

Observation à long terme des environnements arides par satellites : retour d'expériences et perspectives

Richard Escadafal

Institut de Recherche pour le Développement, CESBIO, Toulouse (France)

Résumé. Le recours aux observations par satellite s'est imposé comme une évidence pour surveiller l'environnement des régions sèches. Les expériences réalisées au cours de projets dans le Sud tunisien ont montré que les méthodes développées sur les régions où la végétation est plus abondante sont mal adaptées. Il faut donc prendre en compte la composante dominante des milieux arides, à savoir la surface des sols. L'étude des changements à long terme a pu être réalisée par l'acquisition et les différents prétraitements d'un ensemble d'images Landsat couvrant une période assez longue (27ans). La nature et l'amplitude des changements ont été caractérisées selon différentes méthodes dont les avantages et inconvénients sont discutés, notamment en lien avec l'inégale répartition des images dans le temps. En conclusion, les bénéfices de l'observation à long terme par satellite et ses développements en cours sont discutés.

Mots-clés. Régions sèches – télédétection – observations à long terme – détection des changements.

Long term monitoring of drylands with satellites: lessons learned and future outlook

Abstract. *Satellite imagery has become an integral part of programmes for monitoring dryland. Experiments conducted as part of several research projects in Southern Tunisia showed that some methods used in more vegetated areas were not efficient, as the soil surface, which is the main component of drylands was not taken into account. The present study of long-term changes in the land surface was performed using a series of Landsat images and their stepwise pre-processing. The series covers a rather long period (27 years) but the images are unevenly spaced over time. Different methods were used to characterize the nature and magnitude of the changes, and their advantages and drawbacks are discussed in the light of recent developments, along with the benefits of long term satellite monitoring.*

Keywords. *Drylands – remote sensing – long term observations –detection of change.*

I – Introduction

La nécessité de disposer d'observations à long terme pour mesurer, analyser et comprendre l'évolution de l'environnement s'est progressivement imposée, et dans le cas des régions arides, a été la préoccupation et l'objectif de nombreux projets d'observatoire, dont ceux coordonnés par l'OSS (Aidoud, 2008). Ces régions couvrent de vastes territoires et il est bien difficile d'en appréhender l'évolution à l'aide de quelques stations de mesures. Des itinéraires de reconnaissance ont été parcourus et font parfois l'objet d'observations répétées à quelques années d'intervalle. En effet, le diagnostic de l'évolution de ces milieux nécessite de l'appréhender dans le long terme sur plusieurs décennies comme le confirment les travaux récents sur le Sahel (Hiernaux et al., 2009 ; Miehé et al., 2010).

Ces observations au sol sont nécessaires, mais restent insuffisantes, et le recours aux avions et satellites qui fournissent des images de façon répétée s'est imposé comme une évidence pour surveiller ces vastes étendues. Il a été facilité par le fait que les régions arides sont facilement observables depuis l'espace grâce à leur faible ennuagement. Cependant, après l'enthousiasme, voire la naïveté qui a animé les premières tentatives d'utilisation des images satellites, il s'est avéré nécessaire de retourner aux fondamentaux et de comprendre la nature

des mesures faites par les capteurs utilisés, pour pouvoir correctement les interpréter ensuite en termes écologiques.

Nous résumons ici les principales étapes d'une utilisation raisonnée de la télédétection spatiale pour le suivi de la désertification, sur la base des approches et résultats de projets utilisant les séries d'images de capteurs optiques (principalement Landsat MSS et TM).

II - Concepts de bases mobilisables

1. Les premières tentatives

En 1972 fut lancé le satellite américain ERTS, premier d'une série de satellites civils d'observation de la Terre, la série Landsat qui s'achèvera finalement avec Landsat 7. Si ses images ont été rapidement utilisées pour observer les régions agricoles du territoire américain, il a fallu attendre quelques années pour voir apparaître les premiers essais d'utilisation à des études écologiques en régions arides. En Tunisie, les travaux de la direction des sols au Nord (Souissi, 1976) et du CEFÉ dans le sud de la Tunisie ont été pionniers. Le projet ARZOTU a ainsi exploré la comparaison des zonages d'images acquises à deux dates différentes (1975 et 1976). Ils soulignent la difficulté de relier les « zones isophènes » observées sur les images à des « unités écographiques » (Long et al., 1977). D'une certaine manière cette question est un précurseur de la problématique qui va se poser *in fine*. En effet, différents essais d'applications de techniques de photo-interprétation, ou de classification d'images à partir de méthodes mises au point dans des régions fortement agricoles avec de grandes parcelles de culture des grandes plaines américaines, vont se révéler décevantes et inadaptées à la caractérisation écologique des milieux arides. Ceci est lié intrinsèquement à la différence fondamentale des deux problématiques et la question de base qui va s'imposer est la suivante: à partir des données mesurées par les satellites, comment extraire des informations qui soient interprétables et utiles en termes écologiques? Elle va pouvoir être abordée au fur et à mesure que l'interprétation visuelle de tirages photographiques sera remplacée par les méthodes de traitement d'images sur ordinateur. La première génération, celle développée par exemple au centre de l'Institut de recherche pour le Développement de Bondy (ORSTOM, 1977) mobilisait les meilleurs moyens de traitement d'image du moment, même s'ils sont actuellement largement dépassés par ceux de simples téléphones portables.

Ces premiers outils permettant une approche numérique du traitement des données de télédétection ont pourtant jeté les bases de l'utilisation de méthodes quantitatives dans ce domaine. Les premières ont été des simples seuillages des niveaux numériques par canal, puis les approches ont combiné plusieurs canaux (ORSTOM, 1978). Toutefois, cela s'appuyait sur la présupposition que les objets ou thèmes recherchés avaient une 'signature' unique identifiable dans l'image, présupposition qui à l'expérience s'est trouvée souvent en défaut (Kennedy, 1989a).

Pour pouvoir mieux exploiter les images de satellites il a fallu reprendre l'analyse à la base : ces images sont constituées d'un ensemble de valeurs numériques qui sont des tableaux de mesures faites par les capteurs embarqués sur ces plateformes spatiales. Ce qui induit les questions suivantes : quelles sont ces mesures, dans quelles conditions sont elles obtenues, dans quelles unités sont-elles exprimées, quelles sont les erreurs qui peuvent les entacher, et fondamentalement à quelles caractéristiques de l'environnement peuvent-elle être reliées ? Ces réflexions conduisent à se référer aux bases physiques de la télédétection, détaillées dans les différents manuels et traités de référence. Pour les besoins de cet article nous nous limiterons à ce qui concerne l'observation des régions arides par les capteurs optiques (voir aussi Escadafal, 2007).

En résumant de façon abrupte, les premières images de télédétection ont été des images photographiques, donc produites par un système optique avec comme capteur un film

argentique. Puis les capteurs sont devenus numériques, comme le sont devenus ensuite nos appareils photographiques grand public, ce qui a de nombreux avantages, particulièrement pour ce qui est de la transmission, du stockage et du traitement des images.

Les images acquises dans ce domaine optique sont donc obtenues en mesurant le rayonnement solaire réfléchi par les surfaces observées. Dans les conditions d'atmosphère claire, les propriétés optiques de ces surfaces sont ainsi les paramètres principaux de variations du contenu des images des satellites pris en considération.

2. Les propriétés optiques des surfaces arides

Les images des capteurs tels que ceux du satellite Landsat (le Multispectral Scanner et le Thematic Mapper) fournissent des mesures du rayonnement réfléchi par la surface terrestre (et après qu'il ait été modifié par l'atmosphère). Ces mesures sont arrangées en grille dont la résolution est de 80m pour le premier et 30 m pour le second. Les générations de satellite suivantes tels ceux de la série Spot produisent des images plus détaillées, mais aussi simultanément des images plus globales à résolution kilométrique avec l'instrument "Vegetation" (Maisongrande et al., 2004).

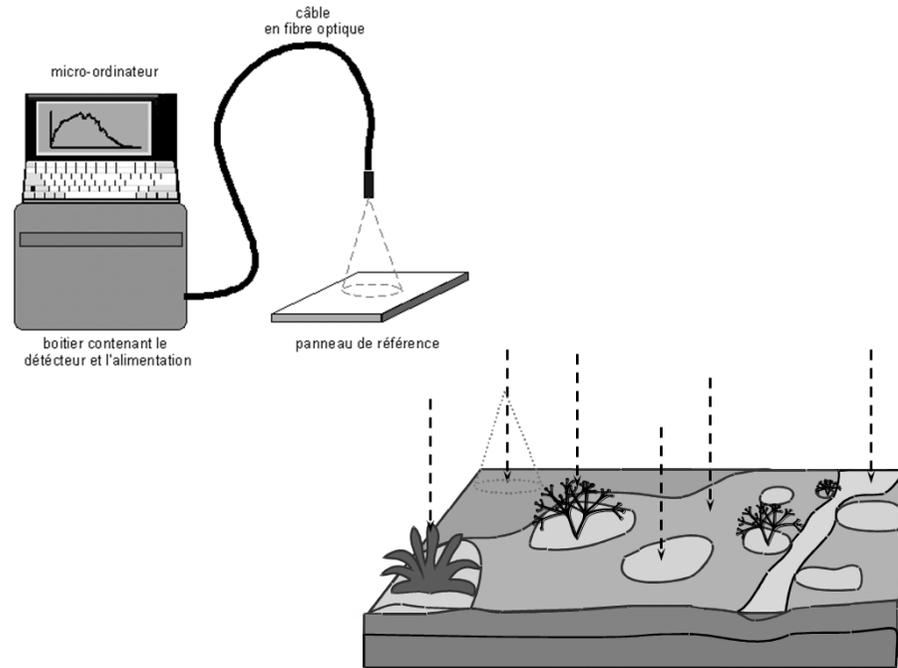
Dans tous les cas, l'analyse et l'exploitation quantitative de ces données suppose de s'être affranchi de l'influence de l'atmosphère. Quelques techniques pour le faire sont décrites dans la partie consacrée au traitement radiométrique des données utilisées. Pour le moment, nous nous intéressons donc uniquement à la réflexion du rayonnement solaire par les surfaces.

A. Mesures de la réflectance spectrale

Le rapport entre l'intensité du rayonnement réfléchi dans la direction d'observation et celui reçu (du soleil dans le cas présent) est la réflectance, qui est sans dimension et varie entre 0 et 1 (soit de 0 à 100%). Les intensités sont mesurées dans le spectre du rayonnement solaire et la variation de ce rapport selon la longueur d'onde est la réflectance spectrale. Elle peut être mesurée de façon continue décrivant un spectre ou dans des bandes spectrales spécifiques, notamment celles des capteurs des satellites.

Les mesures les plus précises sont bien sûr réalisées en laboratoire, avec des spectrophotomètres qui mesurent la réflectance diffuse sur de petits échantillons dans des dispositifs évitant les effets directionnels (sphère intégratrice). Mais il est très pertinent d'utiliser des instruments de terrain qui permettent des mesures sur les échantillons de surface non perturbés, et de taille supérieure, dans des conditions géométriques d'observation représentatives. La figure 1 montre la réalisation de mesures avec un spectroradiomètre portable. Selon la hauteur et le champ de visée, la taille de l'élément de surface visé varie et peut comprendre des éléments plus ou moins diversifiés.

Figure 1. Mesures de réflectance sur un échantillon de surface : la réflectance des différents éléments est mesurée par rapport à un panneau réfléchissant 100% du rayonnement solaire incident.



Source : Auteur

B. Les composants de la surface du sol

Dans le cas des surfaces des milieux naturels arides, le couvert végétal est le plus souvent discontinu, l'étude et la modélisation de la distribution des "patches" qui les composent est même une branche de l'écologie des ces milieux en plein développement (Maestre et Cortina, 2004), L'observation de sites étudiés montre en effet que la surface des sols (*sensu lato*) est composée d'une part d'éléments minéraux: sol sous-jacent, éléments superficiels tels que : sable fin apporté par le vent, éléments grossiers résiduels après érosion (graviers, sables grossiers), dépôt de matériaux fins par décantation d'eaux de ruissellement chargées. D'autre part, la surface peut présenter des zones recouvertes d'algues cyanophycées et mousses, formant des croûtes biologiques, et des végétaux supérieurs de différentes tailles, des petits prostrés, en passant par les herbacées et autres annuelles, jusqu'aux ligneux bas, aux buissons et aux arbres.

Nous avons vu que tous ces composants forment un ensemble qui peut être décrit comme une mosaïque d'éléments individualisables. Ainsi on peut mesurer la réflectance propre à chaque « états de surfaces élémentaires », ou ESE (Escadafal, 1981 ; Escadafal, 1987).

Les mesures de réflectance sur des éléments de surface plus grands, comprenant plusieurs de ces ESE, se rapprochent de celles faites par les satellites qui couvrent plusieurs décamètres par point de mesure. Ainsi les valeurs numériques de pixels d'images de satellite expriment la réflectance d'éléments de surface qui, dans les milieux naturels, sont le plus souvent des mélanges de sol et de végétation (Ruiz Sinoga et al., 2010).

A noter que les mesures de terrain sont réalisées selon un angle de mesure habituellement fixe (visée nadirale) mais un angle d'éclairage variable selon la position du soleil à l'instant de la mesure. Dans ce cas, on parle de réflectance bidirectionnelle (BRF en anglais), qui varie sensiblement pour les surfaces de géométrie complexes (composées de roches, sols, plantes et résidus végétaux). Dans le cas de surfaces de sol homogènes et peu rugueux, l'effet directionnel est plus faible (Escadafal et Huete, 1991a).

C. Mesures par satellite

Depuis le satellite, la réflectance est mesurée par balayage selon un champ de visée instantanée qui dépend de la résolution du capteur. Les valeurs obtenues sont assignées aux pixels qui composent l'image. Ainsi pour simplifier on peut dire que chaque pixel représente la mesure de la réflectance d'une tache au sol. Avec les satellites Landsat et Spot la tache au sol à une dimension variant de 80 à 20m de côté, chacune d'elle couvre donc une fraction de surface englobant plusieurs états élémentaires. De surcroit, comme il est impossible de tracer très précisément ses limites sur le terrain, on s'intéresse habituellement à des ensembles de pixels correspondant à une aire où la surface présente des caractéristiques assez similaires, qui est donc nécessairement composée d'un assemblage de nombreux éléments.

La variabilité de la réflectance mesurée dans cette aire traduit la variabilité naturelle du paysage observé. Ainsi, la réflectance intrinsèque de ces ESE peut être relativement stable dans le temps (roches), varier en fonction de certains paramètres clé (ex : humidité des sols) ou traduire des évolutions phénologiques.

Cette imprécision est due au fait que les tâches au sol n'ont pas une forme parfaite de carrés disjoints (mais plutôt de disques avec un halo), et que d'autre part la précision avec laquelle chaque tache est positionnée est au mieux de l'ordre de grandeur de la tâche elle-même (une tâche au sol de 20x20m est positionnée à +/- 20m)

Pour résumer, la réflectance mesurée par satellite est donc une moyenne intégratrice des réflectances individuelles des éléments de surface. La mesure de ces réflectances individuelles permet de comprendre la contribution de chaque élément à la signature générale de la surface,

et ainsi d'interpréter les mesures par satellite d'après les données réelles sur les propriétés optiques du terrain étudié.

D. Résultats: l'importance des sols

Du fait de la compétition pour l'eau, dans les milieux étudiés les végétaux sont écologiquement adaptés aux caractéristiques locales hydro-pédologiques, et généralement espacés, ils le sont d'autant plus que le climat est plus sec. On remarque également que selon que la période humide a lieu en hiver ou en été le type d'écosystème est différent. Ainsi sur la frange sud du Sahara, les savanes herbeuses dominent, alors qu'au nord du Sahara, c'est le domaine de la steppe à buissons ligneux (chaméphytes).

Dans les deux cas on constate qu'en moyenne sur l'année, la composante minérale est de loin la plus visible dans le milieu : le sol et les différents matériaux présents en surface dominant.

Ainsi, sauf pendant les courtes périodes de maximum de couvert végétal à la fin des épisodes pluvieux importants, la plus grande partie du temps, les surfaces arides observées depuis l'espace sont des surfaces à dominante minérale où roches, sols et dépôts superficiels sont largement majoritaires. Dans le nord du Sahara, les observations des steppes à chaméphytes montrent que le couvert végétal moyen maximum y est de l'ordre de 30%, et bien souvent plus faible. Cela revient à dire que les surfaces observées sont composées de 70 à 100% de sol et matériaux superficiels minéraux, qui sont par voie de conséquence responsables de la réflexion du rayonnement solaire vers les satellites dans les mêmes proportions.

La signature spectrale des roches et notamment celle des affleurements indicateurs de contextes favorables à des gisements de minerais d'intérêt économique a été bien étudiée altération hydrothermales (par ex. Sabins, 1999); les propriétés spectrales des sols arides l'ont été relativement moins.

Du point de vue de l'étude du fonctionnement des écosystèmes il est en effet logique et classique de s'intéresser prioritairement aux composants végétaux de la surface. L'identification et le suivi des principaux biomes de notre planète par satellite sont ainsi encore actuellement très majoritairement basés sur la détection de la végétation verte par des *indices de végétation*. Ils sont tous basés sur l'expression du contraste entre la réflectance dans le domaine spectral rouge et celle dans l'infrarouge, dont la différence normalisée de l'indétrônable NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) défini dans les années 1970 (Anyamba et Tucker, 2005).

Dans les régions arides il est apparu que cet indice ne donne pas de très bons résultats, ce qui s'explique facilement à partir des considérations précédentes. Cet indice est peu sensible aux faibles taux de couverture par la végétation verte et entaché d'erreurs dues aux variations de la réflectance du sol qui la supporte (Kennedy, 1989b) .

De fait, en étudiant ces régions, à propos de la caractérisation de la réflectance des végétaux, au delà de leurs parties vertes, on s'est aussi intéressé aux parties sèches (Elvidge, 1990), et récemment celle des croûtes biologiques présentes à la surface (Karnieli et al., 2001 ; Ustin et al., 2009) . Dans certains écosystèmes arides, notamment dans les zones protégées du pâturage, ces croûtes le plus souvent formées de cyanobactéries et d'algues microscopiques peuvent recouvrir des surfaces importantes, mais ailleurs les sols et matériaux minéraux de surface restent prédominants.

E. Couleur des sols et indices spécifiques

Prenant compte des constations qui viennent d'être soulignées, dans les travaux sur lesquels sont basés cette synthèse, l'étude de la réflectance spectrale des sols et de ses variations spatio-temporelles s'est imposée comme un élément important pour mieux comprendre et utiliser les données de télédétection. Des campagnes systématiques de mesure de la réflectance des différents composants élémentaires des surfaces ont été menées, elles ont bien

sûr pris en considération les composants minéraux, affleurements des horizons superficiels des sols, voiles éoliens, pellicules superficielles.

La figure 2 présente les mesures de réflectance de quelques éléments de surface typiques de régions arides mesurées dans le sud tunisien. Pour ce qui est des éléments minéraux, on remarque une importante fluctuation de la courbe de réflectance en amplitude, mais aussi selon la forme. Les variations les plus importantes sont observées dans le moyen infrarouge, mais ce domaine spectral n'est exploité que par certains capteurs.

En se focalisant sur le domaine visible à proche infrarouge (400-1100 nm) commun à toutes les données en provenance des capteurs optiques on constate que la forme de la courbe de réflectance des sols varie peu mais que la pente moyenne est notablement différente d'un sol à l'autre.

Bien évidemment, plus la réflectance moyenne d'un sol est élevée plus ce sol paraît clair. Nous abordons ici le domaine de la perception de la variation de la réflectance par l'œil humain en d'autres termes de la vision de la couleur des objets. Cette question très complexe fait l'objet de théories élaborées, détaillées dans de volumineux traités de colorimétrie (Wyszecki et Stiles, 2000 ; Shevell, 2003).

Pour résumer nos travaux sur ce sujet, une des observations facilement utilisables est que le sol est d'autant plus coloré que la pente de la courbe de réflectance dans le domaine visible est élevée. Ainsi la pente des sols grisâtres est faible, celle des sols rougeâtres est forte. Ces résultats ont été obtenus sur une gamme de sols variés et sont applicables à tous les sols quelque soit leur région d'origine (Escadafal et al., 1989). Ci dessous nous présentons des exemples issus des régions arides étudiées.

Courbes de réflectance spectrale de composants de la surface rencontrés dans le sud tunisien

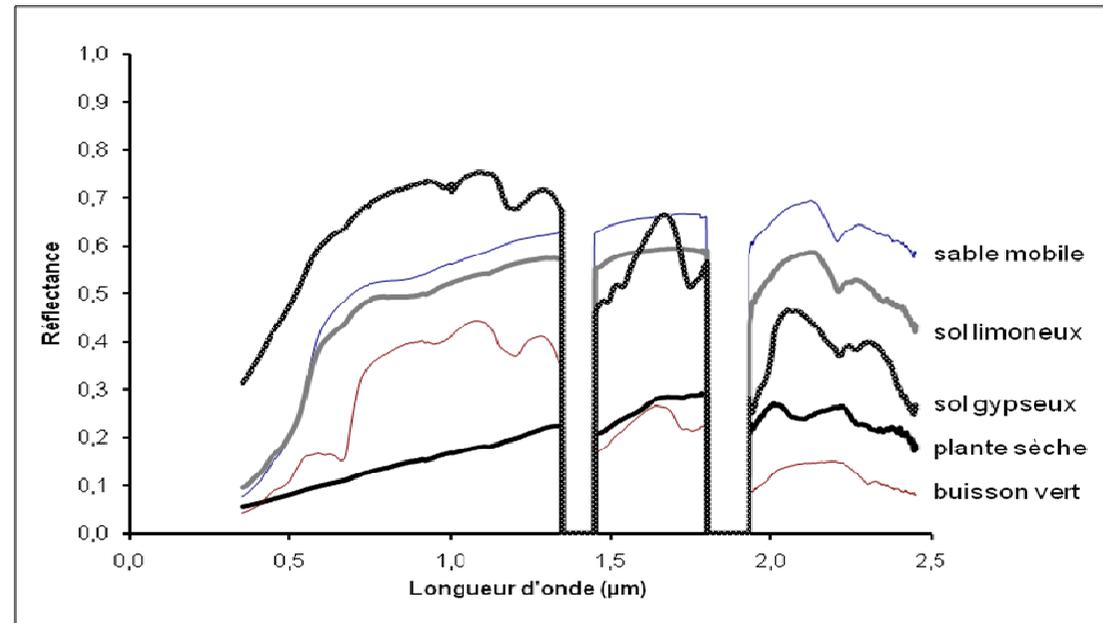


Figure 2

La réflectance mesurée sur le terrain couvre ici tout le domaine spectral du rayonnement solaire (les interruptions correspondent aux domaines d'absorption par l'atmosphère)

Source : Auteur

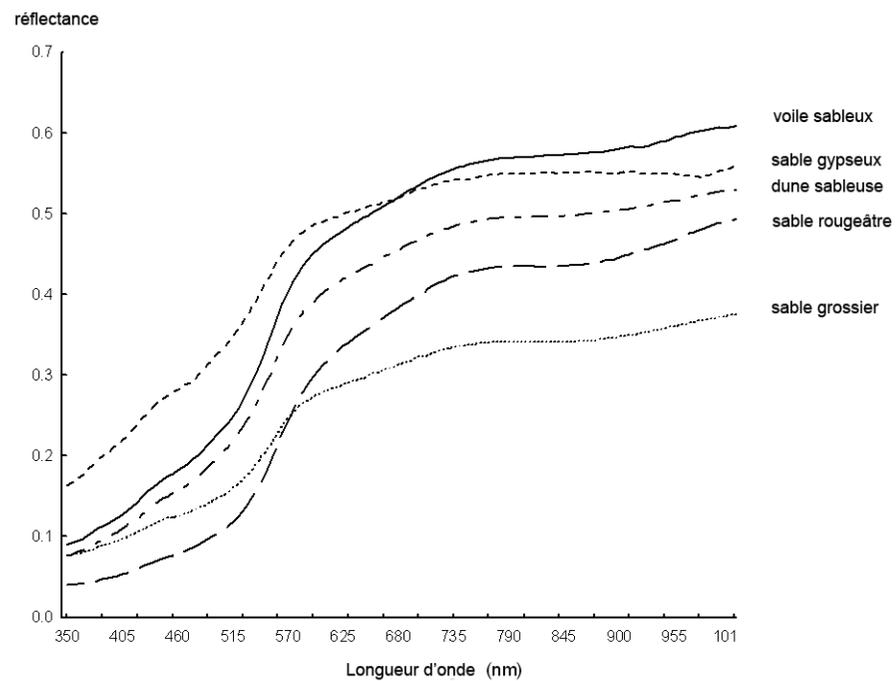
La figure 3 illustre le cas de sols de couleurs différentes et les valeurs moyennes de pente dans la gamme 370-770 nm, qui est celle du domaine visible. Dans l'ordre de la légende, ces sols présentent une coloration de plus en plus exprimée, en colorimétrie on dit que la saturation augmente.

A partir de cette observation et en reprenant le principe de la différence normalisée utilisée dans le NDVI (Normalised Difference Vegetation Index), un indice de couleur (IC) a été proposé (Escadafal et Huete, 1991b).

$$IC = (Br - Bv) / (Br + Bv)$$

Où Bv et Br représentent la réflectance dans les bandes vertes et rouges respectivement (ex.: Landsat TM1 et TM3)

Figure 3 : Courbes de réflectance spectrale de cinq échantillons de matériau de surface de couleurs différentes



Plus l'échantillon est coloré, plus l'absorption du rayonnement dans les courtes longueurs d'ondes est forte, la courbe de réflectance présente alors un creux marqué.

Source : Auteur

Cet indice permet ainsi de distinguer les matériaux de surface d'après la saturation de leur couleur, par exemple les sols à croûte gypseuse affleurante gris très clair, (IC faible) des sols à voile éolien, composé de sable quartzueux rougeâtre (IC élevé). Lorsque sous l'effet conjugué des pratiques agricoles et du vent, les voiles et dépôts éoliens se déplacent, la composition de la surface des sols est modifiée et leur couleur également. En suivant les variations de l'indice de coloration, il est alors possible de suivre ces modifications.

En résumé, les sols et matériaux minéraux de surface sont les composants dominants des surfaces arides, l'interprétation des images acquises par les satellites sur ces régions nécessite de connaître et prendre en compte les propriétés spectrales correspondantes. Des informations de nature géologique et écologique peuvent en être tirées, en détectant la présence d'affleurements de matériaux clairs (calcaire, gypse, sels,...), ou de sable, par exemple.

II – Les données de télédétection disponibles

1. Préparation

Dans les projets cités, l'objectif de suivre des évolutions à long terme nous a naturellement guidé vers les types d'images qui sont acquises de façon régulière depuis plusieurs décennies. Ainsi les données des satellites Landsat, qui fonctionnent depuis 1972 jusqu'à présent, permettent en principe de disposer de longues séries temporelles tout en offrant une résolution suffisamment détaillée pour se placer à l'échelle de projets d'aménagements. Si la série des satellites NOAA-AVHRR est également très longue (voir par ex. Baldi et al., 2008) sa résolution tant spatiale (kilométrique) que spectrale (2 bandes vis-pir) est trop globale pour notre objectif.

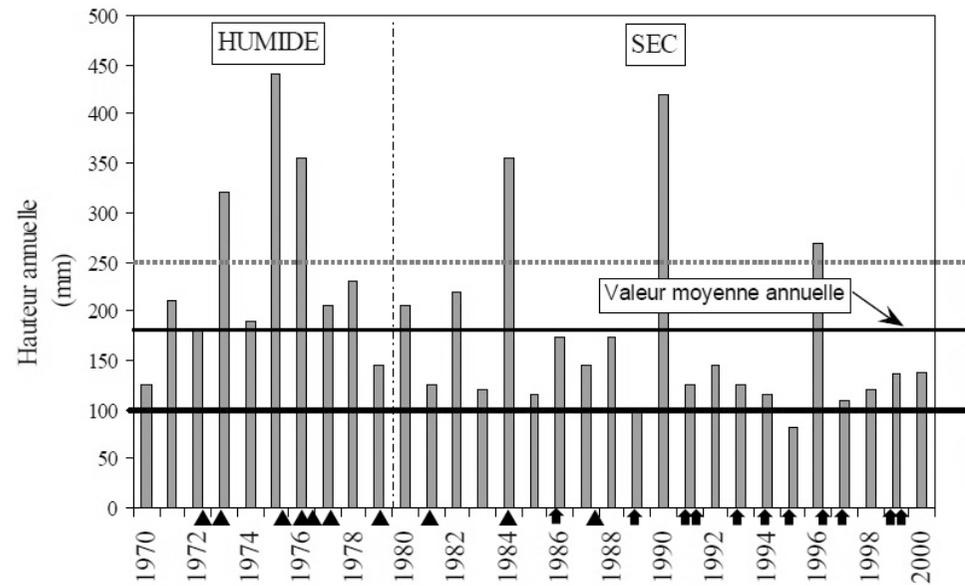
La constitution d'une série d'images de satellites en vue d'une analyse multi temporelle des changements écologiques dans le paysage étudié requiert de très nombreuses étapes, et en premier lieu, une phase de préparation dont la qualité est essentielle à la réussite du processus complet.

F. Sélection / acquisition

La première étape est bien entendu d'inventorier quelles sont les images disponibles chez les fournisseurs. Pour cela il faut consulter les catalogues existants, et y repérer les images dont la position (coordonnées géographiques) et la qualité sont satisfaisantes. Sur ce dernier point seul l'ennuagement est généralement précisé, la qualité radiométrique n'est généralement pas connue. Pour les images les plus anciennes, elles sont malheureusement souvent entachées de défauts tels que des lignes manquantes ou des artefacts en bandes. De plus, idéalement la sélection des images devrait être calée sur le calendrier des saisons et surtout des précipitations, pour s'assurer de disposer d'images au moment des minima et maxima de développement de la végétation. Cet idéal est difficile à atteindre d'autant que certaines images anciennes bien qu'indexées dans les catalogues ne peuvent finalement pas être livrées, le fournisseur ne réussissant pas à les extraire de sa gigantesque archive.

Dans le cas du site étudié dans le sud tunisien, ce processus laborieux a permis de constituer la série décrite dans la figure 4 à partir des catalogues USGS (U.S. *Geological Survey*) et Eurimage de données Landsat.

Figure 4 : Répartition dans le temps des 25 images Landsat rassemblées sur la zone d'étude de Menzel Habib, et pluviométrie annuelle.



Les dates des images disponibles sont mal calées avec les variations des précipitations (triangles : Landsat MSS, flèches : Landsat TM)
 Landsat MSS : 08/1972-02/1973-11/1975-04/1976-06/1976-06/1977-02/1978-07/1979-06/1981-05/1984-09/1987-03/1993
 Landsat TM : 03/1986-04/1989-03/1991-07/1991-03/1993-04/1994-03/1995-03/1996-07/1996-03/1997-03/1999-07/1999-09/1999-12/1999-

Source : Auteur

Si certaines années il a été possible d'avoir deux images prises à deux saisons différentes, on remarque aussi plusieurs années sans images. Une des raisons de ces lacunes est la stratégie d'archivage des données anciennes par le service de l'Earth Resources Observation and Science (EROS) data center de l'USGS. Les contraintes financières ont conduit à sacrifier les données Landsat MSS en dehors du territoire des Etats Unis qui ne paraissaient pas intéresser les utilisateurs. Il y avait en effet peu de demandes à l'époque de leur acquisition, mais avec l'importance actuelle des recherches sur les changements environnementaux et les capacités accrues tant des ordinateurs que des logiciels de traitement d'image, la perte de ces données se fait cruellement sentir.

Il convient cependant de noter que de plus en plus de ces archives d'images de satellites sont mises gratuitement à la disposition du public, qui peut même découvrir les photographies déclassifiées de satellites militaires des années soixante (dont la série Corona). Elles sont extrêmement intéressantes pour les analyses environnementales historiques. Un exemple est l'évolution du couvert arboré dans des terroirs du Sahel africain (Andersen ,2006 ; Gardelle et al., 2010).

Pour ce qui est de notre site d'étude, au final de cette première étape nous disposons d'une série très imparfaite, mais dont la durée nous permet d'espérer de tirer des conclusions sur les changements à long terme.

G. Géométrie, géo référencement

Les images les plus récentes peuvent être commandées et livrées dans un format tel qu'elles sont directement utilisables dans un système d'information géographique : elles sont dans une projection adaptée, par exemple celle des cartes topographiques de la zone étudiée, géo référencées et donc directement superposables à ce fond cartographique.

Pour les images plus anciennes il en va tout autrement. Le travail de reprojection dans un système commun est à réaliser par l'utilisateur, on parle d'un processus de correction géométrique. La procédure classique est d'identifier dans l'image des points de contrôle dont on peut connaître les coordonnées géographiques exactes, à partir d'une carte ou mieux de mesures plus précises faites sur le terrain avec un GPS. Utilisant l'ensemble des paires coordonnées images (ligne/colonne) et coordonnées géographiques au sol, un logiciel de traitement d'image permet alors de réaliser la reprojection de l'image dans le système choisi. C'est le géo référencement qui les rend compatibles avec les autres données géographiques (carte topographiques, géologiques, modèle numérique de terrain, etc).

Dans la pratique, il est courant d'utiliser une image de référence, généralement récente, dont le géo référencement est le meilleur possible, et de reprojeter les autres sur celle-ci.

A noter que le processus de correction géométrique entraîne nécessairement un rééchantillonnage de l'image originale, ce qui a un impact sur les valeurs radiométriques (cf infra). Dans le cas de la série d'images utilisée, les deux types TM et MSS étant de résolution différente, nous avons fait le choix de toutes les rééchantillonner avec la taille de pixel la plus grande, soit 80m, celle des images MSS.

2. Prétraitements

A l'issue de l'étape précédente, on dispose d'une série d'images sur une même zone, superposables, permettant de faire correspondre à chaque élément de surface au sol une série de valeurs numériques. Les images MSS contiennent des valeurs numériques pour les 4 canaux MSS (4 à 7) et les images TM en contiennent 6 (en négligeant ici les données du domaine thermique).

Donc, pour chaque date, nous avons 4 à 6 valeurs numériques; à noter que l'affichage sur écran ne permet d'en visualiser que 3 à la fois, en affichant un canal en bleu, un deuxième en

vert et un troisième en rouge (synthèse additive RVB). Bien souvent les domaines spectraux des canaux ne correspondent pas au codage de couleur choisi, on parle alors d'affichage en fausses couleurs.

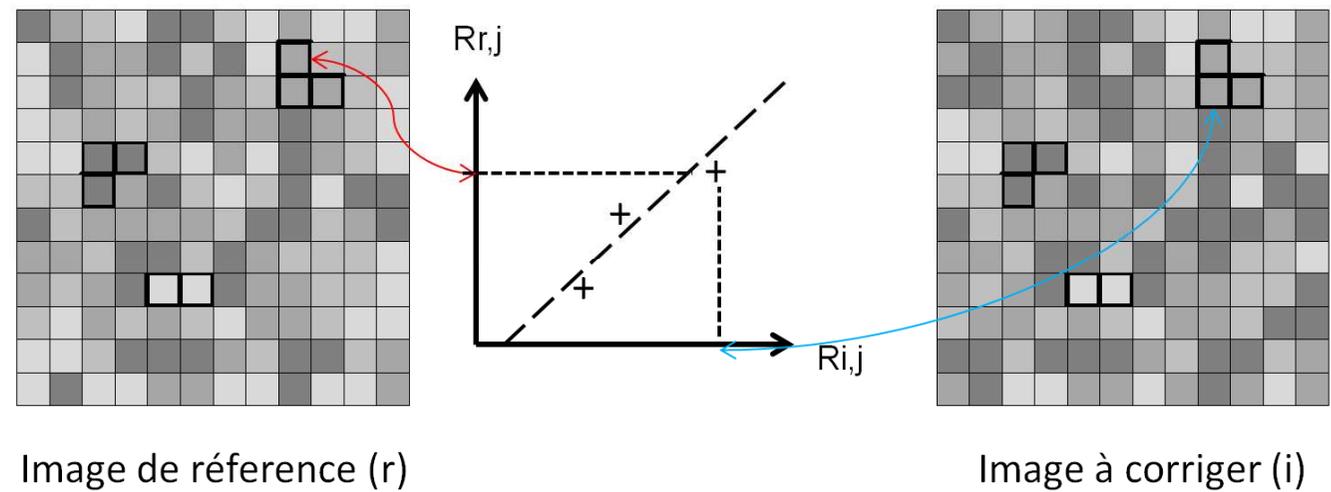
Dans le cas des images Landsat, les valeurs numériques des pixels sont proportionnelles au rayonnement reçu par le capteur, plus précisément à la luminance. Ces valeurs dépendent de la réflectance de la surface, mais aussi de l'intensité du rayonnement solaire qui parvient à cette surface (qui varie selon la saison), des effets d'absorption par l'atmosphère (« effets atmosphériques »), et de la pente du terrain observé. A cela s'ajoutent les différents ajustements techniques au cours du fonctionnement du capteur, notamment son gain et son vieillissement. Les valeurs sont exprimées en comptes numériques proportionnels à la luminance spectrale des surfaces visées. Or l'information qui nous intéresse est la réflectance au sol. Pour l'obtenir il faut alors réaliser un type de traitement souvent appelé « correction radiométrique ».

A. Radiométrie

Dans le cas des images actuelles un certain nombre sont fournies avec les valeurs par canal directement exprimées en réflectance au sol (Spot VGT, produits NASA-MODIS), pour d'autres, le fournisseur le propose comme option payante. En effet, c'est le plus souvent le résultat d'un prétraitement supplémentaire ; ici il a dû être réalisée dans le cadre du projet, les fournisseurs ne proposant pas ce service pour les images d'archive utilisées (Escadafal, Bacha et Delaître, 1997).

Sans détailler l'ensemble de la méthode utilisée, retenons qu'elle se base dans ce cas également sur la préparation d'une image de référence, dont les comptes numériques (luminance) sont convertis en réflectance au sol en utilisant un jeu de mesures spectro-radiométriques réalisées sur des échantillons de surface du terrain. Ensuite une première analyse statistique multi dates permet de définir des ensembles de pixels apparaissant invariants (Elvidge et al., 1995). Pour chacun de ces éléments du paysage qualifiés de « pseudo-invariants » un couple de valeurs est extrait, l'une de l'image de référence (r) et l'autre d'une image (i) à convertir en réflectance. Cet ensemble de couples permet de calculer la formule de conversion linéaire des comptes numériques en réflectance pour chacun des canaux (j) de chaque image de date (i). La figure 5 schématise cette approche, qui a été depuis reprise et adaptée à d'autres types d'images (Simonneaux et al., 2008 ; Hadjimitsis et al., 2009).

Figure 5 : Principe de la méthode de normalisation radiométrique par la méthode des invariants.



Pour chacun des canaux (j) et pour chaque zone pseudo-invariante, les valeurs de réflectance de l'image de référence (r) et les valeurs brutes de l'image à corriger (i) sont extraites. La régression linéaire ensuite calculée permet de convertir les valeurs du canal j de l'image i en réflectances au sol.

Source : Auteur

D'autres méthodes plus rigoureuses sont basées sur la simulation physique du trajet du rayonnement, des absorptions par l'atmosphère selon sa composition. Elles utilisent également les données des constructeurs de satellites sur la calibration, le gain et les performances des capteurs (Vermote et al., 1997). Elles se sont révélées peu adaptées à notre projet car les informations sur ces nombreux paramètres nécessaires ne sont pas disponibles dans la majorité des dates de prises de vues.

B. Calcul des indices

A ce stade nous disposons d'une série d'images converties en réflectance au sol, donc comparables entre elles. Il est possible de suivre l'évolution de la réflectance des surfaces à travers les dates de la série, pour chacun des canaux. Plutôt que de les analyser individuellement, un premier indice permet de caractériser la réflectance moyenne ou « brillance » (indice de brillance IB), une grandeur qui s'apparente à l'albédo (Lillesand et Kiefer, 2000), sans en avoir la même définition physique rigoureuse.

$$IB = \text{SQRT}(B1^2 + B2^2 + B3^2)$$

Où B1 à B3 représentent les bandes dans le domaine visible (ex TM1 à TM3)

Le suivi de l'indice de brillance permet d'estimer si l'élément de surface observé devient plus clair ou s'assombrit. Ce dernier cas est causé par différents phénomènes qui peuvent se combiner : a) la surface a été humidifiée (après des précipitations ou par irrigation), b) la rugosité de la surface a augmenté (par le travail du sol, par ex.) c) le couvert végétal a augmenté. L'éclaircissement correspond bien sûr au phénomène inverse, et donne souvent lieu à un diagnostic de dégradation de l'état du milieu.

A noter cependant que la précision de la méthode de correction radiométrique utilisée est moyenne et de faibles variations de l'indice de brillance ne sont pas significatives. Par construction, les indices normalisés s'affranchissent en bonne partie de ce problème ce qui explique leur large succès. Ainsi dans cette étude, deux indices normalisés, le très classique NDVI et l'indice de coloration développé pour les sols (cf supra) ont été utilisés en sus de l'indice de brillance.

C. Résultat : une hyper image multi date

A l'issue de l'ensemble du processus de prétraitement nous avons choisi d'analyser l'évolution dans le temps des trois indices ainsi calculés. Le jeu de données initial de géométrie, résolution et radiométrie disparates est maintenant homogénéisé et converti en mesures comparables entre les dates. Il constitue une hyper image à 3 « néo canaux » (les valeurs des 3 indices) et 23 plans, un par date.

III – Traitements multi temporels

Avec le développement des satellites à résolution kilométrique et répétitivité quotidienne (notamment NOAA AVHRR) de longues séries temporelles ont été constituées et des outils spécifiques ont été développés pour les traitements dits « multi temporels ». Cette utilisation de la télédétection s'est particulièrement développée dans les années récentes, où sont apparus des séries d'images combinant la haute résolution spatiale avec une répétitivité nettement plus élevée que celles des satellites Landsat et Spot. L'utilisation des données du satellite Formosat pour le suivi du développement des cultures dans la région du Tensift au Maroc en est un bon exemple récent (Duchemin et al., 2008).

Dans le cas de notre série de données, comme nous l'avons vu, le pas de temps entre les images est malheureusement très irrégulier et beaucoup de ces méthodes ne sont pas

applicables. Les exemples ci-dessous illustrent les différentes approches testées au cours des projets, pour pouvoir en tirer un certain nombre d'enseignements.

1. Comparaisons simples entre dates

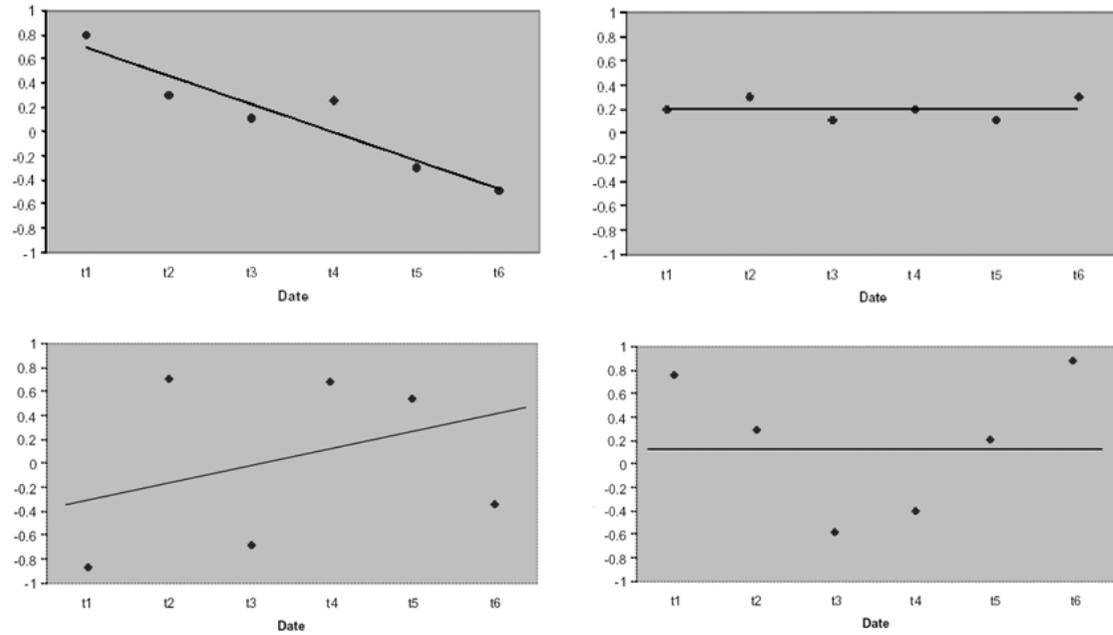
L'approche la plus immédiate consiste à s'intéresser à un couple d'images et réaliser des calculs simples tels que la soustraction entre les deux des valeurs d'un canal ou d'un indice. Selon les dates choisies, l'information obtenue concerne sur le changement sur une période qui peut être très variable : d'un mois à l'autre, d'une saison à l'autre, mais aussi beaucoup plus longue. C'est notamment le cas d'études historiques basiques qui comparent deux situations, généralement une ancienne et une actuelle, par ex. la détermination des changements d'occupation du sol tels que l'extension de l'agriculture irriguée (par ex., Qi et al., 2007). Pour ce qui est des études écologiques dans des milieux aux fluctuations irrégulières comme ceux étudiés ici, même en choisissant les dates des prises de vues au mieux, l'information extractible de la comparaison entre deux instantanés se limite aux éléments à forte persistance : nombre et distribution des arbres par ex (Reij et al., 2005), et bien sûr les infrastructures, telles que routes, maisons, bâtiments.

Pour tirer parti d'une série de plusieurs images, comme nous en disposons ici, il faut passer à des traitements combinant plusieurs dates. Pour une première approche, nous savons qu'il est possible de combiner dans une visualisation à l'écran un maximum de 3 canaux, en leur affectant chacun une des couleurs R,V,B (Girard et Girard, 2010). Dans ce cas nous pouvons donc visualiser simultanément 3 dates quelconques. Si les dates choisies sont pertinentes pour l'objectif poursuivi, il est possible d'interpréter cette « trichromie », voire d'y définir des classes. En général, cette première visualisation permet de repérer les changements les plus importants dans une série d'images, mais les comparaisons 3 par 3 sont vite limitées.

2. Analyse de tendance

Une première méthode simple pour aborder la totalité de la série de données est de rechercher une évolution globale d'un des paramètres, par exemple l'indice de brillance ou l'indice de végétation. Il s'agit de déterminer par calcul si ce paramètre présente une tendance vers une augmentation, ou vers une diminution, ou bien au contraire s'il est globalement stable. Le calcul le plus simple est la recherche de la pente de la droite de régression entre les dates, comme présenté sur la figure 6.

Figure 6 : Exemples théoriques d'évolution temporelle d'un indice extrait d'une série d'images



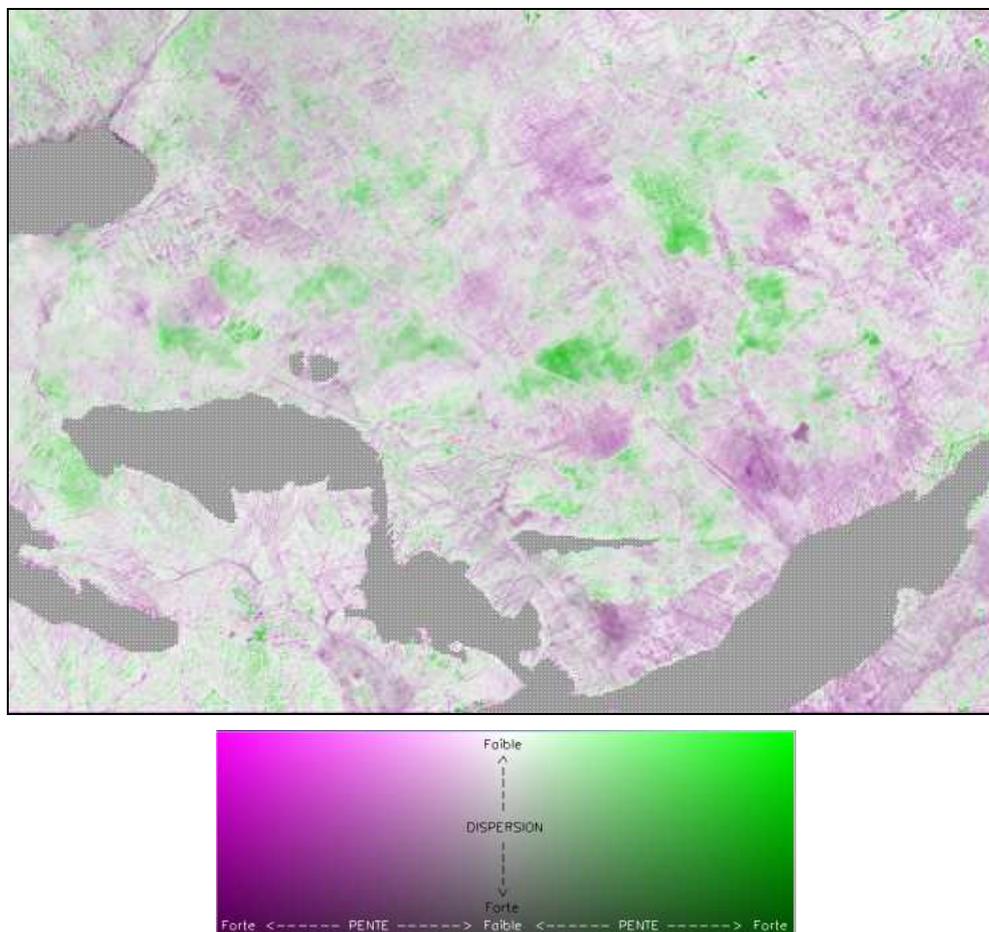
Les schémas de la rangée supérieure indiquent une tendance nette, la ligne inférieure une tendance peu nette, la colonne de droite montre une absence d'évolution de l'indice (stabilité).

Source : Auteur

La pente de cette droite nous indique la direction de la tendance, mais cette information peut être peu significative si la dispersion est grande, comme l'illustre les deux schémas inférieurs de la figure 6. Ce dernier paramètre doit donc être considéré dans toute étude de tendance à long terme selon cette méthode.

Dans le cas de notre série sur la région de Menzel Habib, nous avons réalisé le calcul de la régression linéaire pour l'indice de brillance (figure 7).

Figure 7. Visualisation de l'évolution moyenne de la brillance de la surface de la zone test de Menzel Habib, Tunisie (voir les explications dans le texte)



En utilisant l'approche schématisée dans la figure 6, cette image représente la pente l'évolution des valeurs de l'indice de brillance pour l'ensemble des dates. En vert pente positive, en mauve pente négative. La dispersion est représentée par une saturation décroissante de la couleur (les profils temporels très dispersés sont ainsi représentés par des gris). Les tendances les plus nettes apparaissent donc sous forme de plages de couleur vives : en vert vif les plages nettement dénudées, en mauve vif celles dont le couvert végétal a augmenté (mises en défens, cultures...)

Source : Auteur

Pour visualiser les valeurs observées, nous avons représenté les valeurs de pente obtenues par une gamme du vert (valeurs positives) au mauve (valeurs négatives). La dispersion est exprimée par la saturation de la couleur ; une couleur dé saturée indique une tendance peu significative (forte dispersion), et inversement. Cette approche assez simple est capable de mettre en évidence et de mesurer des tendances linéaires, telles qu'une diminution persistante du couvert végétal. Par contre, elle ne peut révéler les phénomènes saisonniers ou pluriannuels, présentant une périodicité.

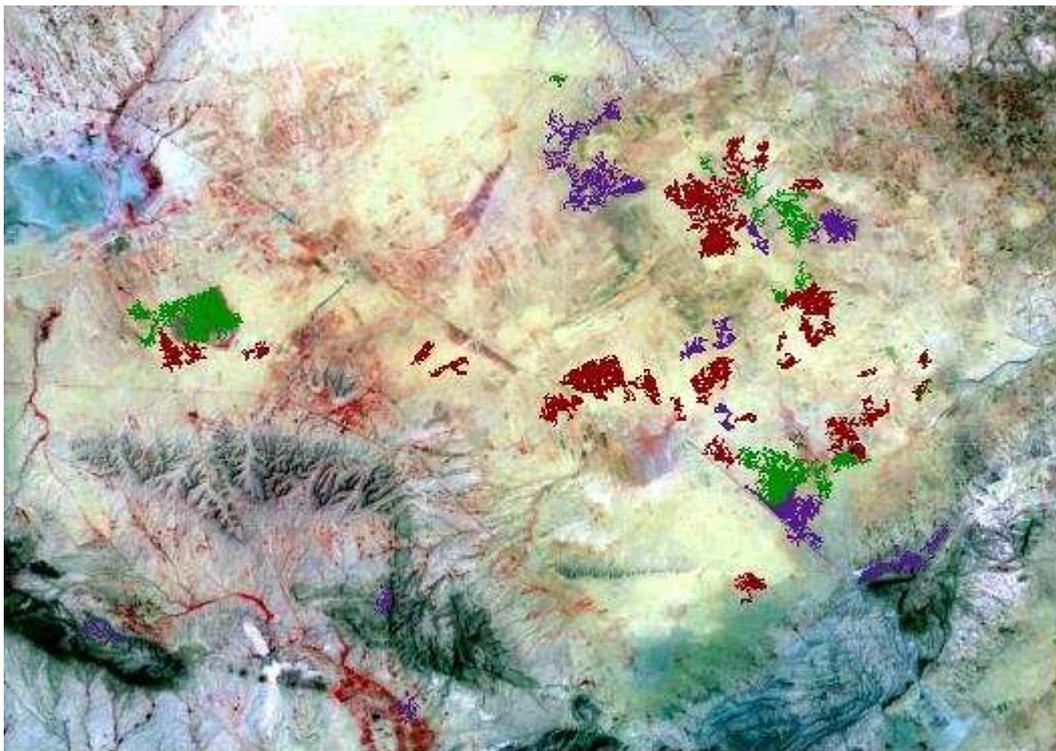
3. Analyse de Fourier

Dans l'étude des phénomènes périodiques, la décomposition en série de Fourier est une méthode très utilisée. Ici (voir figure 8) elle a été testée dans sa version simple à une dimension, pour repérer des cycles ou comportements périodiques communs dans les valeurs de l'indice de végétation de notre série (Albinet, 2004 ; Escadafal et al., 2005).

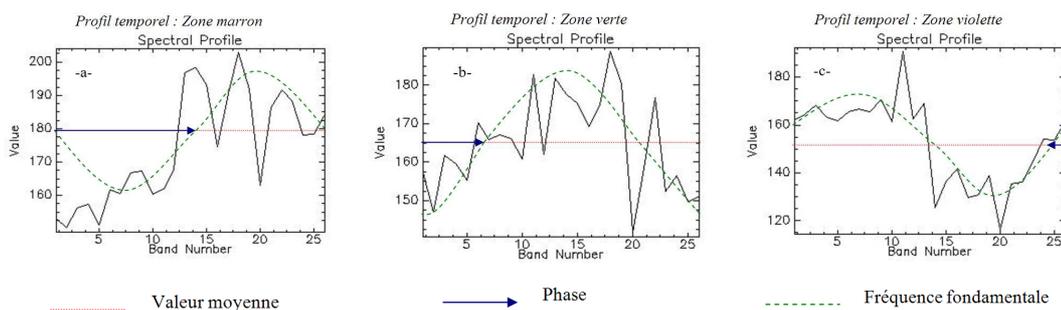
Les résultats de l'analyse par la méthode de Fourier ont permis de distinguer certains sous ensembles de pixels remarquables du point de vue de la périodicité des changements. Cependant cette méthode n'a pas permis d'identifier les profils temporels de tous les pixels.

En effet, si chaque élément de surface représenté par un pixel ne peut être considéré comme totalement indépendant de ses voisins, force est de constater que le nombre de « trajectoires temporelles » potentielles est, sinon infini, du moins très grand. Dans ce foisonnement, il est donc difficile d'y repérer les grands ensembles qui ont des évolutions semblables. L'analyse de Fourier a repéré un certain nombre de sous ensembles de pixels qui ont une évolution semblable, mais elle nous dit peu de choses sur les autres.

Figure 8 : Identification dans la série d'image d'ensemble de pixels présentant des phénomènes périodiques similaires (analyse de Fourier).



Fond : image Landsat en fausses couleurs 05/2003.



La sélection des pixels dont le profil fréquentiel est dominée par une fréquence fondamentale identifiée, permet de distinguer ici trois classes prises en exemple :

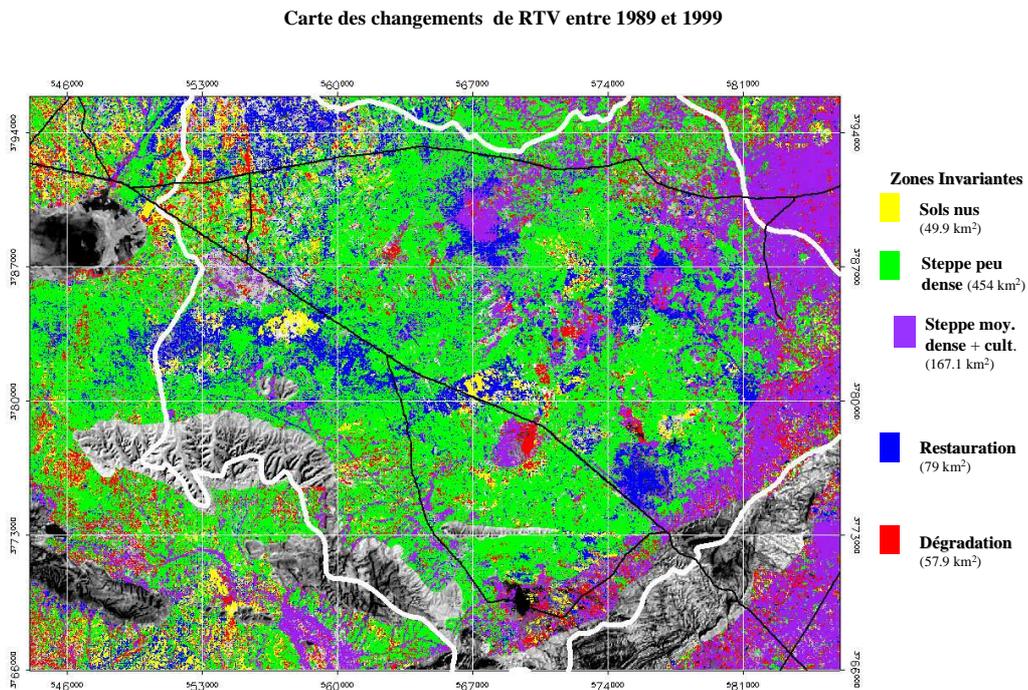
- a) En marron : des plages présentant une croissance de l'indice de brillance(a),
- b) En vert: des plages avec une croissance d'indice de brillance jusqu'à la fin des années 1980, puis une décroissance jusqu'en 2003
- c) En mauve : des plages avec une croissance d'indice de brillance jusqu'au milieu des années 1980, une décroissance jusqu'à la fin des années 1990 et une nouvelle dégradation jusqu'en 2003

Source : Auteur (d'après Albinet, 2004)

4. Classification

Pour faire face à la multiplicité des profils d'évolution temporelle lorsqu'on prend en compte la population des pixels individuels, une approche est de simplifier en diminuant le nombre de situations possibles (figure 9). Pour chaque date, nous avons ainsi regroupé les pixels dans un nombre limité de classes, représentant les principales conditions de surface rencontrées dans la zone.

Figure 9 : Cartographie simplifiée de l'évolution temporelle entre 5 dates à partir de 3 classes d'état des surfaces



La classification multi temporelle a été testée en combinant 5 images d'années différentes, sur chacune seule trois classes ont été distinguées (couvert végétal relativement faible, moyen ou élevé). Sur le nombre maximal théoriquement possible (243) de combinaisons, il est apparu que 65 profils représentent 80% de l'effectif. Ces profils ont été classés en steppe en trois classes de couvert stable, une classe de couvert généralement en diminution (dégradation) et une en accroissement (restauration).

Source : Auteur

Cette approche présente l'avantage de pouvoir définir un profil temporel pour chaque pixel. La difficulté de son utilisation est liée à la validation des classes obtenues pour les images les plus anciennes, même si le fait d'utiliser des images normalisées en réflectance permet une certaine cohérence entre les classes.

5. Vitesse de changement

La vitesse à laquelle se produit un changement est un des paramètres extractibles d'une série d'images de télédétection, intéressants du point de vue écologique. Les séries d'images à pas de temps court, comme celles des séries NOAA-AVHRR ou SPOT-VGT ou plus récemment MODIS, permettent en effet de suivre par exemple le développement d'un couvert végétal et d'en observer au cours d'une saison les modifications graduelles liées à la phénologie, ou des changements plus brutaux dans le cas des pratiques agricoles, comme les coupes et récoltes.

Dans le cas de notre série de données, toujours pour les mêmes raisons, elle ne permet pas une analyse aussi fine. Il faut cependant noter qu'à l'échelle pluriannuelle il y a aussi des différences de vitesses de changements. Ainsi dans le paysage des aires changeant très peu ont été repérées et ont pu servir de référence pour les corrections géométriques. Ce sont le plus souvent des surfaces pratiquement dénuées de végétation comme les piémonts très pierreux, et les dunes vives. Les informations de terrain sur l'état des autres types de surfaces à chacune des dates ne sont pas suffisantes pour valider un calcul de vitesse de changements déduit des images. Cependant cette piste mérite d'être explorée plus avant, car elle est en lien avec la mesure de la résilience des milieux et pourrait introduire une stratification intéressante entre les zones à changements rapides, moyens et lents.

IV – Bilan méthodologique : l'utilisation d'indices

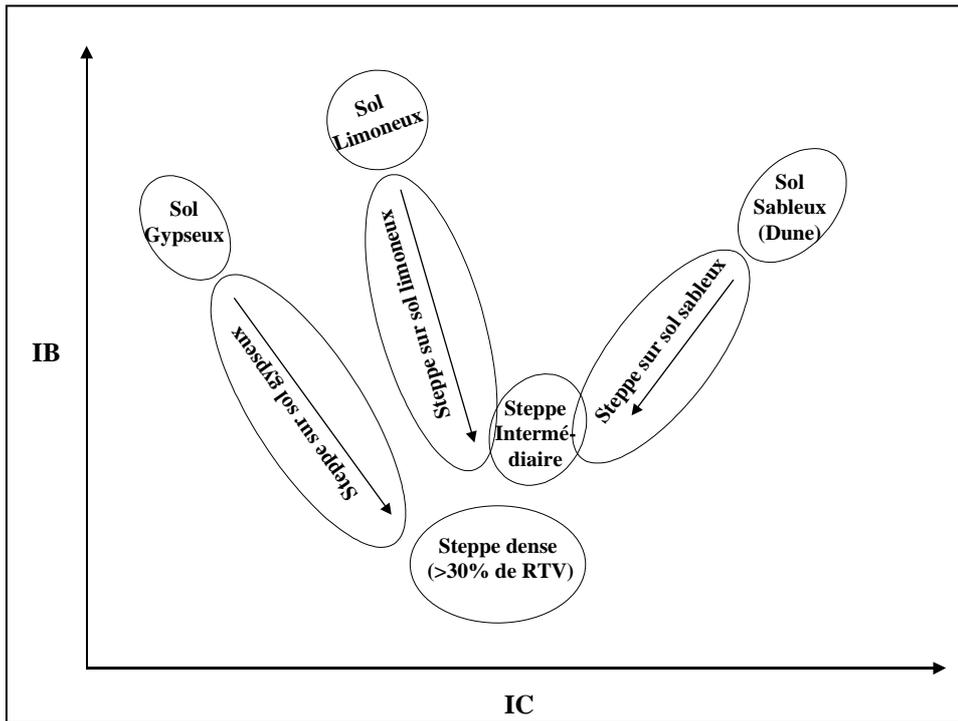
Le classique indice de végétation normalisé, le NDVI reste incontournable pour suivre l'évolution des couverts végétaux verts, mais les taux de couverture végétale sont ici le plus souvent faibles et difficiles à détecter, *a fortiori* leurs variations. Pour prendre en considération l'ensemble de la végétation, il est intéressant d'utiliser le fait qu'elle diminue la réflectance de l'image, qu'elle soit verte ou non. Les variations de l'indice de brillance (IB) peuvent alors être utilisées pour caractériser cet effet assombrissant. Cependant il est plus sensible que les indices normalisés aux variations de la position du soleil au moment de la prise de vue et aux erreurs de correction radiométrique. Par ailleurs, d'autres facteurs peuvent assombrir les surfaces : l'augmentation de l'humidité, ou de la rugosité; cet indice doit donc être interprété en tenant compte de ces différentes limitations.

Les travaux menés au cours de projets cités ont démontré que, à cause de la faible couverture végétale, les sols et particulièrement leur surface sont les composants des milieux arides les plus importants du point de vue de la télédétection. Leur réflectance varie amplement, et leur coloration également. Un indice de coloration, IC, a été développé. Il varie comme la saturation de la couleur des sols, plus la couleur rougeâtre des sols est intense, plus il est élevé, au contraire un sol grisâtre a un indice faible.

Si cet indice est normalisé comme l'indice de végétation NDVI, l'information qu'il fournit sur les sols ne peut être directement interprétée en termes écologiques. Seule une connaissance du milieu et des ses différents aspects selon le niveau de dégradation permet d'utiliser l'indice IC pour diagnostiquer une éventuelle évolution de l'état du milieu, positive ou négative. Ainsi il est possible de repérer la présence de sable éolien (IC élevé), mais dans certains cas cela correspond à l'apparition de dunes vives, ce qui est un signe de dégradation, alors que le départ de sable sur les sols jusqu'alors couverts d'un voile éolien est un signe d'érosion éolienne, qui se traduit par une baisse de l'IC.

Un exemple d'interprétation écologique de l'évolution conjointe des indices IB et IC est donné sur la figure 10.

Figure 10 : Schéma d'interprétation écologique des trajectoires d'évolution combinée des indices IB et IC



La séquence de dégradation typique de la région se traduit par une augmentation de l'indice de brillance (baisse du couvert) et une diminution de l'indice de coloration (érosion de la couche sableuse, apparition des matériaux limoneux, puis gypseux sous jacents (flèche épaisse). Alors que la diminution de l'indice de brillance correspond à une augmentation du couvert végétal, des variations de l'indice de couleur indiquent des changements de type de matériau.

Source : Auteur

Les exemples d'analyses multi temporelles présentées montrent l'intérêt de suivre l'évolution du milieu dans le temps à partir d'indices pertinents. Cela permet de prendre en compte un seul paramètre par date et de focaliser l'analyse sur la seule dimension temporelle. Comme nous l'avons signalé, la série constituée après de nombreux prétraitement a été traitée comme une hyper image à 23 plans, un par date. Leur espacement dans le temps irrégulier n'a pu être pris en compte dans les algorithmes de calculs, mais essentiellement au niveau de l'interprétation des résultats.

V – Perspectives

L'exemple utilisé illustre bien la complexité, mais aussi l'intérêt de chercher à exploiter les images que nous fournissent les satellites d'observations de la Terre depuis leurs débuts.

1. Difficultés d'interprétation

Une des difficultés du suivi multi temporel est liée au fait de calculer des changements au niveau de pixels d'images dont la correction géométrique ne peut être parfaite. Les inévitables erreurs de superposition augmentent artificiellement la gamme des changements dans la mesure où certains sont des artefacts. Lorsqu'on étudie des changements d'occupation du sol de parcelles agricoles dont les limites sont stables dans le temps, ces artefacts peuvent être facilement repérés et éliminés. Dans le milieu étudié où les modifications ne sont pas nécessairement abruptes, des changements apparaissant en bordure de parcelle ou de plages homogènes (voile sableux par ex.) peuvent être des artefacts, mais aussi dans certains cas correspondre à des changements réels au sol, tel que le déplacement d'une limite de parcelle, ou du voile sableux.

Pour le suivi de la couverture végétale, qui reste un élément essentiel de la caractérisation de l'état écologique du milieu, la principale difficulté est sa faible couverture doublée d'une faible abondance du feuillage vert ou plus généralement d'éléments chlorophylliens qui donne le signal habituel de la végétation vue par satellite. Nous n'avons donc pas utilisé cet aspect, pourtant classique, dans l'étude citée, pour s'affranchir des fluctuations saisonnières que la série d'image ne permet pas ici de suivre.

Nous avons tenté de surveiller l'évolution globale du couvert global en nous intéressant à sa propriété d'assombrir les surfaces vue de l'espace. L'indice de brillance est un moyen simple de caractériser cet effet. Il est cependant sensible aux variations des angles d'illumination par le soleil et aux erreurs de calibration radiométrique. En toute rigueur, il est préférable d'utiliser la mesure physique de l'albédo. Si il n'a pas été possible de la calculer à partir des jeux de données dont nous disposons, des valeurs d'albédo sont maintenant disponibles, notamment celles dérivées de la dernière génération de satellites météorologiques, mais de par cette origine ces données sont à une résolution bien plus faible, kilométrique (Loew et Govaerts, 2010).

Enfin, une des limitations inhérentes à l'interprétation de longues séries d'images, c'est qu'il est parfois difficile d'identifier et interpréter des changements apparaissant entre des images acquises il y a de nombreuses années, il n'est plus possible de retrouver des indices ou témoins fiables de la réalité du terrain, dont la reconstruction peut être un peu hasardeuse.

Malgré ces remarques sur les difficultés et les limites de l'analyse multi temporelle à haute résolution discutée ici, le bilan est cependant nettement positif. En effet, seule l'observation répétée au travers des années, peut apporter la vision à long terme indispensable à un diagnostic sérieux de l'état du milieu, tout en l'étendant à de grandes surfaces. En effet, de nombreuses études se contentent de comparer des paires d'images, l'une étant considérée comme l'état initial et la deuxième l'état après le changement que l'on veut observer. En cherchant à analyser les changements à travers les 23 images par l'observation de toutes les combinaisons deux à deux, il est évident que certaines ne mettent pas en évidence de changement important, d'autres montrent des évolutions positives et d'autres négatives. Selon la paire d'images dont on dispose, les résultats sont donc extrêmement différents et ne permettent pas de conclure si on se contente d'une telle analyse par paires.

Globalement l'analyse multi temporelle apporte donc une vision inégalée des fluctuations de l'état des milieux sous l'action combinée du climat et de l'homme. Les extrêmes constatés sont impressionnants, mais les différents traitements mis en œuvre ont permis de dégager des tendances.

Ainsi, la dégradation des terres, mais aussi les actions entreprises pour la juguler et pour une meilleure utilisation du milieu a des effets remarquablement visibles depuis l'espace. Lors de périodes de sécheresse, l'extension des zones sableuses et particulièrement des sables mobiles est bien repérable par leur couleur et leur clarté. Au contraire, les zones mises en défens voient leur réflectance diminuer et apparaissent comme des formes géométriques

sombres dans les images. Dans les images, elles apparaissent et disparaissent selon les actions au sol, dont il est ainsi possible d'évaluer l'impact. Il faut cependant compter plusieurs années pour les voir se manifester. On peut conclure que l'on raisonne sur des décennies.

2. Nouveaux développements

Le premier de la série des satellites français Spot (20 m de résolution) a été lancé en 1986, cette série en est actuellement au numéro cinq, et grâce à une politique récemment améliorée de mise à disposition de séries historiques, il est maintenant théoriquement possible de constituer des séries de 25 ans ce qui jusqu'à présent n'était possible qu'avec le Landsat américain. A noter cependant qu'une image Spot ne couvre qu'une surface de 60 x 60 km, il en faut donc 9 pour couvrir l'équivalent d'une image de la série Landsat. Cette série est cependant maintenant interrompue, le dernier Landsat lancé (N°7) souffre de dysfonctionnements, et le précédent (n°5) est à bout de souffle. Les images de l'instrument ASTER sur la plateforme TERRA-NASA les remplace partiellement.

Les développements technologiques sont rapides dans le domaine de la télédétection et plusieurs ont un impact direct sur les possibilités actuelles de suivi multi temporel des milieux arides. Parmi les innovations dans le domaine optique, on remarque de nouveaux satellites configurés pour permettre à la fois d'acquérir des images en haute résolution spatiale avec une forte répétitivité temporelle.

Ainsi le satellite Formosat a un taux de « revisite » de 3 jours, combiné à une résolution spatiale de 8 m, pour arriver à cette performance les images ne sont acquises que selon certaines trajectoires privilégiées. D'autres instruments sont annoncés sur cette base, par exemple le satellite expérimental Venüs. Ce taux de revisite est notamment conçu pour permettre d'important progrès dans les applications agricoles (suivi du développement des cultures, conseils en termes de traitements et d'irrigation, par exemple). Cet objectif est également poursuivi par le nouveau programme opérationnel Sentinel de l'Agence Spatiale Européenne.

Enfin, il faut signaler que des données de satellites optiques en provenance d'autres pays, notamment de l'Inde, commencent à être largement diffusées. D'une façon générale, de plus en plus d'images de satellites de plus en plus diversifiées sont disponibles, le défi étant de réaliser les traitements appropriés pour obtenir là encore une série temporelle d'images comparables.

Pour ce qui des méthodes de traitement de ces séries, hormis l'amélioration des performances des logiciels, des analyses multi temporelles à pas de temps variable ont été développées, permettant de tenir compte de l'écart de temps réel séparant les images acquises (Petitjean et al., 2011). Nous avons vu que c'est une des problèmes rencontrés dans notre cas d'étude, et d'une façon générale les images de haute résolution sont irrégulièrement espacées, notamment parce que certaines acquisitions sont plus ou moins masquées par des nuages.

Enfin, la nécessité de faire un suivi de l'état de l'environnement s'impose dans de nombreux domaines, pas seulement dans le cas de la désertification. Il paraît donc logique de s'orienter vers des systèmes de surveillance environnementale servant plusieurs objectifs, notamment pour ce qui est de la préparation des rapports des pays pour les trois conventions de Rio.

Les données de satellite ne peuvent cependant suffire à elles seules à caractériser l'état de l'environnement. Les données acquises simultanément par les observatoires au sol sont indispensables et permettent la validation des hypothèses d'interprétation des changements observés depuis l'espace. Un système de suivi environnemental comprend donc idéalement un réseau d'observatoires sur le terrain et des séries d'images acquises en utilisant les satellites d'observation de la Terre, les mesures au sol et depuis l'espace étant combinées selon des approches et modèles intégrés.

Remerciements : cet article a bénéficié d'une lecture attentive et des corrections de Gérard Bégni, chargé de mission CNES, Toulouse.

Références

- Aidoud A. 2008.** *La surveillance à long terme en réseau circum-saharienne : l'expérience Roselt* [en ligne]. Tunis : OSS. 100 p. (Collection Synthèse, n. 3). [Consulté en mars 2012]
http://www.oss-online.org/index.php?option=com_content&view=article&id=1172%3Ala-surveillance-a-long-terme-en-reseau-circum-saharien--l'experience-roseltoss&catid=168%3Aterre&Itemid=100003&lang=fr
- Albinet F. 2004.** *Surveillance des changements écologiques en zone aride. Télédétection des modifications de surface à long terme* [en ligne]. Mémoire DESS-SIGMA : Université de Toulouse (France). 54 p. [Consulté en mars 2012]
www.cesbio.ups-tlse.fr/data_all/pdf/stage_F_Albinet.pdf
- Andersen G.L. 2006.** How to detect desert trees using CORONA images: discovering historical ecological data. *Journal of Arid Environments*, mai 2006, vol. 65, n. 3. p. 491-511.
- Anyamba A., Tucker C.J. 2005.** Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. *Journal of Arid Environments*, novembre 2005, vol. 63, n.3. p. 596-614.
- Baldi G., Nosetto M.D., Aragón R., Aversa F., Paruelo J.M., Jobbágy E.G. 2008.** Long-term satellite NDVI data sets: evaluating their ability to detect ecosystem functional changes in south America [en ligne]. *Sensors*, septembre 2008, vol. 8, n. 9. p. 5397-5425. [consulté en mars 2012].
<http://www.mdpi.com/1424-8220/8/9/5397/>
- Duchemin B., Hagolle O., Mougnot B., Benhadj I., Hadria R., Simmoneaux V., Ezzahar J., Hoedjes J., Khabba S., Kharrrou M.H., Boulet G., Dedieu G., Er-raki S., Escadafal R., Olioso A., Chehbouni A.G. 2008.** Agrometeorological study of semi-arid areas: an experiment for analysing the potential of FORMOSAT-2 time images (Tensift Marrakech plain) [en ligne]. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, n. 17-18. p. 5291-5299. [consulté en mars 2012].
<http://hal.ird.fr/ird-00385110>
- Elvidge C.D. 1990.** Visible and near-infrared reflectance characteristics of dry plant materials. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, n. 10. p. 1775-1795.
- Elvidge C.D., Yuan D., Weerackoon R.D., Lunetta R.S. 1995.** Relative radiometric normalization of Landsat Multispectral Scanner (MSS) data using a automatic scattergram-controlled regression [en ligne]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, octobre 1995, vol. 61, n. 10. p. 1255-1260. [consulté en mars 2012]
http://web.pdx.edu/~nauna/Elvidge_etal_1995.pdf
- Escadafal R. 1981.** Une méthode nouvelle de description de la surface des sols dans les régions arides [en ligne]. In Girard M.C. *Traitement informatique des données de sol*. Paris : INRA, p. 21-27. (Département des Sols - INRA, n. 5). 3. Colloque "Traitement Informatique des Données de Sol", AISS, Paris (France), 1981/09/14-17. [consulté en mars 2012].
http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_12-13/16905.pdf
- Escadafal R. 1987.** The use of earth observation satellites for soil mapping in arid and tropical regions. *EARSeL Newsletter*, n. 33-34. p. 16-18.
- Escadafal R. 2007.** Les bases de la surveillance de la désertification par satellites [en ligne]. *Sécheresse*, octobre 2007, vol. 18, n. 4. p. 263-270. [consulté en mars 2012].
http://www.ile.com/fr/revues/agro_biotech/sec/e-docs/00/04/39/EE/resume.md?type=text.html
- Escadafal R., Albinet F., Simonneaux V. 2005.** *Arid land cover change trend analysis with series of satellite images for desertification monitoring in Northern Africa* [en ligne]. 31. International Symposium on Remote Sensing of Environment, St Petersburg (Russie), 2005/06/20-24. [consulté en mars 2012].
<http://www.isprs.org/proceedings/2005/ISRSE/html/papers/953.pdf>
- Escadafal R., Bacha S., Delaître E. 1997.** Desertification watch in Tunisia : land surface changes during the last 20 years and onwards. In Spiteri A. (ed.) *Remote sensing' 96 : integrated applications for risk assessment and disaster prevention for the Mediterranean*. Rotterdam : A.A. Balkema. p. 35-40. 16.

EARSeL Symposium, Remote Sensing' 96 : Integrated Applications for Risk Assessment and Disaster Prevention for the Mediterranean, La Valette (Malte), 1996/05/20-23.

Escadafal R., Girard M.-C., Courault D. 1989. Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of Landsat MSS and TM data. *Remote Sensing of Environment*, janvier 1989, vol. 27, n. 1. p. 37-46.

Escadafal R., Huete A. 1991a. Influence of the viewing geometry on the spectral properties (high resolution visible and NIR) of selected soils from Arizona [en ligne]. 4 p. 5. Colloque International "Mesures Physiques et Signatures en Télédétection", Courchevel, (France), 1991/01/14-18. [consulté en mars 2012].
http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/b_fdi_33-34/38201.pdf

Escadafal R., Huete A. 1991b. Etude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection [en ligne]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, vol. 312, Série II. p. 1385-1391. [consulté en mars 2012].
http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_31-32/34390.pdf

Gardelle J., Hiernaux P., Kergoat L., Grippa M. 2010. Less rain, more water in ponds: a remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel (Gourma region, Mali) [en ligne]. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 14, n. 2. p. 309-324. [consulté en mars 2012].
<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/14/309/2010/hess-14-309-2010.html>

Girard M.-C., Girard C.-M. 2010. *Traitement des données de télédétection : environnement et ressources naturelles*. Paris : Dunod. 576 p. (Technique et Ingénierie).

Hadjimitsis D.G., Clayton C.R.I., Retalis A. 2009. The use of selected pseudo-invariant targets for the application of atmospheric correction in multi-temporal studies using satellite remotely sensed imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, juin 2009, vol. 11, n. 3. p. 192-200.

Hiernaux P., Ayantunde A., Kalilou A., Mougin E., Gérard B., Baup F., Grippa M., Djaby B. 2009. Trends in productivity of crops, fallow and rangelands in Southwest Niger: impact of land use, management and variable rainfall. *Journal of Hydrology*, août 2009, vol. 375, n. 1-2. p. 65-77.

Karnieli A., Kokaly R., West N.E., Clark R.N. 2001. Remote sensing of biological soil crusts. In Belnap J., Lange O.L. *Biological soil crusts: structure, function and management*. Berlin : Springer. p. 431-456. (Ecological Studies, n. 150).

Kennedy P. 1989a. Monitoring the vegetation of Tunisian grazing lands using the normalized difference vegetation index. *Ambio*, vol. 18, n. 2. p. 119-123.

Kennedy P.J. 1989b. Monitoring the phenology of Tunisian grazing lands. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, n. 4-5. p. 835-845.

Lillesand P.T.M., Kiefer R.W. 2000. *Remote sensing and image interpretation*. 4 ed. New York : John Wiley & Sons. 724 p.

Loew A., Govaerts Y. 2010. Towards multidecadal consistent meteorological surface Albedo time series [en ligne]. *Remote Sensing*, avril 2010, vol. 2, n. 4. p. 957-967. [consulté en mars 2012]
<http://www.mdpi.com/2072-4292/2/4/957/>

Long G., Debussche G., Lacaze B., Le Cocq A., Le Floc'h E., Pontanier R. 1977. *Expérience ARZOTU : résultats obtenus à partir des données Landsat acquises en 1975 et 1976* [en ligne]. In *Journées de télédétection*. Montpellier : CEPE L. Emberger. 17 p. Journées de Télédétection du GDTA, Saint-Mandé (France), 1977/09/21-23. [consulté en mars 2012].
http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_08-09/09193.pdf

Maestre F.T., Cortina J. 2004. Insights into ecosystem composition and function in a sequence of degraded semiarid steppes. *Restoration Ecology*, décembre 2004, vol. 12, n. 4. p. 494-502.

Maisongrande P., Duchemin B., Dedieu G. 2004. VEGETATION/SPOT: an operational mission for the Earth monitoring; presentation of new standard products. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, n. 1. p. 9-14.

Miehe S., Kluge J., Von Wehrden H., Retzer V. 2010. Long-term degradation of Sahelian rangeland detected by 27 years of field study in Senegal. *Journal of Applied Ecology*, juin 2010, vol. 47, n. 3. p. 692-700.
http://www.biogeo.uni-bayreuth.de/biogeo/en/pub/pub/pub_detail.php?id_obj=90793

- ORSTOM. 1977.** *Les satellites d'observation de la Terre Landsat : description sommaire, acquisition des données.* Paris : ORSTOM. 42 p. (Initiations, documentations techniques, n. 34 ; Télédétection, n. 1)
- ORSTOM. 1978.** *Analyse multivariable : procédure "loterie" : application à l'analyse multispectrale en télédétection.* Paris: ORSTOM. 78 p. (Initiations, documentations techniques, n. 39 ; Télédétection, n. 2).
- Petitjean F., Inglada J., Gançarski P. 2011.** *Clustering of satellite image time series under time warping.* p. 69-72. 6. International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images, Multitemp 2011. Trento (Italie), 2011/07/12-14.
- Qi S.Z., Li X.Y., Duan H.-P. 2007.** Oasis land-use change and its environmental impact in Jinta Oasis, arid northwestern China. *Environmental Monitoring and Assessment*, novembre 2007, vol. 134, n. 1-3. p. 313-320.
- Reij C., Tappan G., Belemvire A. 2005.** Changing land management practices and vegetation on the Central Plateau of Burkina Faso (1968–2002). *Journal of Arid Environments*, novembre 2005, vol. 63, n. 3. p. 642-659.
- Ruiz Sinoga J.D., Romero Diaz A., Ferre Buena E., Martínez Murillo J.F. 2010.** The role of soil surface conditions in regulating runoff and erosion processes on a metamorphic hillslope (Southern Spain): soil surface conditions, runoff and erosion in Southern Spain. *Catena*, février 2010, vol. 80, n. 2. p. 131-139.
- Sabins F.F. 1999.** Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, septembre 1999, vol. 14, n. 3-4. p. 157-183.
- Shevell S.K. 2003.** *The science of color.* Amsterdam : Elsevier. 339 p.
- Simonneaux V., Duchemin B., Helson D., Er-Raki S., Oliso A., Chehbouni A.G. 2008.** The use of high-resolution image time series for crop classification and evapotranspiration estimate over an irrigated area in central Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, n. 1. p. 95-116.
- Souissi A. 1976.** *L'utilisation des photos ERTS en cartographie thématique, un exemple pratique d'utilisation : la carte d'érosion du bassin versant des oueds Zroud et Merguellil.* 1. Séminaire de télédétection, Direction des sols, Tunis (Tunisie), 1976/10/29-30.
- Ustin S.L., Valko P.G., Kefauver S.C., Santos M.J., Zimpfer J.F., Smith S.D. 2009.** Remote sensing of biological soil crust under simulated climate change manipulations in the Mojave Desert. *Remote Sensing of Environment*, février 2009, vol. 113, n. 2. p. 317-328.
- Vermote E.F., Tanre D., Deuze J.L., Herman M., Morcette, J.-J. 1997.** Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview [en ligne]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, mai 1997, vol. 35, n. 3. p. 675-686. [consulté en mars 2012]
[http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/reference/docs/Vermote_et_al._\(1997b\).pdf](http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/reference/docs/Vermote_et_al._(1997b).pdf)
- Wyszecki G., Stiles W.S. 2000.** *Color science: concepts and methods, quantitative data, and formulae.* 2 ed. New York : John Wiley & Sons. 950 p. (Wiley Classics Library)