

PLAIDOYER POUR UNE REVALORISATION DES PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES¹

par

Paul DUMONT²

ABSTRACT

Having analyzed the different reasons why geologists seem to disdain the exploitation of aerial photographs, the author comments on the main qualities that are usually attributed to satellite images.

He shows that, in the case of geological mapping at large scale, the exploitation of aerial photographs remains the most effective tool, notwithstanding the importance and duration of the work it implies.

RESUME

Après avoir analysé les différentes causes qui expliquent la désaffection des géologues pour l'exploitation des photographies aériennes, l'auteur fait la critique des principales qualités que l'on attribue aux images satellitaires. Il montre que dans le cas de la cartographie géologique à grande échelle, l'exploitation des photographies aériennes reste l'outil le plus efficace malgré l'importance et la longueur des travaux qu'elle nécessite.

KEY WORDS

Remote sensing, aerial photographs, satellite imagery, geological mapping, astrobleme, Shaba (Zaire).

MOTS-CLES

Télétection, photographies aériennes, images satellitaires, cartographie géologique, astroblème, Shaba (Zaire).

1. PRELIMINAIRES

Au terme de la troisième journée d'études consacrées à la télétection, l'auteur s'est plu à jouer le rôle de Candide en soulevant diverses questions, si

générales, que les scientifiques hésitent peut être à les poser. Dans toute la mesure du possible, il a limité son propos aux problèmes de la cartographie géologique qui lui sont familiers.

Lorsque l'on parle de télétection, on pense en premier lieu au traitement informatisé d'images satellitaires, laissant dans l'ombre l'exploitation stéréoscopique des photographies aériennes. C'est faire peu de cas de l'apport extraordinaire des photographies aériennes à la cartographie topographique moderne et à la modernisation de la connaissance géologique de la terre.

Il est vrai que l'examen d'une image satellitaire, de type Landsat, par exemple, qui couvre une superficie d'un mile carré, ne prend que quelques heures et conduit directement à une carte d'interprétation au 1 000 000. Par contre, l'examen de la couverture aérographique au 1/40 000 d'une surface d'un mile carré exigera un mois de travail assidu et débouchera sur un croquis synthétique au 1 000 000 qui aura nécessité plusieurs réductions et schématisations successives.

Pour le profane, les deux cartes au 1 000 000 sont comparables mais dans le cas du document aérographique, le croquis représente la synthèse d'une analyse détaillée du terrain alors que le document satellitaire traduit une impression globale qui a pu être bien, ou mal appréciée par l'interpréteur.

On perd trop souvent de vue que l'interprétation d'une image satellitaire ne possède pas le même degré de fiabilité qu'une carte de synthèse provenant de la compilation de photographies aériennes : ainsi, sur un croquis d'interprétation d'image ERTS (figure 1) couvrant la partie orientale du Shaba, Mohr (1974) indique la présence de deux structures annulaires, notées "crater" et repérables par des flèches sur la figure 1. L'examen stéréoscopique des photographies aériennes infirme la réalité de ces deux structures, mais elle a permis de repérer une structure annulaire tout à fait typique (figure 2) à la bordure orientale du Plateau des Kundelungu, à l'intersection du 28^e méridien Est de Greenwich et du parallèle de 10°15' de latitude Sud.

¹ Communication présentée le 7 juin 1989 au 3^{ème} Symposium sur la Télétection à Tervuren.

² Professeur honoraire de l'Université Libre de Bruxelles, Drève des Sapins 2 - 1330 Rixensart

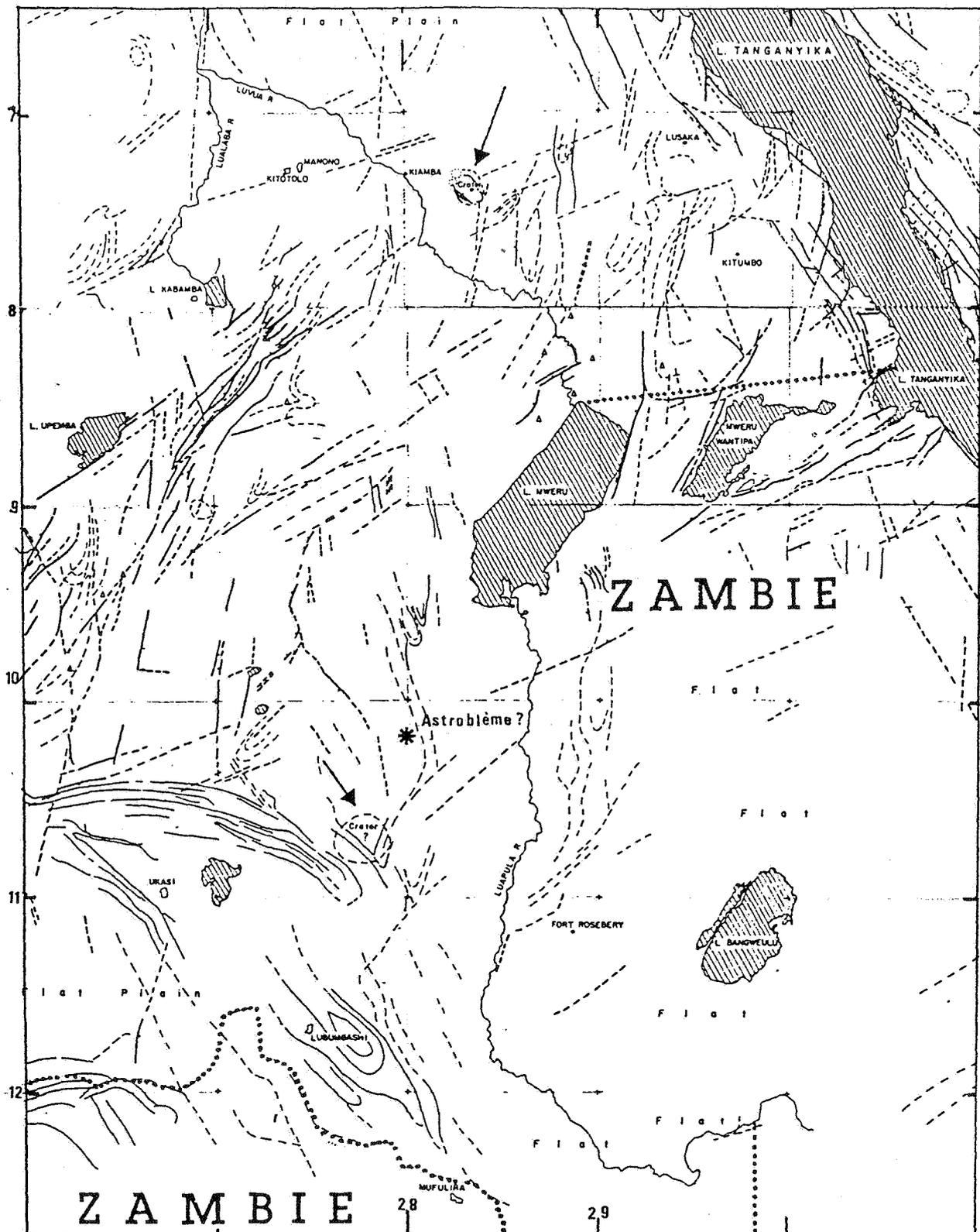


Figure 1. : Croquis tiré d'un assemblage d'images ERTS, couvrant le Shaba oriental. Mohr, 1974 - 1/3 500 000.

La frontière du Zaïre a été ajoutée pour permettre une comparaison plus aisée avec la carte géologique du Zaïre publiée la même année par le Musée royal de l'Afrique centrale.

La comparaison des deux documents souligne la pauvreté des données directement fournies par les images satellitaires. Ceci s'explique par les énormes superficies occupées au Shaba par les surfaces d'aplanissement.

Les traits continus et tiretés correspondent à des crêtes structurales d'âges très différents ou à des failles très récentes de faible rejet. Ces structures linéaires étaient déjà connues par les travaux de terrain ou par l'analyse des photographies aériennes.

En faveur de la thèse de l'astroblème, on notera que la structure annulaire oblitère les linéaments dirigés NNW qui marquent la bordure orientale faillée du Plateau des Kundelungu. L'impact serait donc postérieur à la formation des grabens de l'Est africain.

2. RETROACTE

Vers les années 1945, le major Gilliard entreprenait la création à l'I.G.M. d'un département de photogrammétrie dans le but primordial de refaire la carte topographique de base de la Belgique au 1/25 000. Devant l'importance des investissements envisagés, l'I.C.M. diffusa dans les milieux scientifiques des notes d'information montrant l'intérêt qui pourrait découler de l'exploitation des photographies aériennes pour de nombreuses disciplines

scientifiques et techniques. On trouve les premiers échos des possibilités offertes aux géologues par les photographies aériennes dans Dumont (1950), Woodtli (1954), Thonnard (1954), et Gerards & L'admirant (1960).

Dans le cas particulier de la Belgique, si l'on fait le bilan des travaux cartographiques basés sur la photogrammétrie, il apparaît tout à fait remarquable mais, il faut bien constater que l'utilisation des photographies aériennes est restée tout à fait exceptionnelle dans le domaine de la géologie, de la géographie, de la pédologie, etc....

On peut dès lors se demander si la désaffection pour l'emploi des photographies aériennes que l'on constate à l'heure actuelle, ne préfigure pas l'évolution que risque de connaître l'exploitation des images satellitaires.

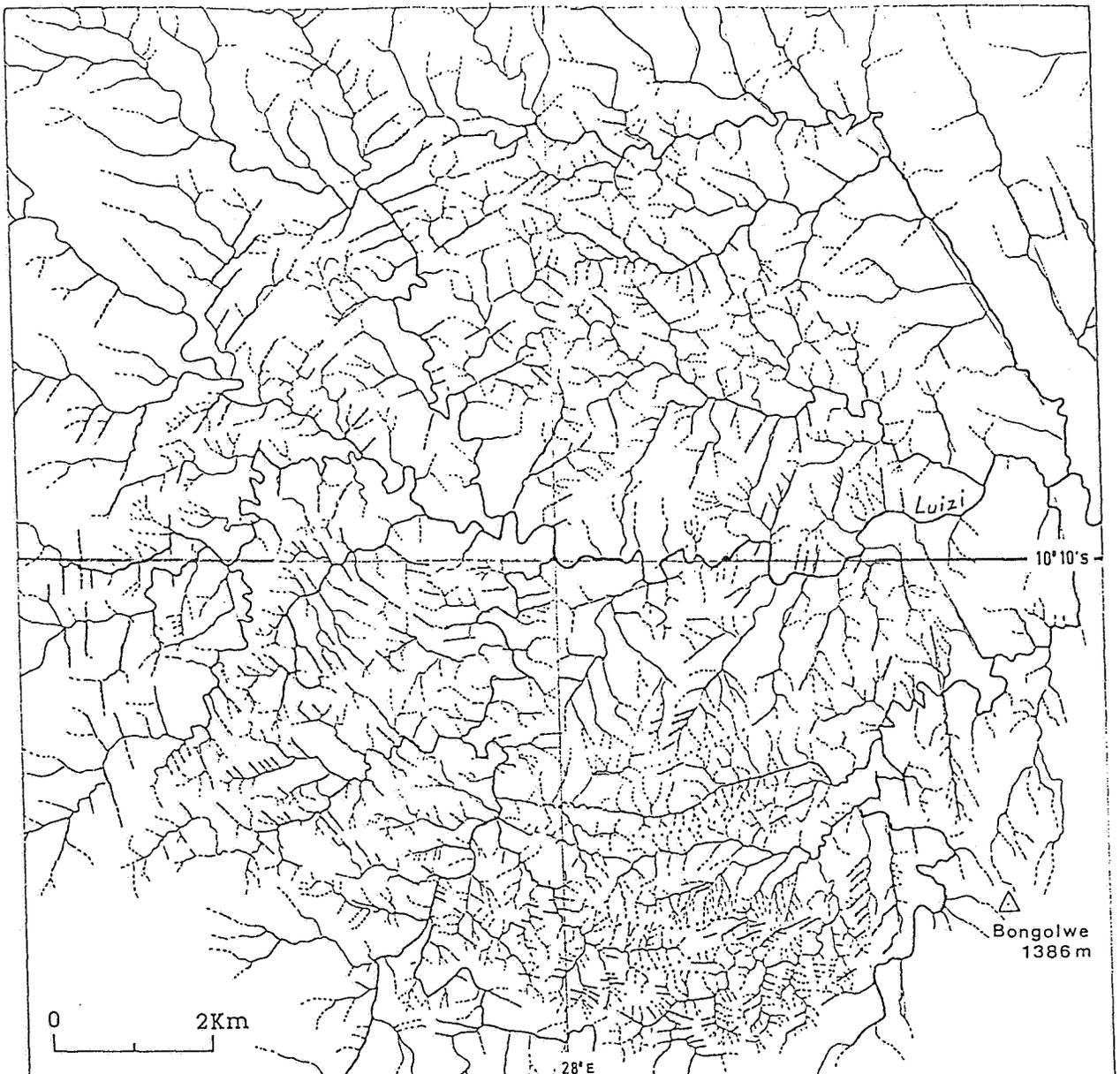


Figure 2. : Structure annulaire d'origine énigmatique (astroblème ?) repérée sur la figure 1 (L'admirant, 1989).

3. DESAFFECTION DES GEOLOGUES POUR L'EXPLOITATION DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES

Plusieurs raisons permettent d'expliquer cette désaffection :

a) il faut mentionner, avant tout, la suspicion avec laquelle les premières études photogéologiques furent accueillies dans les milieux professionnels. Cette méfiance résultait au moins partiellement de l'enthousiasme parfois euphorique montré par de très jeunes chercheurs qui n'avaient pas fait la preuve de leur expérience professionnelle dans des levés géologiques traditionnels et qui ne manifestaient pas le moindre souci de contrôler sur le terrain le bien fondé des interprétations qu'ils proposaient³.

Les méthodes de photogéologie précontrôlée, préconisées au département géologique du M.R.A.C. ont largement contribué à changer cet état d'esprit. A l'heure actuelle, la majorité des géologues acceptent l'idée que l'analyse photogéologique permet de garantir, dans de nombreux cas, la continuité d'une formation géologique, d'une région à l'autre, alors qu'autrefois, il fallait démontrer cette identité par des levés de terrain "effectués de proche en proche".

b) Les premières couvertures photographiques de la Belgique ont été réalisées par l'Institut Géographique Militaire à des échelles comprises entre le 1/25 000 et le 1/50 000. Ces couvertures étaient réalisées au moment où la végétation était aussi réduite que possible, si bien que les clichés convenaient parfaitement aux études géologiques et morphologiques. Malheureusement, l'obtention de ces photographies était soumise à des autorisations qui en retardaient la disponibilité ; de plus, ces photographies étaient censurées par l'autorité militaire qui gommait tous les secteurs présentant un intérêt stratégique ce qui en réduisait considérablement la valeur.

Pour contourner cette difficulté, les utilisateurs de photographies aériennes, se sont tournés vers le Service Topographique du Ministère des Travaux Publics qui délivrait plus rapidement des photographies, non censurées, mais qui présentaient trois inconvénients majeurs :

- 1) ces photographies étaient prises au 1/10 000 ou au 1/15 000, échelles qui, on le verra plus loin, conviennent mal aux études de géologie structurale qui conditionnent le levé géologique.
- 2) l'époque des prises de vue des clichés du Ministère des Travaux Publics était souvent moins favorable que celle adoptée par l'I.G.M.
- 3) à l'échelle du 1/10 000, les distorsions radiales des photographies aériennes ne peuvent

être négligées : elles peuvent dépasser 10 mm dans la vallée de la Meuse où les dénivellations entre le fond de la vallée et le sommet des versants dépassent habituellement la centaine de mètres. Il était donc indispensable de restituer les limites utiles tracées sur les photographies aériennes au 1/10 000 avant de les transférer sur la carte topographique correspondante au 1/10 000. Très peu de géologues possèdent le bagage photogrammétrique élémentaire qui permet de résoudre ce problème. C'est peut être l'une des raisons qui explique que la révision de la carte géologique de la Belgique tarde tant, alors qu'il est impérieux de corriger les tracés de cette carte, ne fût-ce que pour les mettre en accord avec les courbes de niveau restituées de la nouvelle carte topographique au 1/25 000 et respecter ainsi les lois les plus élémentaires de la géométrie descriptive.

c) Les prévisions optimistes formulées sur les possibilités presque illimitées de la photogéologie n'ont été rencontrées que dans des cas très rares ; en effet, l'exploitation géologique des photographies aériennes est fortement limitée par des facteurs que l'on peut répartir en :

facteurs locaux : la présence quasi-permanente d'une couverture nuageuse sur une région déterminée, ou la présence d'un recouvrement forestier dense, empêche d'observer la surface du sol et, à fortiori, d'en étudier la micromorphologie reflétant la structure du soubassement rocheux. Pour cartographier de telles régions, il est fait appel à des avions ou à des satellites porteurs de radar à balayage latéral.

facteurs géologiques et géomorphologiques : l'existence de dépôts superficiels d'âge souvent incertain, plio-pléistocène à actuel, couvrant des surfaces d'aplanissement plus ou moins étendues, des terrasses et des plaines fluviales empêche d'observer le soubassement rocheux en dehors des secteurs rajeunis du réseau hydrographique.

Cette situation est diversement traitée d'un service géologique à l'autre.

Certains services géologiques estiment que les dépôts superficiels recouvrant le substratum ancien (à l'exclusion bien entendu des sols autochtones d'altération) doivent être indiqués sur la carte au même titre que les formations anciennes, parce que leur présence empêche de garantir avec sécurité le tracé des formations du soubassement ancien. C'est en particulier le cas de la carte géologique de France au 1/50 000.

D'autres services géologiques considèrent qu'il ne faut pas représenter ces dépôts récents dont la quasi-omniprésence risquerait de cacher la structure du soubassement rocheux. Cette manière de voir a été adoptée pour la carte géologique de la Belgique au 1/40 000 et cette convention a malheu-

³ On peut parfois formuler le même reproche au sujet de conclusions tirées de l'examen superficiel d'images satellitaires, sur la base de modèles géologiques "à la mode".

reusement été adoptée pour les cartes géologiques du Zaïre.

En réalité, l'omission des dépôts quaternaires sur la carte de Belgique résulte plus vraisemblablement des réelles difficultés soulevées par l'identification et le tracé des formations quaternaires. En effet, la carte indique les alluvions modernes des rivières dont le tracé coïncide pratiquement toujours avec le figuré des prairies de la carte topographique au 1/40 000.

Les photographies aériennes permettent une cartographie rapide et assez précise des dépôts superficiels. La cartographie des dépôts récents est d'autant plus utile qu'elle permet de circonscrire les secteurs où affleure le soubassement rocheux et de mieux organiser les travaux de levé géologique sur le terrain.

Mais, si l'on renonce à indiquer les dépôts superficiels de recouvrement, il faut pouvoir tracer les limites extrapolées des formations du substratum géologique. Malheureusement le recouvrement superficiel, dès que son épaisseur dépasse 4 à 5 m, parfois bien moins, efface toute indication susceptible de déceler la nature du substratum ancien. Les exceptions à la règle sont si rares qu'on peut les énumérer :

1. morphologie et répartition des inselbergs parsemés sur les surfaces pédimentées ;
2. surface d'aplanissement éventrée et à morphologie chaotique lorsque les dépôts superficiels recouvrent un substratum carbonaté ;
3. distribution suivant des directions privilégiées de tronçons du réseau hydrographique. Mais ici encore, les avis diffèrent : pour les uns, les fracturations récentes, responsables de la structuration du réseau hydrographique, sont guidées préférentiellement par des cassures anciennes du soubassement ; pour d'autres, ces directions de fractures sont ordonnées de manière spécifique par rapport à la direction de la contrainte primaire responsable de la fracturation du bâti rocheux.

C'est cette limitation des photographies aériennes pour analyser le substratum ancien qui a conduit bon nombre d'utilisateur des cartes géologiques à espérer que les images satellitaires parviendraient à percevoir la couverture de dépôts superficiels.

d) Enfin, il ne faut pas perdre de vue que l'esprit même de la science géologique a profondément évolué depuis vingt-cinq ans.

Autrefois, l'analyse minutieuse des photographies aériennes, couplée avec l'examen rigoureux des faits sur le terrain, constituait la base de toute interprétation géologique. Les méthodes modernes de la géologie sont fort différentes : le chercheur élabore un modèle hypothétique ; il en déduit les conséquences prévisibles et va éventuellement sur le terrain, dans des sites jugés favorables, pour

rechercher des preuves justifiant ou infirmant l'hypothèse de départ. Par la vue globale qu'elles offrent, les images satellitaires se prêtent bien à ce genre de modélisation.

4. QUALITES SPECIFIQUES DES IMAGES SATELLITAIRES

Parmi les avantages présentés par les images satellitaires⁴, on retient généralement :

a) la **vision synoptique des images** qui permet de saisir les traits majeurs d'une vaste région (un losange de 185 km de côté), présentée à l'échelle du 1/1 000 000, soit l'équivalent de 1000 photographies aériennes de format 18 X 18 cm, à l'échelle du 1/40 000 (en tenant compte des recouvrements latéraux des photographies). On parle même d'une "nouvelle vision de la planète", expression optimiste qui n'est pas sans rappeler celle de Schermerhorn qui appelait la vision stéréoscopique des photographies aériennes, le "sixième sens du géographe".

On n'insiste pas assez sur l'étroite similitude qui existe entre les images satellitaires et les cartes à petites échelles des atlas modernes. Est-il besoin de rappeler que c'est en examinant un planisphère et en constatant la similitude des côtes de part et d'autre de l'océan Atlantique que Wegener eut, pour la première fois, l'idée de la dérive des continents et, plus récemment, la célèbre photographie du Golfe d'Aden, prise par les astronautes de Gemini, n'a pas manqué de conforter la thèse de l'expansion océanique, parce qu'elle suggérait l'ouverture de la Mer Rouge.

Du point de vue géologique, il est clair qu'il existe **un rapport optimal entre l'échelle des photographies et la dimension des phénomènes géologiques que l'on se propose d'étudier** : les images satellitaires permettent une vision globale des segments orogéniques, des batholites granitiques, de l'agencement des fossés d'effondrement ou des zones de décrochement, tandis que les photographies aériennes, aux échelles voisines du 1/40 000, donnent une meilleure vision des appareils volcaniques, des terminaisons périclinales des plis, des intrusions discordantes mineures, etc.. Les photographies aériennes au 1/10 000 permettent une localisation aisée des observations géologiques lors des travaux sur le terrain et autorisent parfois des mesures de pente et d'épaisseur des bancs. Cette dernière échelle ne convient cependant pas pour le levé des carrières et des falaises rocheuses qui exigent des photographies verticales prises au photothéodolite.

Par ailleurs, les images ne sont pas les seules à représenter des secteurs étendus de la surface terrestre, les assemblages de photographies aériennes, sous forme de mosaïques contrôlées fournissent des représentations générales au 1/100 000 ou au 1/200 000, comparables à celles provenant de l'agrandissement des images satellitaires. Dans le cas parti-

⁴ Il s'agit principalement des images de types Landsat, les plus largement répandues et pour lesquelles on dispose de publications abondantes.

culier du Shaba, la comparaison des images Landsat avec les mosaïques contrôlées, élaborées par l'I.G.M. (Bruxelles) plaide en faveur de l'emploi de mosaïques contrôlées ; on ne peut que regretter que de telles mosaïques contrôlées n'existent pas pour le territoire national.

b) Les images satellitaires sont exemptes de distorsions radiales et permettent de réaliser des assemblages presque parfaits : il est donc possible d'en tirer des schémas cartographiques précis à des échelles allant du 1/500 000 au 1/200 000. Cette propriété est malheureusement obtenue, dans le cas des images Landsat, au détriment de la vision stéréoscopique que permet l'examen des couples de photographies aériennes et qui représente un puissant moyen de discrimination des détails morphologiques grâce à l'exagération des pentes observables sur les couples stéréoscopiques. Cette lacune est si évidente que le programme Spot y a remédié et qu'il existe aux États-Unis un projet Stereosat qui pourrait relayer les Landsats.

c) Les images satellitaires comportent des détails particuliers qui n'apparaissent pas sur les photographies aériennes. Cette affirmation ne paraît pas clairement établie ; en effet, d'une couverture photographique à l'autre d'une même région, selon la date de la prise de vue, se marquent des différences très nettes qui sont dues à l'état de croissance de la végétation, au degré d'humidité du sol, à la transparence de l'atmosphère, à l'existence éventuelle de brûlis actuels ou plus ou moins récents, etc... Pour faire une comparaison objective entre une image satellitaire et une mosaïque de photographies aériennes, couvrant la même région, il faudrait que les prises de vue des deux images aient été réalisées pratiquement le même jour, ce qui n'a sans doute jamais été fait.

De plus, lorsque l'on parle de détails particuliers, spécifiques des images satellitaires, il faut bien distinguer entre :

- des traits caractéristiques qui apparaissent grâce à la vision plus générale, plus ample, des images satellitaires comme c'est le cas pour certains linéaments ou certaines structures circulaires ;
- des informations plus ou moins bien définies qui résultent de la comparaison, ou de la combinaison, de plusieurs images distinctes d'une même scène, enregistrées simultanément par les canaux du satellite Lansat.

c-1) analyse des linéaments des images satellitaires

Le mot **linéament** est un ancien mot français qui a été redéfini à diverses reprises et avec des sens différents (Scanvic, 1983, p. 84-85). La définition de Hoobs (1911) est souvent proposée : *"Les linéaments sont des alignements rectilignes ou légèrement courbés de détails topographiques qui s'expriment à l'échelle régionale et que l'on interprète généralement comme une manifestation des structures crustales"*.

Ces lignes qui sont les principales (et parfois les seules) données que l'on puisse lire directement sur

les images satellitaires paraissent souvent énigmatiques, mais elles le deviennent beaucoup moins lorsque l'on étudie les photographies aériennes correspondantes : ainsi, la présence d'une route rectiligne séparant des champs brûlés, d'autres champs qui ne l'étaient pas, créait sur une image Erts du centre de l'Espagne, un linéament passant par l'emplacement projeté d'une centrale nucléaire dont les travaux furent retardés. En effet, on associe généralement les linéaments avec l'existence de fractures, susceptibles de créer des zones d'instabilité, mais susceptibles aussi d'être le siège privilégié des minéralisations.

Malheureusement, les avis diffèrent sur l'importance qu'il faut attribuer aux failles soulignées par un linéament. C'est ce que Mohr (1974) appelle le "paradoxe de Shackleton" (in Hepwork, 1967) : *"les dislocations de faible importance peuvent donner naissance à des linéaments accusés tandis que des failles de décrochement ou des glissements peuvent être invisibles, surtout s'ils sont antérieurs au métamorphisme"* Dans le cas particulier du Shaba, les failles délimitant les grabens de l'Upemba, de la Lufira et du Luapula ne sont pas immédiatement repérables, ni sur les photographies aériennes, ni sur les images satellitaires.

L'explication de ce paradoxe peut s'expliquer par la reprise des processus de pédimentation qui caractérisent, au moins partiellement, la morphogenèse du Shaba. La surface aplanie du bloc affaissé s'est propagée au-delà de l'escarpement de faille par recul progressif de ce dernier. Bien plus, le tracé en plan du nouvel escarpement s'écartera d'autant plus du tracé de la faille primitive que la composition lithologique du bloc soulevé est plus hétérogène (figure 3).

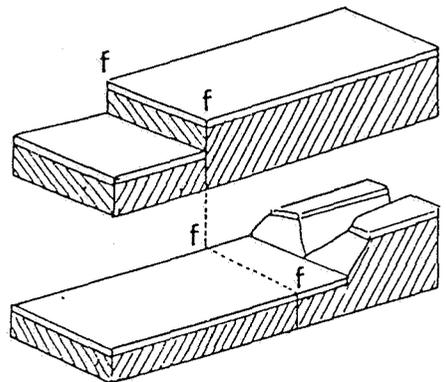


Figure 3. : Extension des surfaces d'aplanissement "transgressant" les failles d'effondrement.

c-2) traitement informatisé d'images multiples d'une même scène

Ces traitements renferment sans doute le potentiel le plus prometteur des images satellitaires mais il faut bien constater qu'ils suivent deux démarches distinctes :

c-2.1) la recherche empirique d'une corrélation satisfaisante entre des limites objectives relevées sur le terrain (ou lue sur une carte géologique ancienne) et des limites souvent imprécises, obtenues par ta-

tonnement, en combinant les différentes images de la même scène grâce aux techniques les plus élaborées de l'informatique. L'imprécision qui caractérise ces méthodes "interactives" ne manquera pas de rencontrer auprès d'un public non scientifique le même succès qu'ont rencontré le flair du prospecteur, la baguette de coudrier du sourcier et, plus récemment, l'avion renifleur des gisements d'huile.

c-2.2) l'analyse de scènes multiples, basée sur les différences de réflectance des minéraux, enregistrées par les différents canaux du satellite. Le bien-fondé de cette méthode fut établi dès les premières photographies Erts (Rowan *et al.*, 1974). Cette méthode a son rendement optimum dans les régions montagneuses et dans les régions arides et semi-arides (Viljoen *et al.*, 1975) ; malheureusement cette méthode n'est pas applicable, ou risque de conduire à des résultats douteux, dans toute une série de secteurs : zones englacées, zones à forte densité de population, zones présentant une couverture importante de dépôts superficiels allochtones (ergs, pédiments), plaines alluviales, etc...), zones boisées, etc...

Dans ces différents cas, les images satellitaires, comme les photographies aériennes doivent être relayées par la géophysique aéroportée, la thermographie, le Slar, etc...

On omet trop souvent de dire que dans de nombreux cas, sinon dans la plupart des cas, les photographies aériennes contiennent de nombreuses informations qui n'apparaissent pas sur les images satellitaires correspondantes, si bien que les deux sources d'informations sont souvent complémentaires.

d) les images satellitaires permettraient la découverte de nouveaux gisements miniers

Dans un article plein d'humour, Joralemon (1975) propose de classer les gisements miniers d'après le métier de ceux qui les ont effectivement découverts. Après avoir constaté que les géologues se sont contentés le plus souvent d'expliquer la genèse des gisements découverts par d'autres, il montre que la plupart des grands gisements ont été découverts par des géophysiciens, des métallurgistes, des ingénieurs, des mineurs, des chimistes, des notaires, des prospecteurs ou des politiciens.

Il ne faut pas perdre de vue que si l'observation de cassures rectilignes, découvertes sur des images satellitaires et confortée par l'existence d'indices de minéralisation, signalés dans la littérature géologique ou découverts sur le terrain, constitue une promesse de gisement, il reste un long chemin à parcourir avant de faire la démonstration à un organisme bancaire que l'indice découvert deviendra une source de profit suffisante pour justifier les risques d'investissement.

E. POSSIBILITES RESPECTIVES DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES ET DES IMAGES SATELLITAIRES POUR L'ETABLISSEMENT D'UNE CARTE GEOLOGIQUE A PETITE ECHELLE (1/200 000) DANS UN PAYS INCONNU

Dans le domaine géologique, l'emploi de la télédétection se justifie plus particulièrement dans les travaux de cartographie soit qu'il s'agisse d'établir ou de moderniser la carte géologique d'une vaste région, soit qu'il s'agisse de résoudre des problèmes de géologie appliquée. Dans le premier cas, les travaux de cartographie sont pris en charge par des organismes d'état ou s'inscrivent dans des projets de coopération avec les pays en voie de développement. Dans le second cas, ils sont l'apanage de sociétés privées et sont principalement axés sur trois thèmes essentiels :

- cartographie des sols et aménagement du territoire ;
- exploration minérale à la recherche de nouveaux gisements ou pour trouver une extension à des gisements en voie d'épuisement ;
- analyse de sites en vue de l'implantation urbaine, de l'installation d'établissements industriels à hauts risques (centrales nucléaires, industries polluantes, etc...).

Il ne sera donc pas question ici de travaux de recherches expérimentales destinées à tester des méthodes nouvelles de traitement des images satellitaires, susceptibles d'être valorisées dans la routine des travaux cartographiques mentionnés plus haut.

Faire une carte géologique, c'est représenter les intersections des surfaces (souvent planes) délimitant les principales formations géologiques affleurant dans une région, avec la surface du sol. Dans le cas le plus compliqué, qui est aussi le cas le plus fréquent, il s'agit de couches de sédiments, tantôt plissées, tantôt subhorizontales et le plus souvent faillées.

Si l'on ne dispose pas d'une carte de base en courbes de niveau, il est impossible d'extrapoler les observations de terrain d'une manière rigoureuse ou de mettre en évidence un décrochement vertical. Réciproquement, si l'on ne dispose pas d'une carte avec courbes de niveau, il est impossible de déduire la pente des couches d'après le tracé des lignes de stratification, parfois bien apparentes sur les photographies aériennes.

Dans le cas le plus général, le lever d'une carte géologique comporte trois phases successives :

- des études préliminaires aux levés sur le terrain.
- les levés proprement dits sur le terrain.
- l'établissement de la carte géologique.

Comme la seconde phase est la plus coûteuse, il est clair qu'il faut tirer de la télédétection le maximum d'information durant les phases antérieures et postérieures aux levés sur le terrain.

Les études préliminaires ont pour but essentiel l'élaboration d'un schéma cartographique de base sur lequel on porte toute indication utile provenant de la compilation des documents les plus divers (en ordre principal, anciens travaux de prospection minière). Ce schéma cartographique doit permettre au géologue de se diriger sur le terrain et de localiser sans ambiguïté les observations géologiques qu'il effectue et, en particulier, l'emplacement des secteurs minéralisés susceptibles d'exploitation ou nécessitant des travaux de recherches plus approfondis.

Avant 1945, les géologues et les prospecteurs étaient astreints à dresser, au cours de leur progression, une carte topographique de base qui devait être ajustée sur une triangulation locale ou sur des points déterminés astronomiquement. Grâce aux couvertures aérographiques réalisées systématiquement entre 1940 et 1960, il est devenu possible de dresser des schémas cartographiques parfaitement adaptés aux besoins des levés géologiques sur le terrain.⁵

Ce décalque des traits caractéristiques du paysage géographique, observé en vision stéréoscopique sur les photographies aériennes est souvent appelé, improprement, "interprétation géologique des photographies" ; en fait, il s'agit d'une véritable cartographie qui ne nécessite de celui qui l'exécute qu'une bonne vue stéréoscopique et une aptitude réelle du dessin. Mais ce traitement rencontre les mêmes problèmes que ceux que soulève l'établissement d'une carte topographique proprement dite : c'est une représentation conventionnelle qui pose les mêmes problèmes de sélection des détails à cartographier, de figuration, métrique ou symbolique, de ces détails puis de schématisation progressive des éléments cartographiés en fonction des réductions successives auxquelles vont être soumis les décalques des photographies.

A première vue, il semblerait que le meilleur schéma cartographique serait celui qui se rapprocherait le plus d'une carte topographique normale (réseau hydrographique, voies de communication, limites contrastées de la végétation, courbes de niveau ou, à défaut, courbes de formes du terrain).

Cependant, comme le rappelait De Dapper (1985), les géomorphologues ont développé d'autres méthodes de représentations du relief, méthodes très fouillées mais qui restent d'une lecture un peu plus

difficile pour ceux qui ont l'habitude d'utiliser des cartes en courbes de niveau.

Il faut bien constater que chaque géologue a tendance à dresser des schémas cartographiques en fonction de son expérience personnelle du terrain ou d'après ses préoccupations immédiates.

Le tracé de la carte géologique sera dessiné sur un fond topographique correct, ce qui nécessite d'inévitables travaux de restitution et les tracés de la carte seront établis à l'aide des photographies aériennes en se basant sur les principes de la géomorphologie. C'est le véritable travail d'interprétation géologique.

Desjardins (1950) a écrit que pour faire un bon interpréteur, il fallait posséder une intelligence légèrement supérieure à la moyenne, posséder une bonne aptitude au dessin et posséder des connaissances aussi étendues que possible dans des domaines aussi variés que la géographie, la géologie, la géomorphologie, la phytogéographie, la pédologie, etc...

Il est clair, qu'un géologue débutant est mal préparé à faire de l'interprétation géologique, évident aussi qu'un géologue chevronné n'est pas qualifié pour délimiter des formations végétales, ni préparé pour détecter les camouflages de l'ennemi sur des photographies prises en temps de guerre.

L'interprétation géologique suppose une connaissance approfondie de la géomorphologie et ce n'est pas sans raisons que de Bethune⁶ proposait de la rebaptiser l'"aérophoto-géomorphologie".

L'exposé qui précède permet de constater que les photographies aériennes restent l'outil indispensable pour l'établissement d'une carte géologique comportant la délimitation des principales formations géologiques et l'indication des unités structurales essentielles du soubassement rocheux. Un tel document répond aux besoins des utilisateurs traditionnels des cartes géologiques à grande échelle. Il est probable que les pays qui disposent d'une bonne couverture photographique aérienne dont l'exploitation systématique est encore loin d'être épuisée, ne seront pas pressés de se lancer dans le traitement des images satellitaires qui restent très coûteuses, nécessitent un appareillage informatique, onéreux et vite dépassé, et dont on ne sait trop s'il faut en confier le maniement, à des géologues, à des informaticiens ou à des équipes pluridisciplinaires. L'exemple du Shaba que nous avons évoqué comme celui de la Belgique (Vandenven, 1977) ne paraissent pas susceptibles de déclencher l'enthousiasme des géologues comme

⁵ Si une telle couverture photographique n'existait pas, il faudrait la faire réaliser par priorité. Une couverture aérographique régulière est un élément essentiel de l'équipement de base d'un pays : c'est à partir de ces photographies que l'on pourra établir, chaque fois que ce sera nécessaire, des cartes topographiques restituées à des échelles adaptées au stade de développement que vont connaître les différentes régions du pays. Il vaut mieux financer la couverture aérographique d'un pays en voie de développement que de le gratifier d'une carte géologique tirée d'images satellitaires et basée sur des modèles géologiques qui risquent d'être périmés avant 25 ans.

⁶ terme proposé par P. de Bethune lors d'une réunion de contact des utilisateurs de photographies aériennes, tenue le 13 novembre 1963 à la Fondation Universitaire de Belgique, à l'initiative de la Société belge de Photogrammétrie

le font les images satellitaires de l'Anti-Atlas ou des Monts Zagros en Iran.

BIBLIOGRAPHIE

- DE DAPPER, M., 1981 - Geomorfologische studie van het plateaucomplex rond Kolwezi (Shaba, Zaïre). *Verh. Kon. Acad. Wet., Lett. Sch. K. België, Kl. Wet.*, 43, 203.
- DESJARDINS, L., 1950 - Techniques in Photogeology. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bulletin*, 37/12: 2284-2317.
- DUMONT, P., 1950 - Les levés aériens au Katanga. *C.R Congr. Scient. Elisabethville*, II/1: 213-222.
- GERARDS, J. & LADMIRANT, H., 1960 - Les applications de la Photographie aérienne à la Géologie. *Bull. Soc. belge PhotoGrammérie*, 62.
- JORALEMON, P., 1975 - The Ore Finders. *Bull. Soc. Mining Engineers*, 32-35.
- MOHR, P.A., 1974 - Mapping of the major structures of the African Rift System. *Smith. Astr. Observ., Sp. Report*, 361: 11 & 13.
- ROWAN, L.C., WETLAUFER, P.H., GOETH, A.F.H., BILLINGSLEY, F.C., STEWART, J.H., 1974 - Discrimination of Rock Types and detection of hydrothermally altered areas in South-Central Nevada by the use of computer-enhanced ERTS images. *Geol. Survey Prof. Paper*, 883, 35 p.
- SCANVIC, Y., 1983 - Utilisation de la Télédétection dans les Sciences de la Terre. *B.R.G.M., Manuels & Méthodes*, 7, 159 p.
- THONNARD, R.L.G., 1954 - Utilisation de la photographie aérienne nadirale en Géologie. *Bull. Soc. belge Géol.*, 63/2: 159-188.
- VANDENVEN, G., 1977 - Les Ardennes belges vues par le satellite ERTS-1. *Bull. Soc. belge Géol.*, 86: 51-56.
- VILJOEN, R.P., VILJOEN, M.J., GROOTENBOER, J. & LONGSHAW, T.G., 1975 - ERTS-1 Imagery : an appraisal of applications in geology and mineral exploration. *Miner. Sci. Eng.*, 7/2: 132-168.
- WOODTLI, R., 1954 - Introduction à la Photogéologie. *Bull. Agric. Congo belge*, 65/6: 1429-1472.

Manuscrit reçu le 15 septembre 1989 et accepté pour publication le 17 avril 1990.