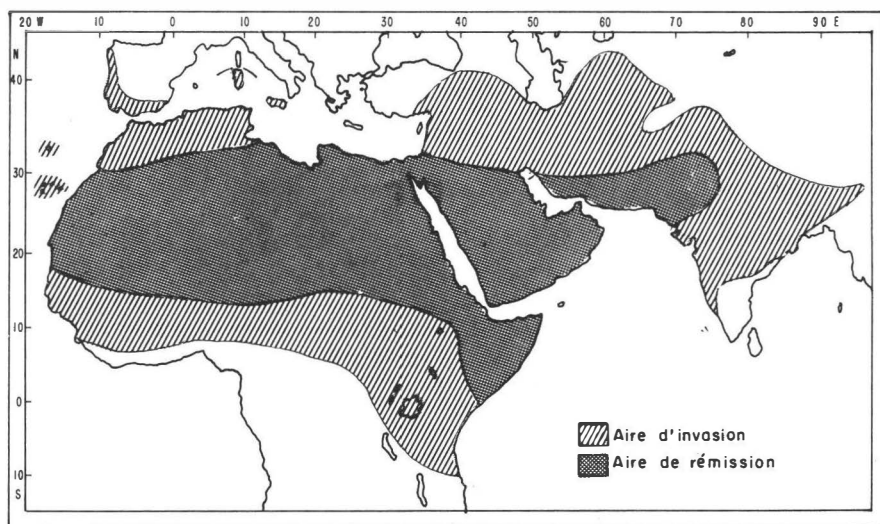


Fig. 1. — Aire de distribution du criquet pèlerin au cours des périodes de rémission et d'invasion.

Depuis 1960, la situation concernant le criquet pèlerin peut être considérée comme étant sous contrôle si l'on excepte les années 1977-79 où

une recrudescence d'activité se manifesta en Somalie et en Ethiopie en raison de l'impossibilité matérielle du contrôle due à l'état de guerre qui régnait alors dans cette région.

DEVELOPPEMENT DU CRIQUET PELERIN EN FONCTION DES CONDITIONS ECOLOGIQUES			
PHASES DE DEVELOPPEMENT	DUREE JOURS	MOUVEMENTS	CONDITIONS ECOLOGIQUES
<u>OEUFs</u>	10 - 20	Aucun	Pluie > 25 mm T° C > 15 °C
<u>LARVES</u>			
1 ^{er} Stode	20 - 50	En surface (sans vols) D'abord très localisés puis plus importants jusque 1 km/jour	Végétation éphémère ou annuelle (nourriture et abri)
2 ^e "			
3 ^e "			
4 ^e "			
5 ^e "			
<u>AILÉS IMMATURES</u>	30 - 90	Envol isolés la nuit ou en essaims de jour jusque 3000 km/mois	Dommages étendus à haute densité. Vols à T° > 21 °C
<u>AILÉS MATURES</u>	30 - 60	Vols moins importants Copulation Ponte des oeufs	Humidité du sol indispensable

Fig. 2. — Développement du criquet pèlerin en fonction des conditions écologiques.

Le cycle de développement du criquet pèlerin comprend plusieurs stades schématisés sur la figure 2 et caractérisés par des besoins d'eau et de nourriture différents. La disponibilité d'eau en particulier sera primordiale au début du cycle de développement pour assurer l'éclosion des œufs et le développement d'une végétation éphémère dont la présence est indispensable pour le développement des premiers stades larvaires à un moment où l'insecte ne vole pas encore.

Le traitement préventif visant à attaquer les populations de sauterelles avant la formation des essaims sera donc logiquement basé sur une surveillance des conditions hydriques dans les zones de multiplication des insectes. Ces zones se trouvent principalement dans la région côtière de la mer Rouge et au débouché des oueds temporaires du Sahara et des zones désertiques de

l'Afrique orientale (figure 3) de la péninsule arabique et du Moyen Orient. Ces zones sont soumises à des précipitations très irrégulières qui, lorsqu'elles tombent sur des terrains imperméables, peuvent ruisseler en suivant les bassins hydrographiques fossiles de ces régions et se concentrer dans les bas-fonds, amenant des quantités d'eau non négligeables qui pourront permettre l'installation d'une végétation éphémère assurant un substrat nutritif idéal ainsi qu'un abri pour le développement des larves de criquet pèlerin.

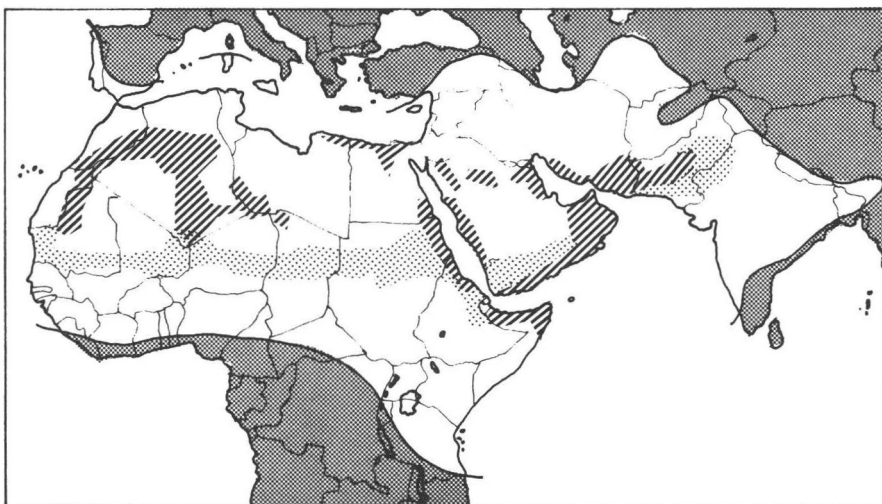


Fig. 3. — Reproduction du criquet pèlerin durant les périodes de rémission. Surfaces hachurées : zones de reproduction d'hiver et de printemps ; surfaces tramées en clair : zones de reproduction en période de mousson.

Alors que, jadis, la reconnaissance de ces zones se faisait par un système complexe de reconnaissances au sol, l'utilisation des satellites météorologiques, du type Meteosat en particulier, pour l'Afrique, a permis d'éliminer à peu près 80% de ce travail de reconnaissance. Le principe est le suivant. Au cours d'une période donnée, la zone sous surveillance est observée à partir des images visibles et infrarouges et la présence des nuages dans chaque zone est notée. En fin de période, les zones où les nuages n'ont jamais été présents sont éliminées car, sans nuages, il n'y a pas de possibilités de précipitation. Par contre, si des nuages denses ont été observés sur les zones reconnues favorables à la multiplication des insectes, les relevés météorologiques disponibles sont consultés et des reconnaissances au sol sont organisées dans

ces régions spécifiques pour y vérifier la composition des populations d'insectes et l'importance de la végétation éphémère résultant de l'humidification du sol.

Pour rester dans le domaine des satellites purement météorologiques, j'ajouterai que dans le domaine du suivi agrométéorologique des cultures, une technique similaire peut être utilisée pour distinguer les régions où des précipitations ont pu se produire de celles qui sont restées sèches.

Diverses techniques ont été proposées aux États-Unis et en Grande-Bretagne pour l'estimation quantitative des précipitations à partir des images satellitaires. Il faut reconnaître qu'en raison des erreurs d'évaluation, ces techniques ne sont pas actuellement applicables aux suivis agrométéorologiques. En bref, les images de satellites météorologiques sont utilisées pour étudier les phénomènes météorologiques à grande échelle et peuvent fournir une information intéressante sur le plan agrométéorologique, en complément à d'autres sources d'informations parmi lesquelles il convient de citer les observations au sol qui demeurent indispensables. De plus, l'analyse et l'interprétation des données de ce type de satellite demande un travail manuel important. Or, il convient de rappeler ici que nous travaillons en opérationnel, ce qui veut dire que l'information dûment analysée et interprétée doit pouvoir être utilisée dans un délai maximum de 10 à 15 jours.

Au cours des dernières années, la NOAA a mis au point un système de télédétection par satellite permettant de faire une estimation du volume de biomasse végétale présente au sol. Ce système peut être utilisé au sol, à partir d'avions ou à partir de satellites. La méthode utilisant des sondes radiométriques est connue sous le nom de «AVHRR» (Advanced very high resolution radiometer). Elle se base sur la réflexion différentielle de la lumière par le sol ou sa couverture végétale dans deux bandes de longueur d'onde bien définie. La première bande (I) est située dans le rouge (0,6-0,7 μm) et correspond à un maximum d'absorption de la radiation par la chlorophylle active. La seconde bande (II) est située dans le proche infrarouge (0,75-1,1 μm) et correspond à une région spectrale où l'albedo de la végétation au sol est proportionnelle à la densité de biomasse.

Les données mesurées dans les deux bandes sont utilisées pour calculer un «index normalisé de différence de végétation» de la façon suivante :

$$\text{INDV} = \frac{\text{II} - \text{I}}{\text{I} + \text{II}}$$

Dans cette équation, étant donné que la radiation I (0,6-0,7 μm) sera très absorbée par la végétation, le numérateur sera proportionnel à la

biomasse couvrant le sol. Le dénominateur tient compte de la variation de la radiation réfléchie totale reçue par les sondes et permet d'exprimer la radiation reçue sous forme d'un index. Cet index fournira l'information sur la distribution spatiale et la densité de la végétation tout en éliminant l'absorption de la radiation par l'atmosphère dans le cas des mesures réalisées par satellite (figure 4).

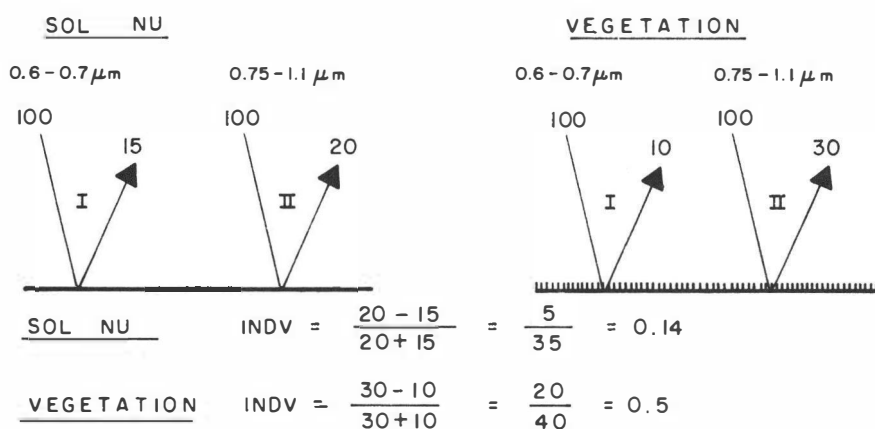


Fig. 4. — Principe de travail du senseur NOAA/AVHRR pour la détermination de la biomasse.

Dans la pratique des opérations, l'imagerie satellitaire est fournie par la NOAA/EDIS (National Oceanic and Atmospheric Administration/Environmental Data and Information Service) sous forme de bandes magnétiques en provenance d'un satellite à orbite polaire, assurant deux passages par jour sur la zone intéressée. Ces données sont ensuite analysées au NASA/GSFC (National Aeronautics and Space Administration/Goddard Space Flying Center) de façon à produire des images synthétiques donnant une information cumulative pour chaque période de 10 jours. Compte tenu de la nature composite de cette image, l'analyse permet, en général, l'élimination des zones qui, à un moment ou l'autre de la décade ont été couvertes de nuages. L'image composite ainsi obtenue présente donc une information complète et cumulative pour une période de 10 jours suivant l'échelle choisie ; chaque «pixel» ou élément de l'image représente une superficie de 1 ou 4 km de côté.

Cette image synthétique parvient à la FAO généralement deux semaines après la fin de la décade d'observation, ce qui, sur le plan opérationnel, est parfaitement satisfaisant. Étant donné que les habitats de reproduction des

criquets représentant un danger potentiel mesurent presque toujours plus de 1 km², l'image ainsi obtenue avec des «pixels» de 1 km de côté permet d'identifier les zones désertiques où des précipitations anormales ont permis l'installation d'une végétation éphémère propice au développement des criquets. Il peut aussi s'agir, dans les zones moins arides, du développement annuel de la végétation des pâturages naturels. Cette information utilisée conjointement aux relevés météorologiques synoptiques permet d'organiser de façon plus efficace le suivi et le contrôle des essaims potentiels de criquets avant même leur formation et leur migration massive.

Il convient également de signaler ici que dans l'étude «statique» des habitats favorables au criquet pèlerin, un large usage a été fait d'images fournies par les satellites de type LANDSAT.

Avant de conclure cet exposé, je tiens à signaler également que ce type de télédétection est aussi utilisé pour compléter les informations météorologiques ponctuelles utilisées dans le cadre du suivi agrométéorologique des cultures. A la suite de la sécheresse catastrophique du Sahel de 1972-73, l'Organisation a cherché les moyens d'établir un système de suivi des cultures en vue d'assurer une prévision au moins qualitative des récoltes. Ce système est basé sur un bilan hydrique cumulatif des cultures qui permet d'arriver de façon simple à un «index de satisfaction des besoins en eau des cultures». Cet index, établi sur des périodes successives de 10 jours, est généralement étroitement lié au rendement des cultures. Au cours des deux dernières années, on a examiné, indépendamment, le tracé sur carte d'une ligne d'index 100 exprimant une parfaite satisfaction des besoins en eau et la ligne traduisant sur l'image satellitaire la présence d'une biomasse importante.

Plusieurs essais faits à divers moments de la saison ont démontré une bonne similitude entre les zones de végétations délimitées par chacune des deux méthodes. Il convient toutefois de faire remarquer que la ligne obtenue par la méthode du bilan d'eau est plus «stylisée» du fait que le nombre de points d'observation est moindre que le nombre des «pixels» de la méthode satellitaire (figure 5). A l'heure actuelle, les deux méthodes sont utilisées de façon complémentaire pour le suivi des récoltes et la méthode satellitaire de l'index de biomasse se révèle extrêmement utile pour mieux caractériser la végétation «entre» les stations d'observations météorologiques.

Par ailleurs, des études de corrélation sont en cours entre les données agrométéorologiques au sol et celles obtenues pour les «pixels», qui correspondent précisément aux stations terrestres. Bien que cette étude ne soit pas achevée, elle confirme une excellente corrélation entre les deux méthodes avec un décalage de deux ou trois semaines dans le temps.

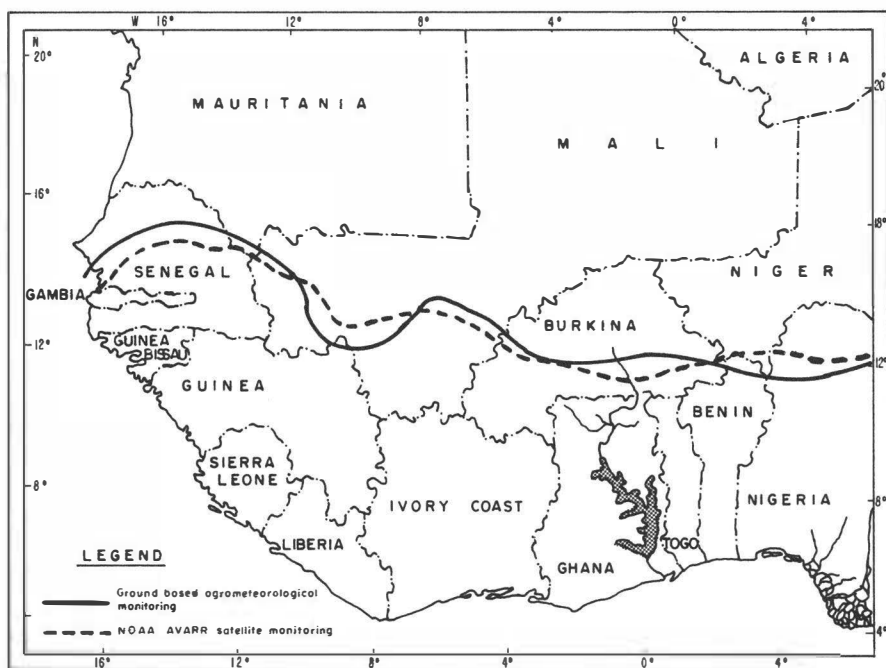


Fig. 5. — La limite de la végétation au Sahel le 31 juillet 1984 résultant des observations agrométéorologiques et de la télédétection.

Ces exemples d'applications de la télédétection aux activités opérationnelles de la FAO vous auront démontré, je l'espère, l'intérêt de ces méthodes pour l'avenir. Il est par ailleurs certain que la mise au point de nouveaux procédés de télédétection permettra d'affiner ces méthodes et peut-être de trouver de nouvelles applications en ce qui concerne par exemple l'évolution de l'humidité du sol.

D'autre part, je désire également insister sur le fait que les méthodes de télédétection constituent un complément aux méthodes d'observation terrestres et que celles-ci resteront toujours indispensables pour assurer la calibration des observations de télédétection.

Il convient donc que dans la mise au point de ces nouvelles méthodes une coopération étroite existe entre les «télédétecteurs» et tous ceux qui, a priori, sont intéressés par l'application et l'utilisation opérationnelle de ces méthodes.

RÉFÉRENCES

- DURANTON, J. F., LAUNOIS, M., LAUNOIS-LUONG, M. H., LECOQ, M. 1982. Manuel de prospection acridienne en zone tropicale sèche. — Gerdat, Paris.
- FRÈRE, M. 1985. The importance of agrometeorology at macro and microscale in plant protection. — *In*: EPPO/FAO/IICA/WMO international meeting for the strengthening of regional plant protection organizations with special emphasis on Latin America and the Caribbean. (San José, Costa Rica, 13-17 June 1983).
- FRÈRE, M. & POPOV, G. F. 1979. Surveillance agrométéorologique pour la prévision des récoltes. — Étude FAO : protection végétale et protection des plantes, 17.
- TUCKER, C. J., HIELKEMA, J. U. et ROFFEY, J. 1984. The potential of satellite remote sensing of ecological conditions for survey and forecasting desert locust activities. — *Int. J. Remote Sensing*.
- TUCKER, C. J., VAN PRAET, C., BOERWINKEL, E. & GASTON, A. 1983. Satellite remote sensing of total dry matter production in the Senegalese Sahel. — *Remote Sensing of Environment*, 13 : 461-474.

Symposium
«De Teledetectie,
Factor van Overzeese Ontwikkeling»
(Brussel, 7 december 1984)
Koninklijke Academie voor Overzeese
Wetenschappen
pp. 147-151 (1986)

Symposium
«La Télédétection,
Facteur de Développement Outre-Mer»
(Bruxelles, 7 décembre 1984)
Académie royale des Sciences
d'Outre-Mer
pp. 147-151 (1986)

SLUITEN VAN HET SYMPOSIUM CLÔTURE DU SYMPOSIUM

DOOR PAR

Paul RAUCQ *

Mesdames, Messieurs, chers Confrères,

Vous attendez peut-être de moi, pour mon allocution de clôture de ce Symposium, que j'en tente une synthèse. Cela a été fait d'une façon remarquable par notre Secrétaire perpétuel, M. J.-J. Symoens, pour le Symposium de 1982, qui avait pour thème «Villes et Campagnes : Problèmes du Monde en Développement». L'an dernier, M. J. Vanderlinden a tenu à couronner le Symposium qu'il présidait, consacré à «La Connaissance du Droit en Afrique», par un exposé plus étoffé encore, qui constituait, en fait, une communication originale remarquable sur les Droits africains.

Je m'en sens incapable, et ce pour trois raisons. Tout d'abord parce que je ne suis pas moi-même un spécialiste de la télédétection, encore que j'en utilise volontiers et avec profit les apports ou les enseignements dans mes domaines d'activité, ou que j'aie quelque pratique de la télédétection «à basse altitude» (ceci paraît presque une antinomie). Ensuite en raison de la diversité des matières abordées dans des domaines en pleine évolution, traitant de sujets qui conditionneront le développement du Tiers Monde dans un avenir plus ou moins proche, par des méthodes et des techniques dont on sait déjà que dans moins d'un an, ou dans cinq ans, ou dans dix, on aura des outils plus performants permettant tous les espoirs. Enfin parce que la modicité de nos moyens ne nous a pas permis d'épuiser la matière, qui aurait dû faire l'objet de deux ou trois jours de débats ; plusieurs domaines n'ont pu être abordés, ou si peu : par exemple la géophysique aéroportée, qui est une des formes les plus anciennes de la télédétection, ou encore la carto-

* Président du Symposium et de l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer ; rue Marie-Thérèse 37, B-1040 Bruxelles (Belgique).

graphie pure et simple à toutes échelles, où la photo-interprétation et l'exploitation des images-satellite ont joué un si grand rôle, et continueront à le faire.

Je me limiterai donc à quelques commentaires, sur un ou deux points, convergents ou non, des exposés que nous avons entendus au long de cette journée. Mais avant de vous les livrer, j'aimerais faire une allusion à un Symposium consacré à la télédétection, qui s'est tenu à Paris en octobre 1984. A côté de cette manifestation qui réunissait, selon mon information, 700 participants et comportait une soixantaine de communications, nos débats de ce jour pourraient sembler être un «mini-symposium» qui serait une redite partielle de ce qui s'est dit ailleurs. En réalité, il s'agit de tout autre chose : notre réunion, tout en se référant en principe aux mêmes approches scientifiques et techniques, a mis l'accent sur le rôle que joue la télédétection dans le développement de l'Outre-Mer, rôle essentiel, et sans doute appelé à croître. Un de nos conférenciers, M. H. Ladmira, a participé au Symposium de Paris ; il a consenti à rédiger à notre intention un compte rendu de ce qu'il y a entendu, et ce texte figure parmi les actes de notre propre Symposium. Il aidera les participants de ce jour à mieux percevoir la différence entre la mise au point de technologies en pleine évolution et leur application aux problèmes, combien aigus, du Tiers Monde.

Je n'aurai garde de paraphraser les divers exposés : cela ne vous apporterait rien après ce que leurs auteurs vous ont dit ; et je ne suis pas capable d'en juger.

Il me semble qu'une certaine ambiguïté se fait jour sur le sens à donner au concept de télédétection lui-même. Pour la plupart des orateurs, il s'agit essentiellement de télédétection spatiale, produisant et exploitant des données fournies par des satellites de divers types, et ayant pour un avenir proche des programmes ambitieux qui permettent de grands espoirs, précisément dans des domaines qui restent un peu en retard. Ces techniques produisent des images réelles, ou des enregistrements, qui peuvent être exploités tels quels, numériquement ou statistiquement, convertis en sigles conventionnels ou en images parlantes.

Pour d'autres conférenciers, la couverture photographique aérienne à des altitudes modestes, n'excédant pas quelques kilomètres, fait partie des techniques de télédétection, et je ne vois pas comment il pourrait en être autrement. L'un des auteurs emploie d'ailleurs l'expression, que je trouve heureuse, de télédétection aérospatiale.

Tous, cependant, éprouvent le besoin de se raccrocher à un contrôle direct, ou à un échantillonnage démonstratif, qu'il s'agisse de photos aé-

riennes à grande échelle, mêmes anciennes, ou encore de levés au sol. J'ai développé ce thème, en quelque sorte, dans mon exposé à cette tribune à la séance de rentrée de notre Compagnie, en octobre 1983 : la géophysique aéroportée ne met en évidence que des anomalies, dont il importe de chercher la cause ; la photogéologie elle-même est généralement décevante si elle ne s'appuie sur un minimum d'observations de terrain et d'échantillonnage.

Une pierre d'achoppement reste, ce me semble, le faible taux de résolution des données spatiales actuelles. La représentativité du « pixel » ne permet pas encore, actuellement, l'élaboration de documents cartographiques utilisables à grande échelle.

Pour les hommes de terrain, le repérage fin exigerait que l'on puisse distinguer un arbre isolé, l'identifier comme manguier, caïllédrat ou borasus, reconnaître un angle de parcelle cultivée, voir une piste marchante : c'est nécessaire pour implanter un puits de prospection ou pour pointer un affleurement. Ce n'est pas encore le cas pour les images satellites, mais on nous promet de très sérieuses améliorations pour bientôt.

Dès maintenant, en tout cas, la télédétection apporte une solution valable ou des voies d'action pour de nombreux problèmes, statistiquement ou même à l'échelle de terroirs peu étendus. C'est surtout vrai dans le domaine de la sauvegarde, voire de la reconstitution du couvert végétal, dans celui de l'aménagement du territoire et de la connaissance des caractéristiques hydrologiques de surfaces à mettre en valeur, bref, dans tout ce qui concerne l'inventaire, le développement ou le maintien de l'activité agropastorale.

Notre Académie a eu tout récemment le privilège lors de séances de Classes, d'entendre des communications de haut niveau sur le drame de la déforestation dans un rayon de plus en plus grand autour des agglomérations en expansion, sur la vigilance qu'impose sans relâche la lutte anti-acridienne, sur les perspectives d'exploitation et de préservation des eaux de l'océan et des estuaires dans la région de la Grande Barrière australienne ; ce ne sont que des exemples, qui illustrent le souci de notre Compagnie de jouer un rôle dans les questions de ce genre, qui font largement appel aux techniques de la télédétection ; elles sont restées au premier plan des préoccupations de ce Symposium.

Je voudrais cependant souligner quelques points tout à fait positifs dans le domaine qui est le mien, la géologie, et particulièrement la géologie économique. C'est la couverture photographique aérienne qui a permis, d'abord, le repérage exact des observations, puis la cartographie géologique,

basée à la fois sur le levé de terrain et l'interprétation photogéologique ; il m'est agréable de saluer ici la présence d'un maître en la matière, qui, à partir de nos descriptions d'affleurements, a réussi à tracer en pleine forêt primaire les limites précises de formations mésozoïques peu contrastées et qui, mieux encore, a débrouillé la structure d'un groupe précambrien que nous avons été incapables d'interpréter sur le terrain : j'ai cité notre confrère Jacques Lepersonne.

L'examen des photos aériennes (beaucoup plus aisé si elles sont au 1/25 000 ou au 1/33 000 plutôt qu'au 1/50 000 ou 1/60 000) permet des découvertes surprenantes allant de la localisation de fractures à celle de massifs kimberlitiques ou serpentiniteux : ce sont des données essentielles pour la recherche minière. L'examen des images LANDSAT conduit au dépistage de linéaments, ces structures qui peuvent se rattacher à des tectoniques anciennes ou actuelles et amener le géologue de terrain à rechercher sur place de quoi il s'agit ; car, jusqu'ici, le dernier mot reste au praticien qui court la brousse pour l'observation directe ou indirecte des faits : géophysique, géochimie, échantillonnage sont susceptibles de recevoir une orientation appropriée.

Un de nos invités vous a entretenus d'une constatation étonnante faite ces dernières semaines par l'examen d'images LANDSAT dans le Sankuru (Kasai), dans la forêt équatoriale de Lusambo, sur 250 km : une morphologie dunaire datant évidemment d'une période où les conditions climatiques étaient différentes ; ces conditions se sont présentées à la fin du Cénozoïque et sans doute aussi au cours d'interpluviaux du Pléistocène ; l'hypothèse de l'auteur est corroborée par mes propres observations, un peu au sud, où des sables fins partiellement éolisés couvrent la plus grande partie de la surface d'un manteau de 30 à 40 m, en savane comme en forêt plus ou moins dégradée. Cet exemple illustre un fait dont il faut tenir compte : les alignements dunaires qui apparaissent sur les photos de satellites au 1/500 000 sont également sur les photos aériennes au 1/33 000, mais guère sur les mosaïques au 1/50 000. Il y a donc une certaine concordance, mais la continuité n'est pas évidente.

Enfin, j'ai été heureux d'entendre un autre de nos orateurs (excusez-moi de ne pas personnaliser davantage ces quelques remarques), nous entretenir du Projet RADAM, dont j'ai parlé à la Classe des Sciences naturelles et médicales de notre Académie en 1977. Il s'agit du levé par radar latéral aéroporté (side-looking radar) du bassin amazonien au Brésil (étendu par la suite à tout le territoire fédéral, ou peu s'en faut). Pour les géologues économistes, c'est une révélation : malgré la nébulosité quasi permanente,

malgré la forêt équatoriale, une série de surfaces ont été tracées au 1/1 000 000 et interprétées comme massifs granitiques. Tous les *garimpos* connus, c'est-à-dire les zones où des exploitants artisanaux produisent depuis longtemps de l'or, de la cassitérite et de la tantalite, s'y retrouvent, en bordure de ces massifs, mais certains granites encore inconnus n'ont pas été explorés, manifestement. Si j'avais un peu d'argent à investir, je pense que je le risquerais dans une telle opération, avec une bonne chance de réussite.

En clôturant ce symposium, je voudrais féliciter tous les orateurs pour le niveau de leurs exposés et les remercier pour leur discipline dans le respect de l'horaire très strict prévu ; merci aussi aux intervenants pour leurs questions pertinentes, qui ont montré l'intérêt qu'ils portaient aux matières traitées.

Toute ma gratitude à notre confrère, M. J. D'Hoore pour le brio et le tact avec lesquels il a conduit les débats de cet après-midi. Et mes plus vifs remerciements enfin aux membres du personnel de notre Académie pour leurs prestations : ils ont une large part dans le succès de cette manifestation.

