



HAL
open science

Les bases de la surveillance de la désertification par satellites

Richard Escadafal

► **To cite this version:**

Richard Escadafal. Les bases de la surveillance de la désertification par satellites. Science et changements planétaires / Sécheresse, 2007, 334 (3-4), pp.493-501. 10.1684/sec.2007.0095 . ird-00389729

HAL Id: ird-00389729

<https://ird.hal.science/ird-00389729>

Submitted on 29 May 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Richard Escadafal

Institut de recherche pour le développement (IRD),
UMR Centre d'études spatiales de la biosphère (Cesbio),
18, avenue Edouard Belin,
Bpi 2801,
31401 Toulouse cedex 9
France
<richard.escadafal@ird.fr>

Les bases de la surveillance de la désertification par satellites

Résumé

La surveillance environnementale des régions arides et semi-arides a placé beaucoup d'espoirs dans l'utilisation des satellites de télédétection pour observer de façon répétée et régulière les vastes surfaces concernées. Cet article introductif rappelle les principes de base de la surveillance à long terme et les données satellitaires effectivement utilisables pour le suivi de la désertification. Dans le cas du suivi détaillé, elle repose sur les longues séries d'images de télédétection optique des satellites Landsat et Spot, qui mesurent les variations de la réflexion du rayonnement solaire par les surfaces terrestres. Leur utilisation est basée sur les relations entre ces mesures et la composition des surfaces, puis l'interprétation en termes de diagnostic sur l'état du milieu. Pour pouvoir mettre en évidence les variations de la composition des surfaces, la qualité des prétraitements des séries d'images est cruciale (correction géométrique, étalonnage, conversion en réflectance au sol). Deux exemples illustrent les types d'informations de nature environnementale obtenus : suivi de l'évolution des terres de parcours sur 30 ans en Tunisie et surveillance de l'extension de l'irrigation au Maroc. Des recommandations et perspectives de recherche sont enfin discutées dans le contexte du foisonnement de nouvelles données et de l'accès accru aux moyens de traitement des données d'observation de la Terre.

Mots clés : désertification, état de surface des sols, imagerie satellitaire et géomatique, lutte contre la désertification, surveillance environnementale, télédétection, zone aride et semi-aride

Abstract

Satellite monitoring of desertification: Background overview

Environmental monitoring of arid and semi-arid regions relies highly on Earth Observation satellites to repeatedly and regularly survey these vast areas. This introductory paper reviews the basic principles of long term monitoring and available imagery. Detailed monitoring relies on long series of images taken by optical sensors from Landsat and Spot satellites. Basically, these satellites measure the variations of solar light reflected by the land surface. Their use is based on relationships established between such measurements and land surface composition. To detect changes affecting the surfaces, the quality of image processing is crucial in terms of geometric correction, radiometric intercalibration and conversion into ground reflectance. Two studies are cited which illustrate the use of change detection: 30 years' monitoring of rangelands in Tunisia, and irrigation extension in Morocco. Recommendations and perspectives are discussed in the context of the wealth of new remote sensing data and more powerful hardware and software for image processing.

Key words: arid and semiarid zone, desertification, desertification control, environmental monitoring, remote sensing, satellite imaging and geomatics, soil surface condition

Tirés à part : R. Escadafal

Les observatoires au sol sont essentiels pour collecter l'ensemble des données nécessaires à la caractérisation de l'état d'un milieu aride à un instant donné et suivre leur évolution au long terme pour établir un diagnostic, notamment en termes de désertification, comme en témoignent les articles de ce numéro spécial.

Même si les observatoires sont bien évidemment judicieusement choisis pour être représentatifs d'une région la plus large possible, la densité des réseaux d'observatoires au sol est insuffisante pour prétendre à une couverture satisfaisante de l'ensemble des situations, que ce soit au niveau d'un pays et *a fortiori* au niveau d'une grande région (ex : Maghreb, Sahel) ou d'un continent.

La possibilité d'assurer une couverture complète d'une région est à peu près uniquement réalisable à l'aide des données en provenance des satellites de télédétection, les couvertures par photographies aériennes étant trop onéreuses pour être réalisées à des fins de surveillance environnementale.

Si les observations réalisées depuis les montgolfières au siècle des Lumières sont considérées comme les premières tentatives de télédétection, ce n'est qu'au début du XX^e siècle que les premières images sont produites, par photographie depuis des ballons. Elles seront très utilisées sur le front durant la première guerre mondiale, ce qui nous rappelle bien que la télédétection tout comme la cartographie est au départ un « art militaire ». L'utilisation des satellites pour observer la Terre n'échappe pas à cette logique, mais dans cet article nous nous intéresserons uniquement aux applications aux surfaces terrestres arides, et particulièrement à la désertification (Escadafal *et al.* [1]).

Les données satellitales sur le long terme

De nombreux ouvrages et articles permettent d'aborder les bases de la télédétection spatiale [2, 3]. En se basant sur l'expérience acquise sur le suivi de milieux naturels ou d'agriculture extensive en Tunisie méridionale [4], une vision d'ensemble des notions indispensables pour comprendre l'utilisation des satellites dans les stratégies d'observation des régions arides à long terme est résumée ici.

Foisonnement des données

Les premières observations spatiales ont été faites à la fin des années soixante depuis les satellites habités, les nombreuses photographies ramenées au sol ont fait

découvrir cette vision totalement nouvelle de notre planète. Cela a donné l'impulsion à la télédétection spatiale civile qui a débuté avec les satellites de la série Landsat (*National Aeronautics and Space Administration, NASA*), dont le premier a été lancé pendant l'été 1972. Depuis, de nombreux autres ont suivi, dont les satellites français de la série SPOT qui assurent une couverture régulière de la planète depuis 1986, soit plus de 20 ans. Dans le cas de ces deux séries de satellites, leurs capteurs enregistrent des images dans le domaine optique avec une résolution au sol variant de 10 à 30 m, et donc relativement comparables à des photographies aériennes. D'autres capteurs optiques à grand champ ont été développés, couvrant une aire très large à chaque passage et permettant ainsi de survoler plus souvent les mêmes régions, mais avec une résolution de l'ordre du kilomètre (ex : NOAA-AVHRR, Spot-Végétation).

Pour détecter une plus large gamme de caractéristiques des surfaces terrestres, une grande variété de capteurs a été imaginée, particulièrement ceux de la télédétection active, où la cible est illuminée par un faisceau radar dont on mesure le rayonnement rétrodiffusé (ex : images du radar à synthèse d'ouverture du satellite européen Envisat). Ces images ont la propriété de s'affranchir des nuages, levant ainsi une des limitations rencontrées dans le domaine optique, et mesurent des paramètres peu accessibles dans ce domaine (rugosité, humidité, etc.) mais leur interprétation est plus complexe.

En sus des pays (États-Unis, France) déjà cités, des images de télédétection ont également été produites en grand nombre par l'Union soviétique puis la Russie et l'Inde notamment. Le nombre d'instruments de télédétection en orbite terrestre ne cesse de croître, avec de nouveaux acteurs, l'Europe, le Brésil, la Chine, le Japon, par exemple. Fort heureusement, en même temps les capacités de traitement de ces données augmentent rapidement, au point qu'un ordinateur portable peut suffire dans beaucoup de situations.

Cette masse d'informations est cependant inégalement accessible, la plus grande partie des données à haute résolution est distribuée commercialement, et tous les catalogues ne sont pas disponibles en ligne sur Internet. Pour donner une idée de la quantité d'informations disponible, l'archive de données maintenue par l'*U.S. Geological Survey (USGS)* aux États-Unis contient des images Landsat et Spot mais aussi des photographies spatiales déclassées, des données AVHRR, puis Modis atteint actuellement 3 millions de Go (soit 3 petaoctets [5]). À Toulouse, l'archive des images acquises sur plus de 20 ans par les

5 satellites de la série Spot HRV contenait 16,4 millions de scènes fin 2006 (information fournie par la société Spotimage qui en assure la diffusion payante). Parmi les données globales, les données Spot-Végétation constituent une archive couvrant plus de 10 ans, que l'accès gratuit et facile *via* Internet rend particulièrement intéressante.

Face à l'importance que prend l'archivage des données de télédétection pour la surveillance environnementale de notre planète, le *Committee on Earth Observation Satellites (CEOS)* regroupant 44 organisations et agences spatiales, chargé de coordonner les efforts en matière de télédétection, a créé un groupe de travail dédié à l'harmonisation de la gestion et la fourniture des données d'observation de la terre [6].

Données les mieux adaptées

Dans cette jungle d'information, il apparaît vite que si l'on s'intéresse à la surveillance des environnements arides, le diagnostic de changements et de l'état de désertification suppose de disposer de séries de données de satellites à long terme, c'est-à-dire sur plusieurs décennies. Comme le foisonnement des données est plutôt récent, le choix devient beaucoup plus limité. Quelques expériences de suivi à long terme des propriétés des surfaces terrestres ont été réalisées avec des données micro-ondes pour le suivi du couvert végétal avec le diffusomètre ERS-1 au Sahel [7], mais ce sont des observations continentales à très basse résolution.

Ce sont essentiellement les données de capteurs optiques déjà cités, NOAA-AVHRR à résolution kilométrique et de Landsat et Spot à haute résolution, qui sont utilisées pour le suivi à long terme. Les régions arides sont un cas particulièrement adapté à la surveillance par télédétection avec ces instruments dans la mesure où l'enneigement y est limité.

Le *tableau 1* résume les caractéristiques des jeux de données disponibles.

Les données à résolution kilométrique sont utilisées depuis les années 1990 pour le suivi de la couverture végétale verte à l'échelle continentale [8], notamment pour les systèmes d'alerte au niveau des pays. Les données à haute résolution sont indispensables au suivi de sites particuliers, notamment les zones « observatoires » qui requièrent des informations plus détaillées et des variables plus nombreuses (cas du réseau Roselt¹). Le taux de couverture de la végétation verte est dans ce cas un critère insuffisant pour caractériser l'état

¹ Roselt : Réseau d'observatoires de surveillance écologique à long terme.

Tableau I. Exemples de données satellitaires disponibles pour les études à long terme.

Satellite	Capteur	Résolution (max)	Disponibilité	Nb de bandes utilisées*	Type de données	Niveau de coût
NOAA	AVHRR	1 km	Accès web gratuit	2	RS	0
SPOT 4 et 5	VEGETATION (VGT)	1 km	Accès web gratuit	4	RS	0
NASA Landsat 1 à 3	MSS	80 m	Accès via USGS	4	CN	1
NASA Landsat 4 à 7	Thematic Mapper	30 m	Accès payant via USGS et NASA	6	CN	2
SPOT 1 à 5	HRV	20 m (5 m pour SPOT 5)	Accès payant via Spotimage	3, puis 4	CN	3

* pour le suivi de la désertification à long terme ; CN : comptes numériques ; RS : réflectance au sol.

écologique et le niveau de désertification, particulièrement dans les milieux steppiques (zones arides méditerranéennes). L'approche continentale basée sur les indices de végétation (cf. *infra*) étant largement déployée et décrite par ailleurs, l'accent est mis ici sur le suivi détaillé à long terme.

Informations obtenues par télédétection

Images, données et mesures

Les images enregistrées par les satellites sont fournies aux utilisateurs sous une forme plus ou moins élaborée. Pour les images Landsat et Spot, le client utilisateur les reçoit sous forme de fichiers qui contiennent d'une part des informations sur la prise de vue et la calibration, d'autre part les données brutes sous forme de comptes numériques, exprimant les niveaux d'énergie reçus par le capteur pour chaque pixel et chaque bande. Il est possible d'acquérir ces images sous un format superposable à un système cartographique, moyennant un coût supplémentaire, sinon cette opération de « géoréférencement » est à la charge de l'utilisateur. Une image en comptes numériques peut être utilisée telle qu'elle si l'on y recherche simplement des objets identifiables par leurs formes, par exemple pour cartographier des structures géologiques, des routes, des constructions urbaines... Dans certains cas simples, il est aussi possible de déterminer grossièrement le contenu des pixels, par exemple en termes de présence ou d'absence de végétation dense (contraste visuel entre canaux visibles et proche infrarouge). Mais pour déterminer ce contenu plus avant, il faut identifier les composants des pixels d'après leurs valeurs relatives dans les différentes bandes. En effet, le concept de base de la télédétection multispectrale (à plusieurs bandes ou canaux) repose sur le fait que les différents éléments des surfa-

ces terrestres réfléchissent le rayonnement solaire de façon inégale selon les longueurs d'onde : c'est la notion de signature spectrale. Les sols, les roches, la végétation, ont des signatures spectrales différentes (figure 1).

La présence d'un élément de surface n'est donc pas dans ce cas identifiée par la distribution et l'arrangement des pixels, mais pour chaque pixel, par les différences de niveaux d'énergie réfléchi dans chaque bande. Pour pouvoir comparer les valeurs d'un capteur à l'autre et d'une date à l'autre, elles sont converties en grandeur indépendante du capteur, généralement la réflectance au sol (cf. *infra*). À noter que les deux approches peuvent être combinées pour identifier dans l'image des objets caractérisés à la fois par une forme et/ou une texture particulière, combinées à une signature spectrale spécifique.

En raison de limitations technologiques, les capteurs des satellites utilisés pour l'observation à long terme ne mesurent les signatures que de façon incomplète, dans un nombre des bandes restreint, limitant les possibilités de discriminer les signatures spectrales.

Enfin, dans le cas des données à résolution kilométrique, elles ne permettent pas la reconnaissance directe d'objets dans l'image, leur utilisation terrestre repose à peu près entièrement sur l'interprétation des contenus des pixels d'après la signature spectrale.

Données environnementales « télédectables »

En considérant que la télédétection nous fournit des images dans lesquelles à chaque pixel correspond une mesure de signature spectrale, la question à résoudre est la suivante : quelles sont les informations d'intérêt environnemental qui peuvent être tirées de ces mesures ?

Pour cela il faut comprendre les principes de la télédétection optique. Fondamentalement, le capteur enregistre la lumière solaire réfléchi par les surfaces terrestres, et l'information réside dans les inégalités de l'absorption. Le pourcentage de rayonnement réfléchi est la notion de *réflectance*, que l'on qualifie de *spectrale* lorsque la longueur d'onde dans laquelle est effectuée la mesure est prise en compte.

Pour ce qui nous préoccupe ici, la réflectance est mesurée de façon directionnelle par les satellites qui passent à une heure précise (donc une position solaire donnée) et visent la cible sous un angle précis. Pour que les comparaisons soient correctes, il faut veiller à choisir des images dont les conditions d'éclairage et des visées soient comparables, et si nécessaire les corriger, notamment des effets perturbateurs de l'atmosphère (figure 2).

Il existe de très nombreuses études sur les signatures spectrales des composants des surfaces terrestres, dont des bibliothèques de signatures, certaines sont même intégrées aux logiciels de traitement d'images de télédétection.

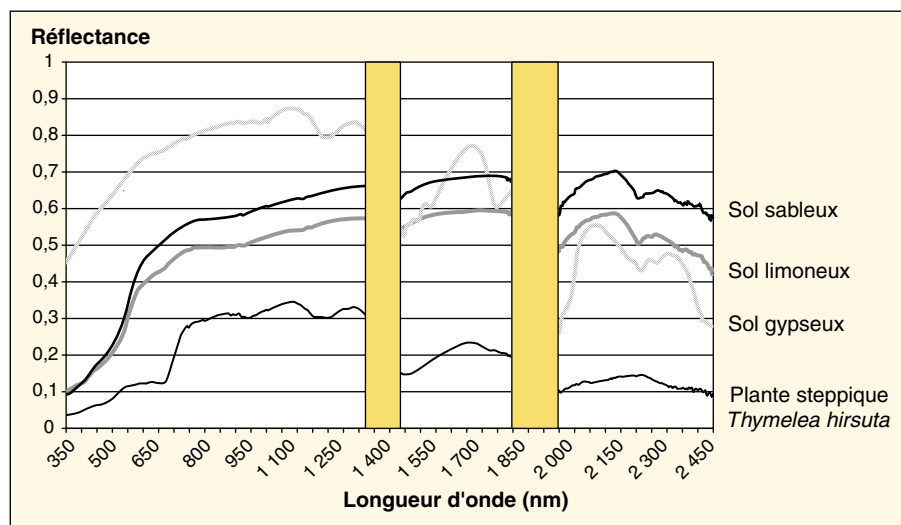


Figure 1. Signatures spectrales de composants de la surface d'une steppe aride du Sud tunisien. Mesures au spectroradiomètre portable : pas de mesures dans les domaines couverts par les bandes grisées.

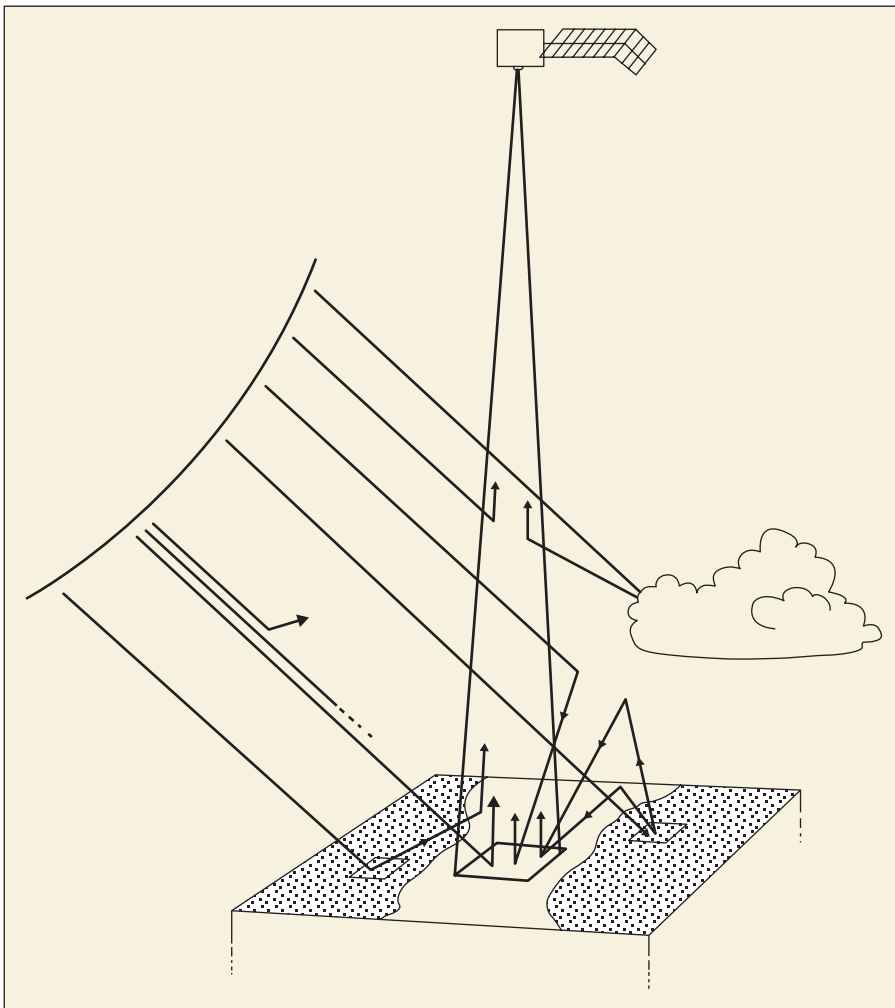


Figure 2. Schéma de la réflexion du rayonnement solaire par la surface vers le capteur du satellite.

• Végétation

La végétation est certainement le composant des surfaces terrestres le plus intensivement surveillé par satellite, une grande partie des études environnementales est basée sur le suivi de l'abondance de la végétation verte. Celle-ci est identifiable par sa signature spectrale caractérisée par une forte absorption dans le domaine spectral du rouge (vers 600 nm) et une forte réflexion dans le proche infrarouge (autour de 900 nm). Cette propriété déjà utilisée dans les photographies aériennes en « fausses couleurs » est le plus souvent exploitée en calculant une valeur du contraste entre ces deux bandes, c'est le cas du très utilisé NDVI (indice de végétation basé sur la différence normalisée, *Normalised Difference Vegetation Index*). Cet indice est relié de façon empirique à des propriétés des végétaux verts, dont la principale est le taux de couverture. Des approches plus récentes basées sur des modèles de transfert radiatif permettent de calculer à partir des mesures des satellites

les valeurs de paramètres du couvert tels l'indice foliaire (LAI, *leaf Area Index*).

Dans le cas des régions arides, ces méthodes s'appliquent également, mais trouvent leurs limites dans la mesure où les taux de couvert et de LAI sont souvent très faibles lorsqu'on s'intéresse essentiellement à la végétation naturelle, voire aux cultures pluviales (le cas des zones irriguées sort du propos de cet article).

Qui plus est, la végétation n'y est souvent que partiellement verte, soit qu'elle soit constituée de buissons ligneux avec des feuilles petites et rares (chaméphytes) soit qu'elle soit carrément en grande partie sèche sur pied. Les signatures spectrales des plantes typiques des régions péri-désertiques sont de fait sensiblement différentes de celles des plantes à feuillage vert abondant [9]. Les indices de végétation se sont de fait révélés peu adaptés au suivi du couvert végétal de la Tunisie aride aux résolutions spatiales habituelles [10].

C'est dans les savanes herbeuses du Sahel à la phénologie contrastée qu'ils permet-

tent plus facilement un suivi du développement saisonnier, et des fluctuations interannuelles, permettant l'alerte précoce en cas de sécheresse [11, 12]. Le suivi sur 20 ans des variations interannuelles du NDVI-AVHRR sur les pays sahéliens a même permis à certains auteurs de parler d'un « reverdissement récent du Sahel » [13]. Il est certain que par rapport aux périodes de grandes sécheresses des années 1980, le couvert végétal vert qui se développe avec la mousson est nettement plus dense ces dernières années [14], mais cela ne signifie certainement pas que ces pays soient hors de la menace de la désertification et ni même des famines (cf. la situation du Niger en 2006).

Enfin, les mesures faites par les indices de végétation peuvent aussi être influencées par les algues (cyanophycées, notamment) qui se développent à la surface de certains sols arides, et peuvent donner une signature semblable à celle des végétaux verts [15].

En résumé, la végétation naturelle est plus difficile à détecter dans les régions arides, dans la mesure où elle ne présente un feuillage vert que pendant des périodes assez courtes, et ce dernier est peu couvrant, donc peu représenté dans les éléments de surface correspondant aux pixels dans l'image. Les indices de végétation y sont à manier avec prudence lorsqu'on cherche à détecter des couverts faibles, notamment à cause de leur altération par les caractéristiques spectrales du sol [16] ou des algues à sa surface. Ils sont surtout utilisés pour déterminer le taux de couverture des herbacées du Sahel, mais échouent à déterminer l'état de la végétation steppique de la bordure nord du Sahara.

• Sols

Dans les régions qui nous intéressent, les sols sont très pauvres en matière organique et la fraction minérale domine donc très largement, même en surface. D'une façon générale, les signatures spectrales des minéraux ont été très étudiées [17], les bibliothèques spectrales en contiennent un grand nombre. L'idée est notamment de reconnaître les minéraux les plus intéressants pour l'exploration géologique. Pour ce qui concerne les minéraux présents dans les sols, ce sont essentiellement les éléments du squelette (sables quartzeux ou carbonatés, par exemple) les éléments fins et les argiles.

Les mesures réalisées au-delà de 1 500 nm dans les bandes moyen infrarouge des capteurs Thematic Mapper (TM) de Landsat et HRVIR de Spot 4 et 5, sont très utiles pour distinguer différents types de minéraux présents dans les sols arides, notamment différents types d'argiles, de carbonates, ou de sulfates comme le

gypse présents dans de nombreux sols, particulièrement en Algérie, Irak, Syrie, Tunisie.

La présence d'oxydes de fer est aussi très fréquente, de faibles quantités suffisent à donner une coloration rougeâtre typique de nombreux sols sableux des régions désertiques. La couleur des sols, qui est un critère très utilisé par les pédologues sur le terrain, est liée à la signature spectrale dans les courtes longueurs d'ondes (entre 400 et 700 nm), et plusieurs indices ont été proposés pour distinguer les sols d'après leur couleur [16, 18].

Observés depuis l'espace, les sols sont les composants majeurs des surfaces arides, leurs signatures spectrales sont assez variées (figure 1) et peuvent être souvent distinguées. Le challenge est de relier ces signatures à des niveaux de désertification et/ou d'autres propriétés intéressantes telles la texture ou les caractéristiques hydrodynamiques (notion de pédotransferts).

• Infrastructures

L'action de l'homme sur le milieu se traduit non seulement par des modifications du couvert végétal ou des végétaux présents (défrichement, cueillette, mais aussi protection, cultures annuelles, plantations pérennes...) et de l'état des sols (labour, irrigation, etc.), mais aussi par des constructions, aménagements et infrastructures (habitations, routes, aéroports, etc.). La densité d'habitations ou de zones bâties peut être suivie facilement sur les images à haute résolution, notamment parce que la signature spectrale des matériaux utilisés est nettement différente de celle des composants naturels des surfaces. L'extension urbaine de grandes agglomérations a ainsi pu être suivie, par exemple celle de la ville de Phoenix en Arizona avec une série de trente ans de données Landsat [19]. Mais il existe aussi des images anciennes de plus haute résolution permettant de s'intéresser au développement de villages, ce qui est en lien avec notre thématique. Ainsi, des photographies de satellites espions prises dans les années 1960 sont maintenant déclassifiées (Corona de la CIA, notamment). Elles permettent des comparaisons avec les images à haute résolution récentes ; il ne s'agit pas ici de suivi, mais de mesure de différences à 40 ans d'intervalle. Elles ont été utilisées au Sahel pour mesurer l'extension de l'habitat rural et l'évolution de la végétation arborée.

• Bilan :

la télédétection des surfaces arides

La démarche la plus rigoureuse pour interpréter au mieux les données de télédétection consiste à considérer la surface des régions arides dans son ensemble (figure 3). Une approche intégratrice,

considérant les surfaces comme un assemblage d'états élémentaires, a été proposée, elle permet de rendre compte de l'hétérogénéité des surfaces en décrivant l'ensemble des éléments qui modifient le rayonnement solaire réfléchi [4]. Suivant les situations, les variations des signatures spectrales observées seront dues à des différences dans la nature et/ou la distribution des différents états élémentaires, par exemple : abondance des plages de sable mobile, présence de végétaux secs, de litière...

Cette représentation de la surface par une mosaïque de composants élémentaires permet d'établir plus facilement les relations entre signature spectrale et contenu des pixels des images à haute résolution. Elle est notamment remarquablement adaptée aux méthodes basées sur les modèles de mélange. Dans cette approche, la signature spectrale d'un pixel est considérée comme un mélange de signatures de composants élémentaires (sol, roches, végétaux verts, écorces...). Les proportions relatives de ces composants élémentaires peuvent être calculées connaissant les spectres individuels, à condition qu'ils soient tous différents les uns des autres. Cette technique nécessite donc des données de télédétection à nombreux canaux (les 6 canaux du Thematic Mapper sont un minimum) et de connaître *a priori* quels sont les composants élémentaires des surfaces étudiées [20].

La télédétection des changements affectant les milieux arides repose donc essen-

tiellement sur la détection des changements de composition des surfaces et leur interprétation en termes de désertification. La signification écologique de ces changements est très contextuelle, il est donc important de les interpréter non pas de façon absolue, mais dans un environnement circonscrit (une approche par zone agroécologique a ainsi été développée par l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) dans son programme Images).

Difficulté du suivi à long terme

L'étude de changements affectant les surfaces requiert plusieurs images, certes, mais de préférence judicieusement choisies le long d'une période de temps adaptée à l'étude. Dans les études de la désertification, bien souvent on cherchera à avoir une période la plus longue possible, par exemple remontant avant la date des modifications d'utilisation des terres, ou des changements socio-économiques dont on soupçonne qu'ils ont eu un impact sur l'état de l'environnement.

Si l'on s'intéresse à plusieurs décennies, cela implique de devoir utiliser plusieurs satellites, leur durée de vie individuelle dépasse rarement une décennie en moyenne, elle est parfois abrégée par des incidents techniques. Pour ce qui concerne la haute résolution, les satellites Landsat sont ceux qui permettent les séries les plus longues, d'autant que leurs images sont

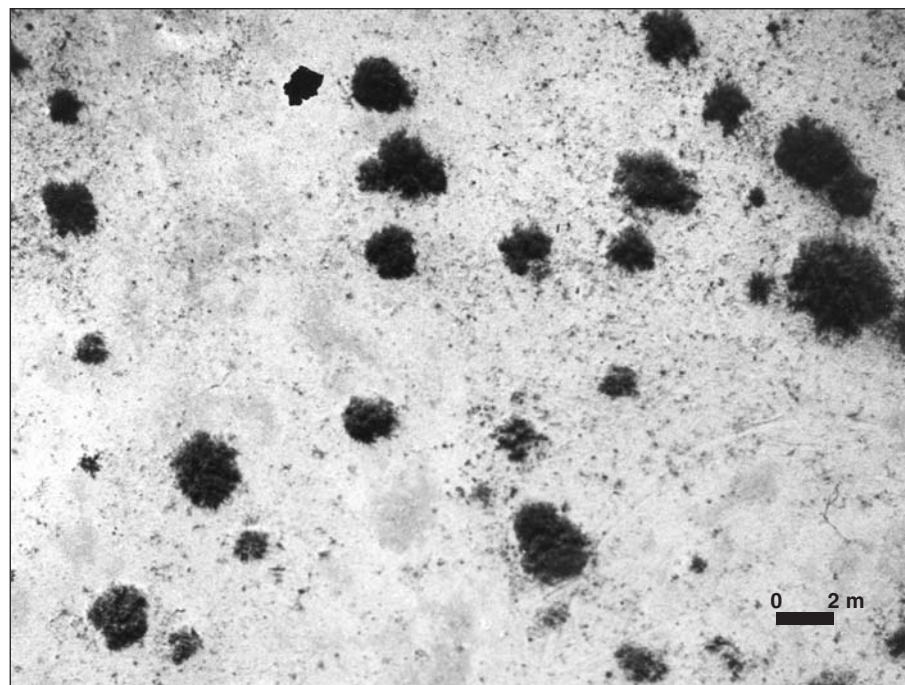


Figure 3. Échantillon de surface de steppe aride du Sud tunisien photographié à la verticale. Les différents états de surface élémentaires apparaissent clairement : sol nu, sable mobile, touffes de plantes chaméphytes.

acquises de façon systématique par construction, toujours selon le même angle de visée verticale. Ainsi, en principe, chaque scène Landsat est survolée toutes les trois semaines environ, alors que les capteurs HRV² des satellites de la série Spot sont orientables, permettant une programmation des acquisitions, ce qui a pour corollaire que la répétitivité des points de vue n'est pas systématique.

Géoréférencement

Une des conditions indispensables pour permettre une comparaison entre images, c'est qu'elles soient parfaitement superposées. Cela passe généralement par la prise de points de contrôle au sol (avec relevé des coordonnées par GPS³) et reprojection des images dans un système de coordonnées géographiques commun. Pour compenser des différences de tailles de pixels entre capteurs (exemple Multi Spectral Scanner (MSS) et TM) il faut également procéder à un rééchantillonnage de la taille des pixels.

Intercalibration relative

Une fois le géoréférencement réalisé avec le plus grand soin, les pixels correspondant à des éléments de surfaces homologues sont parfaitement superposés entre images de différentes dates. Mais pour pouvoir comparer les valeurs des pixels d'une date à l'autre, il faut convertir ces comptes numériques en grandeurs physiques, en valeurs de mesures. Une première façon de faire consiste à intercaler les images entre elles, l'une d'elle servant de référence, par exemple celle qui est au milieu de la série temporelle. Pour cela il faut trouver des éléments de surface invariants communs à toutes les images, par exemple un sol toujours nu, un affleurement rocheux dépourvu de végétation, un plan d'eau permanent. Les comptes numériques des images sont alors normalisés en rendant constantes les valeurs pour ces éléments invariants (ou « pseudo-invariants » [21]). Dans cette série, les variations entre dates ne sont alors plus dues à des variations de gain et/ou de calibration, mais bien à des fluctuations de l'état des surfaces.

Calibration absolue : réflectance au sol

L'intercalibration seule ne permet pas de comparer les valeurs avec d'autres valeurs acquises sur le même site par des instruments différents ou sur d'autres sites, ni avec les mesures faites sur le terrain. Pour

cela il faut d'abord convertir les comptes numériques de chaque pixel en luminance en utilisant les données de calibration et de gain de l'instrument. Connaissant le rayonnement solaire incident sur la surface visée au moment de l'acquisition de l'image, le pourcentage du rayonnement réfléchi par la cible peut alors être déduit, dans les différents canaux (réflectance spectrale). C'est la réflectance apparente au niveau du capteur (ou réflectance, *TOA = Top of Atmosphere*).

Ensuite, la perturbation par l'atmosphère peut être éliminée par modélisation, sous réserve de connaître un minimum de paramètres sur sa composition au moment de l'acquisition de l'image [22]. La réflectance au sol (*TOC = Top of Canopy*) est alors enfin calculée, elle peut être comparée avec celle mesurée sur le terrain avec des radiomètres ou des spectroradiomètres portables, voire avec des mesures de réflectance en laboratoire. En l'absence de données fiables sur l'état de l'atmosphère, par exemple pour des données relativement anciennes, il sera souvent préférable d'utiliser une intercalibration, puis de convertir les comptes numériques en réflectance TOC en s'appuyant sur des mesures de réflectance des surfaces invariables faites sur le terrain [23].

En conclusion, pour réaliser une surveillance à long terme par satellite, il y a de nombreuses opérations à réaliser, et de la qualité de chacune d'elles dépendent la qualité de la série obtenue et la précision des changements qui pourront être détectés.

Exemples de surveillance par satellite

Évolution de terres de parcours sur 30 ans

Une longue série d'images a été constituée sur le site tunisien de Menzel Habib, bien étudié depuis de nombreuses années (et qui fait partie du réseau Roselt). Pour maximiser la durée, les données MSS remontant à 1972 ont été combinées avec des données TM. Un total de 27 images a été rassemblé et plusieurs techniques d'analyse de tendance ont été appliquées [24]. Parmi les résultats, la *figure 4* illustre la tendance à long terme 1972-2002 pour la combinaison de deux indices exprimant l'état de surface. Leur combinaison permet de repérer les zones dont l'état s'est globalement amélioré (restauration) et celles dont l'état s'est globalement dégradé.

Évolution de l'irrigation et ressources en eau

Dans un autre registre, la comparaison des surfaces irriguées, caractérisées par

une forte densité de végétation verte, à plusieurs dates a permis de mesurer l'extension de ce type de culture dans la région de Marrakech au Maroc. Ce type d'étude permet d'estimer l'accroissement de la consommation d'eau et d'évaluer la durabilité du système en fonction des ressources disponibles (*figure 5*, projet Sudmed).

Conclusions et recommandations

L'intercalibration des images est essentielle pour pouvoir réaliser un suivi par satellite. Mais elle comprend de nombreuses étapes, et les approximations souvent nécessaires par manque d'informations rétrospectives (état de l'atmosphère, calibration et vieillissement des détecteurs), conduisent à d'inévitables erreurs sur les valeurs de réflectance qui rendent l'analyse de tendance délicate, lorsque les fluctuations recherchées sont faibles (ex : une variation de 10 % d'une végétation qui ne couvre que 20 % du sol).

Face aux difficultés que posent aux utilisateurs les prétraitements des images, la tendance actuelle est de fournir des produits élaborés tels que les valeurs de réflectance au sol (Postel, Toulouse), le Fapar (*Joint Research Center (JRC)*, Ispra, Italie), le site Nasa-Modis propose ainsi plusieurs dizaines de produits différents. Mais cela concerne uniquement la basse résolution ; pour la haute résolution, l'obtention de données converties en réflectance au sol reste un service à la demande très coûteux, et qui n'est pas disponible pour les données anciennes. Le traitement d'une archive entière sur une région reste à la charge de l'utilisateur qui doit le réaliser au coup par coup. Par ailleurs, l'état de l'archive des données Landsat gérée aux États-Unis est assez inégal sur l'Afrique et même celle qui a été gérée au niveau européen est incomplète (distribution Eurimage). L'archive des données Spot HRV est encore relativement peu exploitée en raison de son coût.

En conclusion, la télédétection est en théorie un excellent outil pour la surveillance environnementale à long terme, mais difficile à mettre en œuvre en pratique. L'analyse de longues séries d'images bien intercalibrées est pourtant une source d'informations incomparable sur l'état et l'évolution d'une région.

Dans le futur, de plus en plus de données seront disponibles et de mieux en mieux prétraitées par les fournisseurs. Parmi les traitements à la disposition des utilisateurs, ceux basés sur les modèles de mélange conviennent bien aux surfaces hétérogènes des régions arides. Même s'ils ont

² HRV : haute résolution visible.

³ GPS : *global positioning system*.

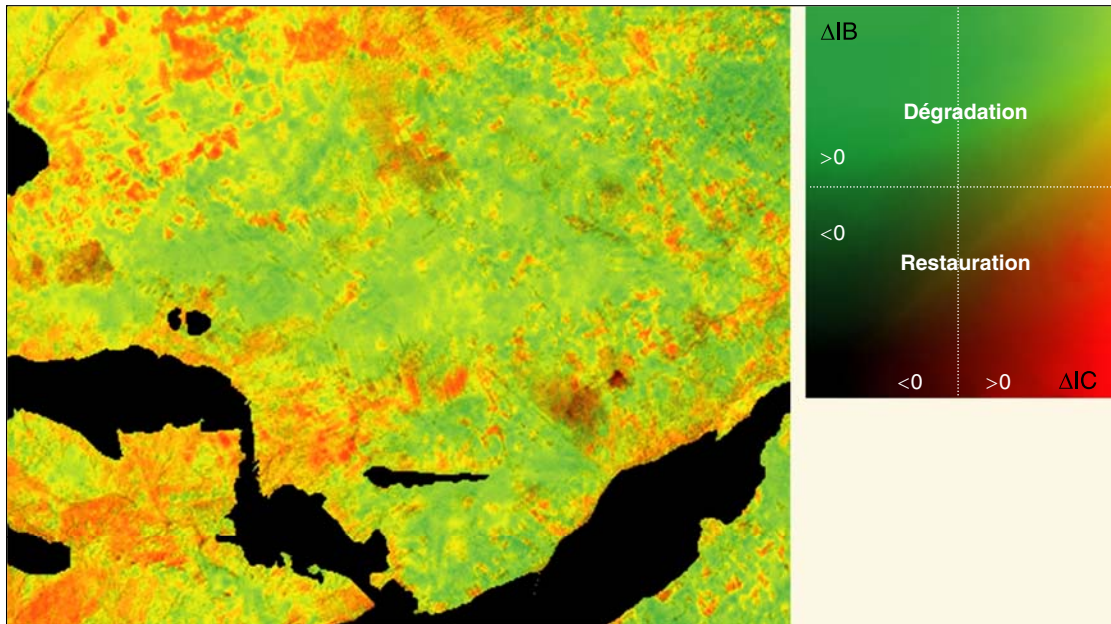


Figure 4. Analyse de tendance à long terme des indices de brillance et de couleur calculés à partir d'une série de 27 images Landsat (1972-2002) sur la région de Menzel Habib.

En noir : zones masquées ; traitement : F. Albinet.

jusqu'à présent surtout servi à mieux détecter la végétation [20], ils sont bien adaptés à la télédétection hyperspectrale qui se développe (satellites Hyperion, puis EnMap) et offre d'intéressantes perspectives [25]. Enfin, pour ce qui concerne un meilleur accès aux données de satellites, les efforts

du CEOS et des agences pour promouvoir des plateformes Web et des réseaux interconnectés visent à permettre aux utilisateurs de s'adresser à un guichet unique. Ils pourront alors obtenir des données de télédétection de différentes plateformes/capteurs et sous un format directement

utilisable, pouvant être aisément combiné avec d'autres sources d'informations spatialisées. Même si la concrétisation n'est pas prévue avant plusieurs années, la communauté des utilisateurs a certainement intérêt à les encourager fortement dans ce sens. ■

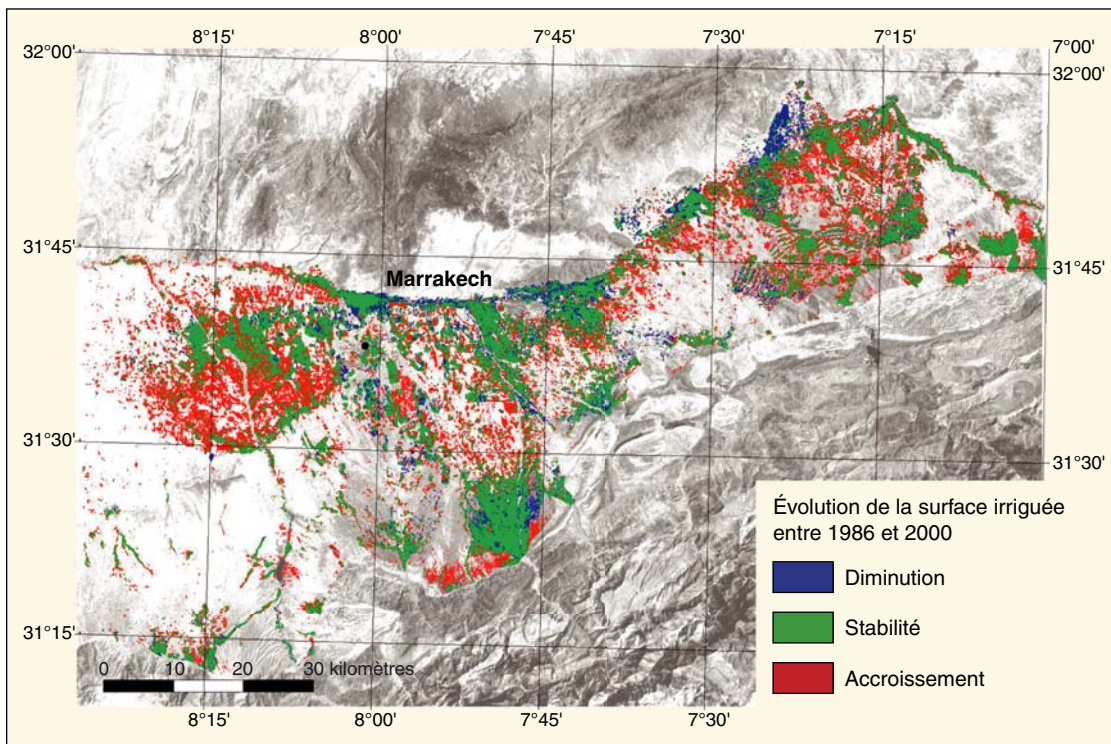


Figure 5. Évolution de la surface irriguée dans la région de Marrakech à partir d'images Landsat. Traitement : V. Simonneaux.

Remerciements

Nous remercions Olivier Hagolle et Philippe Maisongrande, ingénieurs Centre national d'études spatiales (Cnes) au Cesbio, pour les précieuses informations et remarques qu'ils ont aimablement mis à notre disposition, ainsi que les deux relecteurs anonymes pour leurs judicieuses suggestions d'amélioration de cet article.

Références

1. Begni G, Escadafal R, Fontannaz D, Hong-Nga-Nguyen A. *La télédétection, outil pour le suivi et l'évaluation de la désertification*. Dossier n°2 du Conseil scientifique français de la désertification (CSFD). Montpellier : Agropolis, 2005.
2. Bonn F, Rochon G. *Précis de télédétection*. Principes et Méthodes, Vol. 1. Québec : Aupelf, Universités francophones, 1992.
3. Girard M, Girard C. *Traitement des données de télédétection*. Paris : Dunod, 1999.
4. Escadafal R. *CAMELEO : Changes in arid Mediterranean ecosystems on the long term and earth observation - Final report*. INCO contract : ERBIC18CT970155. Ispra (Italie) : Joint Research Center (JRC), 2002.
5. Faundeen J. *Records management report, Quarter 1 2007*. Sioux Falls (South Dakota, États-Unis) : US Geological Survey (USGS), 2007.
6. Faundeen J, Petiteville I, Clark D, Fisher T. *Global environmental databases from CEOS agencies*. XXth ISPRS Congress, Istanbul (Turkey), 2004.
7. Philippon N, Mougou E, Jarlan L, Frison P. Analysis of the linkages between rainfall and land surface conditions in the West African monsoon through CMAP, ERS-WSC and NOAA-AVHRR data. *J Geoph Res* 2005 ; 110 : D24115.
8. Tucker C, Newcomb W, Los S, Prince S. Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989. *Int J Rem Sens* 1991 ; 12 : 1113-5.
9. Elvidge C. Visible and NIR reflectances characteristics of dry plant materials. *Int J Rem Sens* 1990 ; 2 : 1775-95.
10. Kennedy P. Monitoring the phenology of Tunisian grazing lands. *Int J Rem Sens* 1989 ; 10 : 835-45.
11. Justice C, Hiernaux P. Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA-AVHRR data : Niger 1983. *Int J Rem Sens* 1986 ; 7 : 1475-97.
12. Crépeau C, Bennouna T, Bicheron P, et al. Suivi de la végétation en zone sèche par des produits d'information dérivés de l'imagerie spatiale. *Sécheresse en ligne* 2003 ; 1E (1).
13. Eklundh L, Olsson L. Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999. *Geoph Res Letters* 2003 ; 30 : 131-4.
14. Anyamba A, Tucker C. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003. *J Arid Environ* 2005 ; 63 : 596-614.
15. Karnieli A, Kidron G, Glaesser C, Bendor E. Spectral characteristics of cyanobacteria soil crust in semiarid environments. *Rem Sens Env* 1999 ; 69 : 67-75.
16. Escadafal R, Huete A. Étude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection. *CR Acad Sci Paris* 1991 ; 312 : 1385-91.
17. Clark R. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In : Rencz A, ed. *Remote sensing for the earth sciences : manual of remote sensing*. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1999.
18. Escadafal R, Belghit A, Ben-Moussa H. *Indices spectraux pour la dégradation des milieux naturels en Tunisie aride*. 67^e Symp. Int. Mesures physiques et signatures en télédétection. Val d'Isère (France) : ISPRS-Cnes, 1994.
19. Moeller M. *Monitoring long term transition processes of a metropolitan area with remote sensing*. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE, Istanbul (Turkey), 2004. Tempe (Arizona, États-Unis) : Center of Environmental Studies, Arizona State University, 2004.
20. Hostert P, Röder A, Hill J. Coupling spectral unmixing and trend analysis for monitoring of long-term vegetation dynamics in Mediterranean rangelands. *Rem Sens Env* 2003 ; 87 : 183-97.
21. Furby S, Campbell N. Calibrating images from different dates to 'like-value' digital counts. *Rem Sens Env* 2001 ; 77 : 186-96.
22. Tanré D, Deroo C, Duhaut P, Herman M, Morcrette JJ. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum : the 5S code. *Int J Remote Sens* 1990 ; 11 : 659-68.
23. Simonneaux J, Bois C, Sholte K, Delaitre E. *Détection d'invariants dans une série temporelle d'images satellitaires en zone aride : application à l'intercalibration des images et à la correction radiométrique d'images*. Proc Int Symp Marrakech (Maroc), 2001.
24. Escadafal R, Albinet F, Simonneaux V. *Arid Land cover change trend analysis with series of satellite images for desertification monitoring in Northern Africa*. Proc 31st Ints Symp Rem Sens Env, St Petersburg, Russia, 2005.
25. Ustin S, Roberts D, Gamon J, Asner G, Green R. Using Imaging Spectroscopy to Study Ecosystem Processes and Properties. *Bioscience* 2004 ; 54 : 523-34.