

CSFD

Les dossiers
thématiques

NUMÉRO 2

La télédétection : *un outil pour le suivi et l'évaluation de la désertification*



Comité Scientifique Français de la Désertification

Les dossiers thématiques du CSFD numéro 2

Directeur de la publication

Marc Bied-Charreton

Président du CSFD
Professeur émérite de
l'Université de Versailles
Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ)
Chercheur au Centre d'économie
et d'éthique pour l'environnement et
le développement (C3ED-UMR IRD/UVSQ)

Auteurs

Gérard Begni

Directeur de Médias-France
gerard.begni@medias.cnes.fr

Richard Escadafal

Chercheur IRD (Institut de recherche pour le développement)
au Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO)
richard.escadafal@cesbio.cnes.fr

Delphine Fontannaz

Ingénieur de recherche à Médias-France
delphine.fontannaz@medias.cnes.fr

Anne-Thérèse Hong-Nga Nguyen

Ingénieur de recherche à Médias-France
anne-therese.nguyen@medias.cnes.fr

Avec la participation de

Taoufiq Bennouna, conseiller scientifique et
technique à l'OSS, Observatoire du Sahara et du Sahel

Antoine Cornet, directeur de recherche à l'IRD

Éric Delaitre, chercheur à la Coordination Régionale
ROSELT/OSS (Réseau d'Observatoires de Surveillance
Écologique à Long Terme/OSS) de l'IRD

Frédéric Dumay, Ingénieur d'études au Laboratoire
de géographie zonale pour le développement (LGZD)
de l'Université de Reims Champagne-Ardenne

Monique Mainguet, membre de l'Institut universitaire
de France et directrice du Laboratoire de géographie zonale
pour le développement (LGZD) de l'Université
de Reims Champagne-Ardenne

Bernard Toutain, chercheur au Département Élevage et
médecine vétérinaire du Centre de coopération
internationale en recherche agronomique pour le
développement (Cirad Emvt).

Édition

Isabelle Amsallem (Agropolis Productions)

Remerciements pour les illustrations



Danièle Cavanna (Photothèque INDIGO de l'IRD),

June Cools (EOWorks), **Jean-Marc D'Herbès** et

Éric Delaitre (IRD/Programme ROSELT/OSS),

Frédéric Dumay (LGZD), **Nadia Imbert-Vier** (European
Space Agency), **Josef Jansa et Klaus Scipal** (Institute of
Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of
Technology), **Lionel Jarlan** (Météo-France),

Sandrine Jauffret (OSS), **Édouard Lefloc'h** et

Christian Floret (Centre d'Écologie Fonctionnelle
et Évolutive), **Marc Leroy** (Médias-France),

Monique Mainguet (LGZD), **Éric Mougin** (CESBIO),

James P. Verdin et **James Rowland** (U.S. Geological
Survey), **Seydou Traoré** (Centre régional AGRHYMET),

Ann Tubbeckx (VITO), **Nancy Walker** (W.H. Freeman
and Company), **Professeur E. Zakarin** (National Center
for Radio Electronics and Communications),

l'équipe du pôle thématique POSTEL (Pôle
d'Observation des Surfaces Terrestres aux Échelles Grandes,
Médias-France) ainsi que les auteurs
des différentes photos présentées dans le dossier.

Conception et réalisation

Olivier Piau (Agropolis Productions)

Impression : Les Petites Affiches (Montpellier)

Dépôt légal : à parution • ISSN : 1772-6964

Imprimé à 1 500 exemplaires

Comité Scientifique Français de la Désertification

La création, en 1997, du Comité Scientifique Français de la Désertification, CSFD, répond à une double préoccupation des ministères en charge de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification. Il s'agit d'une part de la volonté de mobiliser la communauté scientifique française compétente en matière de désertification, de dégradation des terres et de développement des régions arides, semi-arides et sub-humides afin de produire des connaissances et servir de guide et de conseil aux décideurs politiques et aux acteurs de la lutte. D'autre part, il s'agit de renforcer le positionnement de cette communauté dans le contexte international. Pour répondre à ces attentes, le CSFD se veut une force d'analyse et d'évaluation, de prospective et de suivi, d'information et de promotion. De plus, le CSFD participe également, dans le cadre des délégations françaises, aux différentes réunions statutaires des organes de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification : Conférences des Parties, Comité de la science et de la technologie, Comité du suivi de la mise en œuvre de la Convention. Il est également acteur des réunions au niveau européen et international.

Le CSFD est composé d'une vingtaine de membres et d'un Président, nommés *intuitu personae* par le ministre délégué à la Recherche et issus des différents champs disciplinaires et des principaux organismes et universités concernés. Le CSFD est géré et hébergé par l'Association Agropolis qui rassemble, à Montpellier et dans le Languedoc-Roussillon, une très importante communauté scientifique spécialisée dans l'agriculture, l'alimentation et l'environnement des pays tropicaux et méditerranéens. Le Comité agit comme un organe indépendant et ses avis n'ont pas de pouvoir décisionnel. Il n'a aucune personnalité juridique. Le financement de son fonctionnement est assuré par des subventions du ministère des Affaires étrangères et du ministère de l'Écologie et du Développement durable, la participation de ses membres à ses activités est gracieuse et fait partie de l'apport du ministère délégué à la Recherche.

Pour en savoir plus :

www.csf-desertification.org

La rédaction, la fabrication et la diffusion de ces dossiers sont entièrement à la charge du Comité, grâce à l'appui qu'il reçoit des ministères français. Les dossiers thématiques du CSFD sont téléchargeables librement sur le site Internet du Comité.

Avec la contribution exceptionnelle du Centre National d'Études Spatiales



Marc Bied-Charreton
Président du CSFD
Professeur émérite de l'Université
de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines
Chercheur au C3ED-UMR IRD/UVSQ

L'humanité doit dorénavant faire face à un problème d'envergure mondiale : la désertification, à la fois phénomène naturel et processus lié aux activités humaines. Jamais la planète et les écosystèmes naturels n'ont été autant dégradés par notre présence. Longtemps considérée comme un problème local, la désertification fait désormais partie des questions de dimension planétaire pour lesquelles nous sommes tous concernés, scientifiques ou non, décideurs politiques ou non, habitants du Sud comme du Nord. Il est dans ce contexte urgent de mobiliser et de faire participer la société civile, et dans un premier temps de lui fournir les éléments nécessaires à une meilleure compréhension du phénomène de désertification et de ses enjeux. Les connaissances scientifiques doivent alors être à la portée de tout un chacun et dans un langage compréhensible par le plus grand nombre.

C'est dans ce contexte que le Comité Scientifique Français de la Désertification a décidé de lancer une nouvelle série intitulée « Les dossiers thématiques du CSFD » qui veut fournir une information scientifique valide sur la désertification, toutes ses implications et ses enjeux. Cette série s'adresse aux décideurs politiques et à leurs conseillers du Nord comme du Sud, mais également au grand public, aux journalistes scientifiques, du développement et de l'environnement. Elle a aussi l'ambition de fournir aux enseignants, aux formateurs ainsi qu'aux personnes en formation des compléments sur différents domaines. Enfin, elle entend contribuer à la diffusion des connaissances auprès des acteurs de la lutte contre la désertification, la dégradation des terres et la lutte contre la pauvreté : responsables d'organisations professionnelles, d'organisations non gouvernementales et d'organisations de solidarité internationale.

Une douzaine de dossiers est consacrée à différents thèmes aussi variés que la biodiversité, le changement climatique, le pastoralisme, la télédétection, etc., afin de faire le point des connaissances sur ces différents sujets. Il s'agit également d'exposer des débats d'idées et de nouveaux concepts, y compris sur des questions controversées, d'exposer des méthodologies couramment utilisées et des résultats obtenus dans divers projets et enfin, de fournir des références opérationnelles et intellectuelles, des adresses et des sites Internet utiles.

Ces dossiers seront largement diffusés - notamment dans les pays les plus touchés par la désertification - sous format électronique à la demande et via notre site Internet, mais également sous forme imprimée. Nous sommes à l'écoute de vos réactions et de vos propositions. La rédaction, la fabrication et la diffusion de ces dossiers sont entièrement à la charge du Comité, grâce à l'appui qu'il reçoit des ministères français. Les avis exprimés dans les dossiers reçoivent l'aval du Comité.

Hubert Curien⁺
Membre de
l'Académie des sciences

Depuis l'aube des temps, les premiers chasseurs, puis les premiers pasteurs et agriculteurs ont observé leur environnement, avec leurs yeux et leur cerveau. Ils se sont ainsi forgé des systèmes d'interprétation qui leur ont permis de savoir où semer et planter, où faire paître leurs animaux, où implanter leurs villages. Plusieurs grandes révolutions sont ensuite apparues, notamment au XIX^{ème} siècle : les opticiens ont inventé les longues-vues, les lunettes, les jumelles ; Niepce et Daguerre ont inventé la photographie, et le génial Nadar a, le premier, installé une chambre photographique dans la nacelle d'un ballon. La photographie aérienne était née.

D'abord utilisée massivement pendant la Première Guerre Mondiale pour repérer les positions de l'ennemi, cette technique s'est étendue hors du domaine militaire devenant l'outil indispensable de tous les aménageurs et de tous les cartographes du monde entier. Dans le début des années 60 sont nés les premiers satellites météorologiques, devenus indispensables pour la prévision à court terme ; puis sont apparus les satellites d'observation de la Terre de la série américaine Landsat en 1972 ; puis la génération des satellites à haute résolution, le premier étant le satellite français SPOT, en 1986. Aujourd'hui, nous disposons de toute une gamme de satellites et de capteurs à haute, moyenne et basse résolution pour surveiller notre environnement, faire des comparaisons dans le temps et dans l'espace, modéliser pour mieux comprendre le fonctionnement de nos écosystèmes et de notre planète.

Grâce à ces moyens, un très grand nombre d'informations nous parvient quotidiennement, mais celles-ci sont encore trop largement l'apanage des scientifiques et de personnes hautement qualifiées pour les traiter. Leur usage dans les pays en voie de développement, et spécialement dans les zones arides, semi-arides et sub-humides, a commencé il y a une vingtaine d'années et l'on s'est rapidement rendu compte des immenses services que ces techniques encore nouvelles pouvaient rendre, en particulier pour estimer les espaces dégradés et tenter d'en prévoir les évolutions.

Afin que ces techniques ne restent pas entre les seules mains des techniciens des pays développés, de nombreuses actions de coopération ont été menées et se poursuivent dans des cadres bilatéraux ou internationaux. Pour que les résultats obtenus puissent être utilisés par les acteurs du développement et leurs décideurs, il est nécessaire de vulgariser les résultats obtenus et de donner des informations sur la manière d'en indiquer les limites et les coûts.

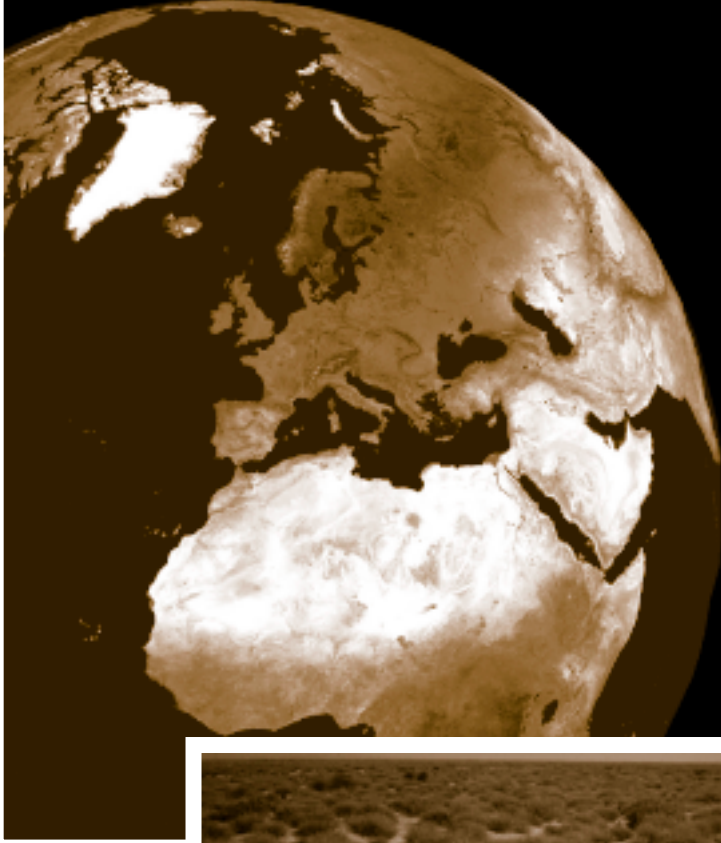
C'est le but de cette publication du CSFD et je félicite le Comité et les auteurs de leurs efforts pour rendre accessibles à un large public les chemins complexes qui permettent de passer d'un enregistrement fait à bord d'un satellite à une information utile.



in memoriam

Hubert Curien a rédigé la préface de ce dossier en janvier 2005, peu de temps avant son décès le 6 février. Nous tenons à lui rendre un hommage très particulier eu égard au soucis qu'il a toujours eu de diffuser les résultats de la science et de la technologie au plus grand nombre possible.

Nous avons perdu un très grand Monsieur, qui fut Directeur Général du CNRS, Président du CNES, Ministre de la Recherche, Président de l'Académie des sciences et Président du Comité d'éthique du Cirad.



Sommaire



4

La télédétection au service
de l'étude et de la surveillance
de l'environnement planétaire

12

La télédétection appliquée
au suivi de la désertification

22

Quelques exemples
d'utilisation de la télédétection
à différentes échelles

30

La télédétection : succès,
échecs, questions ouvertes
et perspectives

33

Acronymes et abréviations
utilisés dans le texte

34

Pour en savoir plus...

La télédétection au service de l'étude et de la surveillance de l'environnement planétaire

Les technologies d'observation de la Terre jouent un rôle majeur dans l'étude, la modélisation et le suivi des phénomènes environnementaux, à des échelles spatiales et temporelles variables, et sur une base objective, exhaustive et permanente. Ces technologies ouvrent ainsi la voie à la mise en place de systèmes d'alerte précoce, et permettent aux politiques et décideurs de définir des stratégies adéquates dans le cadre d'un développement durable.

Divers programmes nationaux et internationaux d'observation spatiale de la Terre (LANDSAT, SPOT, IRS, ERS, ADEOS, RADARSAT, ENVISAT, TERRA, METEOSAT, MSG, etc.) ont été mis en place dès 1960 et se poursuivent de nos jours, reflets des priorités que les divers États – parmi lesquels la France occupe un rôle très important – accordent à cette technologie. Les progrès réalisés à ce jour (conception des satellites, instruments de mesure, etc.) offrent des possibilités toujours plus grandes pour l'étude et le suivi de notre environnement et des changements planétaires.

À la fois une discipline scientifique et une technologie

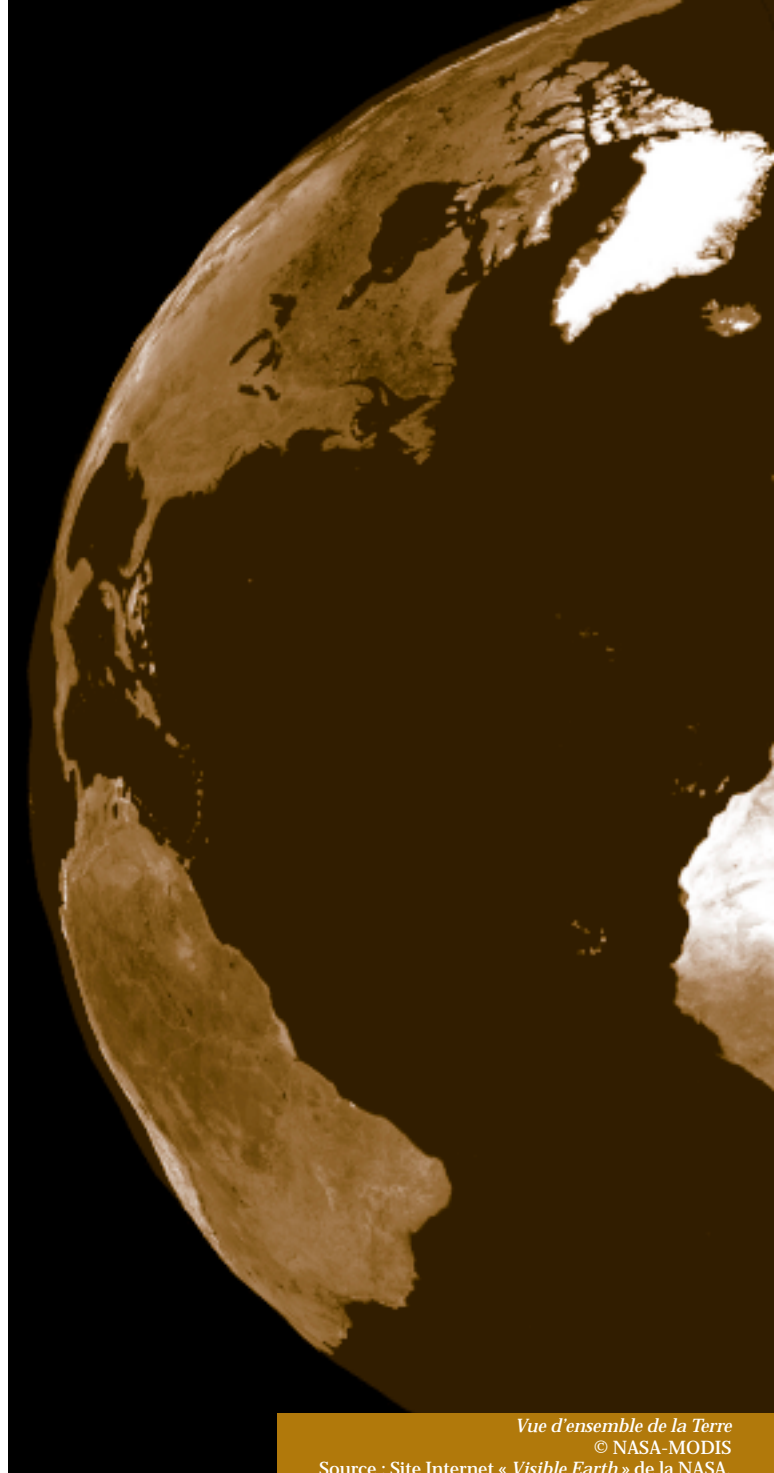
La télédétection est définie comme « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (Journal Officiel du 11 décembre 1980).

Cette définition revêt un caractère assez large, aussi est-il usuel de définir la télédétection comme un outil permettant l'étude des phénomènes mettant en jeu uniquement des ondes électromagnétiques, principalement détectées et enregistrées au moyen de **capteurs** embarqués à bord d'avions ou de satellites*. La télédétection est donc un moyen de définir un objet ou un groupe d'objets à la surface de la Terre à partir de leurs caractéristiques spécifiques :

- Une **signature spectrale** : un ou plusieurs signaux électromagnétiques dans un ou plusieurs domaines de longueur d'onde plus ou moins étroits du spectre électromagnétique ;
- Une variation temporelle de cette signature spectrale ;
- Une répartition spatiale spécifique de l'objet ;
- Une ou des relations dites de voisinage de cet objet avec les autres objets qui l'entourent.

La végétation, les sols, les rivières, les surfaces en eau, les bâtiments, et de manière générale tout élément situé à la surface de la Terre et interagissant avec un rayonnement électromagnétique, sont considérés comme des objets.

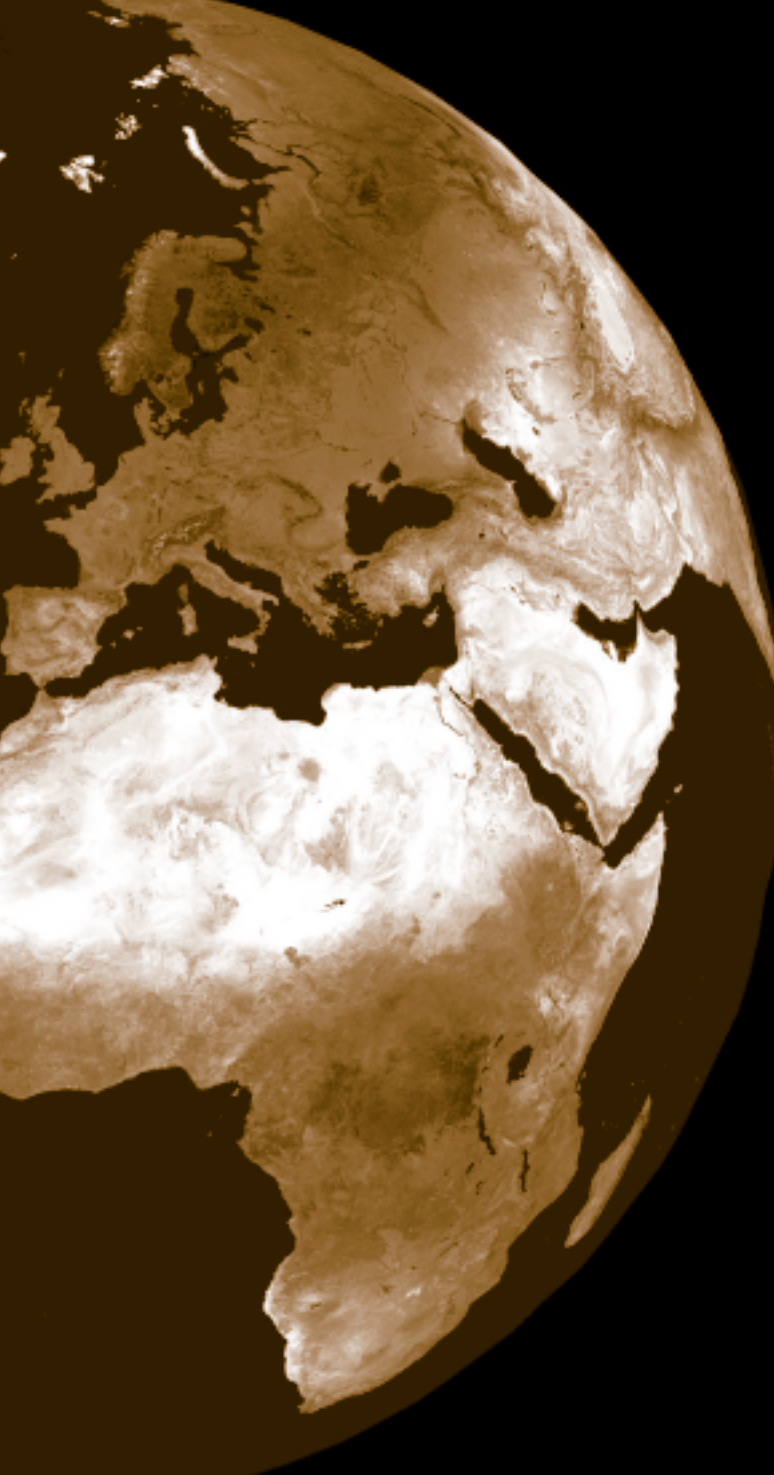
* Cet usage n'est pas universel. Par exemple, nos collègues russes ont une définition beaucoup plus large de ce vocable.



Vue d'ensemble de la Terre
© NASA-MODIS

Source : Site Internet « Visible Earth » de la NASA, consulté le 11/01/2005. <http://visibleearth.nasa.gov>

La télédétection est une technologie et une discipline scientifique permettant d'observer et d'analyser notre environnement et consécutivement de définir, suivre et évaluer les politiques de gestion des ressources naturelles. La télédétection satellitaire est actuellement un des seuls outils permettant d'acquérir des informations détaillées en tout point du globe terrestre (ou presque), rapidement et de manière objective, régulière et répétitive, permettant ainsi un suivi des événements environnementaux (pollution, feu de forêts, séisme, inondation, désertification, etc.). Elle permet également des applications dans de nombreux domaines comme l'agriculture, la forêt, l'hydrologie et les ressources en eau, les océans, la géologie, la cartographie, l'urbanisme, le cadastre, ou bien encore les renseignements stratégiques (la majeure partie des techniques de télédétection a d'abord été développée à des fins militaires).



Un rapide historique

La télédétection a vu le jour avec la première photographie aérienne en noir et blanc réalisée par Nadar au-dessus de la ville de Paris, en 1858, à partir d'un ballon. Cependant, la photographie aérienne, qui a permis d'obtenir une vision globale de notre environnement, ne s'est véritablement développée que lors de la Première Guerre Mondiale. Tout d'abord restreinte au domaine du visible (longueurs d'onde $[\lambda]$ comprises entre le violet $[0,4 \mu\text{m}]$ et le rouge $[0,8 \mu\text{m}]$), la photographie s'est ensuite élargie au domaine du rayonnement proche infrarouge (λ entre $0,8$ et $1 \mu\text{m}$). Ce n'est qu'à partir des années 1960 que son usage, jusque-là militaire, s'est étendu aux applications civiles telles que l'étude de la végétation. C'est à partir de la Deuxième Guerre Mondiale que les techniques de télédétection aéroportée ont été

perfectionnées, notamment grâce au développement de nouveaux instruments de type radar (les premiers radars imageurs ont été réalisés en Angleterre afin d'améliorer la précision des bombardements nocturnes).

La télédétection aérospatiale est apparue dans les années 1960. Elle n'a néanmoins pris son véritable essor à l'échelle internationale qu'avec le lancement du programme LANDSAT de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) en 1972. Incontestablement, le lancement du satellite SPOT par la France, avec la contribution de la Suède et de la Belgique en 1986, a constitué une seconde date clé.

Bien d'autres programmes et lancements de satellites ont suivi depuis, avec une amélioration considérable réalisée non seulement au niveau des satellites, mais aussi dans la conception et la variété des instruments de mesure permettant l'acquisition de données d'une très grande diversité, précision et qualité. Si le potentiel de la télédétection spatiale est d'ores et déjà considérable, beaucoup de recherches restent encore à entreprendre pour mieux l'utiliser.

Les principes fondamentaux de la télédétection

La télédétection utilise les propriétés physiques des objets, communément appelés **cibles**, pour acquérir des informations sur leur nature et les définir. Elle implique une interaction entre l'énergie qui est transmise par le rayonnement électromagnétique provenant d'une source naturelle (par exemple le soleil) ou artificielle (par exemple l'émission de micro-ondes) et la cible. Cette énergie est ensuite captée par un système d'observation, le capteur (embarqué à bord d'un satellite), qui l'enregistre et la transmet à une station de réception traduisant alors ce signal en image numérique. Le rayonnement électromagnétique interagit une première fois avec l'atmosphère lors de son parcours de la source vers la cible, puis dans le sens inverse de la cible vers le capteur. Ces interactions induisent des modifications du signal électromagnétique qu'il est nécessaire de prendre en compte dans la caractérisation de l'objet observé à la surface du sol.

Les bases physiques élémentaires

• *Le spectre électromagnétique et les sources du rayonnement*

Le spectre électromagnétique est divisé en différents domaines allant des courtes aux grandes longueurs d'ondes. La télédétection spatiale n'utilise qu'une partie du spectre électromagnétique tant pour des raisons technologiques que de transparence de l'atmosphère. Ce sont principalement les domaines du visible (λ entre 0,4 et 0,8 μm), du proche infrarouge (λ entre 0,8 et 1,1 μm), du moyen infrarouge*, de l'infrarouge thermique (λ entre 10 et 12 μm) (rayonnement émis sous forme de chaleur par la surface terrestre), mais également le domaine des micro-ondes (télédétection radar). Il existe deux types principaux de télédétection, une méthode de **télédétection passive** et une méthode de **télédétection active** (radar). Dans le premier cas, les capteurs sont passifs et mesurent le rayonnement naturel réfléchi par les objets à la surface de la Terre, tandis qu'en télédétection active, le système émet et reçoit à la fois un signal électromagnétique.

Le rayonnement électromagnétique peut être transmis par différentes sources :

- Le soleil (domaines du visible, du proche et du moyen infrarouge) : les capteurs enregistrent donc l'énergie solaire réfléchi par les objets à la surface terrestre.
- Le sol (domaine du thermique et des micro-ondes) : les récepteurs de télédétection enregistrent l'énergie émise par la Terre à partir de sa température.
- Une source dite artificielle - télédétection active - associée au capteur (c'est le cas des lasers et des radars micro-ondes).

• *Les perturbations engendrées par l'atmosphère sur le rayonnement*

Le rayonnement solaire, émis ou rétrodiffusé par les objets observés au sol, subit des altérations ou perturbations (**réfraction, absorption, diffusion, émission propre**) de plusieurs natures lors de son passage dans l'atmosphère. Celle-ci ne laisse donc passer le rayonnement électromagnétique que dans certaines bandes spectrales précises correspondant à des « fenêtres ». L'influence de l'atmosphère est donc à prendre en compte par modélisation sur le calcul des flux mesurés par les capteurs de télédétection spatiale**.

* La définition du moyen infrarouge est usuellement limitée à un domaine de longueurs d'ondes où l'émission thermique propre est négligeable ($\lambda < 5 \mu\text{m}$).

** L'ordinateur affiche chaque valeur numérique de l'image comme une intensité lumineuse.



Vue d'artiste d'un satellite ENVISAT
© ESA-DENMAN Productions

Les trois types de rayonnement électromagnétique : réfléchi, émis et rétrodiffusé

• *Le signal réfléchi par les objets à la surface de la Terre*

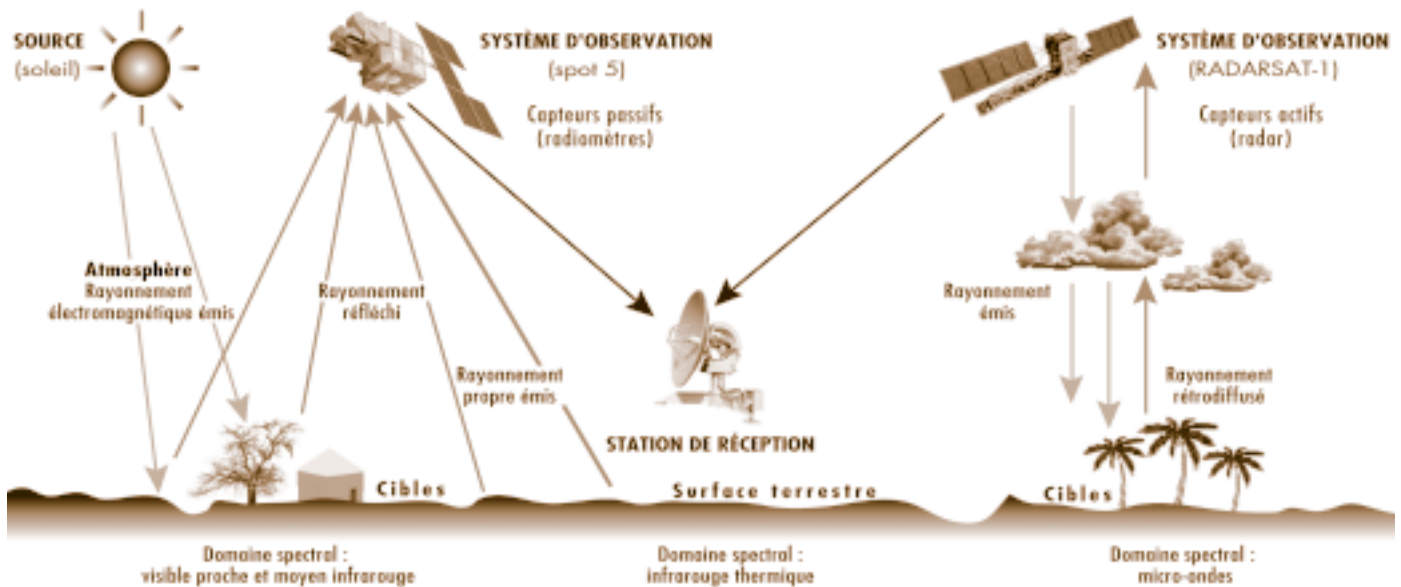
Le rayonnement solaire arrivant au sol est en partie réfléchi vers l'atmosphère par la surface terrestre et les objets qui s'y trouvent. La réflexion du signal dépend de la nature de la surface et de ses propriétés ainsi que de la longueur d'onde. Sur des surfaces parfaitement lisses, toute l'énergie solaire est réfléchi dans une seule direction, tandis que sur des surfaces rugueuses elle est réfléchi dans toutes les directions (cas le plus fréquent). Le flux solaire réfléchi correspond ici surtout au visible et au proche infrarouge. Les enregistrements ne sont possibles que de jour et dans des conditions de bonne transmission atmosphérique des rayonnements électromagnétiques. En télédétection active (radar), l'énergie réfléchi en direction du capteur est dite rétrodiffusée.

• *L'énergie émise par les objets*

En télédétection passive, les capteurs mesurent l'énergie directement émise par les objets, dans les domaines de l'infrarouge thermique, mais également dans celui des micro-ondes. Cette énergie est fonction de la température et de l'état de surface des objets. Contrairement au cas précédent, les mesures du signal émis peuvent être réalisées de jour comme de nuit.

• *L'énergie rétrodiffusée par les objets*

Nous sommes dans le cas de la télédétection active : le système d'observation est à la fois constitué d'un émetteur (source artificielle) et d'un récepteur généralement situés au même endroit. Le rayonnement électromagnétique qui est émis



Les interactions rayonnement-atmosphère-cible

en direction de la cible interagit avec sa surface et est diffusé dans toutes les directions. Une partie de l'énergie est donc réfléchi dans la direction du capteur : c'est le signal rétrodiffusé. Du fait de son principe d'émission-réception (indépendance par rapport au rayonnement solaire), le radar permet des enregistrements de jour ou de nuit, et est particulièrement utile dans les zones nuageuses (indépendance des micro-ondes par rapport aux conditions météorologiques) dans lesquelles il est souvent difficile d'acquérir des données dans le visible ou le proche infrarouge.

Éléments constituant les systèmes de télédétection

Un système de télédétection est un ensemble comprenant un **vecteur**, un ou plusieurs capteurs, et un ensemble de moyens de contrôle du système et d'exploitation des données acquises.

• Les vecteurs

Il s'agit d'un véhicule aérien (avion, voire un ballon) ou spatial (satellite) sur lequel sont embarqués des appareils de mesure (capteurs) et d'enregistrement des données acquises sur les objets observés au sol. On distingue des satellites **héliosynchrones** et **géostationnaires**.



Satellite en orbite héliosynchrone (en blanc la trace au sol, et la fauchée de l'instrument)

• Les capteurs

Ce sont des instruments de mesure permettant d'acquérir et d'enregistrer des données sur les objets observés à la surface de la Terre, dans une ou plusieurs longueurs d'onde données, puis de les retransmettre vers un système de réception. On distingue des capteurs passifs qui enregistrent uniquement l'énergie solaire réfléchi ou le rayonnement propre émis par les objets et des capteurs actifs qui ont à la fois un rôle d'émission et de réception de l'énergie réfléchi par la cible. Les capteurs sont caractérisés par :

- **La résolution spatiale** : elle correspond à la dimension du plus petit élément (**Pixel**) discernable à la surface terrestre. Elle est intrinsèquement liée à la notion de détails qu'il est possible de discriminer dans une **image** de télédétection.
- **La résolution spectrale** : nature des bandes spectrales dans lesquelles se feront les mesures (nombre et position dans le spectre).
- **La fauchée** : surface observée au sol (scène visée).

Du fait de leur altitude élevée (36 000 km), les capteurs des satellites géostationnaires observant de larges surfaces ne sont pas en mesure de fournir des images détaillées de notre planète, au contraire des capteurs embarqués sur des satellites en orbite plus basse (par exemple les satellites héliosynchrones, altitude de 750 km à 900 km) fournissant des images détaillées mais sur des régions plus petites.

• Les moyens de contrôle et de réception

Un système de télédétection satellitaire est toujours associé à un centre de mission (ou de programmation) définissant régulièrement les tâches du satellite, un centre de contrôle pour piloter le satellite, des stations de réception et d'enregistrement des données, un (ou plusieurs) centre(s) de prétraitement des données - souvent associé(s) à des stations de réception qui fournissent ainsi des produits standards utilisables plus aisément - et à des structures de diffusion des données (distribution/commercialisation).

Caractéristiques des principaux capteurs et satellites opérationnels présents et à venir (liste non exhaustive)

Satellite	Panchromatique Multibande	Résolution spatiale	Résolution spectrale	Fauchée	Produits dérivés (liste non exhaustive)
-----------	------------------------------	------------------------	-------------------------	---------	--

Satellite à très haute résolution spatiale

SPOT 5	Panchromatique Multibande	2,5 m et 5 m 10 m	Optique	60*60 km 60*120 km	Cartes (géologiques, pédologiques, occupation des sols, de vulnérabilité), spatiocartes , plan d'information (réseau hydrographique, routier, chemin de fer), modèle numérique de terrain (MNT).
IKONOS 2	Panchromatique Multibande	1m 4 m	Optique	11*11 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information, MNT
QUICKBIRD	Panchromatique Multibande	0,60 et 0,7m 2,4 et 2,88 m	Optique	16,5 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information, MNT
ORBVIEW 3	Multibande	1 et 4 m	Optique	8*8 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information, MNT
HELIOS 2A		30 cm	Optique	Confidentiel	Défense
Pléiades (2008-2009)	Panchromatique Multibande	0,7 m 2,8 m	Optique	21 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information, MNT
EROS A	Panchromatique	1 - 1,8 m	Optique	12,5*12,5 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information, MNT
ROCSAT-2	Panchromatique Multibande	2 - 5 m 8 - 20 m	Optique	24*24 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information, MNT
IRS-P6	Multibande	5,8 m 23 m 60 - 70 m	Optique	24 à 70 km 140 km 740 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information
RADARSAT-1		de 3 à 100 m	Radar	20 à 500 km	Plans d'information, MNT, cartes (humidité des sols, zones inondées)

Satellite à résolution spatiale moyenne

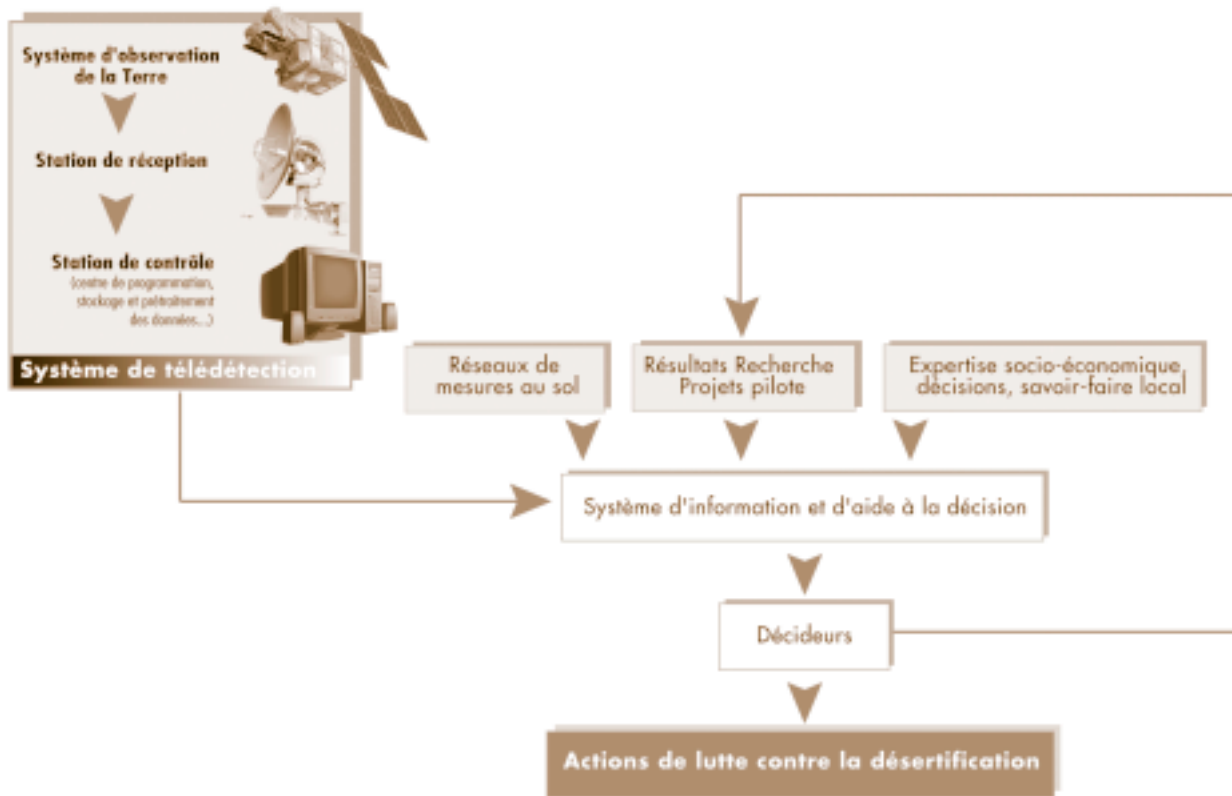
ERS 1,2		25 m	Radar	100 km	Produits de cohérence permettant de réaliser (dériver) des cartes d'occupation des sols (particulièrement en zone tropicale), géologiques. Cartes d'humidité des sols, cartes des zones inondées, MNT.
SPOT 1, 2, 3 et 4	Panchromatique Multibande	10 m 20 m	Optique	60*60 km 60*80 km	Cartes, spatiocartes, MNT, plans d'information
LANDSAT 7 (ETM)	Panchromatique Multibande	15 m 30 m	Optique	185*170 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information
LANDSAT 4, 5	Multibande	30 et 80 m	Optique	185 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information
ENVISAT (ASAR)		10 à 1 000 m	Radar	15*5 km à 405*405 km	Cartes (géologiques, topographiques, humidité des sols, zones inondées, pollution marine, dynamique côtière, glaciologie...), plans d'information, MNT
TERRA (ASTER)	Multibande	de 15 à 90 m	Optique	60 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information, MNT

Satellite à basse résolution spatiale

SPOT (VEGETATION)	Multibande	1 km	Optique	2*2 km	Produits de synthèse (synthèse journalière, décadaire), indice de végétation (NDVI)
METEOSAT	Multibande	2,25 et 4,5 km	Optique	Hémisphère	Produits météorologiques, océanographiques et géophysiques
MSG (Meteosat Second Generation)	Multibande	1 et 3 km	Optique	Hémisphère	Produits météorologiques, océanographiques et géophysiques
ENVISAT (MERIS)	Multibande	300 m	Optique	1 150 km	Produits dérivés des mesures de la couleur des océans (cycle du carbone, gestion des zones de pêche, gestion des zones côtières...)
SMOS (Fev 2007)		35 et 50 km	Radar	1 000 km	Cartes (humidité des sols, salinité des océans)
PARASOL	Multibande	6*7 km	Optique	2 400 km	Cartes du bilan radiatif, observation des nuages et aérosols

Correspondance entre la résolution des images satellites et les échelles cartographiques :

1 000 m -> 1/1 500 000 • 30 m -> 1/80 000 • 20 m -> 1/50 000 • 10 m -> 1/24 000 • 5 m -> 1/12 000 • 1 m -> 1/2 000



Contexte d'un système de télédétection

À quoi servent les données issues de la télédétection ?

Un système de télédétection n'est pas en soi un système autosuffisant pour générer une information directement utile aux utilisateurs finaux. C'est avant tout un outil qui produit des données. Celles-ci sont ensuite analysées conjointement avec d'autres sources de données (données de terrain, données socio-économiques, etc.) dans le but d'en extraire une information compréhensible et utile pouvant être intégrée dans un système d'information et d'aide à la décision (système d'information géographique).

Un système de télédétection peut être utilisé dans différents contextes, notamment dans le cadre de la lutte contre la désertification pour laquelle il joue un rôle important. En effet, il permet un suivi et une surveillance à long terme de l'environnement, la détection des zones à risques, la détermination des facteurs de désertification, l'aide à la prise de mesures adéquates de gestion environnementale par les décideurs et à l'évaluation de leurs impacts.

Les différentes procédures nécessaires à l'obtention d'images satellitaires

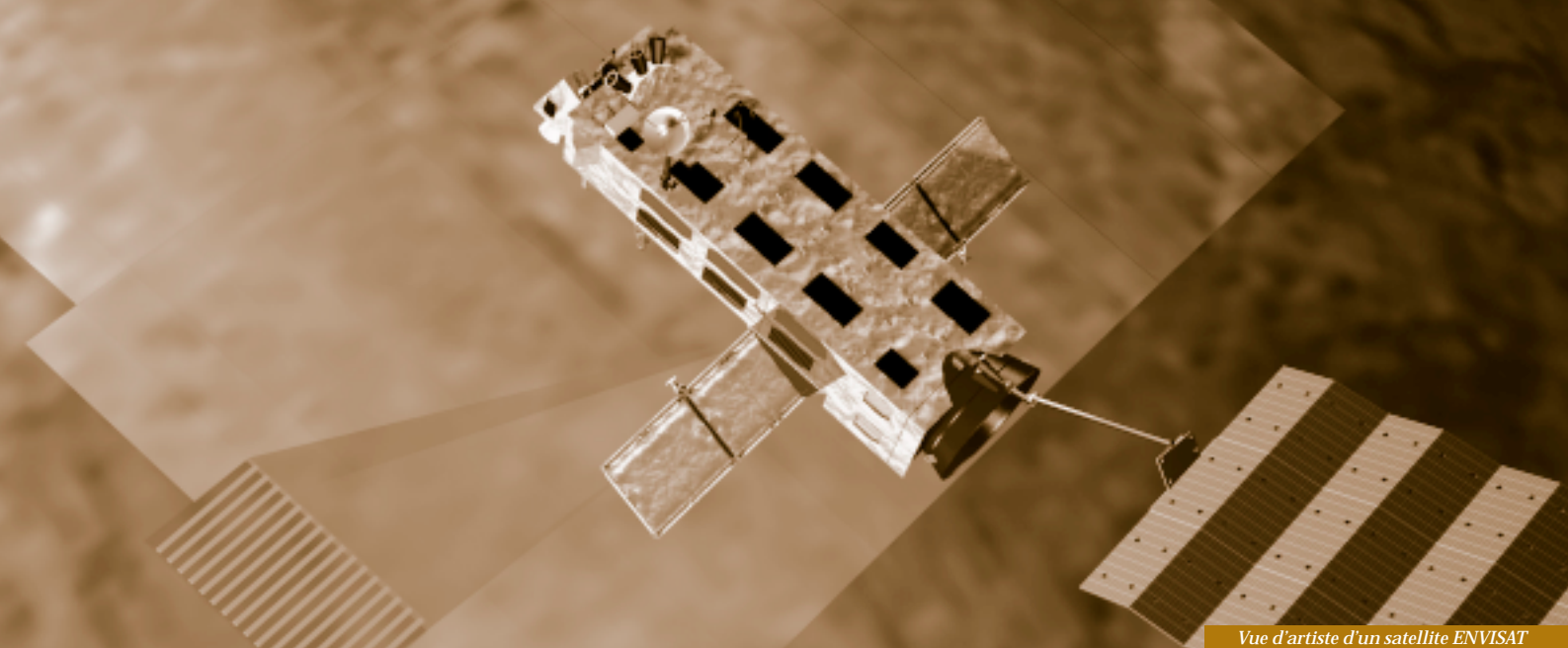
Les capteurs enregistrent la réponse spectrale des objets observés à la surface de la Terre. Ces données ne constituent ni des photographies ni directement des images. Une image satellite est formée d'une matrice de points (pixels) à deux dimensions. À chaque pixel sont associées des coordonnées et une valeur numérique

correspondant à la mesure du signal électromagnétique enregistrée par le capteur, dans une gamme de longueurs d'onde donnée (appelée bande spectrale). Les capteurs multispectraux enregistrent cette mesure physique dans différentes bandes spectrales (ou canaux), leur nombre et leur type varient suivant les capteurs.

À chaque pixel de l'image correspondent alors plusieurs valeurs radiométriques constituant la signature spectrale d'un objet à un instant donné.

La visualisation des images numériques est réalisée en associant chaque bande spectrale à une couleur primaire (rouge, vert, bleu). La combinaison des différentes couleurs correspondant aux différentes valeurs d'intensité d'un pixel génère une couleur combinée (synthèse additive des couleurs). On obtient ainsi des compositions colorées, dont la plus utilisée est dite « en fausses couleurs » par analogie avec les photographies aériennes infrarouges dont elles utilisent la même combinaison de bandes spectrales.

Deux types de prétraitement sont généralement réalisés sur les images : des **corrections géométriques** (pour les mettre en conformité avec un système de **projection cartographique** par exemple) et des **corrections radiométriques** (pour tenir compte des effets indésirables de l'atmosphère et convertir les mesures faites depuis l'espace en valeurs « au sol »). D'autres traitements peuvent ensuite être appliqués afin d'améliorer la lisibilité des images ou d'extraire des informations particulières spécifiques à une étude donnée.



Vue d'artiste d'un satellite ENVISAT
© ESA-DENMAN Productions

Les images satellitaires : à quel coût ?

Le prix est très variable et dépend de la catégorie des images, de leurs caractéristiques, ainsi que de la politique suivie par les différents fournisseurs.

Deux grandes catégories sont à distinguer : les images d'archive et les images sur programmation. Les images d'archive proviennent d'observations faites au préalable et conservées par les fournisseurs d'images. Elles sont mises à disposition pour consultation et commande. Depuis 1986, date du lancement du premier satellite SPOT, la société Spot Image a constitué une archive de plus de 10 millions d'images ; ces archives sont consultables au travers de leur catalogue SIRIUS. Les images sur programmation désignent, quant à elles, les futures images acquises selon les besoins et les caractéristiques définis par le commanditaire. Les prix sont en général plus chers. Le coût varie également selon les caractéristiques des images commandées (résolution de l'image, nature du satellite) :

- **Les images à très haute résolution** permettent la détection d'objets de l'ordre du décimètre au mètre. Elles sont très utilisées dans les domaines de la défense et de l'urbanisme. Elles sont fournies par les satellites militaires (dont Hélios, données confidentielles) et dans le domaine civil par les satellites commerciaux Quickbird et Ikonos.

- **Les images à moyenne résolution** (de l'ordre du décimètre), permettent d'effectuer une classification des terrains, de localiser et différencier les couverts forestiers et les terrains agricoles. Elles proviennent des satellites Landsat, Spot et ERS.

- **Les images à basse résolution** (de l'ordre de l'hectomètre au kilomètre) sont utilisées à l'échelle régionale et mondiale. Prises de manière répétitive, elles servent à assurer la surveillance des phénomènes environnementaux, concernant par exemple le couvert végétal, les zones côtières et les surfaces océaniques. Les images à basse résolution proviennent des satellites SPOT-VEGETATION, ENVISAT-MERIS, TERRA-MODIS et

NOAA. Les satellites géostationnaires (METEOSAT, MSG, GOES) observent à haute répétitivité temporelle la même zone de la surface terrestre.

- **Les images radar à synthèse d'ouverture (RSO)** sont utilisées pour mesurer les caractéristiques physiques et géométriques des objets observés (structure, teneur en eau, biomasse). Leurs applications sont variées : inondations, feux de forêt, croissance de la végétation, humidité du sol, labourage, déforestation, etc. Ces images sont produites par les satellites ERS, ENVISAT et RADARSAT.

Il est possible de visualiser gratuitement des images satellites sur certains sites Internet comme celui développé par le centre de recherche VITO (Institut belge de recherche technologique) qui distribue les produits SPOT-VEGETATION (<http://free.vgt.vito.be>). Mais en général, pour obtenir une image satellite spécifique, il faut s'adresser auprès des fournisseurs d'images. Les prix, certes souvent élevés, oscillent entre 1 600 et 13 000 euros, mais il existe cependant des programmes d'aide à la communauté scientifique, comme le programme ISIS* (Incitation à l'utilisation Scientifique des Images SPOT), qui réduisent ces coûts.

Dans le cadre particulier du programme ISIS, le prix à acquitter par les laboratoires pour des images d'archive (déjà acquises par les satellites SPOT) varie de 100 à 400 euros, et de 500 à 800 euros pour des images sur demande de programmation. Il convient cependant de relativiser le coût des images en le situant dans le contexte d'une application intégrée, et en comparant ce coût à celui de méthodologies utilisant des sources alternatives. On s'aperçoit alors que dans les conditions économiques actuelles, l'usage judicieux de la télé-détection est le plus souvent rentable.

* En 1999, à travers son programme ISIS, le Centre National d'Études Spatiales (CNES) a décidé d'élargir l'accès de la communauté scientifique européenne à l'imagerie spatiale SPOT (hors produits VEGETATION) grâce à des tarifs préférentiels. Depuis cette décision, les chercheurs ont acquis plus de 2 500 images SPOT, dont des produits haute résolution SPOT-5.

Lexique

Absorption : Elle est due aux différents gaz et particules constituant l'atmosphère qui absorbent l'énergie émise par le rayonnement électromagnétique. Elle varie en fonction de la nature des gaz et de leurs propriétés mais également en fonction des longueurs d'ondes du spectre.

Capteur : Instrument qui recueille de l'énergie provenant de la scène visée et délivrant un signal électrique correspondant et mesurable.

Cible : Ce terme désigne la surface ou l'objet observé (une grande partie du vocabulaire utilisé en télédétection reflète encore cette origine martiale).

Corrections géométriques : Elles permettent d'une part de pallier aux déformations dues aux mouvements du satellite et servent d'autre part à transformer une image et à la représenter sous forme de plan (projection cartographique).

Corrections radiométriques : Corrections des mesures enregistrées prenant en compte les caractéristiques propres des instruments de prise de vue ainsi que les effets perturbateurs de l'atmosphère sur la transmission du signal électromagnétique.

Diffusion : Elle résulte de l'interaction des particules et molécules (gouttelettes d'eau, poussières, fumées, aérosols) sur le rayonnement électromagnétique incident et réfléchi. Elle est fonction de la nature des longueurs d'onde, de la turbidité et de l'épaisseur de l'atmosphère (que doit traverser le rayonnement).

Émission propre : L'atmosphère ré-émet une partie du rayonnement qu'elle reçoit du soleil, contribuant ainsi à augmenter la valeur du rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par la surface terrestre.

Fauchée : Surface observée au sol dont la largeur varie entre une dizaine et une centaine de kilomètres en fonction du type de capteurs.

Flux énergétique : Puissance émise, transportée ou reçue, sous forme de rayonnement électromagnétique.

Géostationnaire : Se dit d'un satellite dont l'orbite est généralement circulaire, haute (environ 36 000 km au-dessus de l'Équateur) et dont la position fixe permet une surveillance continue de notre planète du fait d'une grande répétitivité d'acquisition des images. C'est le cas des satellites météorologiques (METEOSAT) ou de télécommunication (EUTELSAT).

Héliosynchrone : Se dit d'un satellite lorsque le plan contenant son orbite garde la même orientation par rapport à la direction Terre-Soleil, et de ce fait, bénéficie d'un éclairage constant toute l'année. Un satellite héliosynchrone repasse toujours à la verticale d'un même lieu à la même heure solaire : c'est le cas de la plupart des satellites d'observation de la Terre (SPOT, LANDSAT).

Image : Représentation graphique des valeurs électromagnétiques mesurées et enregistrées sous une forme numérique.

Pixel : *Picture element*. Plus petite surface homogène constitutive d'une image enregistrée.

Photographie : Image enregistrée sur une pellicule photographique (réaction chimique sur une surface sensible à la lumière).

Projection cartographique : Processus qui consiste à transformer et à représenter sur une surface bidimensionnelle (plane) des points situés sur la surface sphérique tridimensionnelle de la Terre.

Radar à synthèse d'ouverture (RSO ou SAR en anglais) : Système radar cohérent générant des images de télédétection à haute résolution.

Réfraction : Distorsion géométrique du trajet des ondes électromagnétiques vers la surface terrestre, due à des variations d'indice de réfraction.

Résolution spatiale ou géométrique : Dimension du pixel au sol. Elle a donc une dimension géographique qui conditionne la taille du plus petit élément discernable à la surface du sol. Elle peut être assimilée à la distance qui doit séparer deux objets au sol pour que l'on puisse les distinguer. C'est le paramètre fondamental pour reconnaître les objets par leur forme.

Résolution spectrale : Sensibilité des capteurs à certaines longueurs d'ondes du spectre électromagnétique. Elle caractérise la précision de la mesure radiométrique.

Signature spectrale : Réponse spectrale de l'objet ou quantité d'énergie lumineuse réfléchie, absorbée par celui-ci dans les différentes longueurs d'onde.

Spatiocarte : carte réalisée à partir d'images satellites assemblées (mosaïque) et corrigées géométriquement dans un système de projection et un découpage cartographique standardisé. Produit cartographique réalisé sous forme numérique ou sur papier.

Télédétection active : Le système de télédétection émet et reçoit à la fois les signaux électromagnétiques (principe du radar).

Télédétection passive : Le système de télédétection enregistre seulement l'énergie réfléchie ou émise par les objets à la surface du sol.

Vecteur : Véhicule aérien ou spatial utilisé pour transporter une plate-forme sur laquelle sont installés les capteurs et une charge utile.

La télédétection appliquée au suivi de la désertification

Force est de constater que la dégradation des sols touche toute la planète. La **désertification** en est un processus typique dans les régions arides et semi-arides. Elle existe aussi dans les régions humides* mais le phénomène reste moins étendu. Dans les contextes graves, elle aboutit à un état de dégradation des terres irréversible en l'espace d'une génération humaine (25 ans). Elle se traduit par un changement du milieu dont les surfaces subissent des modifications à la fois de la couverture végétale et des sols. Les facteurs de désertification sont d'ordre naturel et anthropique. On cherche à associer à ces facteurs des **indicateurs** permettant d'évaluer le risque potentiel de désertification ou la gravité de la désertification d'une aire donnée, une fois compris les processus qui caractérisent ce phénomène. Ces indicateurs permettront d'alerter et d'aider les autorités locales ou nationales à entreprendre des actions adéquates concernant la gestion de l'environnement. Le rôle de la télédétection dans ce contexte est de permettre via des « variables dérivées » l'évaluation de ces indicateurs, notamment ceux d'ordre physique et écologique, et ainsi de déterminer les processus de désertification.

* Par exemple dans certaines zones tropicales, la déforestation suivie d'un lessivage des sols par les pluies met à nu des socles rocheux infertiles.

Zoom

La **désertification** traduit un processus anthropique et concerne en particulier les activités économiques de production et de consommation. La Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, adoptée à Paris en 1994 et ratifiée 10 ans plus tard par 190 pays, est à la fois une Convention d'environnement et de développement. Elle définit le processus de désertification aux échelles régionales et locales comme « la *dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et sub-humides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines* ». La désertification désigne donc le déclin irréversible ou la destruction du potentiel biologique des terres et de leur capacité à supporter ou à nourrir les populations. Ce processus met en avant la nécessité d'accroître le niveau de vie des sociétés les plus vulnérables en pérennisant le support de leur activité, la fertilité des terres, ou en trouvant d'autres activités qui soulagent la pression sur les terres. La désertification est indissociable de la question du développement durable des zones sèches. Comme en témoignent les annexes de la Convention, cette notion s'applique sur tous les continents, principalement aux aires sèches dans lesquelles aridité et sécheresse sont deux données climatiques courantes.

D'après Requier-Desjardins et Caron, 2005.



Paysage de savane soudanienne, saison sèche froide, couleur d'automne. Mali. Vincent Robert © IRD

Cinq variables dérivées pour évaluer les indicateurs de la désertification : rugosité, albédo, température de surface, humidité au sol, indice de végétation

Tout l'art de la télédétection consiste à transformer des mesures physiques obtenues sur des surfaces en information. Les données de télédétection doivent donc être étalonnées et transformées en variables dérivées, utilisées pour évaluer les indicateurs de désertification. Les informations ainsi construites comprennent en particulier la rugosité des surfaces, l'albédo, la température de surface, la couverture végétale (recouvrement et état phénologique) et l'humidité du sol.

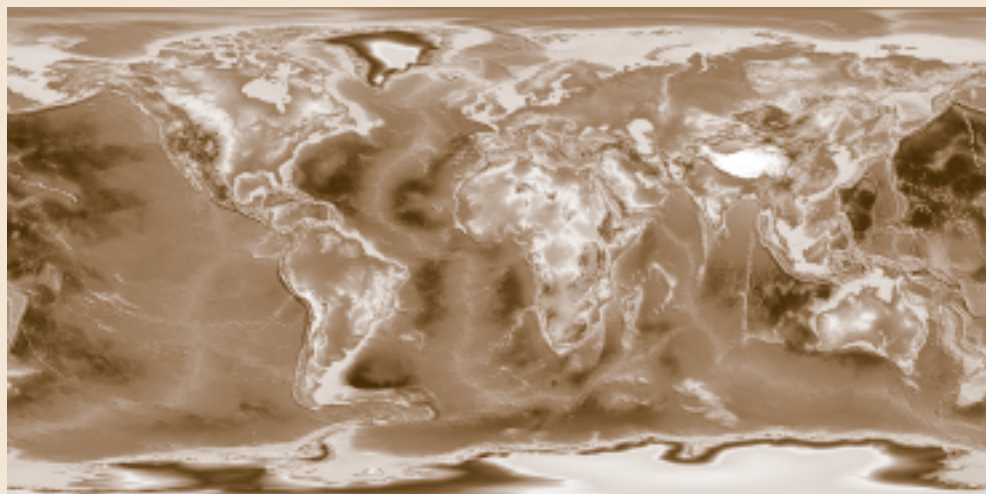
La rugosité permet de quantifier l'irrégularité de surface

La rugosité est un paramètre permettant de quantifier l'irrégularité d'une surface. Plus une surface est irrégulière, plus elle est dite rugueuse. La mesure de la rugosité se fait en général par télédétection radar. Le radar émet des micro-ondes et mesure la puissance avec laquelle un objet les reflète (rétrodiffusion). Plus la surface de l'objet est irrégulière, plus la réflexion est forte.

La télédétection : un outil pour le suivi et l'évaluation de la désertification

Exemple

Utilisation du paramètre « rugosité »
La Terre vue d'un radar altimètre :
topographie des terres et bathymétrie des océans



© ESA/ERS

Cette carte a été établie à partir de données issues du satellite européen ERS-2 par l'ESA (European Space Agency).

Cette illustration est disponible en couleur dans le cahier central.

Exemple

L'albédo, ou la quantité d'énergie solaire renvoyée dans l'atmosphère

L'albédo est le rapport de la quantité de lumière réfléchie par un objet sur la quantité de lumière qu'il reçoit. Il est exprimé par un nombre compris entre 0 (aucune lumière réfléchie) et 1 (toute la lumière est réfléchie) ou bien par un pourcentage. L'albédo joue sur les équilibres énergétiques et sur le bilan radiatif dans la mesure où il contrôle la quantité d'énergie solaire renvoyée vers l'atmosphère.

L'albédo peut varier durant l'année pour une même aire géographique par suite de phénomènes physiques (ou d'effets indésirables tels que la présence de nuages sur des images à basse résolution). L'interprétation de cette valeur et de ses variations temporelles et spatiales, conjointement à d'autres variables observables, apporte de l'information sur les processus de désertification. En effet, l'albédo d'un sol nu décroît lorsque sa teneur en eau croît. De même l'albédo d'un sol couvert de végétation dépend du taux de couverture végétale et de son activité chlorophyllienne.

De nombreux travaux ont cherché à étudier les relations entre albédo et désertification (essentiellement les relations entre l'albédo et les fluctuations du couvert végétal des régions arides ainsi qu'avec les modèles climatiques). Si ces fluctuations ont été mises en évidence à l'échelle continentale, la nature de leur impact sur le climat est encore discutée.

Relation entre albédo et végétation au Mali

Ces deux courbes montrent les fluctuations de l'albédo au Sahel (Mali). Les données proviennent du satellite SPOT-VEGETATION et concernent deux points à 400 kilomètres d'écart. Elles illustrent le cas d'un sol nu et le cas d'un sol avec végétation. Dans le premier cas, l'albédo diminue autour du mois de juillet, pendant la période des pluies. Dans le second cas, l'albédo visible diminue en juillet tandis que l'albédo PIR (proche infrarouge) reste stable. Cela est dû au développement de la végétation pendant la saison des pluies qui absorbe le rayonnement visible pour la photosynthèse.



Fluctuation de l'albédo au Sahel
© Médias-France

Données issues des satellites VEGETATION 1 / SPOT4 et VEGETATION 2 / SPOT5 (2002-2003).

Source : Projet FP5/CYCLOPES (INRA [Institut National de la Recherche Agronomique], Médias-France, Cnes, Météo-France et Noveltis) : CYCLOPES est un projet à coût partagé (contrat EVG1-CT-2002-00076) cofinancé par la Direction Générale Recherche de la Commission européenne au sein des activités de Recherche & Développement du sous-programme Environnement et Développement Durable (5^{ème} Programme Cadre).

La température de surface varie en fonction de la nature du sol et de son occupation

La température de surface résulte des échanges d'énergie ayant lieu au-dessus et au-dessous de cette surface. Elle est donc en partie liée à l'albédo, à la température de l'air et à l'efficacité des échanges thermiques. Elle est estimée par la mesure du rayonnement infrarouge thermique émis (longueur d'onde comprise entre 10,5 et 12,5 μm - télédétection passive). Sa valeur dépend de la nature du sol ainsi que de son occupation. En effet, dans les mêmes conditions d'éclairement et de climat, un sol sableux ou rocheux n'a pas la même température d'équilibre toutes choses égales par ailleurs. Il en est de même pour un sol nu ou avec un couvert végétal. Les conditions hydriques observées près de la surface étudiée peuvent aussi la modifier. L'heure d'observation est aussi importante. En effet, le soleil étant la source principale de réchauffement, une image acquise le matin présente dans l'ensemble des températures de surface moins élevées qu'une image acquise dans l'après midi. Ainsi, grâce aux satellites géostationnaires (de type météorologique), il est possible de suivre l'évolution de la température de surface et de caractériser ainsi l'inertie thermique locale.

L'humidité du sol, un paramètre d'alerte pour la désertification

L'humidité du sol ou la teneur en eau de surface, est définie par la quantité d'eau contenue dans les dix premiers centimètres du sol. Elle peut être estimée par radar (télédétection active) et elle est liée à la température de surface. Elle conditionne les échanges avec l'atmosphère par l'intermédiaire du bilan d'énergie à la surface du sol (très différent sur une surface sèche ou sur une surface humide), mais également la mise en place du peuplement végétal (germination des semences, émergence, implantation du système racinaire, etc.). Son évaluation est donc importante en hydrologie et en agronomie, et constitue un paramètre d'alerte pour la désertification.

Exemples

Variation de la température de surface sur une journée selon le type de surface

La température de surface varie en fonction de la nature et de l'occupation du sol. L'heure de la journée a également son importance avec un pic de température à 14 heures, c'est-à-dire quand le soleil, source principale de réchauffement, est à son zénith.



D'après : *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. 2/e by F.F. Sabins. © 1987 by W.H. Freeman and Company. Used with permission.

Utilisation du paramètre « humidité du sol » en Europe



Humidité du sol en Europe - Satellite ERS (Janvier 2000)

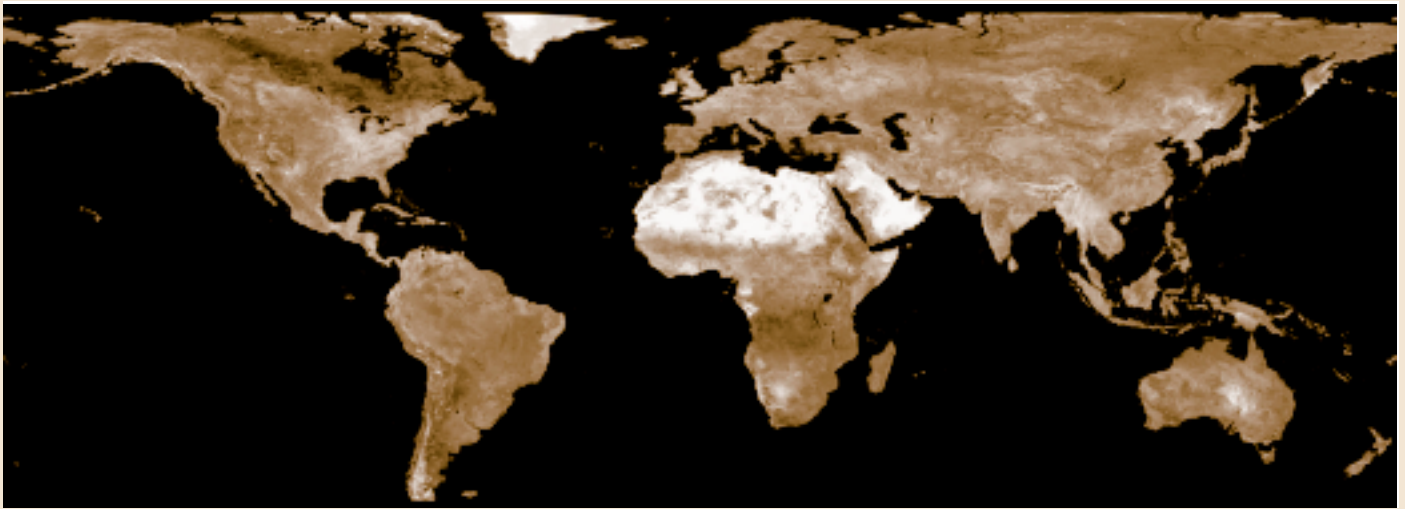
Une cartographie de l'humidité des sols a été déduite des mesures prises par le satellite ERS (janvier 2000) en Europe. L'information est exprimée de façon relative en pourcentage, 0 % représentant des terres sèches et 100 % des terres très humides.

Cette illustration est disponible en couleur dans le cahier central.

Source : aimablement communiqué par l'Institute of Photogrammetry and Remote sensing, Vienna University of Technology.

Exemple

Les indices de végétation au niveau mondial



Une synthèse mondiale des indices de végétation a été réalisée par EOWorks à partir des données issues de Spot Vegetation-NDVI (03/1999). La gamme de couleurs exprime des valeurs croissantes de l'indice du jaune au vert.

© CNES 2004
Image distribuée par VITO

Cette illustration est disponible en couleur dans le cahier central.

Quels sont les processus observables grâce à ces paramètres ?

La désertification est le résultat de nombreux processus liant causes anthropiques et naturelles et dont les facteurs profonds sont souvent lents. La modélisation de ces processus à diverses échelles a pour objectifs l'alerte précoce, la conception de mesures de lutte et l'évaluation de leur efficacité. Ces modélisations doivent s'appuyer sur des observations à caractère socio-économique et physique, sur le terrain mais aussi par l'observation depuis l'espace, à travers les « variables dérivées » déjà décrites.

Deux processus majeurs sont plus particulièrement abordés dans ce dossier et dont certaines caractéristiques sont facilement accessibles à l'observation spatiale :

- Le suivi de la couverture végétale (essentiel pour la sécurité alimentaire et comme traceur potentiel de la fertilité du sol) ;
- La modification de composition des surfaces et de la couverture des sols.

L'étude de ces processus à partir d'images satellites nécessite de tenir compte des cycles des saisons et des épisodes pluvieux* .

* D'une manière générale, les surfaces humides sont moins réfléchissantes que ces mêmes surfaces à l'état sec.

Le suivi de la couverture végétale au travers de trois variables : la végétation verte, la densité des arbres et la biomasse

• *La végétation verte*

La diminution du couvert végétal joue un rôle important dans le processus de désertification. Le suivi de la végétation verte, facilement entrepris par satellite grâce aux indices de végétation, a fait l'objet de nombreux travaux. Ainsi des images basse résolution acquises quotidiennement par les satellites permettent de calculer des valeurs moyennes de l'indice de végétation par décade. L'état des ressources végétales et les zones à risque peuvent ainsi être détectés. Il est alors possible, le cas échéant, de provoquer une alerte afin de tenter d'éviter d'atteindre un stade de dégradation avancée de ces ressources.

Exemples

Utilisation des indices de végétation : la carte des zones arides africaines

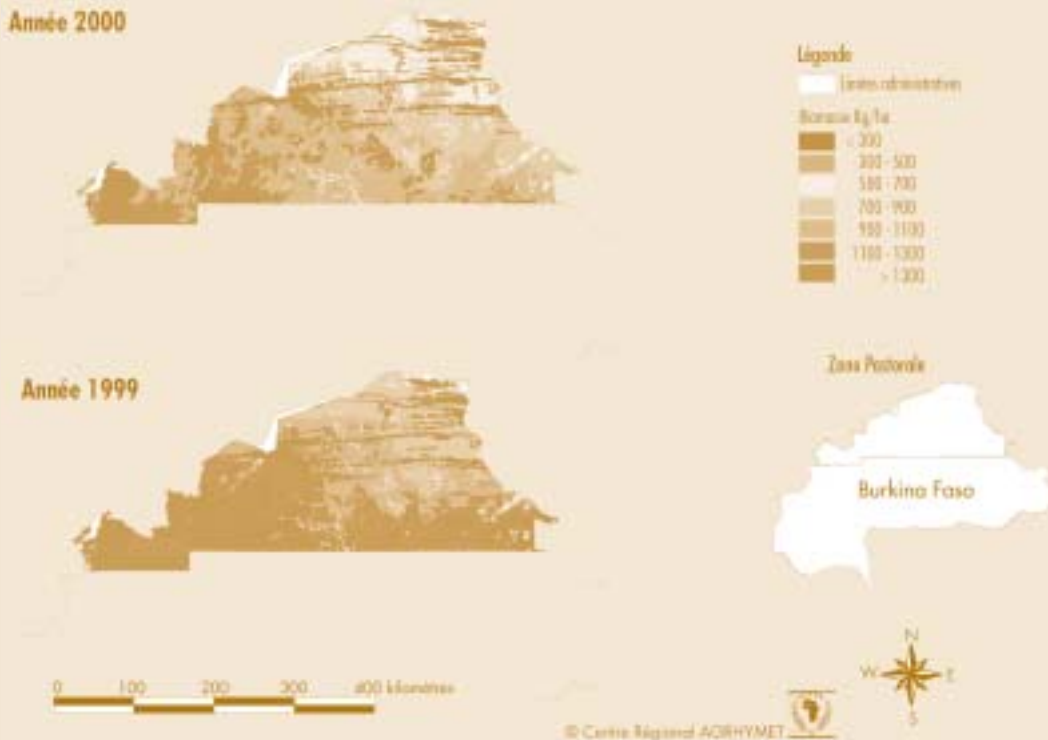


Les indices de végétation (NDVI) pour la première décade d'avril 2004 proviennent de données issues du satellite NOAA-AVHRR. Plus l'indice est élevé, plus le couvert végétal est développé.

Source : Données issues de la NASA GSFC (*Goddard Space Flight Center*), GIMMS (*Global Inventory Modeling and Mapping Studies*) ; Carte réalisée par le projet FEWS-NET (*Famine Early Warning Systems Network*) du Centre de données du système d'observation des ressources terrestres (USGS EROS Data Center; *United States Geological Survey-Earth Resources Observation System*). Travail financé par l'USAID (*U.S. Agency for International Development*).

Cette illustration est disponible en couleur dans le cahier central.

Suivi de la biomasse herbacée en zone pastorale, Burkina Faso



Cartes annuelles de biomasse herbacée sur la zone pastorale du Burkina Faso pour 1999 et 2000 (noter la différence entre les deux situations annuelles).

Au Sahel, la couverture végétale est dominée par des graminées annuelles qui forment une grande partie des ressources pastorales. Le centre AGRHYMET (CILSS, Comité permanent Inter États de Lutte contre la Sécheresse au Sahel) créé depuis 1974, réalise actuellement un suivi des pâturages à l'échelle régionale et transfère les informations aux décideurs nationaux. Cela permet de déterminer les aires de pâture à risque, et en cas de nécessité, de provoquer une alerte afin de modérer l'exploitation de ces aires et d'éviter leur désertification. L'état des ressources pastorales est évalué en estimant la biomasse à partir des valeurs d'indices de végétation cumulés. Ces données sont également regroupées pour la zone sahélienne dans le rapport mensuel du Système Mondial d'Information et d'Alerte Rapide (SMIAR) de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).

Des techniques similaires sont applicables à d'autres zones pastorales semi-arides riches en plantes à cycle annuel, dont celles d'Asie centrale.

Au nord du Sahara, le suivi de la végétation est plus difficile à cause de la dominance de steppes à petits buissons ligneux bas. De plus, une bonne partie de l'année la végétation est faiblement verte, voire pas du tout pendant les périodes très sèches. L'indice de végétation est alors peu utilisable pour estimer la variation du couvert végétal.

© Centre régional AGRHYMET

Source : Projet AP3A, Projet Alerte Précoce et Prévision des Productions Agricoles, Centre régional AGRHYMET, Niamey, Niger

Cette illustration est disponible en couleur dans le cahier central.

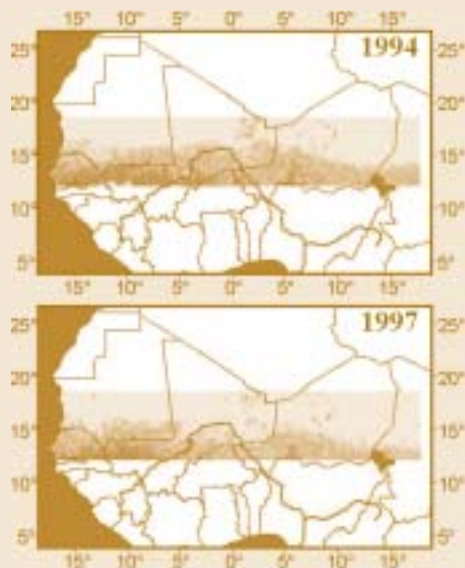


Campement de pasteurs peuls sur un reg ensablé par l'erg ancien (Inchirien, 22000 BP), Nord Oursi, Burkina Faso. Jean-Claude Leprun © IRD

Exemple

Suivi de biomasse dans la zone ouest-sahélienne

L'estimation de la biomasse végétale (partie aérienne) est basée sur l'utilisation des données météorologiques combinées avec celles du diffusiomètre (à travers un modèle). Dans la zone sahélienne couverte par l'étude, on constate une forte différence de distribution de la biomasse entre les deux années : 1994 (humide) et 1997 (sèche). Cette méthode appliquée à l'ensemble de la bande sahélienne présentée sur cette figure, a été validée sur le terrain de la région du Gourma au Mali.



Production végétale aérienne sur la zone ouest sahélienne (-18°E/18°E et 13.5°N/20°N) évaluée par le diffusiomètre des satellites ERS pour deux années contrastées © CESBIO 2003

L'échelle de couleur va de : 0 (blanc cassé) à 3 000 kg de matière sèche par hectare (marron foncé).

D'après Jarlan et al., 2003.

Cette illustration est disponible en couleur dans le cahier central.

• La densité des arbres

C'est un critère utilisé sur le terrain, notamment dans les savanes boisées. Les satellites à très haute résolution spatiale permettent actuellement de détecter les arbres individuellement et de suivre l'évolution de la densité d'un peuplement arboré. Ainsi dans les zones arides du Nouveau-Mexique, des comparaisons entre des images commerciales actuelles et d'anciennes images de satellites militaires déclassifiées ont mis en évidence une augmentation très significative du nombre d'arbres sur une période de trente ans. Une étude du même type, mais utilisant des photos aériennes, a montré un recul des peuplements d'arbres vers le sud dans le Sahel ouest-africain. Néanmoins, cette méthode ne peut être appliquée à de vastes surfaces à cause du coût élevé d'acquisition et d'analyse des images à haute résolution.

• Le suivi global de la biomasse

Si les indices de végétation obtenus à partir des images des satellites à capteurs optiques nous permettent de suivre le développement de la végétation verte des surfaces continentales, d'autres méthodes à l'échelle continentale ont été développées à partir des mesures dans le domaine des micro-ondes. Ainsi, les mesures réalisées par le capteur « diffusiomètre » à bord des satellites ERS (domaine des micro-ondes) sont en relation avec la teneur en eau des surfaces terrestres. Les variations mesurées sont particulièrement fortes dans le Sahel africain entre la saison sèche et l'hivernage. Ces données permettent ainsi de suivre les variations saisonnières d'humidité de surface et de biomasse végétale.



Berger accompagnant son troupeau à un point d'eau. Burkina Faso. Marc Bournof © IRD

La modification de la composition des surfaces sableuses et le transport éolien : deux processus observables par télédétection

La production primaire d'un milieu dépend principalement des précipitations et de l'état des terres. Le suivi et la modélisation à partir des données de télédétection, tentent d'approcher des indicateurs significatifs, tels que l'efficacité écologique, le bilan de croissance et la consommation d'eau. La perte de qualité des terres peut ainsi être décelée indirectement.

La modification de composition des surfaces des sols peut s'effectuer de différentes manières, plus ou moins facilement observables par télédétection, grâce à des variables telles que leur **réflectance** et secondairement leur rugosité.

L'épuisement des sols par des méthodes culturales inadaptées ou par surpâturage peut se traduire par des changements subtils de couleur et/ou d'albédo qu'il convient d'interpréter avec précaution. Dans beaucoup de cas, cela se traduit de fait par une diminution du couvert herbacé (pâturage ou végétation cultivée), ce qui nous ramène à l'observation du processus décrit auparavant.

Le surpâturage peut, dans certaines zones où il est particulièrement intense (notamment au voisinage des points d'eau), se traduire par un piétinement important des sols qui modifie la signature spectrale et l'albédo (qui devient généralement plus élevé). Ces zones localisées sont assez facilement identifiables par télédétection, d'autant plus qu'elles ont souvent une morphologie particulière (chemins convergents vers les points d'eau).

La salinisation des sols se traduit également par une perte de productivité primaire et elle est donc perçue indirectement à travers le processus décrit plus haut. Il est rare que ce phénomène modifie la signature spectrale d'un sol au point de le rendre identifiable sans ambiguïté par sa signature spectrale. Il existe cependant des cas extrêmes dans lesquels le sel affleure et est donc observable sur des images à haute ou moyenne résolution. Tel est notamment le cas de l'Asie centrale où existent des zones (généralement d'anciennes mares) actuellement complètement transformées en croûtes salines (effet conjugué du drainage du sel dissous et du fait que l'alimentation en eau ne compense plus l'évaporation) très facilement observables par télédétection (couleur blanche, fort albédo).

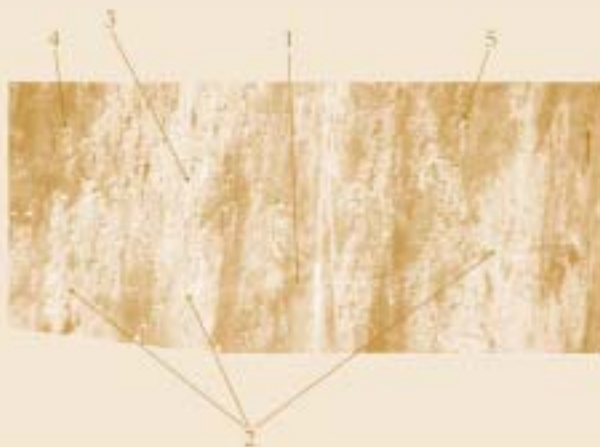
Sols et roches peuvent être couverts de matériaux déposés ou en transit, souvent transportés par le vent (poussières - limons, sables - ensablement) ou par l'eau (zones inondées). Ces matériaux sont érodés et peuvent également mettre à nu des matériaux sous-jacents de composition différente. Le transport éolien joue un rôle important dans le phénomène de désertification. Sous sa forme la plus spectaculaire, il peut conduire à la formation ou au déplacement de dunes de sable, visibles par leur forme et leur signature spectrale (images SPOT, LANDSAT, IRS). De manière plus subtile, il peut conduire à des dépôts de sable qui peuvent envahir ou recouvrir champs, infrastructures et habitations. Ce mécanisme peut donc provoquer des dégâts socio-économiques autres que la désertification proprement dite. L'érosion éolienne peut être freinée par la végétation (ligneuse et herbacée) qui stabilise le sable localement et contribue à freiner le vent par sa rugosité aérodynamique ; réciproquement, le surpâturage et la déforestation peuvent accélérer les processus de transport éolien.

L'utilisation de la télédétection dans ce contexte s'effectue à différentes échelles. Une vue d'ensemble met en évidence les grands courants éoliens qui relient par exemple le Sahara et le Sahel (exemple de la circulation éolienne Sahara-Sahel). À l'échelle régionale et locale, elle permet d'observer les mécanismes d'ensablement, qui peuvent provoquer la désertification par perte de qualité des sols, mais aussi des dégâts sur les infrastructures et le réseau de transport. Une analyse des photographies aériennes est néanmoins nécessaire pour compléter et affiner la compréhension de ces phénomènes.

L'érosion éolienne se décèle également par la fréquence des vents de poussières observables par des systèmes tels que METEOSAT, NOAA-AVHERR et VEGETATION. Les vents de poussières entraînant une perte de matières fines, on peut en déduire une caractérisation de la dégradation des sols. Les satellites à faible résolution permettent également d'observer le transport de matériaux sur de très grandes distances à partir de ces zones. Dans ces cas, l'étude des modifications environnementales se fonde principalement sur l'observation des textures et des structures. Ces observations sont réalisées de manière visuelle par un chercheur formé à ces techniques. Le traitement informatique souvent utilisé dans un système de télédétection, s'avère ici moins fiable pour le suivi de la dégradation de l'environnement dans les aires sèches (sableuses). Les dunes d'érosion ou les dunes d'accumulation, par leurs signatures spectrales identiques, ne sont pas différenciées par une analyse numérique.

Exemple

Observation spatiale du processus éolien et d'ensablement en Mauritanie



- 1- Voie ferrée de la Société Nationale Industrie Minière (Nouadhibou-Zouérate)
- 2- Section de la voie menacée d'ensablement
- 3- Aire de transit éolien par saltation, voiles sableux et édifices barkhaniques*
- 4- Barkhane* avec allongement de l'aile senestre sous l'influence du courant éolien littoral
- 5- Barkhane* avec allongement de l'aile dextre sous l'influence de l'harmattan.

*NDLR : Barkhane - dune de sable mobile, sous forme de croissant, et dont les crêtes pointent vers la direction du vent.



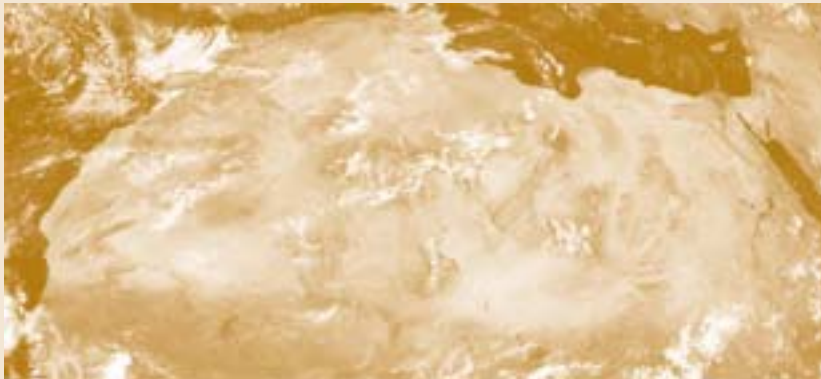
Les arrivages sableux continuels sur la voie ferrée entraînent l'usure rapide des rails et lorsque ceux-ci ne sont pas remplacés à temps, des déraillements réguliers spectaculaires ont lieu.

Légendes :

- Photo de gauche : **Vue de l'espace** - Aire de rencontre entre le courant océanique N - S et l'harmattan NE - SW, Mauritanie (Extrait de l'image SPOT 1 P 021-313 au 1 : 100 000). Aimablement communiqué par M. Mainguet et F. Dumay (LGZD, Laboratoire de Géographie Zonale pour le Développement).
- Photo de droite : **Vue de terrain** - Arrivage barkhanique menaçant la voie ferrée Nouadhibou-Zouérate, Mauritanie © Frédéric Dumay

Exemples

Détection de l'érosion éolienne par observation des vents de poussières et de sable

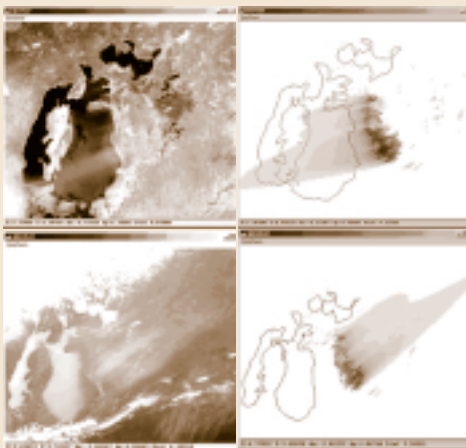


A : Air	N : Kordofan
AD : Adrar Doutchi	S : Lac Tchad
Al : Adrar des Hoggar	M : Djebel Marra
E : Eglak	T : Tibesti
En : Ennedi	T.A. : Tassili N'Ajjer
H : Hoggar	

Cette image METEOSAT 4 infra-rouge du 3 janvier 1992 (METEO France CMS Lannion) permet grâce à son échelle au 1/26 000 000 d'observer à l'échelle globale une tempête de poussières et de sable qui s'étire sur plus de 3 000 km, de la Dépression de Qattara (27°N, Égypte) au Golfe de Guinée (5°N) à la limite entre la forêt et la savane. À partir des réflectances, ont été cartographiées les liaisons assurant la continuité entre les grands ergs du Sahara et du Sahel et le rôle des différents obstacles sur le cheminement éolien des particules sableuses.

D'après Mainguet et Dumay, 1995.

Détection d'érosion et de transport éolien : la mer d'Aral



Observation par télédétection à faible résolution de l'ancien lit asséché de la mer d'Aral (Asie centrale) et d'épisodes de transport éolien (19/09/98 et 09/04/02)

Cette figure illustre le cas particulièrement grave des régions environnant la mer d'Aral (Asie centrale). On sait que la consommation abusive d'eau pour l'irrigation, jointe à des technologies désuètes, a conduit à une très forte baisse du niveau de ce lac. En s'évaporant, le lac d'Aral laisse un dépôt salin infertile, aire complètement désertique, dont l'albédo est très facilement repérable sur des images basse, moyenne et haute résolution (satellites NOAA-AVHRR ou SPOT-VEGETATION). Ce dépôt est très sensible à l'érosion et au transport éolien qui propagent ces particules en rendant infertiles les sols atteints. Ceci peut être interprété comme un cas extrême des phénomènes d'apparition de croûtes locales de salinisation dans cette région.

Aimablement communiqué par le Pr. E. Zakarin, National Center for Radioelectronics and Communication of the Republic of Kazakhstan (NCREC) dans le cadre d'une coopération avec Médias-France.



Plateau du Tagant. Ce plateau très anciennement peuplé, se présente comme un ensemble hétérogène de falaises, de crêtes, de massifs, entrecoupés de plaines alluviales et de défilés, où se trouvent les oasis et les palmeraies. N'Beika. Plateau du Tagant, Mauritanie. Jean-Jacques Lemasson © IRD

Lexique

Indicateur : Paramètre synthétique servant à évaluer les changements environnementaux liés au processus de la désertification. Ils peuvent être quantitatifs ou qualitatifs.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) : Rapport (proche infrarouge - rouge/proche infrarouge + rouge).

Réflectance : Rapport de l'intensité du rayonnement réfléchi au rayonnement incident sur une surface (cible).

Quelques exemples d'utilisation de la télédétection à différentes échelles

La télédétection est un outil d'observation spatiale qui permet l'étude et le suivi de sites à différentes échelles. Cette variété est illustrée dans ce chapitre par deux exemples : le site test de Menzel Habib en Tunisie présaharienne a fait l'objet d'observations répétitives depuis 1970 (projet CAMELEO, *Changes in Arid Mediterranean Ecosystems on the Long term and Earth Observation/* Changements dans les écosystèmes méditerranéens arides sur le long terme et observation de la Terre, 1997-2001) et le projet ROSELT, Réseau d'Observatoires de Surveillance Écologique à Long Terme, projet interdisciplinaire à l'échelle régionale circumsaharienne mené par l'Institut de recherche pour le développement (IRD) dans le cadre des programmes de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS).

Surveillance d'une zone steppique sableuse : un exemple en Tunisie présaharienne

Parmi les sites qui ont fait l'objet de recherches sur la désertification en Afrique, celui de Menzel Habib dans le sud de la Tunisie fait l'objet d'observations continues depuis les années 1970, particulièrement par la communauté scientifique française et francophone et ses pionniers dans cette thématique. Ce site a fait l'objet d'expériences de suivi par télédétection, et d'une étude récente sur les indicateurs écologiques à long terme, il est un des observatoires du programme ROSELT.

L'observatoire de Menzel Habib

Avec des précipitations annuelles très irrégulières comprises entre 100 et 200 mm, la région de Menzel Habib dans le sud de la Tunisie est constituée de sols sableux et sablo-limoneux couverts d'une steppe à ligneux bas, typiques des régions arides de la bordure nord du Sahara.

Sous l'influence conjuguée d'une période de sécheresse et de la mise en cultures de terres jusqu'alors réservées aux parcours, cette région a connu des phénomènes de désertification particulièrement intenses durant les années 1980. Ils ont été combattus par un programme de lutte contre la dégradation des terres et l'ensablement.



Qued El Akarit situé à une trentaine de kilomètres au nord de Gabès, Tunisie.
Jean-Pierre Roset © IRD

Des méthodes de surveillance par télédétection ont été testées et développées dans cette région notamment dans le cadre de programmes de recherche euro-méditerranéens tels que le projet CAMELEO à partir duquel a été extrait ce qui suit.

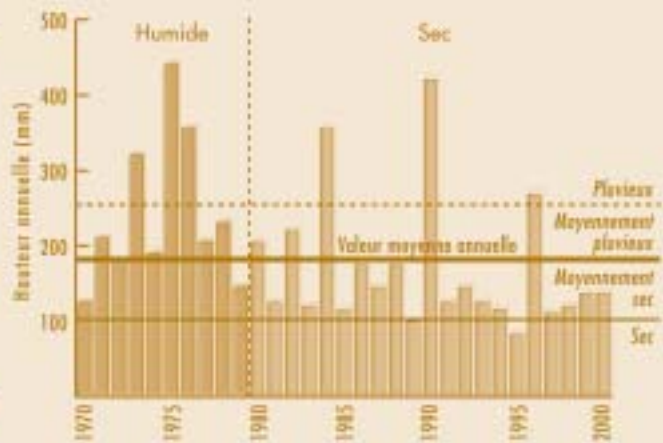
Hormis les reliefs qui bordent cette plaine, portant des sols squelettiques sur des roches sédimentaires dures, presque tous les sols sont développés sur des matériaux éoliens, loess péri-désertiques et sables fins, enrichis en éléments solubles hérités des dépôts gypseux et salés sous-jacents. La matière organique y est très peu abondante, mais de faibles quantités liées à l'activité biologique de surface donnent une certaine cohésion aux sables (croûtes algales, par exemple).

La végétation naturelle est dominée par les buissons bas ligneux (chaméphytes) et des plantes annuelles se développent rapidement après les pluies qui surviennent majoritairement en hiver. À cela s'ajoute les cultures annuelles (orge et blé dur), et l'arboriculture (avec une densité de plantation très faible). La végétation n'est donc verte qu'une partie de l'année, le plus souvent les premiers mois, et elle est globalement très peu couvrante. Les sols dominent à la surface.

Localisation et pluviométrie annuelle, Menzel Habib, Tunisie



Carte de situation de la zone test de Menzel Habib en Tunisie présaharienne. Carte adaptée d'après Floret et Pontanier, 1982.



Variation des précipitations annuelles à Menzel Habib, Tunisie (1970-2000).

Sur cette période de trente ans, la moyenne des précipitations annuelles est de 180 mm, on constate des années plus humides jusqu'en 1980, puis des années plus sèches entrecoupées d'années « pluvieuses » de pluviométrie supérieure à 250 mm, comme par exemple en 1990.

D'après Jauffret, 2001.

L'approche développée par la recherche pour le suivi de la zone de Menzel Habib

L'utilisation des images de télédétection a été fondée sur l'établissement des relations entre les caractéristiques des sols et de la végétation composant les surfaces observées au sol et la réponse spectrale de ces surfaces mesurée par les capteurs optiques des satellites. Ainsi sur le terrain, à la description écologique de l'état de la surface (composition et organisation du sol, nature de la phénologie, abondance de la végétation) ont été associées des mesures des valeurs de réflectance réalisées avec un instrument portable. Il a été ainsi démontré que, dans cette région, l'indice de végétation est mal corrélé avec le couvert végétal global. Le taux de couverture végétale (indicateur très important pour le diagnostic de la

désertification rendant compte de l'abondance des plantes pérennes ligneuses) affecte globalement l'intensité du signal. Sur un sol donné, une steppe plus dense apparaît donc plus foncée sur l'image satellite (lien avec l'albédo).

De plus, comme la végétation est généralement peu couvrante, les mesures de réflectance sont très fortement influencées par les propriétés des sols, et en particulier leur couleur. Un indice de coloration dérivé des mesures dans les bandes spectrales visibles a été proposé : plus il est élevé, plus les sols sont colorés (sable par exemple) et des valeurs faibles correspondent à des sols grisâtres (gypses par exemple). Ainsi, ces deux critères, albédo et couleur, ont été utilisés pour suivre l'évolution de l'état des surfaces dans le temps et diagnostiquer les tendances.

Suivi de l'évolution des sols et de la végétation

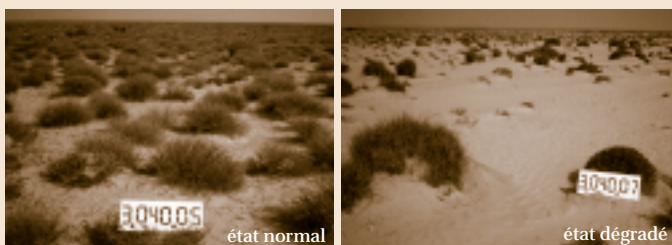
Lorsqu'une étude se situe à l'échelle d'une région, les images à haute résolution s'imposent. Une série d'images Landsat a été acquise sur la plaine de Menzel Habib (steppe sableuse), une image par année et lorsque cela a été possible à la même saison pour minimiser les différences de réflectance dues aux variations de la hauteur du soleil. Les images de printemps ont été préférées pour saisir la végétation au moment de son maximum. Pour les rendre comparables, elles ont été corrigées des points de vue de la géométrie (rendues empilables pixel à pixel) et de la radiométrie (valeurs des pixels converties en réflectance au sol pour chaque image).

Les photographies ci-dessous illustrent le résultat pour quatre dates où les différences sont particulièrement contrastées. La combinaison des deux types d'images Landsat MSS plus anciennes et Landsat TM plus récentes permet de couvrir une période de 23 ans. Les images sont représentées en composition colorée standard (« fausses couleurs ») où la végétation verte apparaît en rouge. Deux photographies de terrain représentant une steppe sableuse dans un état « normal » et « dégradé » viennent compléter cette illustration. La dégradation par diminution du couvert végétal se traduit dans ce cas par une mobilisation du sable (ensablement).

Zoom

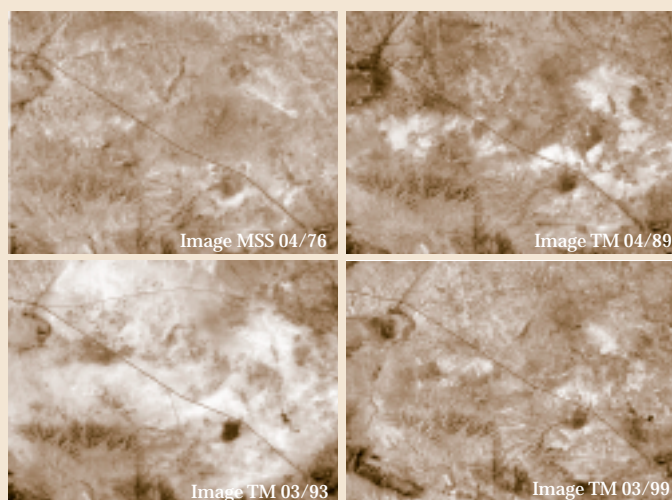
Dégradation par diminution de couvert végétal de la steppe sableuse de Menzel Habib, Tunisie

Vue de terrain



R. Escadafal © IRD

Images satellites



R. Escadafal © IRD

Quatre images Landsat de la région de Menzel Habib (Tunisie) géoréférencées et intercalibrées (1976, 1989, 1993, 1999)

Richard Escadafal © IRD

Les différences correspondent à des modifications de l'état des surfaces au sol. La zone couverte par chaque image est de 30 x 24 km.

• Image Landsat MSS du 04/1976

En 1976, la plaine de Menzel Habib, bordée de reliefs au sud-est et sud-ouest (gris), est dominée par une steppe sableuse au centre (beige) et des cultures annuelles (rouge) vers la périphérie et dans les dépressions (taches rouge vif).

• Image Landsat TM du 04/1989

En 1989, la sécheresse a entraîné une diminution des cultures et une extension spectaculaire des sables mobiles (jaune clair) : la région est « désertifiée ».

• Image Landsat TM du 03/1993

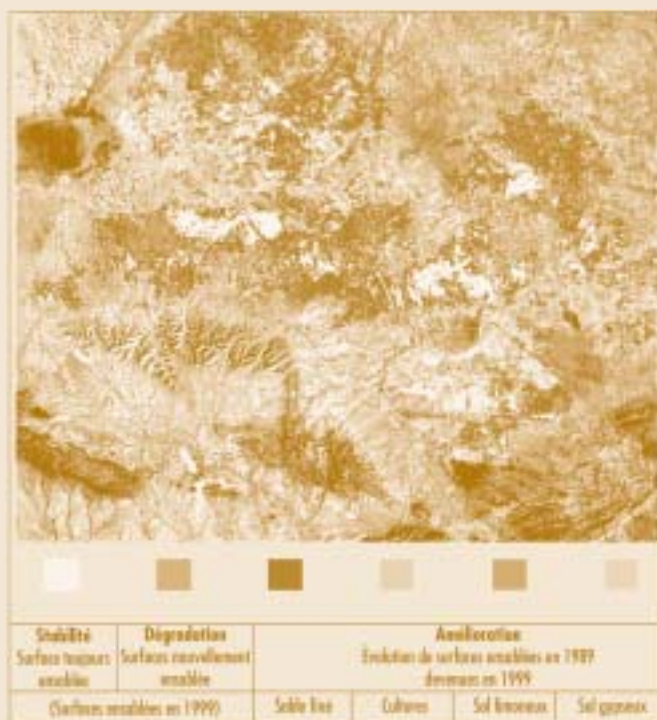
En 1993, quatre ans plus tard, les effets des mises en défens apparaissent clairement sous forme de trapèzes sombres au milieu des zones sableuses, alors que les cultures annuelles sont intensifiées (pointillés rouges).

• Image Landsat TM du 03/1999

En 1999, les zones de sables mobiles ont complètement régressé et la situation semble bien contrôlée, le paysage paraît entièrement découpé en parcelles de différents usages, de nouvelles mises en défens ont été installées dans les dernières zones de dunes.

Cette illustration est disponible en couleur dans le cahier central.

Synthèse de l'évolution de l'ensablement de la zone de Menzel Habib (Tunisie) entre 1989 et 1999



Richard Escadafal © IRD

Cette figure illustre une des synthèses obtenues en analysant les tendances observées sur des images classées sur cinq dates (entre 1989 et 1999), et concernant les surfaces ensablées (sables mobiles non fixés, dunes, etc.). Il existe une diminution de la surface des zones ensablées (dunes mobiles) au profit des surfaces à sables fixés et des cultures.

Les images satellites ont ainsi mis en évidence une amélioration de l'état du milieu entre 1989 et 1999. Les efforts de fixation des sables mobiles qui avaient envahi la région pendant la décennie précédente ont porté leurs fruits ; la surveillance par télédétection a permis de quantifier sur de larges étendues cet effet qui a bien sûr été aussi observé localement sur le terrain.

Cette illustration est disponible en couleur dans le cahier central.

Synthèse cartographique de l'évolution du milieu

L'observation de séries d'images, si elle permet de composer un « film » des différents états des surfaces, ne suffit pas à définir les tendances à long terme et à diagnostiquer la désertification ou la restauration du milieu. L'analyse doit porter sur une série suffisamment longue et dégager une synthèse en termes de tendances, en tenant compte des variations climatiques.

Pour déterminer ces tendances à long terme, plutôt que de se focaliser (comme dans beaucoup d'essais de suivi de la désertification) sur la biomasse qui est trop faible ici pour que ses variations soient aisément détectables, c'est l'état des surfaces en général qui doit être surveillé à long terme.

En utilisant les indices de brillance et de coloration pour ces surfaces à faible couvert végétal, complétés par l'indice de végétation pour distinguer les couverts les plus actifs, chaque image est classée selon une légende très simple basée sur le type de sol et la densité du couvert végétal. Le pourcentage occupé par chacune de ces catégories a été suivi en fonction du temps pour diagnostiquer l'évolution du milieu (stabilité, dégradation ou amélioration).

Transposition de cette méthode à d'autres contextes

Cet exemple dans le sud tunisien illustre l'utilisation des images satellitaires pour la surveillance d'une région steppique sableuse. La désertification sévit aussi dans d'autres milieux tel que le sud du Sahara où elle se manifeste différemment, par la raréfaction des ligneux par exemple. Le suivi par satellite doit donc tenir compte des caractéristiques écologiques des milieux surveillés et s'appuyer sur la connaissance des processus sur le terrain. C'est la condition indispensable pour pouvoir interpréter les changements d'états de surface et pour diagnostiquer l'état : dégradation, stabilité ou restauration des milieux. La multiplication des satellites et des capteurs augmente la densité et la diversité des informations acquises depuis l'espace. L'enjeu est alors d'exploiter cet ensemble au mieux pour une surveillance précise au meilleur coût, alimentant des systèmes d'alerte précoce qui seuls intéressent vraiment les gestionnaires des territoires concernés.

Utilisation d'images satellitaires pour le suivi de la faune

Dans le cadre du Réseau d'Observatoires de Surveillance Écologique à Long Terme (ROSELT) de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS), des images ASTER (NASA) ont été utilisées sur l'observatoire de Oued Mird (Maroc) pour mettre au point un dispositif de surveillance de la faune, en se basant sur l'intégration de concepts et de méthodes issus de l'écologie du paysage et de la biologie des populations (Baudat, 2003).

La cartographie intégrée du milieu naturel mise au point permet de travailler à différentes échelles : du paysage au biotope puis à l'habitat. Il est alors possible de surveiller l'évolution des paysages, échantillonner les peuplements animaux selon les **biotopes** et prendre en compte des problématiques spécifiques liées aux habitats d'espèces particulières.

En réalisant une cartographie des biotopes, un plan est construit sur lequel est appliquée une méthode d'échantillonnage stratifié à choisir en fonction du peuplement animal étudié. L'intégration de ces données dans un système d'information géographique (SIG) permettra d'effectuer les traitements et opérations spatiales nécessaires.

L'observatoire de Oued Mird au Maroc

L'observatoire de Oued Mird s'étend sur 550 km² dans le Sud du Maroc (Anti-Atlas saharien). Le site est situé dans l'étage bioclimatique saharien à hivers chauds (moyennes hivernales supérieures à 7°C et précipitations annuelles inférieures à 100 mm, Brignon et Sauvage, 1963). L'altitude y est comprise entre 637 et 1 243 mètres, depuis le fond de la vallée de l'Oued Mird jusqu'aux crêtes du jebel Taddart. Les formations végétales sont des steppes désertiques et des steppes arborées.

Par ailleurs, Oued Mird est représentatif d'une problématique de désertification particulière : il abrite des boisements à *Acacia raddiana* encore bien conservés. Cette espèce est écologiquement un hôte clé et le pivot socio-économique, avec l'accès à l'eau, d'une présence humaine sur ce territoire. En effet, ces arbres fournissent le bois de chauffage et de cuisine aux populations et sont une ressource

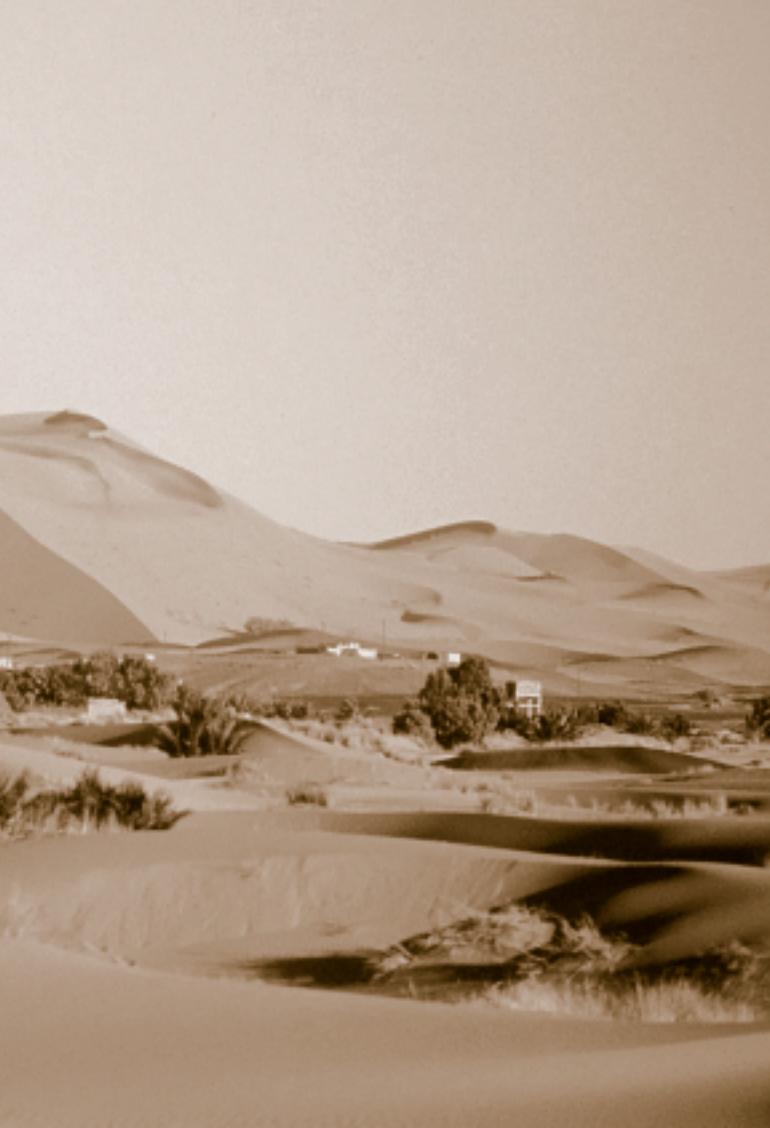


Erg Chebbi, début du grand Erg occidental situé au Sud-Est d'Erfoud. On peut observer l'invasion des palmeraies par les dunes. Maroc. Claude Dejoux © IRD

de pâturage (camélins, caprins). Environ 1 500 personnes vivent sur le site et pratiquent un élevage extensif et une agriculture vivrière (céréaliculture et henné) ; sur 152 foyers recensés, seuls 17 pratiquent encore l'élevage nomade sur les parcours présahariens de la zone.

Élaboration d'une carte des paysages

L'implantation des stations d'observations se fait en prenant en compte l'altitude et la pente, si possible le long de toposéquences. Sur chacune de ces stations, une coupe verticale est réalisée dans laquelle est effectuée une description systématique et stratifiée des composantes du milieu grâce à 17 variables considérées comme des descripteurs écologiques du milieu désertique (sol et végétation). Deux cent six stations géoréférencées par GPS (*Global Positioning System*, 4 semaines de terrain) ont ainsi été décrites sur un peu plus de 400 photos. Une typologie des milieux naturels est alors possible grâce à des analyses statistiques (analyse factorielle des correspondances associée à une classification ascendante hiérarchique) : 14 classes mettent en évidence un gradient écologique depuis les milieux sans végétation (regs et sols nus) jusqu'aux boisements à *Acacia raddiana*.

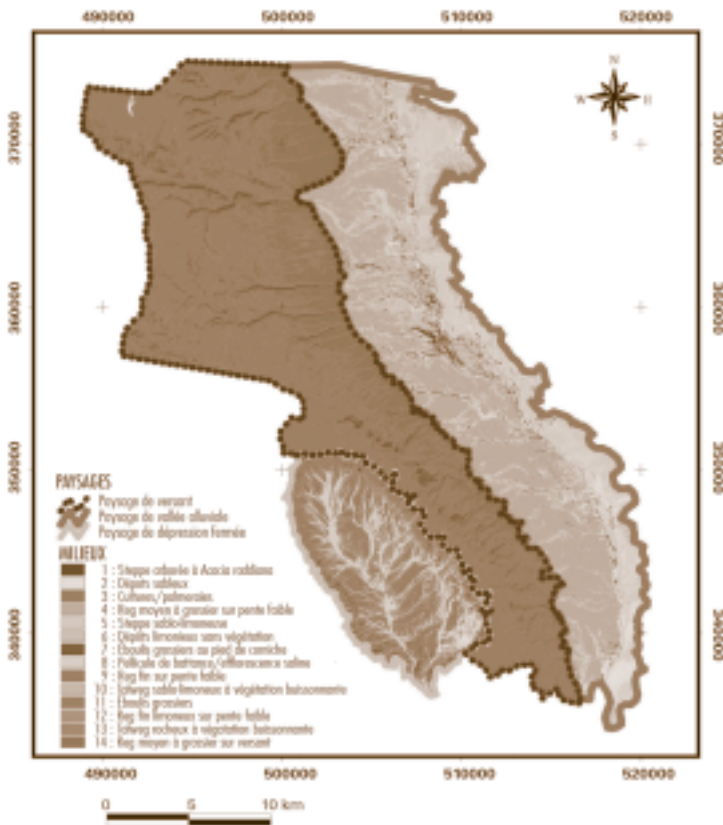


Deux images ASTER à 15 mètres de résolution (visible et proche infrarouge), toutes deux prises à la même date (18/08/01), ont été classées par la méthode dite du maximum de vraisemblance en utilisant la typologie issue des stations de terrain. Mais la précision totale de la classification obtenue est mauvaise (< 40%) : des classes terrains sont totalement confondues voire non classées. Ceci est dû à une inadéquation entre la classification écologique (terrain) et celle radiométrique (image satellite) : les variables écologiques qui prévalent dans la définition de ces classes ne sont pas détectées sur l'image et/ou sont complètement confondues en raison de la résolution des images (15 m), en plus du fait de la sous-détection du couvert végétal, souvent inférieur à 10 pour cent pour cette zone.

Finalement, une interprétation visuelle des images guidée par la typologie de terrain a été effectuée pour corriger les résultats de la classification par maximum de vraisemblance : la carte des paysages et des milieux naturels résulte donc d'une alliance entre classification assistée par ordinateur et expertise humaine.

Trois paysages sont définis sur la carte :

- *Un paysage de versant* : long versant en pente moyenne, d'un aspect monotone dû à la prépondérance du reg et des éboulis (classes de milieu 14 et 11). La végétation n'est présente que sous forme buissonnante le long des axes de drainage (13). On peut ainsi identifier une matrice de milieux rocheux très connectés entrecoupée de corridors de végétation et de versants à éboulis et corniches rocheuses (7 et 11), l'ensemble formant une mosaïque très homogène.
- *Un paysage de dépression fermée* : large cuvette ovale, la dépression du Tafenna présente un fond quasi plat dominé par des regs à matériel fins (9 et 12) entrecoupés d'éboulis à même le sol (11). Les talwegs sont sablo-limoneux et colonisés par une végétation buissonnante bien développée ponctuée d'arbustes et d'arbres isolés (10 et 5). Des dépôts sableux (2) parfois importants couvrent les versants qui ceinturent la cuvette de leurs pentes raides à éboulis grossiers et à corniches rocheuses (11 et 7). On identifie une matrice de reg fin sur pente faible entrecoupée de taches d'éboulis grossiers et de corridors de steppe sablo-limoneuse et de végétation buissonnante. Les versants raides à corniches rocheuses et à éboulis occupent une place transitoire avec le paysage du versant, formant un corridor à tendance circulaire qui délimite la dépression (linéament orange).



Carte des paysages, observatoire de Oued Mird, Maroc.
 © ROSELT/OSS, D'après Baudat, 2003.
 Projection Lambert conique conforme / Sud Maroc II
 Datum : Merchich / Ellipsoïde : Clarke 1880 (IGN) - Cartographie
 d'après 2 images Aster à 15 m (Vis./PIR) - Prises de vue : 18/08/2001
 J. Baudat / Mastère SILAT / IRD-ROSELT/OSS/octobre 2003

Cette illustration est disponible en couleur dans le cahier central.

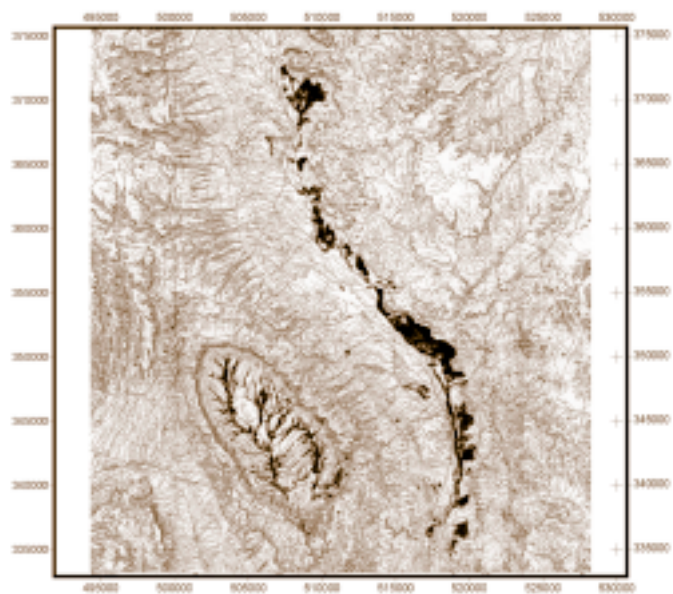
• **Un paysage de vallée alluviale** : la vallée de l'Oued Mird concentre la plus grande hétérogénéité écologique de l'observatoire. Ceci est le fait de la présence d'eau (exutoire du réseau d'écoulement des versants et nappe phréatique peu profonde) associée à celle de l'homme (cultures). La matrice est constituée ici par ces regs moyens à grossiers des terrasses et cônes de déjection (4) ou bien par cette association de dépôts limoneux à très faible couvert végétal et de steppes sablo-limoneuses (5 et 6). Un ensemble de taches hétérogènes alliant cultures et palmeraies (3), dépôts et milieux sableux (2), steppe arborée à *Acacia raddiana* (1) et sols à nu à pellicule de battance et efflorescences salines (8), constitue l'autre élément caractéristique de ce paysage de vallée alluviale.

Une carte des paysages peut ainsi prétendre être un point de rencontre pour les différentes sciences de la Nature, un paysage pouvant être considéré comme un assemblage de biotopes (Forman et Godron, 1986 ; Blondel, 1995 ; Burel et Baudry, 2001). Ce type de produit cartographique constitue un outil pour le travail interdisciplinaire et la surveillance écologique à long terme. Pour ROSELT, la définition d'unités paysagères de ce type permettrait l'intégration d'un suivi de la faune à partir de l'étude des peuplements échantillonnés sur les biotopes.

L'exemple de l'Outarde houbara

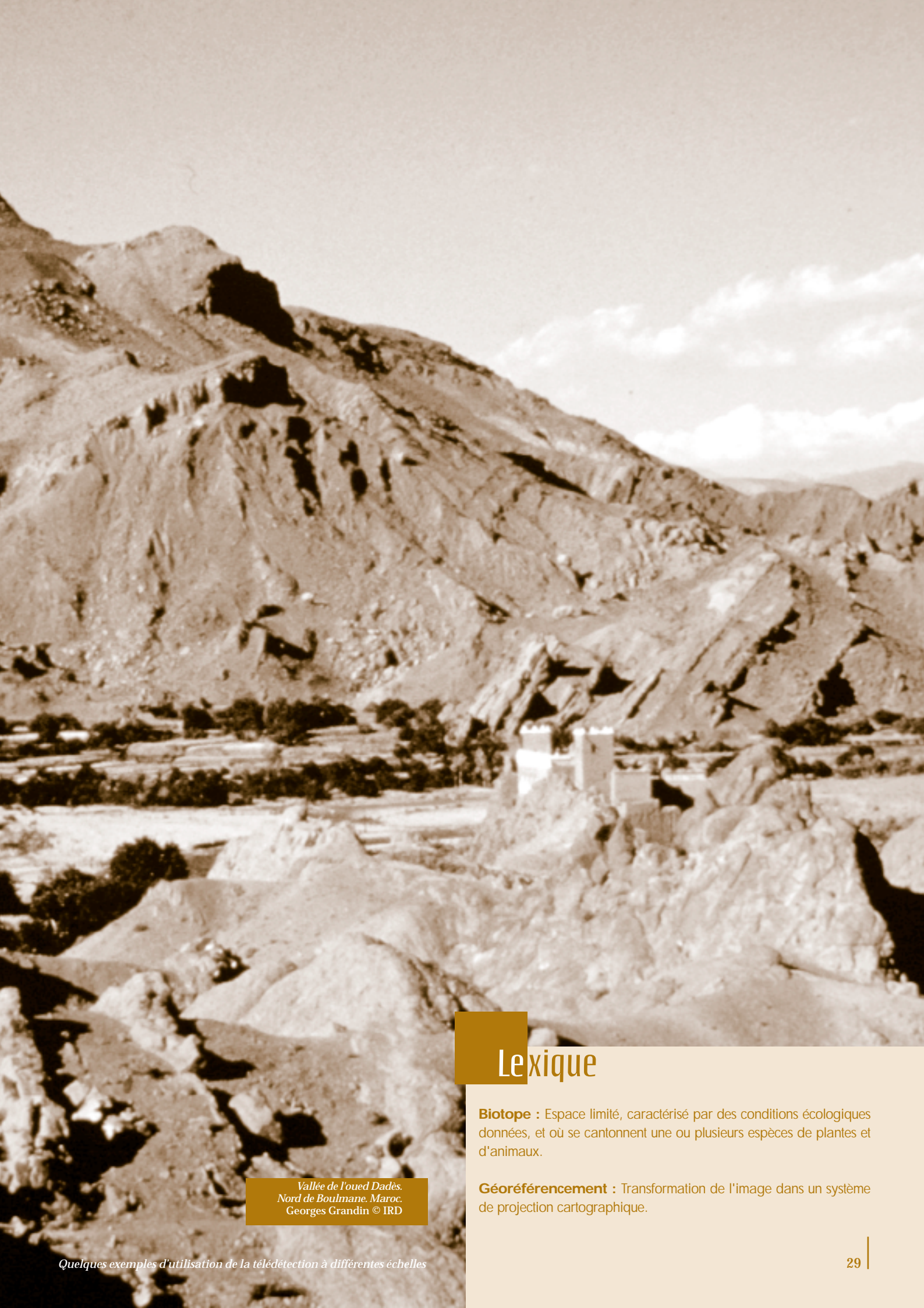
L'outarde houbara est un oiseau marcheur d'assez grande taille (60 cm environ) dont l'aire de distribution s'étend des zones arides sahariennes jusqu'en Asie centrale. Les steppes à végétation xérophytique, sur sol sablo-limoneux à reg fin et pentes faibles parsemées de petites dépressions constituent l'habitat de cette espèce au régime alimentaire végétarien à tendance insectivore (Collar, 1996).

En Algérie, donc dans la même zone biogéographique que la zone d'étude et sur la même sous-espèce, Gaucher (1991) a pu fournir quelques indications sur les espèces végétales ingérées, comme celle du genre *Farsetia* sur Oued Mird, et sur l'espace utilisé pour la prospection alimentaire (1 km/jour pour un rayon minimal de 400 mètres). Sur la base de ces critères, et à partir de la carte des milieux, la carte de l'habitat de l'outarde houbara est extraite sur l'observatoire de Oued Mird. Une superposition sur le fond topographique permet de planifier une recherche systématique par exemple ou encore l'établissement d'un état de référence de l'habitat en vue d'une surveillance. Le résultat concorde par ailleurs avec l'observation d'un individu, réalisée au cours de la campagne de juin 2003.



Localisation de l'habitat de l'outarde Houbara (en orange foncé) à Oued Mird.
 Fond topographique 1/100 000 (DFCTT, 1968) modifié.
 © ROSELT/OSS, D'après Baudat, 2003.

Cette illustration est disponible en couleur dans le cahier central.



*Vallée de l'oued Dadès.
Nord de Boulmane. Maroc.
Georges Grandin © IRD*

Lexique

Biotope : Espace limité, caractérisé par des conditions écologiques données, et où se cantonnent une ou plusieurs espèces de plantes et d'animaux.

Géoréférencement : Transformation de l'image dans un système de projection cartographique.

La télédétection : succès, échecs, questions ouvertes et perspectives



Jeunes gens peuls. Ferlo, Sénégal.
B. Devaux © IRD

Un outil fiable d'acquisition de données de plus en plus abordable

L'immense intérêt des satellites est de couvrir à coût modéré de très grandes surfaces de façon répétitive, homogène et systématique, ce qui est impossible à faire sur le terrain. Naturellement, cette notion de « coût modéré » est à préciser. Lorsque la résolution croît, la taille des images décroît, ainsi que généralement leur fréquence d'observation et en règle générale, leur coût d'acquisition et de traitement augmente également.

Il est donc d'usage de pratiquer un suivi régulier de vastes surfaces à l'échelle journalière ou hebdomadaire à l'aide d'images à basse résolution. Il s'agit alors d'interpréter à petite échelle la dynamique observée dans l'évolution de ces images. Afin d'aider une telle interprétation, on peut faire usage d'un petit nombre d'images à haute résolution, acquises moins fréquemment, et situées dans des sites représentatifs choisis selon leurs caractéristiques particulières (vulnérabilité par exemple), ou bien selon des règles statistiques (stratification et pose d'échantillons), soit par souci de disposer de réseaux d'observatoires pérennes.

Des efforts sont en cours, notamment dans le cadre du 6^{ème} programme-cadre de recherche de la Commission européenne pour fédérer et faire progresser de manière intégrée les recherches et connaissances acquises jusqu'à présent. Lorsqu'une évolution apparemment anormale apparaît sur les images à basse résolution (alerte précoce), il est possible d'observer plus finement ce qui se passe dans ces endroits précisément en programmant des images à haute résolution et, si nécessaire, en provoquant des expertises sur le terrain.

Le suivi conjugué par images à basse et haute résolution permet également d'effectuer un suivi de l'efficacité de mesures de réhabilitation et de lutte contre la désertification.

Comment réduire la « fracture numérique » ?

Pour utiliser une terminologie à la mode, il existe entre les spécialistes des techniques numériques de télédétection et les acteurs de la lutte contre la désertification une « **fracture numérique** » que les scientifiques, les ingénieurs, les décideurs et ceux qui les conseillent, s'efforcent de réduire.

Coupler des informations spatiales et de terrain

Tout d'abord, il existe une distance considérable entre les processus de désertification, extrêmement complexes, les indicateurs pertinents pour les suivre, les variables que la télédétection permet d'observer, et l'efficacité des méthodes d'extraction de ces variables et des modèles. Certaines difficultés sont intrinsèques (peut-on statuer à partir d'observations spatiales sur l'aspect irréversible d'une dégradation ?) et d'autres peuvent être levées par les progrès de la recherche. Bien souvent, ces progrès consistent à associer données de télédétection et données provenant d'autres origines dans des modèles qui améliorent l'utilité et l'efficacité de ces différentes données. Un projet comme ROSELT représente d'ailleurs un effort majeur pour réduire ce type de fracture dans la région circumsaharienne. En effet, beaucoup de diagnostics écologiques sont fondés sur la dynamique des



différentes espèces, la disparition de certaines d'entre-elles, l'apparition d'autres, et cette information est à peu près inaccessible par satellite (aspect biodiversité). Seuls certains peuplements sont reconnaissables par une structure particulière, généralement grâce au calendrier phénologique qui permet de distinguer aisément la végétation annuelle de la végétation pérenne, et encore plus facilement les espèces caduques des sempervirentes. Le progrès consiste à repousser aussi loin que possible la représentativité de ces modèles, qui doivent d'une part se fonder sur des sources d'informations spatiales et sur le terrain et d'autre part s'inscrire dans la durée.

Mieux cibler l'aide internationale

Le coût de la télédétection est modéré au vu des gains qu'elle permet de réaliser par rapport à d'autres techniques. Les investissements, les coûts d'exploitation et ceux de formation des spécialistes doivent être prévus. Or, les pays menacés par la désertification sont des pays pauvres qui peuvent difficilement financer ces investissements et ces coûts récurrents, ainsi que stabiliser le personnel spécialisé. Dans ces conditions, il est étonnant de constater que, bien souvent l'aide internationale porte plus souvent sur des investissements intellectuels ou matériels que sur des coûts récurrents d'exploitation, ce qui risque de rendre vains les investissements consentis par les uns et les autres (fuite des cerveaux, obsolescence du matériel).

Une meilleure diffusion et appropriation des techniques de télédétection par les utilisateurs finaux

La technologie évolue plus vite que les utilisations et le savoir-faire des experts. Néanmoins, des produits relativement simples, qui ne correspondent pas au meilleur niveau des connaissances technologiques, existent et sont disponibles. Par exemple, les bulletins d'alerte sont déjà une réalité. Il convient tout d'abord de faire le meilleur usage de ces produits. En particulier, il est impératif que ceux-ci parviennent aux utilisateurs finaux et que ces derniers soient en mesure de les interpréter. Le développement rapide des techniques de communication numérique fait que le problème de distribution, encore réel il y a quelques années, s'atténue fortement – encore que l'utilisateur final puisse se trouver fort loin dans la chaîne de diffusion de l'information. Le problème de la formation des utilisateurs finaux à ces nouvelles technologies spatiales et celui de leur stabilisation se posent alors. Sans leur concours, les coûts d'investissements et de fonctionnement seraient dépensés en pure perte.

L'utilisation optimale et efficace aux plans social, économique et environnemental, de la télédétection dans la lutte contre la désertification connaît donc ses succès et ses limites. Il est certain que pour aller de l'avant, il convient de progresser dans la réduction des trois types de fracture précédemment évoquées, et ceci de façon cohérente et donc concertée. Sans cette attitude volontariste, on provoquera soit la génération de nouvelles connaissances sans possibilité de mise en œuvre pratique soit la stagnation inacceptable des pratiques utilisées par les acteurs compétents alors que le progrès technologique permettrait d'aller de l'avant et d'assurer le développement durable des régions et des populations les plus vulnérables de notre planète.

Lexique

Fracture numérique : Écart existant en matière d'accès aux technologies de l'information.



Mali, au Mande, les jeunes du Cjrd Kamadjan dressent un inventaire de la flore, sous la conduite de Moussa Kareme (chercheur à IER). Mali. Thérèse Touré © IRD

Acronymes et abréviations utilisés dans le texte

AGRHYMET	Centre Régional de Formation et d'Application en Agrométéorologie et Hydrologie Opérationnelle
AP3A	Projet Alerte Précoce et Prévision des Productions Agricoles
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
C3ED	Centre d'économie et d'éthique pour l'environnement et le développement
CAMELEO	<i>Changes in Arid Mediterranean Ecosystems on the Long term and Earth Observation</i>
CESBIO	Centre d'Études Spatiales de la BIOSphère
CILSS	Comité permanent Inter États de Lutte contre la Sécheresse au Sahel
Cirad Emvt	Département Élevage et médecine vétérinaire du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CSFD	Comité Scientifique Français de la Désertification
EROS	<i>Earth Ressources Observation System</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
ETM	<i>Enhanced Thematic Mapper</i>
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FEWS-NET	<i>Famine Early Warning Systems Network</i>
GIMMS	<i>Global Inventory Modeling and Mapping Studies</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSFC	<i>Goddard Space Flight Center</i>
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
IRD	Institut de recherche pour le développement
ISIS	Incitation à l'utilisation Scientifique des Images SPOT
LGZD	Laboratoire de Géographie Zonale pour le Développement
Médias	bassin MEDIterranéen et Afrique Sub-tropicale
MERIS	<i>Medium Resolution Imaging Spectrometer Instrument</i>
MNT	Modèle numérique de terrain
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MS	<i>Multispectral</i>
MSG	<i>Meteosat Second Generation</i>
MSS	<i>Multi Spectral Scanner</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCREC	<i>National Center for Radio Electronics and Communications</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel
PIR	Proche infrarouge
POSTEL	Pôle d'Observation des Surfaces Terrestres aux Échelles Grandes
ROSELT	Réseau d'Observatoires de Surveillance Écologique à Long Terme
RSO	Radar à synthèse d'ouverture
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SIG	Système d'information géographique
SMIAR	Système Mondial d'Information et d'Alerte Rapide
SMOS	<i>Soil Moisture and Ocean Salinity</i>
UMR	Unité mixte de recherche
USAID	<i>U.S. Agency for International Development</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UVSQ	Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines
VITO	Institut belge de recherche technologique



Références bibliographiques

La télédétection

Bonn F. et Rochon G., 1992. *Précis de télédétection - Volume 1 - Principes et Méthodes*. Universités Francophones, Presses de l'Université du Québec/AUPELF. 485 p.

GDTA, nd. *Visualisation d'images numériques, Visualisation des couleurs, Bases physiques de la télédétection*. Cahiers pédagogiques du GDTA (Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale), France.

Girard M.C., 1989. *Télédétection appliquée - zones tempérées et intertropicales*. Masson, Collection sciences agronomiques, Paris. 260 p.

Girard M.C. et Girard C.M., 1999. *Traitement des données de télédétection*. Dunod (éd.), Paris. 527 p.

La désertification

Jarlan L., Mazzega P., Mougou E., Schoenauer M., Lavenue F., Marty G., Frison P.L. et Hiernaux P., 2003. Mapping of Sahelian Vegetation parameters from ERS Scatterometer data with an evolution strategy algorithm. *Remote Sensing of Environment*. 87 : 72-84.

Mainguet M. et Dumay F., 1995. Trans-Saharan Wind Flows Observed on Meteosat 4 Satellite Image. Resources, urban, sand & wind, Desert Technology III, Oct. 15-20 1995, Lake Motosu, Japan. *Journal of Arid Land Studies*. 53: 89-94.

Mainguet M., Dumay F., Mahfoud A. et Hacen L., 1999. Baseline and Growth Indicators for Desertification in the Sahara - Sahelian Area of Mauritania and their Monitoring from 1953 to 1998. *Desertification Control Bulletin*. 34: 21-30.

Requier-Desjardins M., 2002. *Désertification et environnement mondial (biodiversité et changement climatique) : proposition d'indicateurs pour un projet de développement, l'IREMLCD*. Rapport FFEM/CFSD, France. 60 p.

Requier-Desjardins M. et Caron P., 2005. *La lutte contre la désertification : un bien public mondial environnemental ? Des éléments de réponse...* Les dossiers thématiques du CSFD n°1. CSFD/Agropolis, Montpellier, France. 28 p.

L'exemple tunisien

Escadafal R., 1989. *Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie)*. Études et Thèses. Édition ORSTOM, Paris.

Escadafal R., 1994. Soil spectral properties and their relationships with environmental parameters - Examples from arid regions. In: Hill J. & Mégier J. (Eds). *Imaging spectrometry - a tool for environmental observations*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 71-87.

Escadafal R. et Mégier J., 1998. *CAMELEO: a concerted research effort to develop validated desertification monitoring techniques in Northern Africa*. Actes du symposium international « Satellite-based observation: a tool for the study of the Mediterranean basin ». CNES, Toulouse, France.



Sur le chantier écologique de Mbour, les jeunes des Cjrd de Mbour et de Gouvieux, étudient la végétation. Plusieurs transects, formés de 5 placettes de 10 m sur 10 m, ont été identifiés. Ici, une parcelle de savane arborée. Sénégal. Dominique Lefèvre © IRD

Floret C. et Pontanier R., 1982. *L'aridité en Tunisie présaharienne. Climat, sol, végétation et aménagement*. Travaux et documents de l'ORSTOM n°150, Paris. 544 p.

Floret C., Le Floc'h E. et Rambal S., 1982 – Measurement and modelling of primary production and water use in a South Tunisian steppe. *Journal of Arid Environments*. 5 : 77-90.

Floret C., Le Floc'h E. et Pontanier R., 1992. *Perturbations anthropiques et aridification en zone présaharienne. L'aridité, une contrainte au développement*. Éditions ORSTOM, Paris : 449-463.

Jauffret S. 2001. *Validation et comparaison de divers indicateurs de changements à long terme dans les écosystèmes méditerranéens arides. Application au suivi de la désertification dans le sud tunisien*. Thèse de doctorat, Université de Marseille III (en collaboration avec l'IRD), France. 372 p.

Kennedy P.J., 1989. Monitoring the phenology of Tunisian grazing lands. *Int. J. Remote Sensing*. 10(4-5) : 835-845.

Long G., Le Floc'h E., Pontanier R., Debussche G. et Lacaze B., 1978. *Contribution à l'analyse écologique des zones arides de Tunisie avec l'aide des données de la télédétection spatiale. Expérience ARZOTU, rapport final 1975-1978*. CEPE/CNRS Montpellier, CNES, INRAT Tunis et ORSTOM, Paris. 222 p.

Pontanier R., M'Hiri A., Akrimi N., Aronson J. et Le Floc'h E. (Eds), 1995. *L'homme peut-il refaire ce qu'il a défait ?* John Libbey Eurotext, Paris. 480 p.

L'exemple marocain

Baudat J., 2003. *Une approche spatiale pour la surveillance de la faune. Étude de cas au Sud du Maroc : la vallée de l'oued Mird*. Collection scientifique Roselt/OSS, Contribution Technique n°10, Montpellier, France. 68 p.

Blondel J., 1995. *Biogéographie, approche écologique et évolutive*. Masson, Paris. 297 p.

Brignon C. et Sauvage Ch., 1963. Planche 6B « Carte des étages bioclimatiques du Maroc ». In : Comité de Géographie du Maroc (éd.) *Atlas du Maroc*. Rabat.

Burel F. et Baudry J., 2001. *Écologie du paysage, concepts, méthodes et applications*. 2^{ème} éd. Lavoisier (éd.), Tec. & Doc., France. 349 p.

Collar N.J., 1996. Family Otidae (bustards). In: Lynx Edicions, *Handbook of the Birds of the World*. Vol.3. Spain. 820 p.

Forman R.T.T. et Godron M., 1986. *Landscape ecology*. J. Wiley (éd.), New York. 619 p.

Gaucher Ph., 1991. On the feeding ecology of the Houbara *Chlamydotus undulata undulata*. *Alauda, Rev. Int. Ornithol.* 59(2) : 120-121.

Sites Internet

Organismes européens et internationaux

- **Bassin MEDiterranéen et Afrique Sub-tropicale (Médias)**
<http://medias.obs-mip.fr>
- **Centre d'Études Spatiales de la BIOSphère (CESBIO)**
www.cesbio.u-ps-tlse.fr
- **Centre Régional de Formation et d'Application en Agrométéorologie et Hydrologie Opérationnelle (AGRHYMET)**
www.agrhymet.net
- **Comité Scientifique Français de la Désertification (CFSD)**
www.csf-desertification.org
- **European organisation for the exploitation of METeorological SATellites (EUMETSAT)**
www.eumetsat.de
- **Institut de recherche pour le développement (IRD)**
www.ird.fr
- **Laboratoire de Géographie Zonale pour le Développement (LGZD)**
www.univ-reims.fr
- **Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS)**
www.unesco.org/oss
- **Réseau d'Observatoires de Surveillance Écologique à Long Terme (ROSELT)**
www.roselt-oss.teledetection.fr
- **United Nations Convention to Combat Desertification / Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD)**
www.unccd.int

Agences spatiales

- **Centre National d'Études Spatiales (CNES)**
www.cnes.fr
- **Indian Space Research Organisation (ISRO)**
www.isro.org
- **European Space Agency (ESA)**
www.esa.int
- **National Aeronautics and Space Administration (NASA)**
www.nasa.gov
- **National Space Development Agency of Japan (NASDA)**
www.nasda.go.jp/index_e.html
- **Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)**
www.jaxa.jp
- **Agence spatiale canadienne (ASC)**
www.space.gc.ca/asc

Programmes et missions satellites

- **ADEOS II**
www.eoc.jaxa.jp/adeos2
- **ENVISAT**
<http://envisat.esa.int>
- **ERS**
<http://earth.esa.int/ers>
- **IRS-P4 (OCEANSAT)**
www.isro.org/irsp4.htm

- **LANDSAT**
<http://landsat.gsfc.nasa.gov>
- **MODIS**
www.ga.gov.au/acres/prod_ser/modisdata.htm
- **MSG**
www.esa.int/msg/pag0.html
- **PARASOL**
<http://smc.cnes.fr/PARASOL/Fr>
- **RADARSAT 2**
www.radarsat2.info
- **SMOS**
www.esa.int/esaLP/smos.html
- **Spot 4**
<http://spot4.cnes.fr>
- **TERRA**
<http://terra.nasa.gov>

Fournisseurs d'images satellites

- **ESA (European Space Agency)**
<http://earth.esa.int/images>
- **EURIMAGE**
www.eurimage.com
- **GLCF (Global Land Cover Facility)**
<http://glcf.umiacs.umd.edu>
- **Landsat**
www Landsat.org
- **Radarsat International**
www.rsi.ca
- **Space Imaging**
www.spaceimaging.com
- **Spot Image**
www.spotimage.fr
- **VITO (VEGETATION)**
<http://free.vgt.vito.be>

Enseignement

- **Centre canadien de télédétection**
www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/learn_f.html
- **Institut National Agronomique de Paris-Grignon (INA PG)**
<http://lacan.grignon.inra.fr/ressources/teledetection/vademecum.htm>
- **Institut National Agronomique de Paris-Grignon / Institut National de la Recherche Agronomique (Inra)**
www.inapg.inra.fr/ens_rech/ager/ressources/supports/courteld/cours/couverture.htm
- **Remote Sensing Tutorial (NASA)**
<http://rst.gsfc.nasa.gov>

Programme ISIS / Incitation à l'utilisation Scientifique des Images Spot

- <http://medias.obs-mip.fr/isis>
- <http://medias.obs-mip.fr/www/Reseau/Lettre/13/en/isis.pdf>

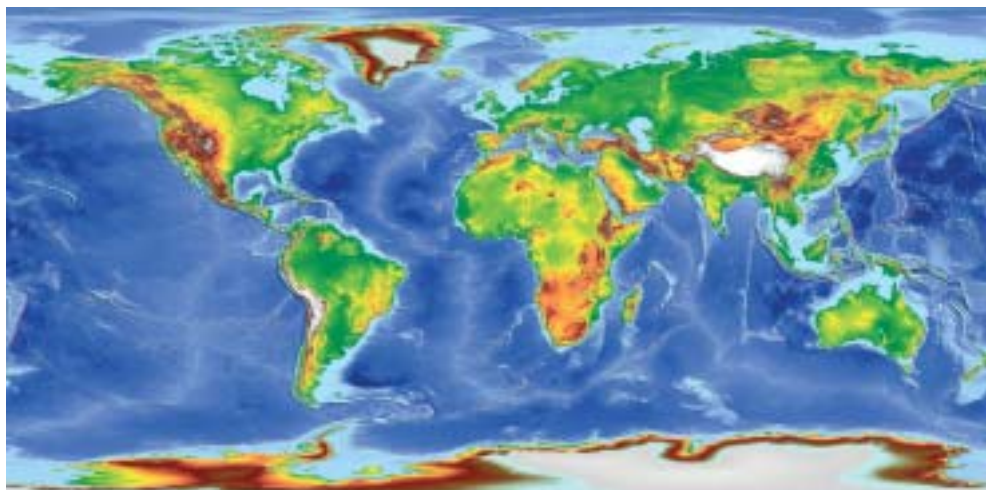
Cahier central :
illustrations en couleur



*Campement de pasteurs peuls sur un reg
ensablé par l'erg ancien (Inchirien,
22000 BP). Nord Oursi, Burkina Faso.*
Jean-Claude Leprun © IRD

Exemple (page 13)

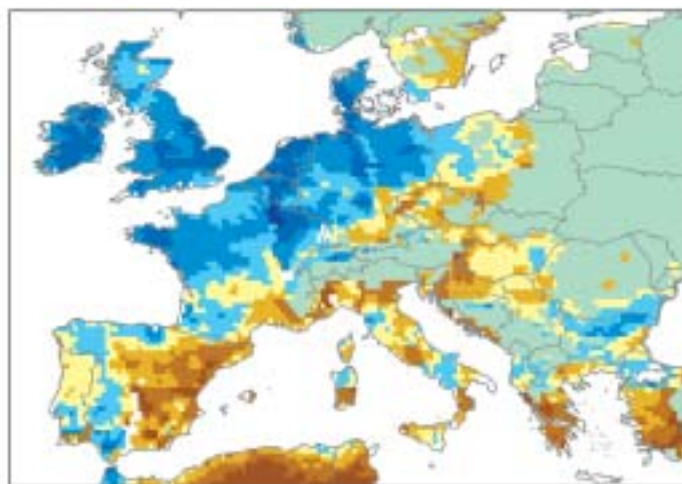
Utilisation du paramètre « rugosité »
La Terre vue d'un radar altimètre :
topographie des terres et bathymétrie des océans



Cette carte a été établie à partir de données issues du satellite européen ERS-2 par l'ESA (European Space Agency).

Exemple (page 14)

Utilisation du paramètre
« humidité du sol » en Europe



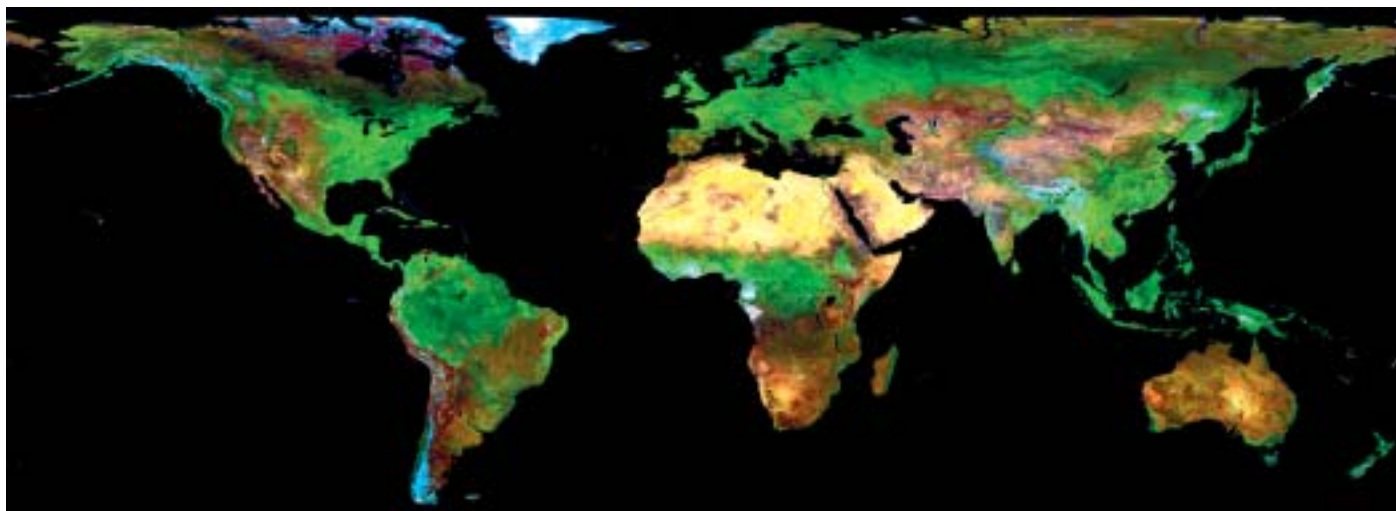
Humidité du sol en Europe - Satellite ERS (Janvier 2000)

Une cartographie de l'humidité des sols a été déduite des mesures prises par le satellite ERS (janvier 2000) en Europe. L'information est exprimée de façon relative en pourcentage, 0 % représentant des terres sèches et 100 % des terres très humides.

Source : aimablement communiqué par
l'Institute of Photogrammetry and Remote sensing, Vienna
University of Technology.

Exemple (page 15)

Les indices de végétation au niveau mondial



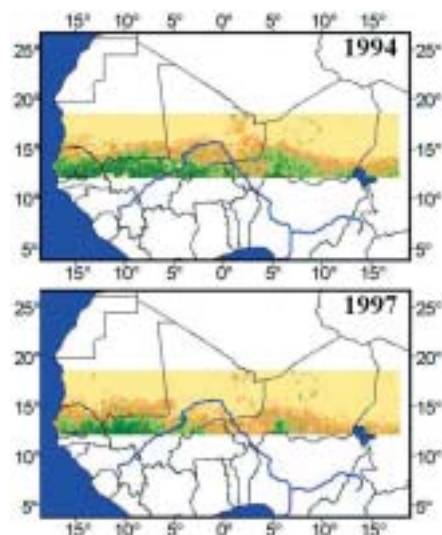
© CNES 2004

Une synthèse mondiale des indices de végétation a été réalisée par EOWorks à partir des données issues de Spot Vegetation-NDVI (03/1999). La gamme de couleurs exprime des valeurs croissantes de l'indice du jaune au vert.

Image distribuée par VITO

Exemple (page 17)

Suivi de biomasse dans la zone ouest-sahélienne



Production végétale aérienne sur la zone ouest sahélienne (-18°E/18°E et 13.5°N/20°N) évaluée par le diffusiomètre des satellites ERS pour deux années contrastées
© CESBIO 2003

L'estimation de la biomasse végétale (partie aérienne) est basée sur l'utilisation des données météorologiques combinées avec celles du diffusiomètre (à travers un modèle). Dans la zone sahélienne couverte par l'étude, on constate une forte différence de distribution de la biomasse entre les deux années : 1994 (humide) et 1997 (sèche).

Cette méthode appliquée à l'ensemble de la bande sahélienne présentée sur cette figure, a été validée sur le terrain de la région du Gourma au Mali.

L'échelle de couleur va de :
0 (blanc cassé) à 3 000 kg de matière sèche par hectare (vert foncé).

D'après Jarlan et al., 2003.



Exemples (page 16)

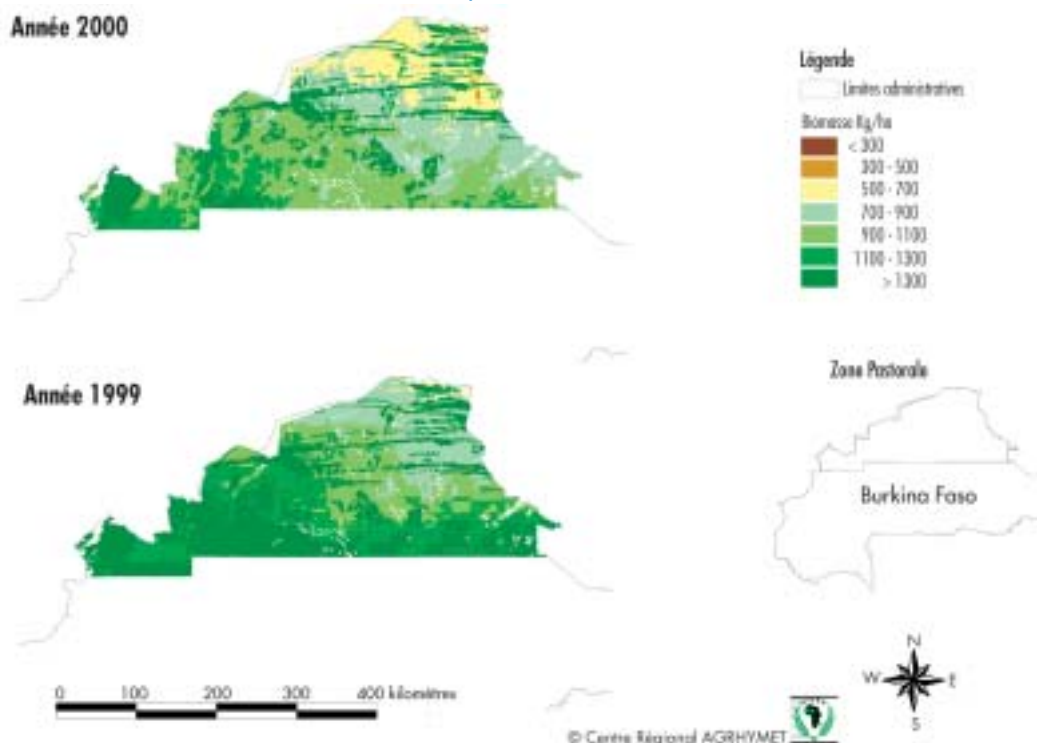
Utilisation des indices de végétation : la carte des zones arides africaines



Les indices de végétation (NDVI) pour la première décennie d'avril 2004 proviennent de données issues du satellite NOAA-AVHRR. Plus l'indice est élevé, plus le couvert végétal est développé.

Source : Données issues de la NASA GSFC (Goddard Space Flight Center), GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) ; Carte réalisée par le projet FEWS-NET (Famine Early Warning Systems Network) du Centre de données du système d'observation des ressources terrestres (USGS EROS Data Center, United States Geological Survey-Earth Resources Observation System).
Travail financé par l'USAID (U.S. Agency for International Development).

Suivi de la biomasse herbacée en zone pastorale, Burkina Faso



Cartes annuelles de biomasse herbacée sur la zone pastorale du Burkina Faso pour 1999 et 2000 (noter la différence entre les deux situations annuelles).

Au Sahel, la couverture végétale est dominée par des graminées annuelles qui forment une grande partie des ressources pastorales. Le centre AGRHYMET (CILSS, Comité permanent Inter États de Lutte contre la Sécheresse au Sahel) créé depuis 1974, réalise actuellement un suivi des pâturages à l'échelle régionale et transfère les informations aux décideurs nationaux. Cela permet de déterminer les aires de pâture à risque, et en cas de nécessité, de provoquer une alerte afin de modérer l'exploitation de ces aires et d'éviter leur désertification. L'état des ressources pastorales est évalué en estimant la biomasse à partir des valeurs d'indices de végétation cumulés. Ces données sont également regroupées pour la zone sahélienne dans le rapport mensuel du Système Mondial d'Information et d'Alerte Rapide (SMIAR) de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).

Des techniques similaires sont applicables à d'autres zones pastorales semi-arides riches en plantes à cycle annuel, dont celles d'Asie centrale.

Au nord du Sahara, le suivi de la végétation est plus difficile à cause de la dominance de steppes à petits buissons ligneux bas. De plus, une bonne partie de l'année la végétation est faiblement verte, voire pas du tout pendant les périodes très sèches. L'indice de végétation est alors peu utilisable pour estimer la variation du couvert végétal.

© Centre régional AGRHYMET
Source : Projet AP3A, Projet Alerte Précoce et Prédiction des Productions Agricoles, Centre régional AGRHYMET, Niamey, Niger

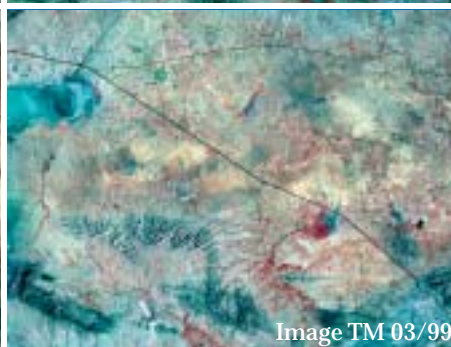
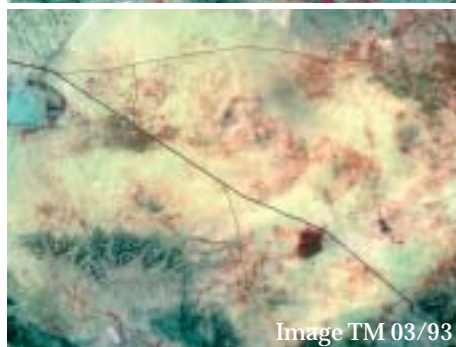
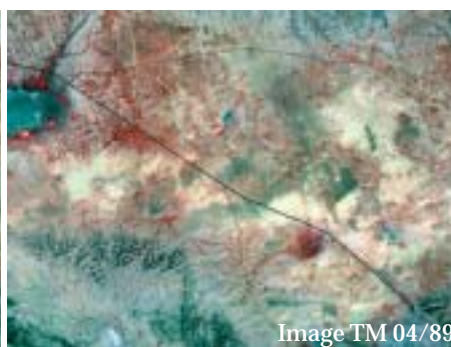
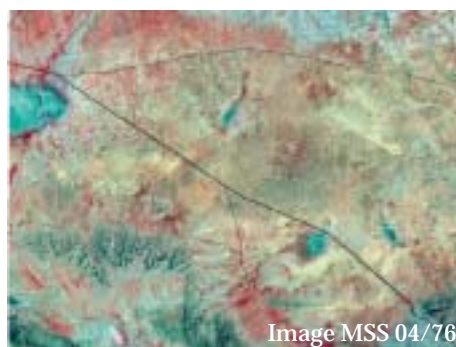
Dégradation par diminution de couvert végétal de la steppe sableuse de Menzel Habib, Tunisie

Vue de terrain



R. Escadafal © IRD

Images satellites



R. Escadafal © IRD

Quatre images Landsat de la région de Menzel Habib (Tunisie) géoréférencées et intercalibrées (1976, 1989, 1993, 1999)
Richard Escadafal © IRD

Les différences correspondent à des modifications de l'état des surfaces au sol. La zone couverte par chaque image est de 30 x 24 km.

• Image Landsat MSS du 04/1976

En 1976, la plaine de Menzel Habib, bordée de reliefs au sud-est et sud-ouest (gris), est dominée par une steppe sableuse au centre (beige) et des cultures annuelles (rouge) vers la périphérie et dans les dépressions (taches rouge vif).

• Image Landsat TM du 04/1989

En 1989, la sécheresse a entraîné une diminution des cultures et une extension spectaculaire des sables mobiles (jaune clair) : la région est « désertifiée ».

• Image Landsat TM du 03/1993

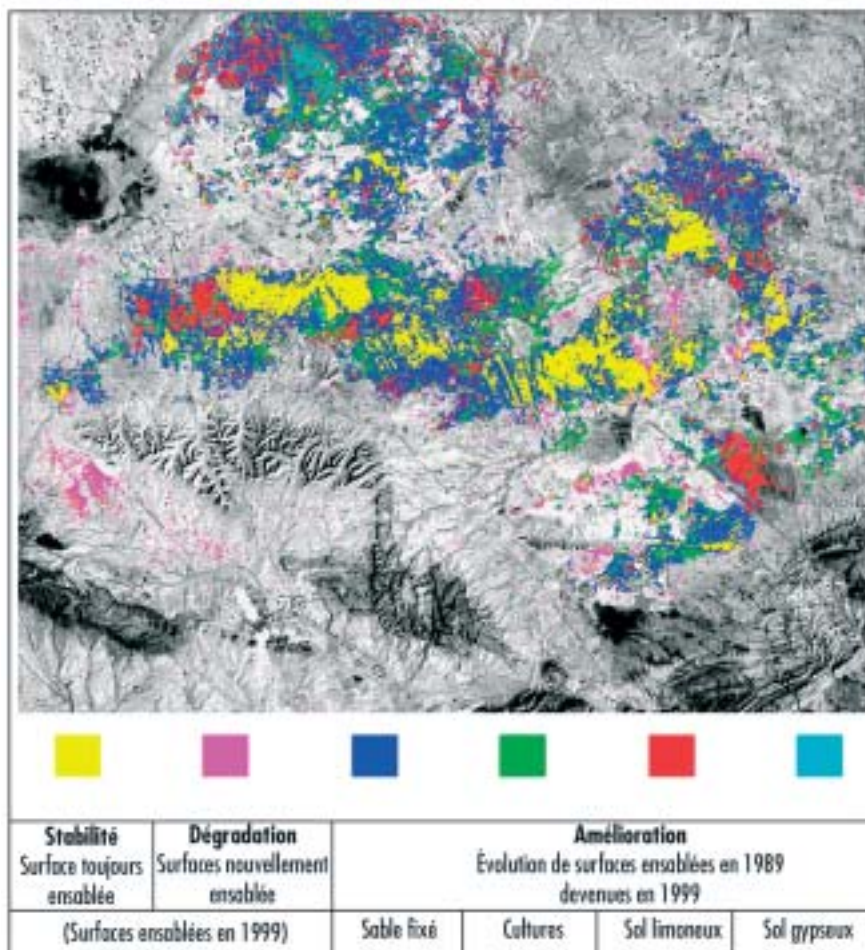
En 1993, quatre ans plus tard, les effets des mises en défens apparaissent clairement sous forme de trapèzes sombres au milieu des zones sableuses, alors que les cultures annuelles sont intensifiées (pointillés rouges).

• Image Landsat TM du 03/1999

En 1999, les zones de sables mobiles ont complètement régressé et la situation semble bien contrôlée, le paysage paraît entièrement découpé en parcelles de différents usages, de nouvelles mises en défens ont été installées dans les dernières zones de dunes.



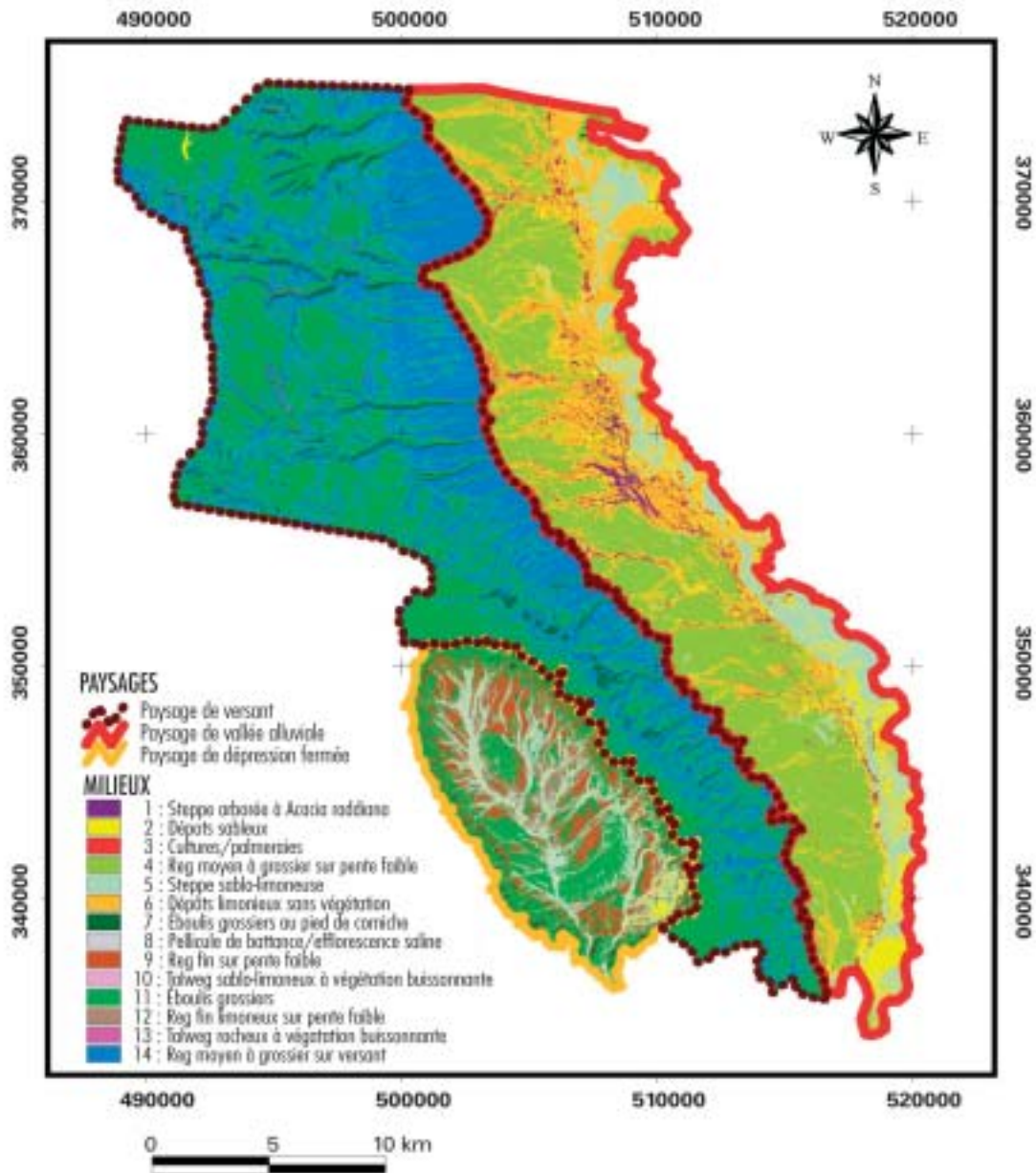
Synthèse de l'évolution de l'ensablement de la zone de Menzel Habib (Tunisie) entre 1989 et 1999



R. Escadafal © IRD

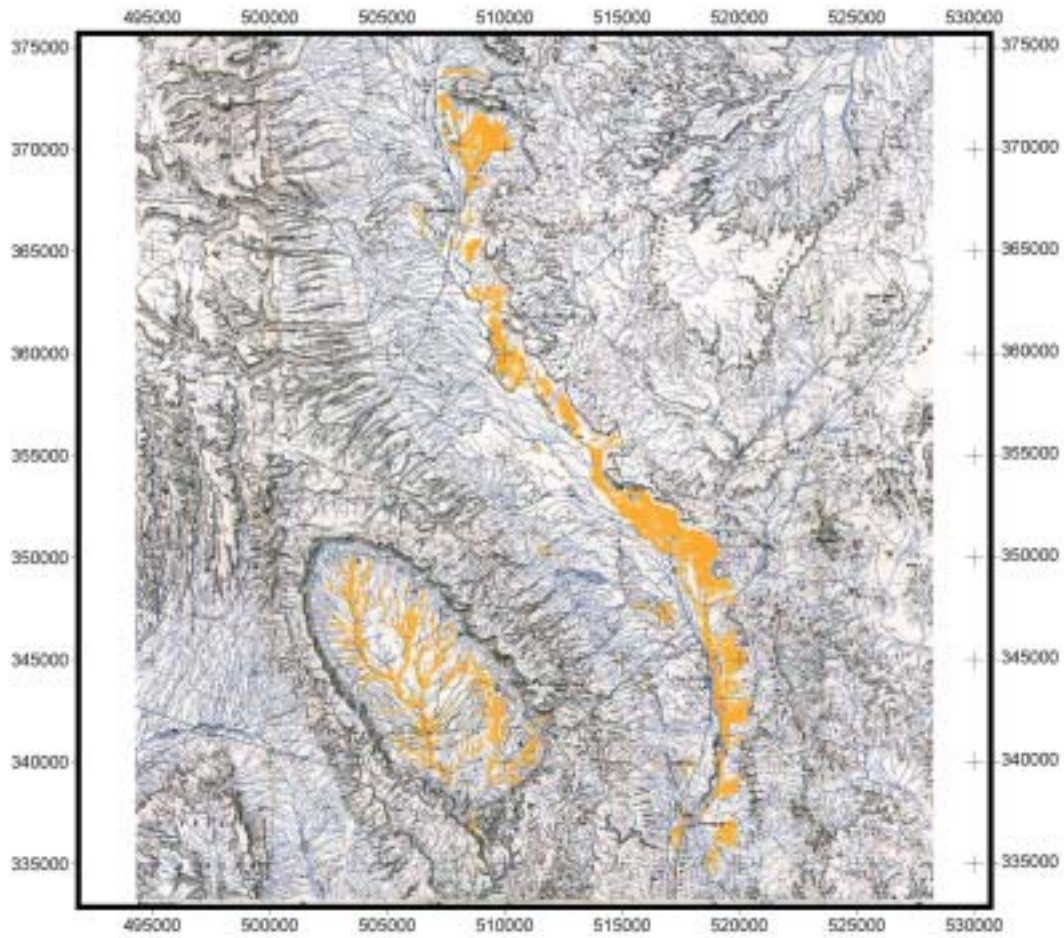
Cette figure illustre une des synthèses obtenues en analysant les tendances observées sur des images classées sur cinq dates (entre 1989 et 1999), et concernant les surfaces ensablées (sables mobiles non fixés, dunes, etc.). Il existe une diminution de la surface des zones ensablées (dunes mobiles) au profit des surfaces à sables fixés et des cultures.

Les images satellites ont ainsi mis en évidence une amélioration de l'état du milieu entre 1989 et 1999. Les efforts de fixation des sables mobiles qui avaient envahi la région pendant la décennie précédente ont porté leurs fruits ; la surveillance par télédétection a permis de quantifier sur de larges étendues cet effet qui a bien sûr été aussi observé localement sur le terrain.



Carte des paysages, observatoire de Oued Mird, Maroc.
 © ROSELT/OSS. D'après Baudat, 2003.
 Projection Lambert conique conforme / Sud Maroc II
 Datum : Merichich / Ellipsoïde : Clarke 1880 (IGN) - Cartographie
 d'après 2 images Aster à 15 m (Vis./PIR) - Prises de vue : 18/08/2001
 J. Baudat / Mastère SILAT / IRD-ROSELT/OSS/octobre 2003





Localisation de l'habitat de l'outarde Houbara (en orange foncé) à Oued Mird. Fond topographique 1/100 000 (DFCTI, 1968) modifié. © ROSELT/OSS. D'après Baudat, 2003.

Le cahier central est imprimé sur Cyclus Print, papier recyclé et désencré sans chlore.



Résumé

La télédétection est une technique permettant l'observation du rayonnement diffusé ou émis par la surface de la Terre. La télédétection par satellite permet des observations régulières, répétitives, fidèles, de la quasi-totalité de la planète, à divers pas d'espace et de temps, dans plusieurs domaines de longueur d'onde.

Ces observations traduisent la nature, l'état, la variation spatiale et temporelle des propriétés des objets présents à la surface terrestre. À titre d'exemple, l'étendue des surfaces en eau, la rugosité, l'humidité des sols et leur changement de nature, la densité et l'évolution phénologique du couvert végétal, les vents de sable, sont des informations présentes dans ces observations.

Néanmoins, ces observations se combinent entre elles le plus souvent et il est plus ou moins difficile de les extraire des données brutes transmises par les satellites. La science de la télédétection consiste à interpréter et traiter les séries spatiales et temporelles d'images afin d'extraire ces paramètres qualitativement ou quantitativement. La désertification est un phénomène de dégradation irréversible des terres. Elle est le résultat de processus complexes liés à l'évolution conjointe et couplée de facteurs naturels et anthropiques. Le départ de tels processus, leur développement et leur résultat, se traduisent dans les états de surface du sol et leur évolution.

Les données de télédétection sont donc porteuses d'informations que la science de la télédétection permet partiellement d'extraire, avec plus ou moins de précision. Ces informations, couplées avec d'autres, interviennent dans diverses phases du processus de désertification. La télédétection apporte des informations utiles, parfois indispensables et impossibles à acquérir autrement (notamment en termes d'homogénéité et de couverture spatiale et/ou de suivi temporel), pour l'alerte précoce, le suivi du développement de phénomènes de désertification et le constat d'un état final. Elle peut notamment permettre de dresser des constats sur les impacts de politiques de lutte. Néanmoins, de par les limitations signalées sur l'extraction des paramètres utiles et le rôle de ces paramètres dans ces processus en jeu, la télédétection s'avère être un outil parmi d'autres, certes puissant, mais non une solution 'miracle' scientifique, décisionnelle ou opérationnelle.

Après avoir présenté de manière détaillée la technique et la science de la télédétection, et comment elle permet de suivre certains éléments des processus de désertification, ce dossier s'attache aux cas les plus importants et significatifs, en rapprochant les deux aspects. Certains paramètres et processus clés sont étudiés : rugosité, albédo, température de surface, humidité, indices de végétation d'une part ; suivi de la couverture végétale, modification de composition des surfaces en milieu aride et transport éolien d'autre part. Des exemples sont développés : évolutions de sites particuliers, projets en cours de développement. Des leçons d'expériences passées sont analysées d'un œil critique et des voies pour le futur sont dessinées.

Mots clés : Télédétection, désertification, couvert végétal, état des surfaces, transport éolien, alerte précoce, politiques de prévention, suivi/évaluation

Abstract

Remote sensing is a technique that enables to observe the radiation scattered or emitted by the Earth surface. Satellite-based remote sensing allows regular, repetitive, accurate observations of nearly the whole planet, at various spatial and temporal scales, in several wavelength fields.

Such observations render the nature, state, temporal and spatial variations of the properties of the objects at the Earth surface. By way of example, water-covered areas, roughness, soil moisture, changes in the nature of land, density and phenological evolution of the vegetation cover, sand winds, are information included in these observations. Nevertheless, these observations usually combine together, making them more or less difficult to extract from the raw data transmitted by satellites. The science of remote sensing consists in interpreting and processing the series of spatial and temporal images in order to extract such parameters, qualitatively or quantitatively.

Desertification is a phenomenon of irreversible land degradation. It results from complex processes linked to the coupled and joint evolution of natural and human-induced factors. The beginning, development and results of such processes are materialised by land surface states and their evolution.

Remotely sensed data consequently include information that the science of remote sensing allows to partly extract with more or less accuracy. Such information coupled with others are involved in various stages of the desertification process. Remote sensing provides useful data; some of them are essential information impossible to collect otherwise (especially in terms of homogeneity and spatial coverage and/or temporal monitoring) for early warning, monitoring the development of desertification phenomena and acknowledging a final state. Among others, remote sensing may allow to determine the impacts of policies to combat desertification. However, because of the mentioned limits regarding the extraction of useful parameters and the part played by the latter in the processes concerned, remote sensing turns out to be a tool among others - certainly a powerful one, but not a scientific, decisional or operational "miracle" solution.

After presenting in detail the technique and science of remote sensing and how it allows to monitor various elements of desertification processes, this brochure deals with the most important and significant cases and brings both aspects together. Several key parameters and processes are studied: roughness, albedo, surface temperature, moisture, vegetation indices on the one hand; vegetation cover monitoring, modifications in the land surface composition in dry environments, wind transportation on the other hand. Examples are developed: evolutions of specific sites, projects under way. Lessons taught by previous experiments are critically analysed, options for the future are designed.

Key words: Remote sensing, desertification, vegetation cover, land surface states, wind transportation, early warning, prevention policies, monitoring/assessment

Couverture (photo montage) :

Paysage : Irrigation en milieu aride, Tunisie - J. Pouget © IRD

Homme : Vie de l'ethnie peule, Burkina Faso - J.-F. Molez © IRD

Dans la même collection



Janvier 2005

La lutte contre la désertification :
un bien public mondial environnemental ?
Des éléments de réponse...
(M. Requier-Desjardins et P. Caron)

La télédétection : un outil pour le suivi
et l'évaluation de la désertification
(G. Begni, R. Escadafal,
D. Fontannaz et A.-T. Nguyen)

Restauration des milieux dégradés
en zones arides et semi-arides
(É. Le Floc'h et J. Aronson)

Biodiversité et désertification
(A. Sarr)

Pastoralisme et désertification
en zone subsaharienne
(Ph. Lhoste et B. Toutain)

La révolution pastorale en Méditerranée
et son impact sur la désertification
(A. Bourbouze)

Biens, ressources naturelles et pauvreté
dans les sociétés pastorales :
quelles approches ?
(A. Bourgeot)

Érosion éolienne et désertification
(M. Mainguet et F. Dumay)

Désertification et gestion
des ressources en eau

Impact socio-économique
de la désertification

L'information environnementale
pour l'aide à la décision

Changement climatique
et désertification

Arbres, arbustes et produits
forestiers non ligneux



Ministère délégué à la Recherche

1 rue Descartes
75231 Paris CEDEX 05
France
Tél.: +33 (0)1 55 55 90 90
www.recherche.gouv.fr



Ministère des Affaires étrangères

20 rue Monsieur
75007 Paris
France
Tél.: +33 (0)1 53 69 30 00
www.diplomatie.gouv.fr



Ministère de l'Écologie et du Développement durable

20 avenue de Ségur
75302 Paris 07 SP
France
Tél.: +33 (0)1 42 19 20 21
www.ecologie.gouv.fr



Agence Française de Développement

5, rue Roland Barthes
75598 Paris CEDEX 12
France
Tél.: +33 (0)1 53 44 31 31
www.afd.fr



Secrétariat de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification

P.O. Box 260129
Haus Carstanjen
D-53153 Bonn
Allemagne
Tél.: +49 228 815-2800
www.unccd.int



Agropolis

Avenue Agropolis
F-34394 Montpellier CEDEX 5
France
Tél.: +33 (0)4 67 04 75 75
www.agropolis.fr



CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

Avec la contribution exceptionnelle du Centre National d'Études Spatiales

18 avenue Édouard Belin
France
F-31401 Toulouse CEDEX 9
Tél.: +33 (0)5 61 27 31 31
www.cnes.fr



Avec la participation du Laboratoire de Géographie Zonale pour le Développement

(Université de Reims Champagne-Ardenne)
57 rue Pierre Taittinger
France
F-51096 Reims CEDEX
Tél.: +33 (0)3 26 91 81 62
www.univ-reims.fr

POUR NOUS CONTACTER



CSFD Comité Scientifique Français de la Désertification

Agropolis International
Avenue Agropolis
F-34394 Montpellier CEDEX 5
France
Tél.: +33 (0)4 67 04 75 44
Fax: +33 (0)4 67 04 75 99
csfd@agropolis.fr
www.csf-desertification.org