

## ***La réflectance des végétaux***

### Variations et évolution annuelle

#### INTRODUCTION

De nombreux travaux ont pour objet d'évaluer indirectement la productivité des végétaux à partir de mesures radiométriques obtenues soit au sol, soit par des satellites d'observation du globe, soit encore, plus fréquemment, en combinant ces 2 sources d'informations. L'analyse des résultats se heurte souvent à des difficultés pour corrélérer les données de la télédétection et les biomasses végétales, et les corrélations proposées par les divers auteurs sont toujours différentes. Ces faits nous ont conduit à réaliser des mesures aériennes de réflectance à partir d'un petit avion volant à basse altitude ; le terrain concerné (Kenya et Sud éthiopien) a été choisi en fonction de la diversité de ses paysages végétaux qui vont de la forêt montagnarde au désert, avec des gradients accusés liés à la topographie.

#### INDICE DE VÉGÉTATION

Il est nécessaire de rappeler que le pourcentage de lumière solaire réfléchi par un objet varie selon les diverses longueurs d'ondes lumineuses. La matière de l'objet, sa couleur, sa structure et bien d'autres facteurs interviennent pour déterminer les caractéristiques de son absorption lumineuse ; on appelle généralement «signature spectrale» la courbe d'absorption qui correspond à chaque objet. La figure 1 présente une telle courbe pour les plantes vertes ; on remarque qu'il s'agit d'une surface du fait de la diversité des végétaux ; néanmoins, la lumière est toujours plus absorbée dans les radiations perçues comme rouges (R), et beaucoup moins pour la lumière qui appartient au proche infrarouge (IR), en limite des radiations perçues par l'oeil.

#### **Bandes spectrales utilisées pour les mesures sur végétation**

En raison de la signature spectrale des plantes, les mesures sur la végétation considèrent 2 bandes de radiations qui correspondent au minimum et au maximum d'absorption. On a figuré sur le même croquis (fig. 1) les canaux de 3 radiomètres satellitaires usuels : *Multi-Spectral-Scanner* (MSS), *Thematic Mapper* (TM) et *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR).

Étant donné que les mesures de radiations sont fortement tributaires de la quantité de lumière incidente qui atteint l'objet contrôlé, il est usuel d'éliminer cette influence en combinant les bandes infrarouges et rouges sous forme de rapport simple (IR/R) ou en une expression plus complexe. Une combinaison particulièrement adaptée à l'étude des plantes est l'indice de végétation (*Normalized Difference Vegetation Index* ou NDVI) qui est le rapport de la différence IR - R à la somme IR + R.

Lorsque les bandes sont assez voisines, cet indice de végétation obtenu à partir de 2 systèmes différents (par exemple radiomètres TM et MSS) demeure assez comparable pour un mélange usuel de sol et de plantes et la mesure de petites variations d'indice est perçue de façon presque identique. Avec un radiomètre qui disposait de 4 canaux, mesures simultanées et enregistrement, on a pu contrôler expérimentalement que :

$$\text{indice MSS} = 0,999 \text{ indice TM} - 0,029$$

Cette propriété se révèle intéressante car un petit décalage accidentel dans les bandes utilisées (filtre défectueux, vieillissement du matériel ou autres causes liées à l'alimentation électrique) n'affecte pas beaucoup la différence entre 2 niveaux de l'indice et celui-ci conserve ainsi une bonne valeur relative.

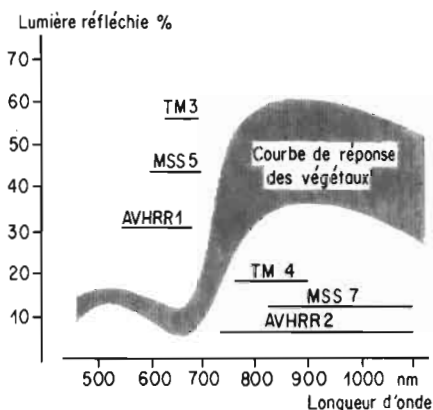


FIGURE 1. - Signature spectrale des plantes.

### Indice d'un mélange d'objets

Si l'on excepte l'utilisation au sol d'équipement à très petit champ angulaire, le champ du radiomètre (surface sur laquelle sont effectuées les mesures) comprend le plus souvent un mélange de plantes vertes, de sol nu ou de roc, de plantes sèches, de litière ou de parties non chlorophylliennes des végétaux. Les surfaces mesurées par satellite peuvent inclure, en outre, des plans d'eau ou n'importe quel autre élément fortuit du globe terrestre.

Si l'on s'en tient aux 3 composantes les plus constantes, chacune peut être présentée dans un même système de coordonnées en fonction de ses réflectances dans le rouge et dans l'infrarouge. C'est ce que montre la figure 2 où les droites représentatives d'un certain nombre d'indices remplacent les valeurs mesurées le long de chaque axe, lesquelles n'ont aucune importance ; il est à noter cependant, pour les points N (sol nu), S (plantes sèches) et V (plantes vertes) que des mesures réelles sont indiquées et non pas une situation théorique.

Le point N, qui correspond donc à un type de sol déterminé, serait situé différemment pour un autre sol, tout en restant voisin de la droite d'indices 0,2. De même, les points S et V, obtenus avec des végétaux différents, garderaient le même ordre de grandeur de leurs indices, soit 0,3 à 0,4 pour la litière et plus de 0,8 pour le matériel vert. En théorie, le point représentatif de tout mélange de végétaux et de ce sol sera inclus dans le triangle NSV. Si on remplaçait le sol par de l'eau, dont l'indice est négatif, on obtiendrait un triangle différent, et le point qui montre un mélange de 4 composants appartiendrait au quadrilatère établi à partir de ces 4 éléments.

Si la brillance, ou la somme IR + R qui lui est liée dans notre cas, était la même pour tous les objets, l'indice d'un mélange des éléments serait obtenu comme la

somme des indices des divers composants, pondérés par leurs proportions respectives. En réalité, l'influence des plantes vertes sur l'indice est supérieure à ce qu'on pourrait prévoir à partir d'une relation linéaire. Comme les indices des points N et S sont peu différents, la présence de matériel vert constitue le facteur essentiel d'établissement de l'indice. En pratique, et si l'on excepte les couverts végétaux très réduits ou très élevés, un incrément de l'indice traduira donc une augmentation quasi proportionnelle de la quantité de végétation verte.

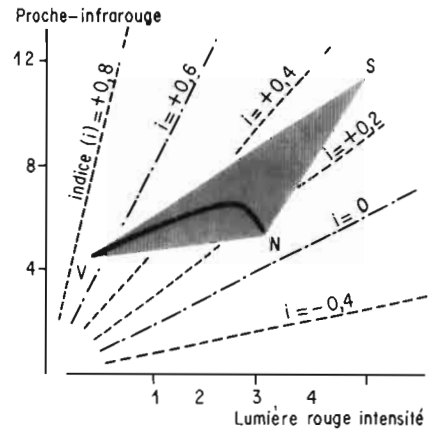


FIGURE 2. - Le triangle de réflectance.

En outre, un mélange exclusif de sol et de plantes vertes semble très rare dans le champ des radiomètres satellitaires, et l'expérience montre que le triangle est déformé en une surface hastée. La plupart des situations observables dans les zones arides s'inscrivent dans la partie droite de cette flèche avec un pourcentage modeste de matériel vert. À ce propos, on peut remarquer que l'impression visuelle de couleur donne une bonne représentation de l'indice qui est élevé pour toute surface verte, même non végétale, et faible pour les autres teintes (jaune, noir, rouge, etc.)

À ce stade, on peut conclure que l'indice est bien lié à l'abondance de plantes vertes, donc photosynthétiquement actives ; on peut donc envisager de l'utiliser pour estimer la production végétale et cette dernière devrait être d'autant plus élevée que l'indice est plus fort.

## ÉVOLUTION ANNUELLE DE L'INDICE

2 approches sont possibles pour tenter de relier l'indice à la production végétale. La première consiste à choisir une date au cours de la saison de croissance des plantes et à subdiviser l'espace étudié en fonction des différentes valeurs d'indice pour obtenir une représentation de l'intensité du couvert végétal, puis de calibrer les classes de couvert en termes de production végétale ou de biomasse en fin de saison de croissance. La procédure suppose implicitement que la nature des peuplements végétaux soit connue et que chaque communauté soit étudiée à part sur le terrain. La seconde possibilité consiste à suivre l'évolution de l'indice dans le temps et à combiner l'intensité et la durée de la croissance, en considérant que les modalités d'évolution de l'indice sont une indication suffisante du type de végétation.

## Suivi de l'indice par Noaa

Le satellite météorologique Noaa observe la totalité du globe en 14 orbites chaque jour. Un certain nombre de contraintes s'opposent pourtant à l'utilisation quotidienne de toutes les mesures : présence de nuages au-dessous desquels les mesures sont impossibles, grand angle de balayage du radiomètre, qui conduit à écarter les mesures par trop obliques, entre autres. TUCKER *et al.* (1985) ont choisi d'établir des images composites à partir de toutes les mesures réalisées au cours d'une période de trois semaines de façon à assurer une bonne couverture du terrain.

Les pixels couverts par des formations nuageuses sont éliminés par un masque thermique, en imposant une limite inférieure aux températures mesurées dans l'infrarouge moyen. Pour les autres, on sélectionne la plus haute valeur d'indice obtenue dans les meilleures conditions. Malgré des efforts pour améliorer le repérage géographique des pixels, la superposition des images demeure un point faible du procédé, qui est acceptable seulement pour des groupes de pixels dans une zone relativement homogène et qui entraîne en principe une légère surestimation de l'indice moyen.

Le procédé permet néanmoins de suivre un même groupe de pixels au cours de l'année. La figure 3 (TUCKER *et al.*, 1985) montre l'évolution de l'indice de surfaces respectivement situées en forêt équatoriale (près de Yangambi, Zaïre), en savane soudanienne (dans le Soudan), au Sahel (région de Niono, Mali) et dans le désert namibien.

L'étagement des courbes d'indice est certainement un bon reflet des végétations concernées ; de toujours vert, en forêt primaire qui bénéficie de 2 m de précipitations bien réparties, à toujours nu, dans le désert où la pluviométrie annuelle est de 15 mm. En région soudanienne, on observe une phase de croissance végétale intense pendant les six mois de saison humide, tandis que la productivité au Sahel, réduite, est aussi limitée dans le temps.

Au-delà de cet agrément général entre l'évolution des indices et les formations végétales, le détail des courbes pose un certain nombre de questions. Ainsi, pourquoi le désert est-il aussi variable ? Les indices enregistrés varient de - 0,04 à + 0,01 ; ils sont à la fois trop irréguliers et trop faibles, puisqu'on a remarqué que les sols nus ont en principe un indice supérieur à 0,10 ou à 0,15.

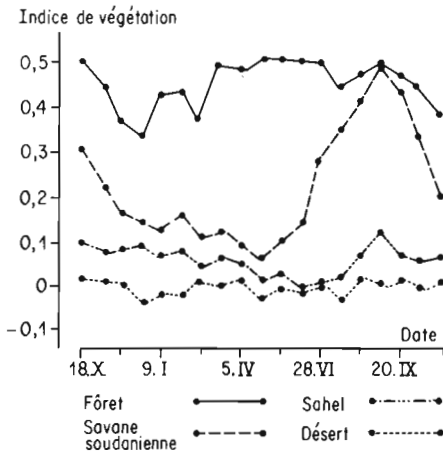


FIGURE 3. - Évolution annuelle de l'indice (TUCKER *et al.*, 1985).

Les indices sur forêt primaire (0,35 à 0,52) semblent aussi faibles pour un couvert végétal très dense. Même si la variation annuelle exprime une réalité biologique, on voit mal pourquoi deux *minima* de l'indice encadrent le mois moins humide de janvier, pendant lequel l'indice est plus élevé. Il n'apparaît pas non plus d'explication logique pour justifier le grand écart entre les indices de début et de fin de période.

Les différences entre les indices pour la savane soudanienne et ceux pour le Sahel sont peut-être liées à l'abondance d'arbres et d'arbustes, mais les feuilles des ligneux se développent généralement au tout début des pluies, période caractérisée ici par un indice minimal. En outre, ces feuilles persistent jusqu'à la saison sèche, alors que l'indice diminue ici rapidement dès le mois de septembre, comme s'il ne reflétait que l'évolution de la strate herbacée et son jaunissement.

Il est donc difficile de lier rigoureusement l'évolution des indices à celle du couvert des plantes vertes ou des masses végétales. Cet indice de végétation pourrait mettre en jeu d'autres paramètres que ceux de l'activité photosynthétique ; on peut imaginer l'influence éventuelle de facteurs qualitatifs inconnus ou des interférences sans rapport avec la végétation. En outre, l'évolution de la réflectance mesurée au sol sur une surface permanente ne montre pas les variations observées ici ; on assiste plutôt à une montée brutale de l'indice au cours des premières semaines de croissance des plantes, puis à un palier plus ou moins long, suivi d'une diminution lente pour les espèces pérennes ou d'une chute plus rapide chez les plantes annuelles.

## Mesure des indices de végétation par avion

L'objet des mesures effectuées de 1984 à 1986 était de simuler l'acquisition de données satellitaires de réflectance en échantillonnant un certain nombre de surfaces, tout en conservant une possibilité d'observer et de photographier le terrain au moment même des mesures, et en collectant toute information annexe qui pouvait sembler utile à leur interprétation.

Dans ce dessein, on a équipé un avion de tourisme d'un miroir extérieur incliné à 45° pour obtenir des mesures verticales avec un matériel fixé horizontalement ; mesures et observations ou photographies se faisaient par l'intermédiaire de ce miroir. Le radiomètre disposait d'un système programmable de déclenchement automatique de mesures simultanées des radiations dans plusieurs bandes, de stockage des résultats et de calcul de l'indice avec affichage des résultats en temps réel. Ainsi l'opérateur pouvait-il suivre le déroulement des mesures et constater sans délai les anomalies éventuelles ; il avait alors la possibilité d'en rechercher immédiatement les causes.

À la suite d'essais préalables, il est apparu qu'une altitude de 1 200 pieds au-dessus du sol permettait une bonne observation visuelle, un champ radiométrique (taille de l'échantillon) convenable, de l'ordre de 1,3 ha, et des conditions de navigation précises. En outre, la navigation était assistée par un ordinateur de bord et les mesures pouvaient être obtenues, si nécessaire, à un rythme supérieur à 1 par seconde. La périodicité la plus usuelle était cependant de 20 secondes, soit en moyenne 1 mesure par kilomètre ou encore une densité d'échantillonnage linéaire de 12 % environ.

Les essais ont également montré que, dans ces conditions, les résultats obtenus par répétition des mêmes lignes de vol demeuraient constants pour la moyenne et l'écart-type de plus de 60 à 80 mesures (selon la variabilité du milieu) ; de même, les fluctuations le long d'une ligne de vol étaient correctement décrites sous réserve de grouper les mesures par 5 au moins pour éviter des écarts localisés trop élevés. En fait, les simulations ont été tentées avec une large marge de sécurité le long de 4 parcours, de

150 km chacun, survolés périodiquement au-dessus de la province de Sidamo (Éthiopie), dont le milieu naturel faisait l'objet de nombreux contrôles au sol, ou encore le long de trajets de près de 2 000 km (mais survolés plus épisodiquement) sur le Kenya. En Éthiopie, chaque parcours était donc finalement décrit, pour 150 à 300 mesures, à partir de 30 points qui constituaient le «profil radiométrique» du trajet à un temps donné.

### Résultats obtenus au cours de l'année

L'évolution des indices de végétation au cours de l'année peut être illustrée à partir de celle des profils radiométriques qui décrit les pentes depuis les hauts plateaux au nord (2 000 m d'altitude) jusqu'à la zone pastorale 500 m plus bas vers le sud. Cette région bénéficie de pluies faiblement bimodales du 15 mars au 15 octobre ; le total annuel varie de 500 à 800 mm en moyenne selon l'altitude. Les paysages le long de ce parcours sont plus diversifiés que dans les autres cas (zone de cultures en montagne, parcours plus arides des confins kenyans et désert de Chalbi).

Les enregistrements réalisés en 1985 sont présentés pour 4 périodes caractéristiques (fig. 4). L'indice moyen mesuré le long des 150 km est de 0,06 pour janvier, cœur de la saison sèche. Des taches de verdure n'existent qu'en haut de pente où on trouve quelques cas de boisement sempervirent ; les petits pics d'indice observés plus au sud correspondent à des pitons isolés ou à des boisements ripicoles. Les plus faibles indices sont obtenus sur des parcours érodés et surpâturés ; le profil dans son ensemble constitue une excellente image des différents milieux et les variations s'expliquent bien par les détails de la topographie ou de l'utilisation du terrain.

L'indice moyen en début avril est de 0,49 ; la valeur est atteinte après deux à trois semaines de développement végétal, alors que le couvert des plantes est encore bien inférieur au maximum saisonnier ; ceci confirme les mesures au sol. La tendance générale le long du transect est encore une diminution de l'indice vers le sud, mais l'augmentation d'indice en altitude est plus faible qu'en bas de pente.

Plusieurs explications peuvent être envisagées pour cette relative stabilité de l'indice au nord ; par exemple, les boisements ont été peu modifiés et quelques défrichements ont été réalisés (causes biologiques) ou bien on se rapproche du niveau de saturation de l'indice qui cesse de refléter linéairement les surfaces vertes (raison technique).

En octobre, où l'indice moyen est de 0,27, les pluies persistent au nord et ont cessé au sud. Le profil radiométrique traduit ce phénomène par une pente très marquée, et

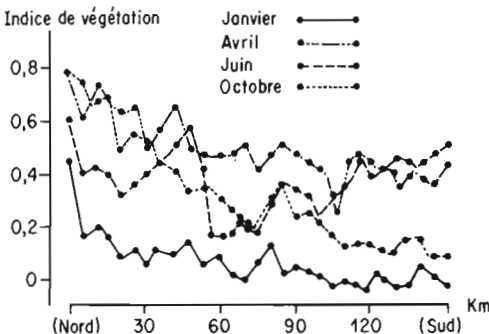


FIGURE 4. - Évolution de l'indice sur transect aérien.

on note déjà dans la fraction au sud les mêmes détails topographiques qu'en saison sèche. Le profil de janvier 1986, qui n'a pas été figuré, est très comparable à celui de janvier 1985. La principale différence entre les résultats satellitaires et les résultats aériens tient à ce que l'avion attribue à l'indice une décroissance plus graduelle que celle enregistrée par satellite.

Le profil de juin, qui n'a pas encore été commenté, se singularise du fait qu'il ne montre pas la tendance habituelle du nord au sud. En outre, la végétation à cette date est encore totalement verte et ne justifie ni une diminution d'indice, dont la moyenne s'établit alors à 0,36, ni les écarts observés par rapport à la courbe d'avril pour certaines parties du trajet. Au cours des périodes de vol correspondantes, on note depuis l'avion une «mauvaise visibilité», bien qu'il ne pleuve pas et que le ciel ne soit que partiellement nuageux.

Le même jour, des mesures réalisées sur un lac donnent un indice égal à - 0,44, alors que les résultats habituels varient de - 0,18 à - 0,24 pour la même surface utilisée comme référence au départ des vols. Il faut donc admettre que la transmission des radiations lumineuses à travers l'atmosphère a pu être profondément affectée sur plusieurs parties du trajet perçues comme brumeuses, tout le paysage paraissant bleuté et flou.

## La Vague verte

Les termes *Green Wave* ont été proposés par Rouse *et al.* (1974) pour décrire l'évolution de l'indice de végétation, en considérant non plus les variations d'un pixel, mais celles d'un groupe de pixels. Les résultats précédemment présentés peuvent également servir à illustrer ce phénomène (fig. 5).

Pour établir cette figure, les indices mesurés ont été distribués en classes de 0,1 unité d'indice entre les valeurs extrêmes - 0,15 et + 0,85 observées le long des divers transects éthiopiens. À chaque date correspond une courbe de fréquence des 10 classes d'indice ainsi créées. Les distributions obtenues à différentes dates sont caractéristiques d'un terrain donné car elles expriment à la fois l'hétérogénéité du milieu et sa variabilité dans le temps. Dans notre cas, par exemple, le trajet sur le désert est à la fois le plus homogène lorsque tout est sec et le plus diversifié à la suite de pluies occasionnelles ; à l'opposé, les zones cultivées sont assez hétérogènes tout au long de l'année, avec des différences saisonnières moins marquées.

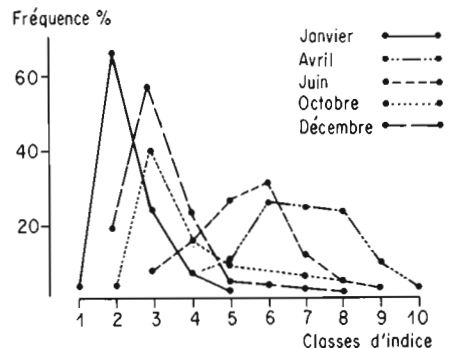


FIGURE 5. - *La Vague verte.*

Sur le transect retenu en exemple, le développement des plantes en avril est caractérisé par une distribution des fréquences presque normale et les indices se concentrent sur les 3 classes qui encadrent la valeur 0,5 (centre de la classe 7). Il n'existe pas de faibles valeurs de l'indice pour la période, et le radiomètre enregistre, à plusieurs reprises, des surfaces totalement vertes sur des zones boisées qui possèdent par ailleurs un tapis graminéen bien développé.

Dès le mois de juin semble s'amorcer la Vague verte qui se gonfle : la courbe de fréquence devient plus aiguë, même si le nombre de classes est le même. On sait que les mesures de juin sont vraisemblablement en partie des sous-estimations ; cependant celles-ci sont en principe distribuées sur toutes les classes et le pic de fréquences observé devrait être conservé si une fraction des mesures change de classe. D'autre part, le mouvement se poursuit en octobre où il ne subsiste que peu de valeurs supérieures à 0,30, et où le mode de la courbe devient très net.

Dès octobre, et plus encore par la suite, la distribution, en outre, est très dissymétrique avec une médiane bien inférieure à la moyenne. Beaucoup de surfaces vertes reliques (boisement, bas-fonds, etc.) vont subsister pendant deux mois après l'arrêt des pluies. Au cœur de la saison sèche, presque toutes les valeurs sont proches de zéro et la crête de la Vague verte est au plus haut ; il est probable que le retour à la situation d'avril se fasse selon le schéma inverse, avec un brusque déferlement de cette retombee. Un bon suivi nécessiterait sans doute un contrôle du terrain chaque deux ou trois jours, ce qui n'a pas été réalisé.

La brutalité de l'établissement des indices maximaux de végétation permet de penser que le stade pendant lequel ce maximum est mesurable ne dure qu'un temps assez court et qu'il échappera le plus souvent à la détection. Par suite, les essais de corrélations entre indice maximal de végétation et productivité seront très approximatifs ; de même, tout calcul qui repose sur une seule date d'acquisition de la réflectance (et ceci quelle que soit la définition ou la précision des appareils de mesure) est incompatible avec les délais nécessaires pour réaliser des mesures de biomasse végétale au sol.

En fait, une telle procédure met en parallèle 2 situations évolutives qui ne sont connues chacune que par une photographie instantanée assez floue. Dans le cas traité ici, il est apparu que la courbe de fréquence des indices en octobre était la meilleure indication, encore que peu satisfaisante, de la répartition des biomasses végétales en fin de saison de croissance ; cependant, il n'existe pas de preuve du caractère généralisable de ce résultat qui est certainement faux pour des territoires moins boisés, même avec un climat analogue. Les corrélations entre végétation et valeurs radiométriques obtenues le long de cet itinéraire n'étaient pas extrapolables aux autres transects du Sud éthiopien.

## TRANSMISSIVITÉ ATMOSPHÉRIQUE

On peut facilement contrôler l'absorption d'une part du rayonnement solaire par les nuages, même diffus, en effectuant des mesures radiométriques en direction du ciel sous un verre dépoli horizontal et avec une optique d'angle plat. On constate que les radiations sont plus ou moins réduites pour les diverses bandes lumineuses en cas de couvert nuageux, et qu'un indice mesuré par temps couvert sera sous-estimé. La lumière qui est captée par un radiomètre de satellite subit 2 fois l'influence de l'atmosphère, d'où des mesures d'indice plus faibles qu'au sol, même en s'efforçant de réduire les distorsions dues à l'atmosphère par composition des images et choix des valeurs maximales pour chaque pixel (*cf. supra*).



## Corrélations entre mesures à basse et à haute altitudes

En principe, la mesure des indices de végétation par avion devrait éliminer près de la moitié des distorsions dues à l'opacité atmosphérique. Associés à nos activités, des scientifiques de la *National Aeronautics and Space Administration* (Nasa) (groupe *Global Inventory, Modelling and Monitoring Studies* du Centre spatial Goddard, États-Unis) nous ont procuré tout au long de la période d'étude, et sous forme digitale, les mesures obtenues par le satellite Noaa sur les mêmes terrains et aux mêmes dates que nous. Il devenait donc possible de chercher à corrélérer les indices mesurés par avion et par satellite.

La figure 6 est un exemple de résultats obtenus dans ce domaine sur les 4 transects du Sud éthiopien. Pour une date donnée, les mesures aériennes sont bien corrélées aux acquisitions satellitaires ; on trouve même une corrélation significative ( $r = 0,89$ ) pour l'ensemble des résultats toutes dates confondues, bien que les mesures aériennes, interrompues en avril pour cause de mauvais temps, soient à la fois incomplètes et peu satisfaisantes. Les corrélations ont évidemment été établies entre les moyennes des mesures aériennes pour chaque transect (soit 150 valeurs) et les moyennes des indices des pixels le long d'une bande qui couvre le transect (également 150 valeurs), car les pixels Noaa ne sont pas repérables au sol avec une précision supérieure à 2 pixels.

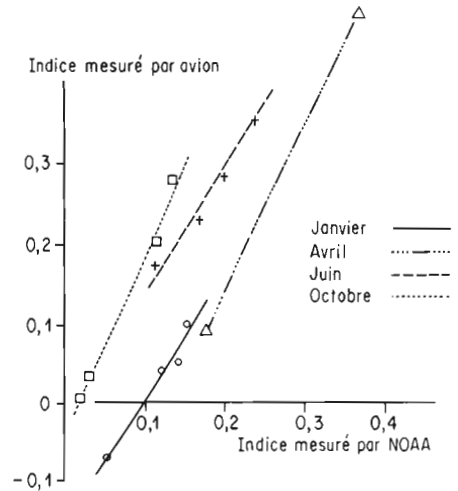


FIGURE 6. - Corrélation entre indices mesurés par avion et par Noaa.

Cependant, les droites de régression établies pour les diverses dates diffèrent sensiblement les unes des autres :

- janvier, indice (air) = 1,57, indice (satellite) - 0,15 ;
- avril, indice (air) = 1,74, indice (satellite) - 0,24 ;
- juin, indice (air) = 1,51, indice (satellite) - 0,02 ;
- octobre, indice (air) = 2,15, indice (satellite) - 0,05 ;

Utiliser la relation moyenne : indice (air) = 1,52, indice (satellite) - 0,06, conduit à des erreurs qui peuvent dépasser 0,1 point d'indice dans certaines situations ; une relation entre les 2 mesures n'est valable que pour une date. Le résultat est important, car il confirme le fait qu'une relation entre végétation et indice est dépendante du moment où elle a été obtenue.

D'autres relations entre mesures d'indice par avion et par satellite ont pu être établies par ailleurs le long des transects beaucoup plus longs au-dessus du Kenya, entre Nairobi et Moyale (700 km) ; entre Nairobi et Lodwar (600 km) ; ainsi qu'entre Kisumu, sur les rives du lac Victoria, et Malindi, sur la côte de l'océan Indien (650 km). Les régressions obtenues en octobre 1985 sont respectivement :

$$Y = 2,62 x - 0,19$$

$$Y = 1,94 x - 0,21$$

$$Y = 1,42 x - 0,09$$

Dans tous les cas, les valeurs de r sont supérieures à 0,75. Comme tous les vols ont eu lieu en moins d'une semaine, il apparaît que les régressions obtenues ont seulement une valeur relativement locale et, en aucun cas, elles ne peuvent être extrapolées à d'autres surfaces que celles où les mesures ont été réalisées.

De nouveau, les résultats obtenus par temps clair sont les meilleurs. C'était le cas au Kenya dans le sud du pays, et la pente de la droite de régression entre les 2 types de mesures pourrait être une bonne indication de la valeur des résultats : plus les mesures sont comparables en valeur absolue (pente faible), moins les mesures ont été biaisées par l'atmosphère. Le résultat est extrapolable à l'évaluation des indices mesurés au sol sous réserve d'échantillonnage représentatif.

Or, la représentativité de l'échantillonnage au sol demande un grand nombre de mesures ; si les résultats sont mal extrapolables, l'effort nécessaire pour calibrer une scène entière de satellite devient hors de proportions avec les bénéfices escomptés et l'utilisation de l'imagerie n'apporte qu'une confirmation accessoire de la valeur du travail effectué sur le terrain.

## Distorsions atmosphériques

Des diverses observations précédentes, il résulte 2 faits : d'une part l'atmosphère abaisse la valeur des indices, d'autre part elle réduit les écarts entre ces différents indices. Un radiomètre à bord du satellite est moins discriminant qu'un appareil utilisé par avion ou au sol, alors que la variabilité de l'opacité atmosphérique rend encore plus imprécises les valeurs enregistrées.

Ainsi, les indices mesurés par satellite sur les terres exondées varient le plus souvent de - 0,05 à + 0,55. On peut considérer par suite qu'un accroissement de 10 % du matériel végétal vert présent au sol augmente l'indice d'une valeur inférieure à 0,08 alors que les indices mesurés à travers une atmosphère opaque peuvent être réduits de plus de 0,10. Il apparaît également que les interférences atmosphériques ne sont pas seulement le fait des nuages, mais aussi de toute une gamme d'aérosols, terme usuel qui regroupe poussières, brumes et autres fumées. L'utilisation de transmissomètres au sol permet seule de détecter les aérosols, par la mesure de l'intensité de la lumière incidente sous l'atmosphère. Il n'existe pas encore de réseau constitué qui fournisse des valeurs de transmissométrie.

L'abaissement de l'indice est logiquement accru lorsque la mesure radiométrique est oblique. HOLBEN et FRASER (1984) considèrent que les aérosols peuvent diminuer de près de 0,4 unité l'indice d'une surface d'eau libre si l'angle de mesure atteint 48°, et

de 0,2 unité l'indice d'une végétation de densité moyenne dans les mêmes conditions. En outre, les sols sont très variables : les valeurs mesurées verticalement par avion sur divers sols nus s'étagent de - 0,1 pour des sables blancs à + 0,4 sur des laves récentes.

L'atmosphère est souvent trouble pendant les intersaisons, c'est-à-dire au moment de l'arrivée des pluies et en début de saison sèche ainsi que lors de la période comprise entre les 2 pics de pluviosité pour les régimes bimodaux. Les indices mesurés dans ces 3 cas sont moins fiables et correspondent à la plupart des anomalies constatées ; on s'est parfois efforcé de réduire les variations d'indice dues à l'atmosphère en rétablissant des courbes dans le temps à partir des seuils maximaux enregistrés pendant les périodes de bonne transmissivité ; le procédé n'est qu'un pis-aller qui, outre son manque de rigueur scientifique, ne peut pas garantir une présentation correcte des faits.

Aucune procédure, parmi celles qui ont été tentées, ne permet donc d'éliminer les distorsions atmosphériques avec sécurité. L'examen des distributions de fréquences des classes d'indices serait une meilleure base pour déterminer, à l'intérieur de séries multi-temporelles, les mesures douteuses qui ne doivent pas être prises en compte. Pour reprendre le cas de l'Éthiopie méridionale, on pouvait constater, par exemple, que les indices satellitaires de saison sèche ne comprennent que peu de valeurs négatives. Or, celles-ci représentent 3 % des mesures en avril, 1 % en mai, 3 % en juin, 1 % en août et 4 % en octobre ; les résultats, inacceptables pour au moins 3 mois de la saison des pluies, pourraient même être médiocres tout au long de la saison de croissance des plantes.

## Comparaisons entre plusieurs années de mesures

Les données digitales Noaa ont été obtenues pour le Sud éthiopien (3 000 pixels) en 1984 et en 1985, mais un mauvais fonctionnement du satellite n'a pas permis de couvrir la période d'avril à juin 1985. Il reste possible de comparer les 2 saisons sèches, par exemple entre janvier et mars, et les fins de pluies, sachant que l'année 1985 a été beaucoup plus humide que l'année précédente sur la zone concernée.

Les résultats ont été tout à fait similaires pour les saisons les plus sèches ; en outre, ils n'ont été différents en saison des pluies que sur le quart de la zone, où l'on observe à la fois concordance entre les mesures aériennes et les mesures AVHRR, et des indices systématiquement plus élevés en 1985. La différence entre les années, pourtant très réelle, n'a pas été perçue sur le désert de Chalbi ; dans les secteurs humides du nord de la surface étudiée, les indices Noaa de 1985 sont supérieurs à ceux de 1984 en juillet et en août, mais l'écart s'inverse pour les mois de septembre et d'octobre.

Grâce aux contrôles aériens, on sait que les indices Noaa obtenus en juillet ont été sous-estimés pour les 2 années. L'estimation par satellite, bonne en octobre 1984, est très mauvaise en 1985 parce que les pluies n'ont pas encore cessé. Finalement, les différences entre les années 1984 et 1985, ou l'absence de différences, peuvent être expliquées par une bonne connaissance du terrain et par les observations annexes sur le climat. Ces conditions seront rarement remplies pour de vastes surfaces où l'on ne dispose au mieux que de rares postes météorologiques et de quelques zones test supposées représentatives (le fait qu'elles soient représentatives au cours d'une année donnée ne signifie pas qu'elles le resteront pour les années suivantes).

La durée annuelle pendant laquelle l'indice est plus élevé qu'au cours de la saison sèche pourrait être une mesure de la croissance végétale plus correcte que l'augmentation des indices. Cependant, le démarrage de la végétation n'est repérable qu'à une ou deux semaines près ; la fin de la production végétale est encore plus imprécise : dans tous les cas, les indices de végétation mesurés par satellite n'apportent que des indica-

tions approximatives sur le comportement végétal et ils devraient plutôt être retenus comme mesures semi-quantitatives.

## CONCLUSIONS

Le suivi des indices de végétation par télédétection reste un exercice particulièrement complexe en raison des nombreuses interférences susceptibles de fausser les mesures. Ces difficultés s'ajoutent aux problèmes plus habituels de constitution d'un système d'échantillonnage compatible avec l'échelle à laquelle on travaille ; surtout si on fait appel à l'imagerie puisque chaque fragment d'image devrait être corrélé de façon indépendante aux caractéristiques végétales, sans que l'on puisse extrapoler ni appliquer les résultats à une autre image.

L'usage du radiomètre au sol est plus aisé, à condition toutefois de réaliser un grand nombre de mesures dans un temps assez court pour que la qualité de la lumière incidente soit conservée ; l'automatisation des mesures est souhaitable car c'est la seule technique qui permet une vitesse d'exécution élevée. L'avion enfin est un excellent relais entre les données au sol et l'imagerie ; il assure une échelle intermédiaire avec un bon repérage sur le terrain.

Les mesures d'évolution annuelle exigent la réalisation de mesures multitemporelles ; en conséquence de ce qui précède, il est impossible d'accroître beaucoup la précision des résultats satellitaires sans aboutir à des contrôles au sol trop contraignants. En revanche, il semble que l'on puisse développer des raisonnements satisfaisants à partir des caractères de la Vague verte, c'est-à-dire des courbes successives de fréquences des valeurs d'indice de végétation. La durée de déformation de la courbe obtenue en saison sèche ainsi que la dispersion des mesures, à la fois pendant la croissance végétale et hors saison, seraient les paramètres à considérer puisqu'ils ne font appel qu'aux valeurs relatives des indices et non à des valeurs absolues qui sont généralement mal connues.

---

J.-C. BILLE : *écologue*, ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1

---

## BIBLIOGRAPHIE

- HOLBEN (B. N.) et FRASER (R. S.), 1984. - Red and near-infrared response to offnadir viewing. *Int. J. Remote Sensing* : 5-145.
- ROUSE (J. W.), HASS (R. H.), SCHELL (J. A.), DEERING (D. W.) et HARLAN (J. C.), 1974. - Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Texas A. and M. Univ., College Station.
- TUCKER (C. J.), 1979. - Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Envir.* : 8-127.
- TUCKER (C. J.), TOWNSHEND (J. R.) et GOFF (T. E.), 1985. - African land-cover classification using satellite data. *Science*, 227, n° 4685.