

CSEFD

Les dossiers
thématiques

Numéro 12

SURVEILLER LA DÉSERTIFICATION PAR TÉLÉDÉTECTION



AGROPOLIS
INTERNATIONAL



Comité Scientifique Français de la Désertification
French Scientific Committee on Desertification

Les dossiers thématiques du CSFD numéro 12

Directeur de la publication

Richard Escadafal

Président du CSFD

Directeur de recherche de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) au Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO, Toulouse)

Auteurs

■ **Richard Escadafal**, richard.escadafal@ird.fr

Pédologue spécialisé en télédétection, IRD, CESBIO

■ **Gérard Bégni**, begnigerard@yahoo.fr

Télédétection, changements et environnement globaux, ex-Médias-France, ex-Centre national d'études spatiales (CNES)

Avec la participation de

- **Ahmad Al Bitar**, hydrologie spatiale, CESBIO
- **Nabil Ben Khadra**, agronome spécialisé en télédétection, Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS), Tunisie
- **Philippe Billet**, juriste en droit public, Université Jean Moulin Lyon 3
- **Bernard Bonnet**, pastoraliste, Institut de Recherches et d'Applications des Méthodes de développement (Iram)
- **Gilles Boulet**, hydrologue, IRD, CESBIO
- **Michael Cherlet**, télédétection pour la surveillance des changements environnementaux globaux, *European Commission Joint Research Centre*, Italie
- **Cécile Dardel**, télédétection, Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse (GET)
- **Luc Descroix**, hydrologue, IRD
- **Pierre Hiernaux**, agronome et écologue, ex-Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et Institut International de Recherche en Élevage (ILRI)
- **Béatrice Marticorena**, physico-chimiste de l'atmosphère, Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA)
- **Vincent Simonneaux**, pédologue spécialisé en télédétection, IRD, CESBIO
- **Stefan Sommer**, télédétection pour la surveillance des changements environnementaux globaux, *European Commission Joint Research Centre*, Italie
- **Sébastien Subsol**, Centre régional AGRHYMET, Niger
- **Maxime Thibon**, Gestion des ressources naturelles et biodiversité, OSS, Tunisie
- **Yves Travi**, hydrogéologue, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse

Coordination éditoriale et rédaction

Isabelle Amsallem, amsallem@agropolis.fr

Agropolis Productions

Réalisation

Frédéric Pruneau, pruneauproduction@gmail.com

Pruneau Production

Remerciements pour les illustrations

Daina Rechner et Christelle Mary (Photothèque INDIGO, IRD), **Pierre Hiernaux** (CNRS), **Tom Corl** (*Spectra Vista Corporation*) ainsi que les auteurs des différentes photos présentes dans le dossier.

Impression : Pure Impression (Mauguio, France)

Dépôt légal : à parution • **ISSN** : 1772-6964

Imprimé à 1 500 exemplaires

© CSFD / Agropolis International, novembre 2016.

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. D'une part, il s'agit 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 subhumides 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. 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. Il contribue aux activités de plaidoyer en faveur du développement des zones sèches, en relation avec la société civile et les médias. Il coopère avec le réseau international DNI, *DeserNet International*.

Le CSFD est composé d'une vingtaine de membres et d'un Président, nommés *intuitu personae* par le ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et issus des différents champs disciplinaires et des principaux organismes et universités concernés. Le CSFD est géré et hébergé par Agropolis International qui rassemble, à Montpellier et en 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 pas de personnalité juridique. Le financement de son fonctionnement est assuré par des contributions du ministère des Affaires étrangères et du Développement international, du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, ainsi que de l'Agence Française de Développement. La participation de ses membres à ses activités est gracieuse et fait partie de l'apport du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

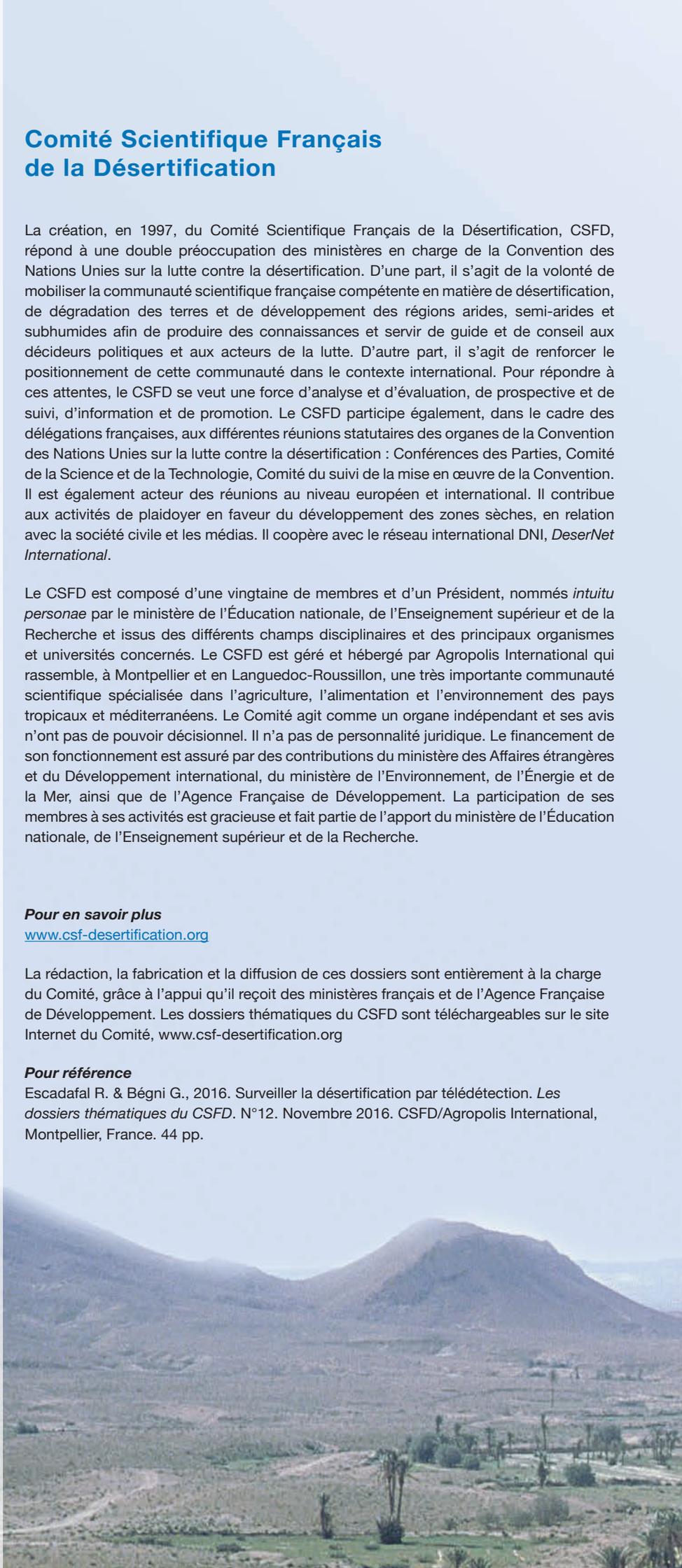
Pour en savoir plus

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 et de l'Agence Française de Développement. Les dossiers thématiques du CSFD sont téléchargeables sur le site Internet du Comité, www.csf-desertification.org

Pour référence

Escadafal R. & Bégni G., 2016. Surveiller la désertification par télédétection. *Les dossiers thématiques du CSFD*. N°12. Novembre 2016. CSFD/Agropolis International, Montpellier, France. 44 pp.



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 pour les scientifiques de mieux comprendre les processus en jeu et de proposer des solutions. Cela implique également 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 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 champs disciplinaires. 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.

Ces dossiers sont consacrés à différents thèmes aussi variés que les biens publics mondiaux, la télédétection, l'érosion éolienne, l'agroécologie, le pastoralisme, 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, des adresses et des sites Internet utiles.

Ces dossiers sont largement diffusés notamment dans les pays les plus touchés par la désertification sous format électronique 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 et de l'Agence Française de Développement. Les avis exprimés dans les dossiers reçoivent l'aval du Comité.

RICHARD ESCADAFAL

PRÉSIDENT DU CSFD

DIRECTEUR DE RECHERCHE DE L'IRD
AU CENTRE D'ÉTUDES SPATIALES DE LA BIOSPHÈRE

Cette deuxième édition vient avec bonheur remplacer la première préfacée par Hubert Curien ; on ne peut qu'en remercier les auteurs¹. En effet, si les auteurs redonnent des informations de base sur la télédétection spatiale, ils indiquent aussi les tendances récentes, en particulier le développement de nombreux capteurs de types différents — dont les radars — et de types d'images, couvrant de grandes parties du globe jusqu'à des surfaces très petites et détaillées en utilisant des drones civils que les auteurs appellent « la télédétection personnelle ». Ils s'attachent également à faire découvrir des exemples d'utilisations variées sur les régions sèches, du niveau global jusqu'à celui de la parcelle.

Le lecteur découvre ainsi, à partir des résultats les plus récents, les multiples images que les satellites offrent en termes de données géographiques et thématiques. Mais ces très nombreuses données ne sont utilisables qu'associées à des études et à des mesures de terrain indispensables pour interpréter correctement les images.

L'accent, bien naturellement, est mis sur l'observation de la Terre dans les régions où les pluies sont faibles. En conséquence, les images des capteurs fonctionnant dans le domaine visible sont privilégiées. Or ce sont ces dernières qui sont disponibles sur plus de 40 années. Il est donc possible de mesurer et interpréter les tendances à long terme, comme en témoignent les discussions récentes sur le « reverdissement du Sahel africain ».

Les spécificités des régions sèches sont bien prises en compte, en particulier l'importance de la surface des sols qui est capitale dans ces régions. En effet, elle est peu couverte par une végétation discontinue dans le temps et/ou dans l'espace, et elle produit des poussières éoliennes, impactant le champ du paysan sahélien au niveau local, mais aussi, globalement, le système climatique de l'ensemble de la planète.

Depuis 10 ou 20 ans, l'observation de la Terre s'est beaucoup démocratisée. Elle était auparavant réservée à des spécialistes. Dorénavant son usage s'est répandu auprès des bénéficiaires directs, notamment ceux qui surveillent l'environnement et, en particulier, ceux qui analysent et suivent la « désertification » dans les régions arides et semi-arides.

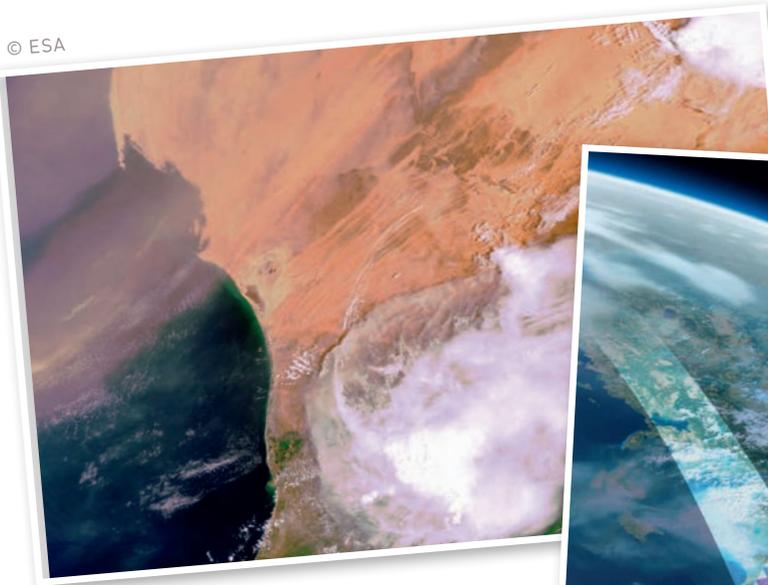
Ce dossier comporte de nombreuses indications sur les outils disponibles pour le grand public, les images (gratuites) et les données disponibles. En fin de dossier, nous est fournie une liste de sites contribuant à une démocratisation de l'utilisation des images. Cela permettra, espérons-le, une surveillance de l'environnement facilitant la gouvernance de ces régions sèches.

MICHEL-CLAUDE GIRARD

PROFESSEUR ÉMÉRITE À AGROPARISTECH
MEMBRE TITULAIRE DE L'ACADÉMIE D'AGRICULTURE DE FRANCE

1. La première édition est constituée par le dossier CSFD N°2 paru en 2005.

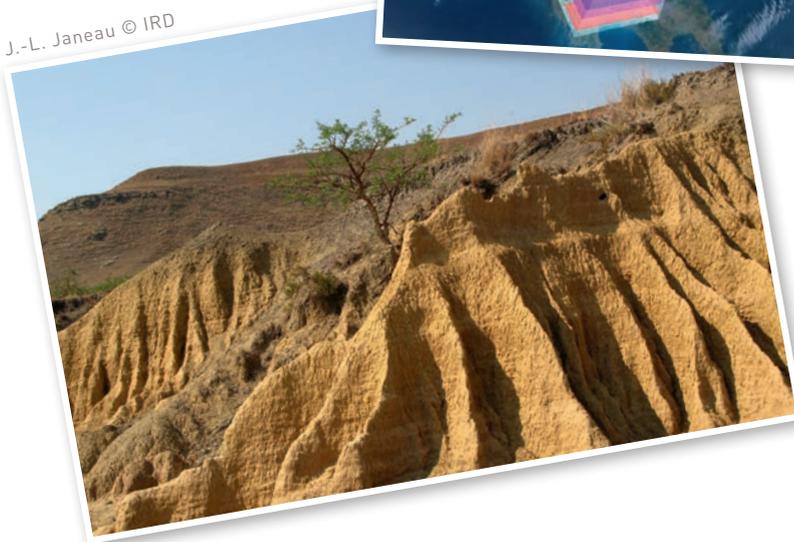
© ESA



© ESA



J.-L. Janeau © IRD



Sommaire

Les satellites et la surveillance de l'environnement	4
Les bases physiques de la télédétection	8
Désertification et utilisation des images satellitaires	16
Vers une démocratisation de l'utilisation des images satellitaires ?	36
Pour en savoir plus...	38
Lexique	44
Acronymes et abréviations	44

Les satellites et la surveillance de l'environnement

Depuis une quarantaine d'années, les satellites d'observation de la Terre ont progressivement augmenté nos capacités de surveillance de notre environnement. Les régions sèches n'ont pas échappé à cette tendance.

En 2016, une centaine de satellites sont en activité — ou sur le point de l'être — et fournissent une grande variété d'images de la Terre, tant de l'atmosphère que des continents et des océans. Cela se traduit par une grande diversité des technologies mises en œuvre ainsi que des possibles applications comme, par exemple, la météorologie ou l'urbanisme.

Ce dossier thématique présente quelques notions de base et des exemples d'utilisation des satellites d'observation de la Terre dans le contexte de la lutte contre la désertification ; il donne ainsi un premier aperçu des possibilités offertes par la télédétection. Son ambition est d'initier le lecteur qui pourra ensuite aller plus loin à travers, entre autres, la lecture de manuels et de sites dédiés mentionnés dans la section « Pour en savoir plus » (cf. p. 38).

DEUX TYPES DE SATELLITE POUR OBSERVER LA TERRE

Parmi tous les satellites qui scrutent actuellement notre planète, on peut distinguer, pour simplifier, deux types : (1) les satellites géostationnaires qui ont une

position fixe par rapport à la Terre — principalement les satellites météorologiques — et (2) les satellites à défilement qui tournent autour d'elle.

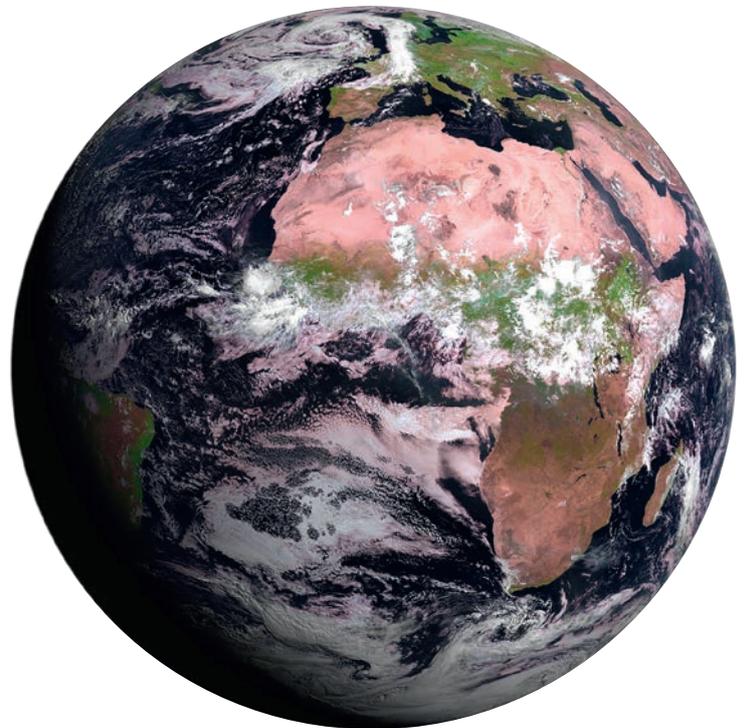
Les satellites géostationnaires sont en orbite à 36 000 km d'altitude et tournent à la même vitesse que la Terre, observant en entier le côté de la planète vu depuis leur position fixe (par exemple, ci-dessous, l'image complète de la Terre prise par le satellite Meteosat 8). Avec une image acquise tous les quarts d'heure, ces satellites suivent les mouvements des nuages tels qu'on les voit dans les bulletins météorologiques, mais aussi un grand nombre de paramètres nécessaires aux modèles de prévision météorologique (température de surface, teneur en vapeur d'eau, etc.). En contrepartie de cette haute fréquence d'acquisition, ils offrent une faible **résolution spatiale**², c'est-à-dire que le pixel — ou surface élémentaire observée par le capteur — a un côté compris typiquement entre 1 et 8 km.

→ ZOOM | La télédétection

C'est l'ensemble des appareils et des techniques produisant des images satellitaires ou aériennes permettant d'obtenir de l'information sur la surface terrestre — dont l'atmosphère et les océans — sans contact direct avec elle*.

Les satellites de télédétection collectent le rayonnement électromagnétique provenant de la surface de la Terre pour des surfaces élémentaires appelées « pixels » (*picture element* en anglais) dont l'assemblage ordonné selon une grille régulière forme des images. Ces mesures sont liées à la nature physique de la surface observée et renseignent sur les processus qui s'y déroulent. Les mesures d'un **capteur** étant faites pour plusieurs longueurs d'onde, les images fournies par les satellites comportent en général plusieurs canaux ou bandes spectrales.

* Définition adaptée de celle de la Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988.



▲ 4 août 2015. Première image acquise par le capteur SEVIRI. (*Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*) du satellite MSG-4 (Meteosat de Seconde Génération) de la série Meteosat. © Eumetsat, 2015

2. Les termes définis dans le lexique (page 44) apparaissent en bleu et sont soulignés dans le texte.

Les satellites à défilement sont les plus utilisés et permettent des observations plus détaillées notamment pour le suivi environnemental, avec des résolutions spatiales allant jusqu'à 50 cm, mais avec des fréquences d'acquisition moindres (« répétitivité » inférieure ou temps de « revisite » supérieur), comprises entre 1 jour et plusieurs semaines. Tournant autour de la Terre sur une orbite nettement plus basse, ils en suivent les détails le long de leur trace. Leurs **capteurs** prennent des images en continu le long de cette trace, sur une largeur appelée « fauchée ». Comme, bien sûr, la Terre poursuit sa rotation sur elle-même pendant ce temps-là, ils observent une trace voisine à chaque passage. Les traces s'enroulent ainsi autour de la Terre un peu comme un fil de laine sur une pelote, et au bout d'un certain nombre de rotations, le satellite a observé toute la surface de la Terre et repasse au-dessus de la même position.

La fréquence des acquisitions est liée à la durée qui sépare deux survols d'une même zone. Toutefois, certains satellites sont capables de « dépointer » (viser en oblique d'une trace vers sa voisine), ce qui permet localement d'augmenter la répétitivité. Il faut noter que les orbites d'une bonne partie des satellites à défilement sont choisies pour être synchronisées avec le cycle de l'éclairement par le soleil (ils sont dits « héliosynchrones »). Ils passent à la même heure solaire et observent ainsi la zone survolée dans des conditions similaires d'éclairement d'un passage à l'autre, ce qui facilite l'interprétation du signal.

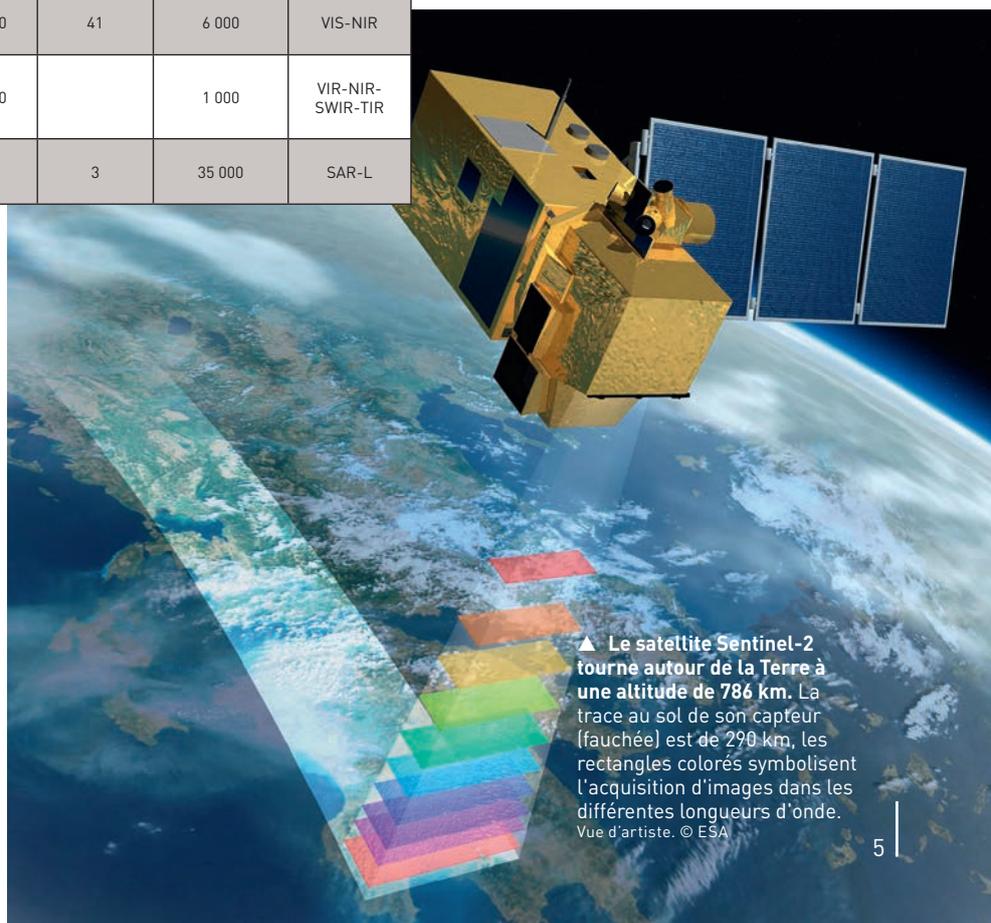
L'image ci-dessous représente un satellite à défilement de la dernière génération (Sentinel-2, *European Space Agency*, ESA) et illustre aussi les notions de trace, de sa largeur (fauchée) et d'altitude en orbite.

Le tableau ci-contre présente quelques ensembles de satellites et de capteurs récents cités dans ce dossier et leurs caractéristiques principales.

Satellite	Capteur	Pays**	Altitude (km)	Fauchée (km)	Revisite (jours)	Résolution spatiale maximale (m)	Domaine spectral***
SPOT-7 - Satellite Pour l'Observation de la Terre	NAOMI	France (EADS)	694	60	26	1,5	VIS-NIR
Landsat-8	OLI	USA (NASA)	705	185	16	30	VIR-NIR-SWIR
Envisat* <i>Environmental Satellite</i>	MERIS	Europe (ESA)	783	300	35	300	VIS-NIR
Sentinel-1	SAR-C	Europe (ESA)	693	400	12	5	Radar Band-C
Sentinel-2	MSI	Europe (ESA)	786	290	10 [5 à terme]	10	VIR-NIR-SWIR
Proba-V-Project for On-Board Autonomy	VGT-P	Europe (ESA)	820	2 250	1	100	VIR-NIR-SWIR
Terra	MODIS	USA (NASA)	705	2 330	2	250	VIR-NIR-SWIR
ADEOS* - <i>Advanced Earth Observing Satellite</i>	POLDER-1	Japon	787	2 400	41	6 000	VIS-NIR
NOAA-19 - <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>	AVHRR	USA (NASA)	870	2 000		1 000	VIR-NIR-SWIR-TIR
SMOS - <i>Soil Moisture and Ocean Salinity</i>	MIRAS	Europe (ESA)	758		3	35 000	SAR-L

◀ **Quelques exemples récents de satellites et de capteurs pour l'observation de la Terre**
 Ce tableau détaille les caractéristiques essentielles des capteurs cités dans ce dossier et les satellites (ou plateformes) sur lesquels ils sont embarqués. Un même satellite porte souvent plusieurs capteurs bien que cela n'apparaisse pas dans cette liste volontairement limitée. Les satellites participant à des programmes à long terme sont souvent groupés en séries du même type (comme par exemple la série SPOT1 à SPOT7 actuel). Il en est de même pour la série Landsat 1 à 8 (seul le dernier est cité dans ce tableau).
 Pour plus d'informations : <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>

* Satellites qui ne sont plus en opération.
 ** EADS : *Airbus Defence and Space*, France
 NASA : *National Aeronautics and Space Administration*, États-Unis d'Amérique
 ESA : *European Space Agency*
 *** VIS : Visible [0,4 à 0,7 microns]
 NIR : Proche infrarouge [0,7 à 1,6 microns]
 SWIR : Infrarouge de courte longueur d'onde [1,6 à 4 microns]
 TIR : Infrarouge thermique [4 à 15 microns]
 SAR-L : Radar à synthèse d'ouverture



▲ Le satellite Sentinel-2 tourne autour de la Terre à une altitude de 786 km. La trace au sol de son capteur (fauchée) est de 290 km, les rectangles colorés symbolisent l'acquisition d'images dans les différentes longueurs d'onde.
 Vue d'artiste. © ESA



▲ la région méditerranéenne vue de l'espace. Le contraste entre la rive nord assez verte, et la rive sud, aride, y est très visible.
Image PROBA-V/VEGETATION synthèse du mois de juin 2013. © ESA

La grande variabilité de la résolution spatiale des différents capteurs est liée au fait que les ensembles « capteurs/satellites » sont très variés selon l'utilisation qui en est en faite, les modèles globaux du climat planétaire ou la cartographie détaillée des infrastructures urbaines par exemple. On remarque, ces dernières années, l'arrivée d'images de résolution de plus en plus fine (inférieure à 1m) par des opérateurs privés (*GeoEye, Digitalglobe*) qui remplacent progressivement les photographies aériennes pour les besoins d'entreprises des secteurs tels que ceux des télécoms, des bâtiments et des travaux publics ou de la distribution (supermarchés, etc.).

À QUOI PEUT SERVIR LA TÉLÉDÉTECTION ?

En synergie avec les mesures au sol et les modèles scientifiquement validés, les technologies d'observation de la Terre depuis l'espace permettent l'étude, la modélisation et le suivi des phénomènes environnementaux et de la surveillance des ressources — notamment alimentaires — à des échelles spatiales et temporelles variables. Elles constituent une base d'information objective, exhaustive et permanente. Ces technologies permettent ainsi des suivis et des diagnostics de situation et elles ouvrent la voie à des systèmes d'alerte précoce.

Ces données sont également essentielles au développement et à la mise en œuvre des modèles de fonctionnement des surfaces terrestres qui permettent en particulier l'établissement de scénarios et de perspectives à diverses échéances (cf. zoom ci-contre). Elles permettent aussi de dresser le bilan d'actions entreprises en contribuant à l'évaluation de leurs résultats. Elles aident les politiques, les décideurs et les autres acteurs de la vie économique et sociale à prendre des mesures à court terme qu'exige une

situation donnée, mais aussi à définir des stratégies adéquates à moyen et long termes dans le cadre d'un développement durable. Elles leur permettent de bénéficier également de retours d'expériences. La compréhension des mécanismes de désertification, leur suivi, la définition de plans de lutte contre celle-ci et le bilan des actions entreprises font ainsi partie de ce type d'applications.

DE NOMBREUX PROGRAMMES D'OBSERVATION DE LA TERRE

Des programmes nationaux et internationaux d'observation de la Terre ont été mis en place dès les années 1960. Citons entre autres Landsat (1972), SPOT (depuis 1986) complété par Pléiades depuis 2011, et, parmi les grands programmes récents, RADARSAT (depuis 1995), Terra et Aqua (2007), SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*, 2009), Envisat (*Environmental Satellite*) puis la série Sentinel démarrée en 2014.

Il est important d'y inclure les satellites météorologiques qui participent à la veille météorologique mondiale (*World Weather Watch*) : du côté européen, Meteosat (1977) puis MSG (*Meteosat Second Generation* en 2002) et Metop (*Meteorological Operational* depuis 2006), et, du côté américain, GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite* depuis 1975), NOAA-AVHRR (*National Oceanic and Atmospheric Administration - Advanced Very High Resolution Radiometer* depuis 1978) entre autres.

→ ZOOM | Télédétection et modélisation

L'analyse et la représentation (sur des bases mathématiques et/ou physiques) des phénomènes se produisant dans l'environnement (tels que le cycle de l'eau, la croissance de la végétation, la machinerie climatique, etc.) permettent de concevoir des modèles plus ou moins complexes de ces phénomènes qui sont ensuite utilisés pour les prévisions des crues par exemple, ou du rendement des cultures, des conditions météorologiques à venir, etc.

Les données acquises par télédétection renseignent sur des variables aussi diverses que la hauteur des cours d'eau, le taux de développement du couvert végétal, la température de surface, etc. Ces informations acquises périodiquement permettent d'alimenter divers types de modèles simulant l'évolution d'un système ou d'une ressource et permettent ainsi d'en affiner les prévisions.

Le développement de programmes d'observation de la Terre se poursuit de nos jours à une cadence accélérée et coordonnée, ce qui reflète les priorités que les États, institutions ou organisations internationales, accordent à cette technologie et à ses évolutions, leur permettant ainsi l'observation toujours plus précise de phénomènes variés. Le programme Copernicus de l'Union européenne est emblématique de ce bond en avant avec la série de satellites Sentinel en cours de déploiement. La France joue également un rôle important dans ces progrès, le plus souvent à travers des coopérations multilatérales et, avant tout, par son implication dans l'Agence Spatiale Européenne (ESA en anglais). Le secteur privé s'y implique également de façon croissante. Par exemple, le programme SPOT, à l'origine une initiative publique française avec une contribution de la Suède et de la Belgique, a été pris en charge progressivement par le secteur privé jusqu'à SPOT 6, premier satellite entièrement privé.

Bien que les nouveaux satellites aient une résolution spatiale de plus en plus fine, ils forment une série cohérente avec les satellites plus anciens et permettent ainsi le suivi à long terme de phénomènes tels que la désertification. On observe ainsi depuis plusieurs années une tendance à l'augmentation des fréquences d'acquisition (par exemple Sentinel-2 offrira en 2017 une couverture tous les 5 jours en tout point du globe), une augmentation des résolutions spatiales, mais aussi, de plus en plus, la gratuité des données dont la vocation principale est le suivi de l'environnement. Restent actuellement payantes les données très hautes résolutions récentes uniquement.

Ces efforts nationaux ou de groupes de nations pourraient générer des redondances et des manques. Pour y remédier au mieux, les agences spatiales ont d'abord mis sur pied un forum — le Comité sur les satellites d'observation de la Terre (CEOS, 1984) —, puis un forum plus large — la Stratégie mondiale intégrée d'observation (IGOS) — avec d'autres agences fournissant des types différents de données. Enfin, sur le plan politique, le Sommet du Développement Durable du G8³ en 2002 a conduit à la constitution du Groupe pour l'observation de la Terre (GEO), un partenariat de gouvernements et d'institutions internationales pour construire un Système de Systèmes pour l'Observation Globale de la Terre (GEOSS).

En une cinquantaine d'années, les systèmes d'observation spatiaux ont permis d'acquérir des

archives d'images extrêmement volumineuses et à priori fort hétérogènes. Des efforts importants ont été menés au plan international (notamment dans le cadre du CEOS et de GEOSS) pour rendre ces archives interopérables à coût minimal et facilement accessibles aux utilisateurs. Par exemple, citons les applications « grand public » permettant de visualiser cartes et images satellitaires sur les téléphones portables, les GPS de véhicules, etc. Le domaine des applications scientifiques, institutionnelles et opérationnelles, plus ciblées, a bénéficié de semblables progrès permettant le traitement numérique des images (géoréférencement, correction radiométrique) pour les rendre plus facilement utilisables.

Si certains satellites ont des plans d'acquisition systématiques non modulables (chaque 16 jours pour Landsat par exemple), d'autres, par leur possibilité de visée oblique, permettent d'observer dans les meilleurs délais une ou plusieurs zones demandées par un utilisateur. De plus en plus de systèmes offrent cette « flexibilité » permettant de mieux servir la demande. Globalement, on assiste à une amélioration de la répétitivité des acquisitions qui permet de suivre des évolutions plus ou moins rapides comme, par exemple, les stades phénologiques (stades de développement) de la végétation naturelle et cultivée.

Par ailleurs, il est possible de coordonner l'utilisation simultanée de plusieurs satellites, par exemple dans le cadre de la « charte sur les risques majeurs » qui permet l'observation prioritaire des zones affectées par une catastrophe naturelle ou industrielle (séisme, inondation, etc.).

Les prochains chapitres de ce dossier présentent les différents paramètres observables par satellite ainsi que l'utilisation des images satellitaires aux diverses opérations liées à la lutte contre la désertification.

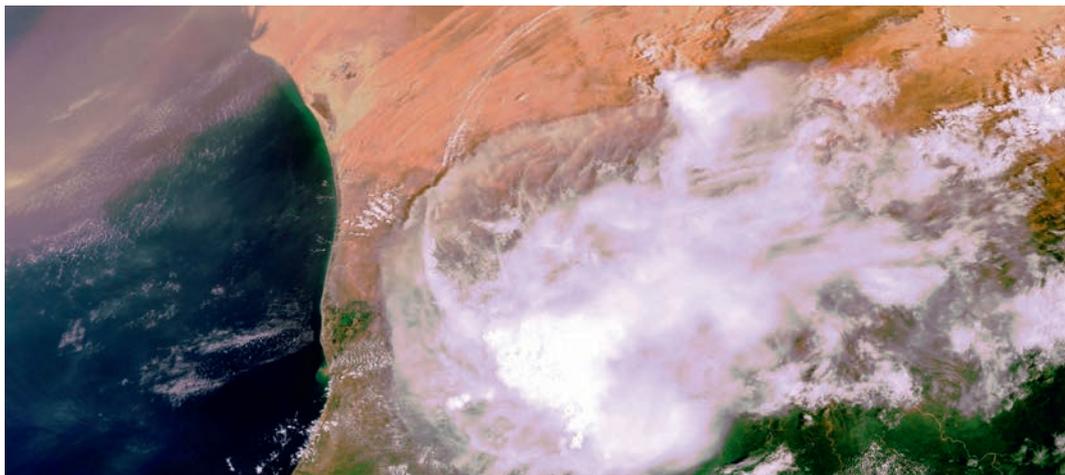


▲ Paysages arides du Cap-Vert.
Y. Boulvert © IRD

3. Les membres du G8 sont la France, les États-Unis, le Royaume-Uni, la Russie, l'Allemagne, le Japon, l'Italie et le Canada.

Les bases physiques de la télédétection

Les notions de base résumées dans ce chapitre permettent au lecteur d'aborder les utilisations de la télédétection en ayant les connaissances indispensables pour en appréhender les possibilités mais aussi les limitations.



▲ Extrait d'une image du satellite européen Envisat au-dessus de la Mauritanie, acquise le 16 septembre 2010. Les différences de couleurs du sol selon les régions sont très visibles avec le capteur MERIS. On perçoit un vent de sable au-dessus de l'océan. © Agence Spatiale Européenne (ESA)

Ce chapitre donne un aperçu des notions physiques nécessaires pour comprendre la télédétection et ses utilisations. De nombreux ouvrages de référence en français et en anglais permettent d'en savoir plus sur ces techniques (cf. p. 38).

ÉCHANTILLONNAGE, SIGNATURE SPECTRALE, REVISITE

Le spectre électromagnétique et les sources de rayonnement

Le spectre électromagnétique observé par les instruments embarqués, porteur de l'information que la télédétection cherche à analyser, se répartit en différents domaines allant des courtes aux grandes longueurs d'onde (notées λ). La télédétection n'utilise que certains de ces domaines tant pour des raisons physiques que technologiques comme par exemple la transparence ou l'[absorption](#) de l'atmosphère et des nuages dont on tente de minimiser et/ou de corriger les effets perturbateurs en choisissant des domaines de longueur d'onde adéquats.

Ces domaines sont principalement ceux du visible (0,4 à 0,7 μm), du proche (0,7 à 1,6 μm) et moyen infrarouge (1,6 à 4 μm), de l'infrarouge thermique (4 à 15 μm), rayonnement caractérisant la chaleur émise par le « système Terre » (c'est-à-dire l'ensemble constitué par la Terre et l'atmosphère). Cet ensemble de domaines est qualifié parfois « d'optique » en raison de la technologie des instruments d'observation. Vient ensuite le large domaine des micro-ondes — ou rayonnement « radar » — qui occupe une bande de longueurs d'onde du millimètre au décimètre.

Il existe deux types principaux de systèmes de télédétection :

- **Les systèmes passifs** mesurent le rayonnement émis par le système Terre tout d'abord dans le domaine du visible et de l'infrarouge, puis, la technologie évoluant, dans le domaine des micro-ondes.
- **Les systèmes actifs** émettent leurs propres sources de rayonnement — essentiellement dans le domaine des micro-ondes et des lidars (télédétection par laser) — et mesurent le rayonnement renvoyé par la [cible](#) à analyser.

Ainsi, le rayonnement électromagnétique mesuré par les capteurs embarqués à bord des satellites peut donc :

- **soit résulter de la [diffusion](#) du rayonnement incident**, dont la source peut être naturelle comme le soleil (domaine du visible et du proche infrarouge) ou satellitaire (domaine des micro-ondes actives) ;
- **soit être directement émis par la Terre du fait de sa température**, principalement dans le domaine de l'infrarouge thermique (lié à la température du sol avec une émission thermique maximale de la Terre) et dans le domaine des micro-ondes passives qui traduit également la température du sol modulé par plusieurs phénomènes physiques importants (par exemple l'humidité du sol pour le satellite SMOS, cf. p. 20).

Dans la quasi-totalité des cas, plusieurs phénomènes — état du sol, activité de la végétation, couleur de l'eau, atmosphère — interviennent dans le signal reçu. Il est donc nécessaire de disposer de plusieurs mesures pour extraire au mieux l'information que l'on cherche à obtenir. Ceci suppose en général de choisir des domaines de longueur d'onde où l'influence du phénomène que l'on cherche à observer est prépondérante sur celle des autres.

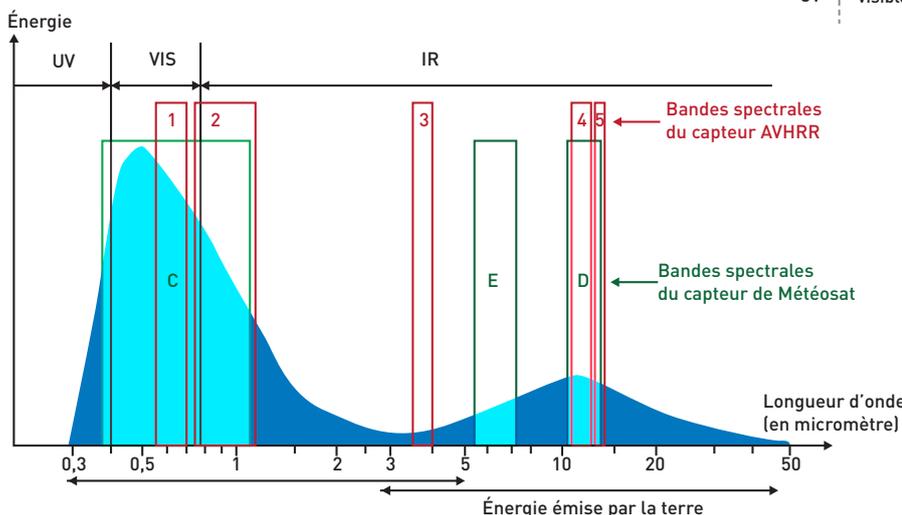
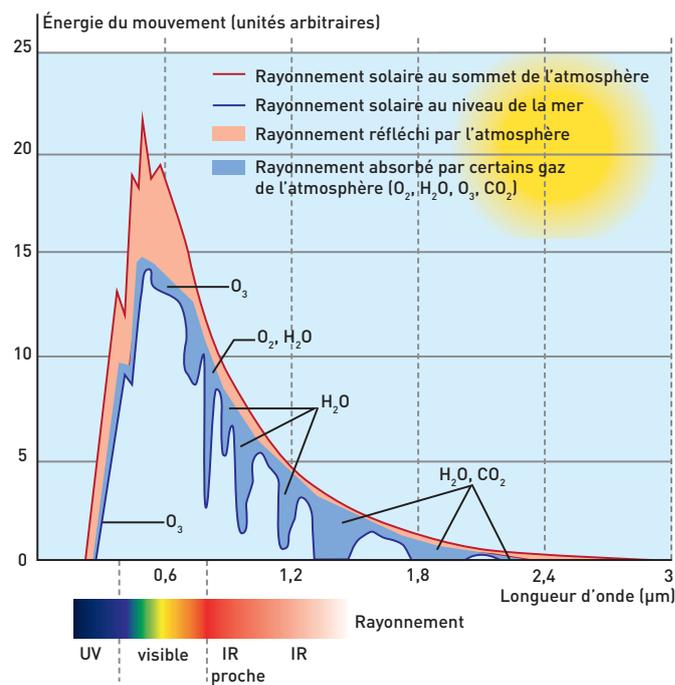
L'observation dans les domaines de l'infrarouge thermique et des micro-ondes (actives ou passives) peut se faire de nuit comme de jour. L'atmosphère et les nuages jouent très peu sur le spectre électromagnétique dans le domaine des micro-ondes. L'observation « radar » permet donc l'observation de nuit comme de jour, sur des zones dégagées ou nuageuses.

D'une manière générale, les ondes électromagnétiques interagissent fortement avec les objets lorsque leur taille est de l'ordre de grandeur de leur longueur d'onde. En particulier, dans le domaine des micro-ondes actives (dont l'ordre de grandeur de longueur d'onde varie du millimètre au décimètre), on conçoit que la végétation et la rugosité du sol contribuent de manière significative au signal rétrodiffusé, et ceci en fonction de leurs caractéristiques et des longueurs d'onde utilisées. Quelques cas particuliers importants pour l'étude de la désertification sont évoqués dans le prochain chapitre.

Échantillonnage, résolution et corrections

Le signal n'est pas mesuré par le capteur de manière continue (comme par exemple sur un support photographique), mais pour des surfaces élémentaires dénommés « pixels ». Les images brutes issues des capteurs ne sont pas dans une projection cartographique standard, compte tenu de la géométrie de prise de vue du satellite. Des outils existent dans les logiciels de traitement d'images pour ramener celles-ci dans des projections classiques. Cependant cette tâche est de moins en moins nécessaire pour l'utilisateur car les images sont fournies dans des projections standards (« géoréférencées »), voire corrigées des déformations dues au relief (« orthorectifiées »).

À ces corrections géométriques s'ajoute le besoin de corrections radiométriques permettant de s'affranchir au mieux des inévitables imperfections de l'instrument d'observation — imperfections dues notamment à l'atmosphère, mais également aux angles d'observation, aux effets optiques à l'intérieur de l'instrument, à la physique de la détection, etc. Le traitement a pour but de passer du rayonnement mesuré au niveau du satellite à sa valeur émise au niveau de la surface, en faisant abstraction des effets atmosphériques. Ces corrections ont longtemps été un problème pour l'utilisateur du fait de la faible disponibilité des données atmosphériques nécessaires pour les réaliser, mais la situation est en train de changer puisque ces corrections sont de plus en plus réalisées par les fournisseurs d'images. Dans la plupart des cas, on n'utilise pas directement la quantité de rayonnement envoyée par la surface, mais une valeur normalisée qui est le rapport entre cette valeur et l'énergie reçue par la surface. Cette valeur appelée « réflectance » varie ainsi de 0 à 1 pour des objets respectivement très absorbants et très réfléchissants.



▲ Rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère et au niveau de la mer.

© Université Virtuelle Environnement et Développement durable (UVED)

◀ Émission électromagnétique de la Terre.

En bleu : spectre du rayonnement émis par la Terre et spectre du rayonnement solaire réfléchi. La figure précise également les cinq domaines spectraux explorés par le capteur AVHRR des satellites NOAA ainsi que les domaines spectraux explorés par le capteur des satellites Météosat 1 à 7 (bandes C, D, E). © Ministère de l'Éducation nationale - Direction générale de l'Enseignement scolaire. Pour plus d'informations : <http://eduscol.education.fr/orbito/pedago/tempe/tempe3.htm>

La notion de « signature spectrale »

Les instruments optiques mesurent le rayonnement dans plusieurs domaines de longueur d'onde, plusieurs valeurs sont ainsi fournies pour chaque pixel et constituent la « [signature spectrale](#) » d'un objet à un instant donné. Les données d'une image sont ainsi constituées de plusieurs « canaux » ou « bandes spectrales » correspondant chacune à une mesure dans une longueur d'onde. Cette notion peut être étendue aux systèmes micro-ondes actifs et passifs, grâce auxquels on peut collecter le rayonnement électromagnétique émis ou rétrodiffusé dans plusieurs longueurs d'onde, mais également en fonction de la polarisation du signal.

Le plus souvent, comme l'information recherchée (par exemple le taux de couverture végétale) ne peut être obtenue à partir d'un seul canal, son extraction nécessite un traitement portant sur les différents canaux de la signature spectrale de chaque pixel, voire l'introduction de données exogènes (mesurées ou connues indépendamment du système d'observation).

Temps nécessaire pour une couverture complète

Comme déjà explicité, la [fauchée](#) est la largeur de la bande de terrain au sol observée à un moment donné par un instrument embarqué, lequel enregistre en fait des bandes au sol s'enroulant autour de la Terre et finissant par la couvrir entièrement au bout d'un temps appelé « la répétitivité » (ou « temps de revisite »). On peut donc la définir comme la période théorique d'observation d'un point donné au sol (nous écrivons « théorique » car, d'une part, certains dispositifs de visée latérale permettent de l'accroître pour certains points, en défavorisant d'autres, et, d'autre part, dans le domaine optique, la nébulosité peut occulter le point à observer). Le temps de revisite est un élément important des bases physiques de la télédétection.

▼ **Vent de poussières au-dessus de la mer Rouge.**
© NASA image courtesy Jacques Descloitres, MODIS Rapid Response Team, Goddard Space Flight Center.

DIFFÉRENTS TYPES D'IMAGES

Il existe plusieurs grandes catégories d'images selon la technologie des instruments de mesure.

Les images optiques

Les images optiques font appel aux technologies dites « passives », dans lesquelles on collecte le signal naturellement réfléchi ou émis par la cible. Les progrès très rapides de la technologie ces dernières années ont permis des gains de résolution très importants dans le domaine optique notamment aux courtes longueurs d'onde (domaine du visible et du proche infrarouge, typiquement 0,4-1,1 µm).

Les images à très haute résolution (inférieure au mètre) permettent d'observer des détails relatifs aux milieux fortement anthropisés et aux infrastructures. Elles fournissent également des informations concernant la structure spatiale de la végétation (comme, par exemple, la répartition de la strate arborée) qui sont importantes dans l'étude des processus de désertification. Néanmoins, ces images sont généralement onéreuses et couvrent de faibles surfaces. Dans le domaine de la lutte contre la désertification, elles sont surtout utilisées pour obtenir des informations très locales pour « zoomer » sur une zone d'intérêt et ensuite généraliser ces informations convenablement.

Les images à haute résolution (typiquement de 10 à 30 mètres) permettent généralement une compréhension locale des paysages et une identification générale des phénomènes qui les affectent. On distingue sur ces images les parcelles agricoles à partir d'un hectare environ. L'information apportée est composite, en particulier en milieu semi-aride : elle comporte principalement une contribution du sol souvent prépondérante sur le signal d'une végétation clairsemée et/ou peu active.

Les images à moyenne (de 50 à 250 m) et basse résolution (à partir de 500 m) ont l'avantage de disposer d'une très large fauchée et d'une répétitivité de l'ordre de la journée. Même compte tenu de la couverture nuageuse, elles permettent généralement d'avoir une vision de l'évolution de la végétation de semaine en semaine. On peut ainsi constituer des séries temporelles qui sont des sources d'informations très intéressantes pour suivre l'évolution des milieux (*cf.* l'exemple du Sahel p. 25).

Les images dans l'infrarouge thermique, généralement de résolution plus faible que les images de plus courtes longueurs d'onde, véhiculent une information caractéristique de la température de surface des objets observés, modulée par un paramètre qui leur est propre, l'émissivité. Cette information de température dépend des échanges d'énergie entre la surface et son environnement, lesquels sont liés à des phénomènes importants tels que l'évapotranspiration et le niveau de stress de la végétation.

Les images micro-ondes

Les images micro-ondes actives peuvent atteindre une haute résolution grâce à une technique appelée « radar à synthèse d'ouverture » (RSO, l'abréviation anglo-saxon SAR étant davantage utilisé). Les objets qui interfèrent le plus avec l'onde incidente sont ceux dont la taille est de l'ordre de la longueur d'onde, ce qui peut avoir un intérêt dans l'étude de la rugosité des sols et de la végétation en zones semi-arides. De plus, les objets métalliques ainsi que les surfaces d'eau libre réfléchissent l'onde incidente ; les sols humides ont tendance à l'absorber. Comme pour les images optiques, mais de manière moins intuitive, la réponse d'un pixel contient donc des informations liées à de nombreux paramètres de la surface. À titre d'exemple, des longueurs d'onde très différentes de la taille de grains de sable permettent, dans certaines conditions, d'obtenir des images de structures cachées par le sable : réseaux hydrologiques fossiles, sites archéologiques enfouis, etc. (*cf.* p. 21)

La résolution des images en micro-ondes passives est typiquement de l'ordre de la dizaine de kilomètres. Elles ne permettent d'appréhender que des phénomènes d'échelle sous-régionale. Elles apportent cependant des types d'information difficilement accessibles à une précision convenable par d'autres systèmes. Ainsi, malgré sa faible résolution (une fréquence de revisite de trois jours et échantillonnage spatial meilleur que 50 km), le système SMOS conçu par le Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO) apporte de précieuses informations sur l'humidité de surface des sols (*cf.* p. 20).

Il peut être intéressant de développer des systèmes mixtes, comprenant les deux types de capteurs, ou deux capteurs de même type possédant des caractéristiques différentes. Ainsi, la France et l'Italie ont conjointement développé le système d'observation spatiale à haute résolution Orfeo (*Optical and Radar Federated Earth Observation*), dont Pléiades (France) est la composante optique, et Cosmo-Skymed (Italie) la composante radar. Enfin, l'Europe (ESA/UE) développe la série des satellites Sentinel déjà citée, dans le cadre du programme Copernicus qui contient divers types de systèmes d'information.

Les fournisseurs de données et de produits tendent à s'affranchir des contraintes liées à la fauchée en fournissant aux utilisateurs la surface au sol dont ils ont besoin, en « mosaïquant » plusieurs (types d')images. Le service « clefs en main » est généralement fort commode pour la plupart des applications, mais le scientifique ne doit alors pas oublier que dans ce cas, tous les points de l'image fournie ne sont pas exactement observés aux mêmes dates et dans les mêmes conditions d'angle d'observation, d'état de l'atmosphère, etc., et doit donc s'abstenir d'utiliser des méthodes faisant explicitement ou implicitement l'hypothèse d'uniformité de ces conditions.

ACCÈS AUX DONNÉES

Le paysage de l'accès aux données, aux produits et aux services d'observation de la Terre est en mutation rapide et profonde, comme l'ont montré dès la première décennie du 21^e siècle les produits grand public de type « *Google Earth* ». Ces produits et services « grand public » ne sont généralement pas, sauf cas particulier, ceux dont ont besoin les scientifiques, ingénieurs, décideurs, dont ceux qui sont engagés dans la lutte contre la désertification. La plateforme « *Google Earth Engine* » est conçue pour répondre à leurs besoins (cf. p. 40). À côté de cette offre grand public, on observe actuellement un accroissement rapide de l'offre d'images satellitaires, classique, multi-longueur d'onde et multi-résolution, offrant une richesse d'informations exploitables par les scientifiques. Ces images sont de plus en plus souvent gratuites, comme c'est le cas par exemple des images Sentinel.

Certains systèmes publics de distribution fournissent leurs données et produits numériques gratuitement. D'autres, dont le financement fait intervenir des investissements privés, les commercialisent (cf. p. 40). Le cas du système — principalement français — SPOT est original : les produits sont commerciaux, mais l'archive antérieure à une certaine date est fournie gratuitement si elle ne sert pas à des applications commerciales.

Le jeu des intérêts nationaux et/ou régionaux, l'évolution rapide des compétences en matière de technologie spatiale, les progrès technologiques ainsi que la baisse des coûts industriels, font que de plus en plus de pays se sont dotés, se dotent et se doteront, de satellites nationaux ou régionaux. Ils sont généralement achetés en tout ou partie aux grandes compagnies des pays industrialisés (avec une implication croissante d'équipes nationales et/ou des opérations de transfert de technologie) ou résultant d'accords Nord/Sud ou Sud/Sud entre États. Par exemple, en ce qui concerne

l'Afrique, une coopération continentale s'est établie entre l'Algérie, le Nigeria et la République d'Afrique du Sud, concrétisée pour la première fois par le lancement du satellite AlSat-1 en 2002, sous la responsabilité de l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL).

La disponibilité des données de ces satellites peut être réservée ou ouverte, avec, en pratique, une plus ou moins grande facilité d'accès. Parfois, ces nouveaux « États spatiaux » s'allient aux grands distributeurs occidentaux pour la distribution de leurs données comme, par exemple, celles du satellite FORMOSAT qui sont disponibles auprès d'*Airbus Defence & Space* (ex-SPOT Image).

Il est fort probable que la politique de diffusion massive et gratuite de données du programme européen (ESA/UE) Copernicus soit appelée à apporter des changements majeurs en matière de types de produits disponibles opérationnellement en ce domaine.

Par ailleurs, le Centre national d'études spatiales (CNES) et la communauté scientifique française ont mis au point le projet des « pôles thématiques » scientifiques, parmi lesquels Theia est consacré aux surfaces continentales. Ce pôle thématique Theia fournit un large éventail d'images, de méthodes et de services de qualité certifiée, aux communautés scientifiques et acteurs des politiques publiques. L'étude des pressions anthropiques et climatiques sur les écosystèmes et les territoires est un axe important de ce pôle.

Ces dispositions nationales sont bénéfiques aux études sur la désertification, qui nécessitent l'accès à des données autant locales que concernant de vastes territoires, et ceci sur de longues séries temporelles (l'archive SPOT permet par exemple de disposer de données depuis 1986) (cf. *Spot World Heritage* p. 40).

INDICATEURS ET VARIABLES « DÉRIVÉES »

La désertification est le résultat d'interactions complexes entre l'homme et son environnement. À ce titre, sa détection, la compréhension des mécanismes, la définition de politiques de lutte à court et moyen termes, la prédiction de l'évolution des phénomènes qui y sont liés et l'analyse du retour d'expériences font généralement appel à un ensemble d'indicateurs spécifiques. La définition de tels indicateurs est un travail de longue haleine, dans lequel responsables technologiques, scientifiques et décideurs doivent collaborer étroitement. Ainsi, pour ce qui est de la désertification, les agences des Nations Unies concernées, réunies autour de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULD), ont récemment retenu comme indicateurs les plus représentatifs et pertinents au niveau national : le pourcentage des terres dégradées par rapport à l'ensemble des terres, le taux de couverture végétale et la teneur en carbone organique des sols.

La télédétection est une source majeure d'informations permettant de calculer des indicateurs relatifs à l'état de l'environnement, en donnant accès à des informations de nature physique comme l'albédo, les indices de végétation, la rugosité des surfaces, la température de surface ou l'humidité des sols.

→ ZOOM | Télédétection et géomatique

La **géomatique** regroupe l'ensemble des outils et méthodes permettant d'acquérir, de représenter, d'analyser et d'intégrer des données géographiques. Parmi ces outils, les systèmes d'information géographique (SIG) sont utilisés dans un nombre croissant de domaines : aménagement du territoire, gestion des infrastructures et réseaux, transport et logistique, assurance, télécommunications, ingénierie, réseaux sociaux, etc.

Les **images de télédétection** sont une source de plus en plus importante des données géographiques utilisées en géomatique. Si elles sont manipulables directement dans les SIG, elles sont en général exploitées via des logiciels spécifiques dit de « traitement d'images » qui comportent toutes les fonctionnalités de visualisation et d'analyse nécessaires (corrections géométriques et radiométriques, création d'indices, classification de l'occupation du sol, etc.).



▲ Sur cette image issue de capteurs optiques, le Salar d'Uyuni en Bolivie se distingue nettement comme une zone blanche due à son albédo bien plus élevé que le paysage qui l'entoure. © Google Maps, 2016

Albédo

L'albédo est le rapport de la quantité de lumière réfléchiée par un objet sur la quantité totale de lumière qu'il reçoit. Il est exprimé par un nombre compris entre 0 (aucune lumière réfléchiée) et 1 (toute la lumière est réfléchiée). L'albédo est un facteur majeur des équilibres énergétiques et du bilan radiatif dans la mesure où il contrôle la quantité d'énergie solaire absorbée par une surface. L'albédo d'une zone géographique donnée peut varier durant l'année pour une même aire géographique par suite de divers phénomènes physiques tels que l'humidité du sol, les divers stades phénologiques de la végétation, les dépôts éoliens (voire par suite d'effets indésirables tels que la présence de nuages pour des images à faible résolution).

L'interprétation de cette valeur et de ses variations temporelles et spatiales est liée aux processus de désertification. En effet, l'albédo d'un sol nu décroît lorsque sa teneur en eau croît ou lorsque sa rugosité augmente. 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 été menés sur les relations entre albédo et désertification notamment du point de vue climatique, sans que des conclusions définitives puissent en être tirées car cette relation est indirecte.

▼ **Paysage aride, Namibie.** Le désert du Namib est un désert côtier situé dans le sud-ouest de la Namibie. Il est considéré comme le plus vieux désert du monde. J.-Y. Meunier © IRD

Indice de végétation

Si l'albédo intègre la totalité du spectre du rayonnement solaire, l'étude de la réflexion de ce rayonnement selon différentes bandes spectrales permet de caractériser certains types d'objets et leur état. Ainsi, la végétation verte, par son activité chlorophyllienne, présente une **réflectance** faible dans le domaine des longueurs d'onde du domaine spectral rouge (entre 600 et 700 nm, notée R) et une réflectance forte dans les longueurs d'onde du domaine proche infrarouge (entre 0,8 et 1,1 µm, notée IR) due à la structure des tissus végétaux verts (parenchymes lacuneux).

Lorsque l'activité chlorophyllienne décroît, R croît tandis que l'IR décroît. Les courbes présentées page suivante montrent que la réflectance croît (toutes choses égales par ailleurs) lorsque l'activité chlorophyllienne est plus intense. Cette propriété remarquable des végétaux verts a permis de développer plusieurs « indices de végétation » utilisant ces bandes, le plus couramment utilisé étant l'indice de végétation normalisé (*normalized difference vegetation index*, NDVI).

$$\text{NDVI} = (\text{IR}-\text{R})/(\text{IR}+\text{R})$$

En milieu aride, l'utilisation de cet indice est néanmoins délicate. En effet, les écosystèmes y sont caractérisés par une végétation peu couvrante et généralement peu active. L'essentiel du signal provient donc du sol. L'impact de l'état de la végétation sur l'indice de végétation reste faible et peut être perturbé par des variations de toute autre nature liées au sol.

▼ **Érosion des sols en Afrique du Sud.** Forme d'érosion en ravine au sein de pâturage envahie par *Acacia iberiasna*, bassin versant de Potshini, région de Bergville. J.-L. Janeau © IRD

L'interprétation est notamment délicate lorsque l'on étudie de vastes régions sur de longs intervalles de temps, bien souvent en utilisant plusieurs satellites, car la mise en cohérence de ces longues séries n'est jamais parfaite. Un exemple typique est le débat sur le « reverdissement du Sahel » (cf. p. 26).

Rugosité des surfaces

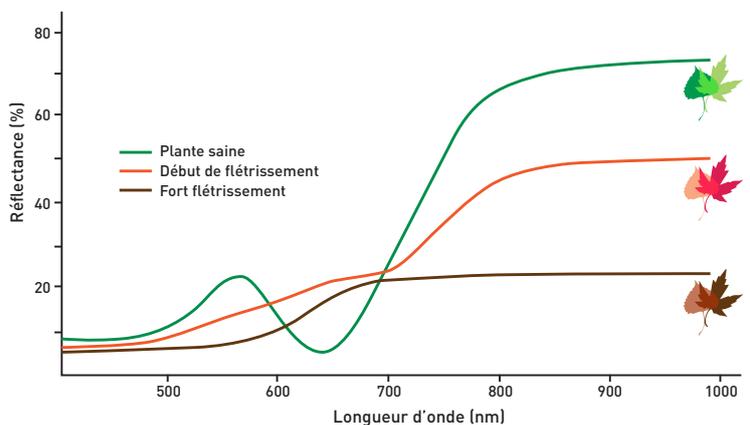
La rugosité est un paramètre permettant de quantifier l'irrégularité d'une surface, qui peut être due à la surface du sol lui-même ou à la végétation présente. Plus une surface est irrégulière, plus elle est dite rugueuse. Naturellement, cela suppose que l'on ait défini un ordre de grandeur de la dimension des irrégularités rendant un objet « rugueux ». Par exemple, une surface de sable bien régulière est lisse à l'échelle centimétrique mais peut être rugueuse à l'échelle du dixième de millimètre.

Si la rugosité influence la réflectance dans le visible, l'estimation de cette rugosité se fait généralement 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 rétrodiffusion est forte. L'effet est d'autant plus important que la taille des irrégularités évoquée ci-dessus est de l'ordre de grandeur de la longueur d'ondes des micro-ondes émises par le radar. La rugosité est un paramètre important dans le calcul de la sensibilité à l'érosion éolienne et hydrique ainsi que dans l'écoulement des eaux de surface.



Température de surface

La température de la surface résulte des échanges d'énergie se produisant au niveau de la surface terrestre. Elle est estimée par la mesure du rayonnement infrarouge thermique. Sa valeur dépend plus ou moins directement de nombreux facteurs, les principaux étant l'albédo qui gouverne l'énergie absorbée, ainsi que l'humidité de la surface du sol, la quantité de végétation active présente et son niveau de stress hydrique qui gouvernent l'évapotranspiration. À l'image de ces échanges énergétiques, la température d'une surface varie en fonction de l'heure d'observation. Grâce aux satellites géostationnaires (de type météorologique), il est possible de suivre l'évolution de la température de surface sur de grandes zones mais avec des résolutions faibles. Seul Landsat permet actuellement des observations à plus haute résolution (60 m).



▲ Évolution de la réponse spectrale de la végétation en fonction de son état physiologique. D'après e-cours Université Paris 1.

Humidité du sol

L'humidité de surface du sol peut être estimée par radar (satellites ERS, Envisat, Sentinel-1), à condition de pouvoir isoler l'influence de la rugosité, ou, plus récemment, par télédétection passive dans le domaine des micro-ondes mais à des résolutions très faibles (satellite SMOS de l'ESA, conçu au CESBIO, cf. p. 20). L'humidité du sol conditionne les échanges énergétiques avec l'atmosphère notamment par son rôle dans l'évapotranspiration. Son évaluation et son suivi temporel sont donc importants en hydrologie et en agronomie, notamment dans les écosystèmes des régions arides et semi-arides où ce paramètre est généralement faible et constitue un élément d'alerte pour la désertification.

→ ZOOM | Les observations de terrain

Pour pouvoir établir le lien entre les données contenues dans les images des satellites et la réalité au sol, il est indispensable de collecter des informations adaptées à la thématique étudiée et parfaitement géoréférencées en utilisant un GPS. Par exemple, l'établissement d'une carte d'occupation des terres obtenue par traitement d'images se fait en utilisant un ensemble de points au sol pour lesquels on établit visuellement sur le terrain à quelle classe ils appartiennent (forêt, terre agricole, prairie permanente, urbain, etc.) et qui va servir à mettre au point le traitement. La qualité de la carte obtenue sera vérifiée en comparant les classes attribuées à chacun d'un autre ensemble de points (on utilise notamment le pourcentage de points bien classés). Ces points auront été visités au sol au cours de la même campagne d'observations de terrain. Celles-ci sont donc indispensables à la validation des produits obtenus par télédétection (cartes, mesures, statistiques, etc.).

Pour certaines applications, on cherche à obtenir des mesures précises de paramètres tels que, par exemple, l'indice foliaire ou l'état de sénescence du couvert végétal. Les mesures de réflectance obtenues par des instruments tels que les spectromètres ou spectroradiomètres de terrain, vont alors servir à l'étalonnage de la relation entre la mesure par satellite et les paramètres au sol. Ce dernier type d'appareil détermine la courbe de réflectance de la cible visée, dans une gamme de longueurs d'onde variable selon les modèles. Les courbes présentées dans la figure ci-contre couvrent le domaine visible à proche infrarouge.



▲ Exemple d'un spectroradiomètre portable récent (SVC HR-768si) mesurant la réflectance dans la gamme visible à moyen infrarouge.

Avec la permission de Spectra Vista Corporation (SVC), Poughkeepsie, New York.

Désertification et utilisation des images satellitaires

Il existe toute une gamme d'informations fournies par les satellites pouvant être utilisées lorsque l'on cherche à diagnostiquer les effets de la désertification, à mesurer son évolution dans le temps — extension, stabilisation, régression — et même à la prévoir.

Certaines de ces informations sont globales et couvrent la planète entière alors que d'autres permettent de « zoomer » jusqu'au niveau du champ d'un agriculteur. Qu'il s'agisse de densités de la végétation verte, de températures ou d'humidités, ces informations sont organisées selon une grille géographique, formant des images. C'est le cas des exemples d'utilisation de données de télédétection présentés dans ce chapitre.

LA MÉTÉOROLOGIE ET LE SUIVI D'ÉVÈNEMENTS CLIMATIQUES

Les images satellitaires les plus utilisées dans le monde sont celles qui informent sur la répartition des nuages, des vents, de l'humidité et de la température de la surface terrestre (cf. carte page suivante). Utilisées en météorologie, elles servent à alimenter en informations les modèles de prévision à court terme (bulletins de prévision météorologique), mais aussi à moyen terme (bulletins d'alerte) ainsi que les modèles d'étude du climat et de ses changements sur le long terme⁴.

C'est bien sûr aussi le cas dans les régions sèches et ces images « météo » sont très utiles pour suivre les

précipitations et pour surveiller les sécheresses et leurs extensions. Ainsi l'étude du phénomène de la mousson africaine, responsable du régime des pluies en Afrique de l'Ouest, a récemment mobilisé la communauté scientifique internationale en faisant une large part aux données de télédétection⁵. Dans ces régions, des systèmes d'alerte précoce sur la sécheresse par surveillance satellitaire de la production végétale sont déjà en place (cf. p. 24).

SURVEILLER ET COMPRENDRE LES PHÉNOMÈNES ÉOLIENS TYPIQUES DES RÉGIONS SÈCHES

Dans les régions sèches, de grandes superficies sont recouvertes de sable, c'est même une de leurs caractéristiques les plus frappantes. Depuis leur apparition, les images de satellites ont permis d'y observer les formations sableuses, les ergs et les grands champs de dunes, les barkhanes ou les nebkas plus modestes, faciles à identifier grâce à leur albédo généralement élevé (cf. p. 13). Les formes typiques que prennent ces édifices sableux et leurs orientations par rapport aux vents dominants sont bien visibles depuis l'espace (cf. photo ci-dessous), ce qui a permis d'affiner

▼ Dunes en étoile au cœur du Grand Erg, région d'Ouargla, Algérie.
© Google maps/2015

→ ZOOM | Estimer la pluie : par satellite, mais pas seulement...

Une des applications essentielles pour le suivi hydrologique et écologique est l'estimation des précipitations par satellite. Il existe différentes méthodes qui conduisent à des cartes généralement produites à une échelle assez globale*. Ces cartes sont insuffisamment fiables et détaillées pour certaines applications telles que l'évaluation des risques de crues. Une innovation récente, basée sur la perturbation par les pluies des ondes émises par les réseaux de téléphonie sans fil, s'est révélée très précieuse pour améliorer le suivi et la spatialisation des pluies comme cela a été expérimenté au Burkina Faso (Doumounia et al., 2014).

* Comme celles de Météo France par exemple : www.meteo-spatiale.fr/src/multi-sensor_precipitation_estimate.php

4. Les techniques spatiales pour la météorologie sont nombreuses et très développées. Elles font l'objet d'ouvrages complets et sortent du cadre des utilisations plus spécifiquement dédiées aux régions sèches fixé dans ce dossier.
5. Voir en particulier le programme AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) : www.amma-international.org

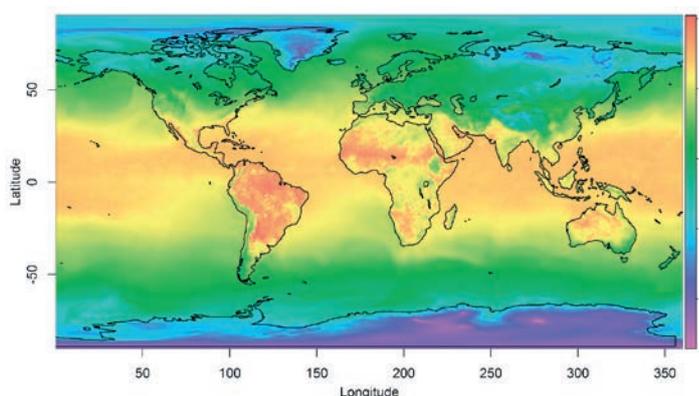
la cartographie de ces formations éoliennes et même leur déplacement, qui s'est révélé généralement faible (deux à trois mètres par an, au maximum).

Ainsi, les dunes des grands ergs sahariens sont au même emplacement depuis plusieurs milliers d'années et ne sont pas en train de se déplacer à grande distance pour envahir le Sahel, contrairement à certaines croyances confondant désertification et « avancée du désert » (Dia *et al.*, 2010 ; Escadafal *et al.*, 2011).

Soumis à l'action du vent, les sables et poussières sont entraînés dans l'air et vers l'atmosphère, formant des vents ou des tempêtes de sable. Ce sont des manifestations de l'érosion éolienne typique de ces régions (Mainguet & Dumay, 2006). Leur déclenchement, évolution et ampleur sont difficiles à appréhender et à suivre depuis le sol. Les poussières et aérosols (sahariens notamment) sont étudiés par les scientifiques depuis les années 1950 car leur impact est important non seulement sur l'environnement (par exemple sur les cultures) mais aussi sur la santé humaine (atteintes respiratoires et affections oculaires par exemple), sur la navigation aérienne et, plus généralement, le climat. Les efforts pour mieux

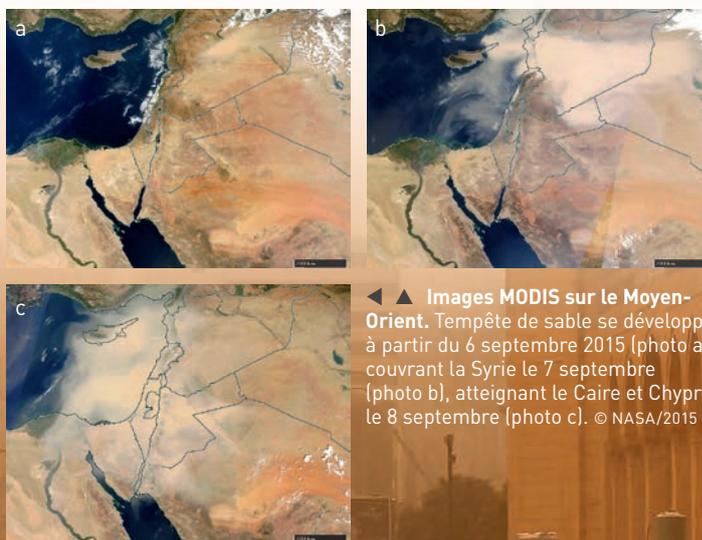
comprendre d'où ces poussières et aérosols viennent, où ils vont et ce qu'ils font, se sont récemment renforcés. Les images satellitaires se sont rapidement révélées capables d'identifier et de repérer des tempêtes de sable ainsi que de mesurer leur étendue, ce qui est très difficile à faire depuis le sol (*cf.* photos ci-dessous).

En repérant sur des images successives dans le temps, les régions où démarrent ces tempêtes, il est possible de surveiller les zones sources de poussières et de repérer celles qui sont le plus souvent actives (*cf.* carte page suivante).

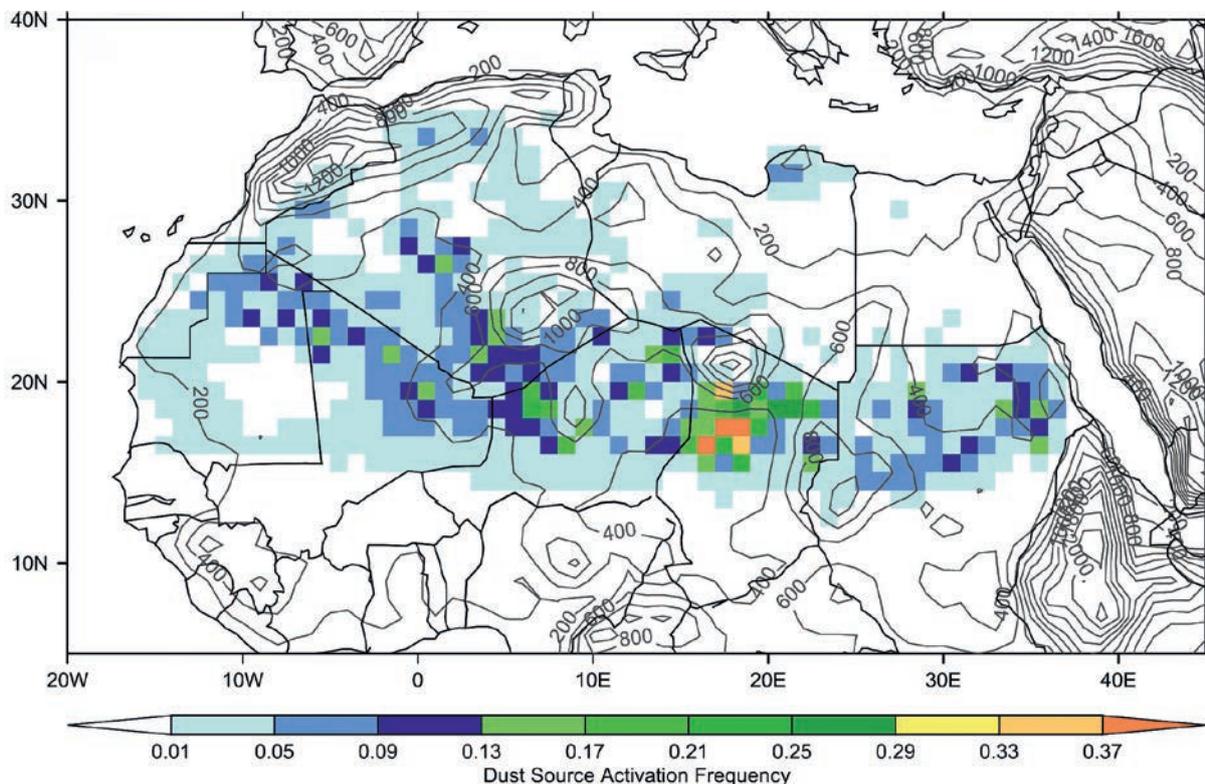


▲ Carte mondiale des températures de surface le 29 octobre 2014 à 18:00 GMT. © NOAA

▼ Ciel chargé de poussières au-dessus de Beyrouth (Liban) le 8 septembre 2015. © Hurriyet Dailynews, 2015



▲ ▲ Images MODIS sur le Moyen-Orient. Tempête de sable se développant à partir du 6 septembre 2015 (photo a), couvrant la Syrie le 7 septembre (photo b), atteignant le Caire et Chypre le 8 septembre (photo c). © NASA/2015

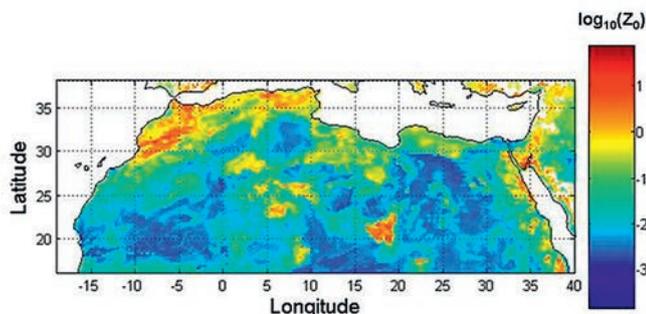


▲ Fréquence d'activation des sources de poussières détectées au moyen du capteur SEVIRI du satellite européen Meteosat 8. Le nord du Tchad apparaît comme la région produisant le plus de poussières. D'après Schepanski *et al.*, 2012.

Prédire ces tempêtes est par contre bien plus complexe, car elles se forment lors de la rencontre de vents forts et secs avec des terrains secs et couverts de particules fines qui peuvent être emportées en grande quantité par ces vents. La vitesse du vent au sol, responsable de l'arrachement de ces particules, dépend bien sûr des conditions météorologiques. La vitesse minimale (seuil) devant être atteinte pour initier cet arrachement dépend des sols et de la rugosité des surfaces. À ce titre, les modélisateurs — qui mettent au point les méthodes de prédiction — recourent aux satellites pour mesurer cette rugosité (*cf.* ci-dessous).

SUIVRE LES GRANDES VARIATIONS DE L'HUMIDITÉ DES SOLS

Une des informations essentielles à connaître pour comprendre le climat et l'écologie de ces régions sèches est celle des quantités d'eau disponibles dans les sols pour les plantes. L'outil le plus utilisé jusqu'à présent est le suivi de variations des températures de surface par les satellites équipés de capteurs dans le domaine de l'infrarouge thermique. Ils permettent de repérer les situations où une surface est humide. En effet, elle est alors plus froide que son environnement. Inversement, lorsqu'elle s'échauffe, et s'il s'agit d'une culture, la végétation est en situation de stress hydrique.



▲ Carte des hauteurs de rugosité aérodynamique à la résolution ($1/4^\circ \times 1/4^\circ$) dérivée des données satellite POLDER-1 et complétée à partir d'une analyse géomorphologique des états de surface. D'après Marticorena *et al.*, 2006.

Surveillance de parcelles irriguées

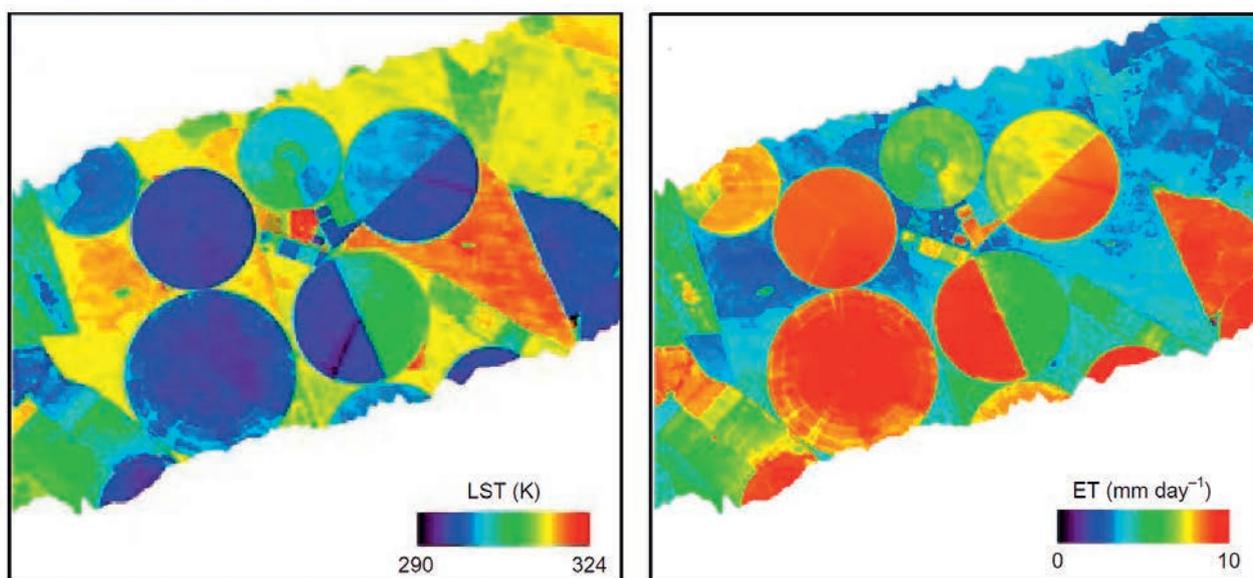
Suivre les variations des températures de surface est particulièrement bien adapté aux zones irriguées comme le montre l'étude de la région de Barrax en Espagne (*cf.* page suivante) réalisée avec des données satellitaires assez précises pour suivre des parcelles individuelles (*Landsat Thematic Mapper*). Les surfaces les plus froides en bleu à gauche, correspondent aux champs qui viennent d'être arrosés par un grand système d'irrigation à pivot. L'intensité de l'évapotranspiration quotidienne correspondante, représentée à droite, est calculée à partir des différences de température entre la culture et l'air ambiant. Logiquement, les champs les plus humides évaporent le plus.

Pour valider ces estimations, il est crucial d'avoir des appareils de micro-météorologie déployés sur le terrain. Ainsi on peut vérifier, en certains points précis des cultures, la correspondance entre mesures au sol et estimations par satellite. La télédétection montre alors son formidable effet de levier : elle permet de passer de ces quelques mesures précises de terrain à une véritable carte de l'évaporation et, ainsi, de calculer précisément combien d'eau est consommée à un instant donné dans une zone donnée.

En répétant dans le temps ce type d'estimation de l'évaporation, il est possible de calculer la consommation en eau sur la saison agricole, au niveau d'un champ, d'un ensemble de champs, d'un périmètre irrigué, voire même d'une région. Ces informations

sont essentielles pour permettre une bonne gestion des ressources en eau et sont particulièrement cruciales dans les régions à climat sec où ces ressources sont limitées et doivent être gérées au plus près.

Une étude récente, réalisée sur un périmètre irrigué de la région de Marrakech au Maroc, a montré que cette estimation de la consommation en eau réelle d'une culture est assez précise pour pouvoir être comparée avec les quantités dont disposent normalement les agriculteurs grâce au réseau d'irrigation. Lorsqu'au niveau d'un champ, la consommation est supérieure à ces quantités, c'est qu'il a bénéficié de quantités d'eau supplémentaires apportées à partir de puits et forages non déclarés (Chehbouni *et al.*, 2008).



▲ Sur de grands champs irrigués par pivot de la région de Barrax en Espagne, les températures mesurées à leur surface (photo de gauche) permettent de calculer l'évapotranspiration quotidienne (photo de droite), c'est-à-dire la quantité d'eau que la culture utilise par jour.

LST (K) : température de surface (degrés Kelvin)

ET : évapotranspiration (mm par jour)

D'après Lagouarde *et al.*, 2012.

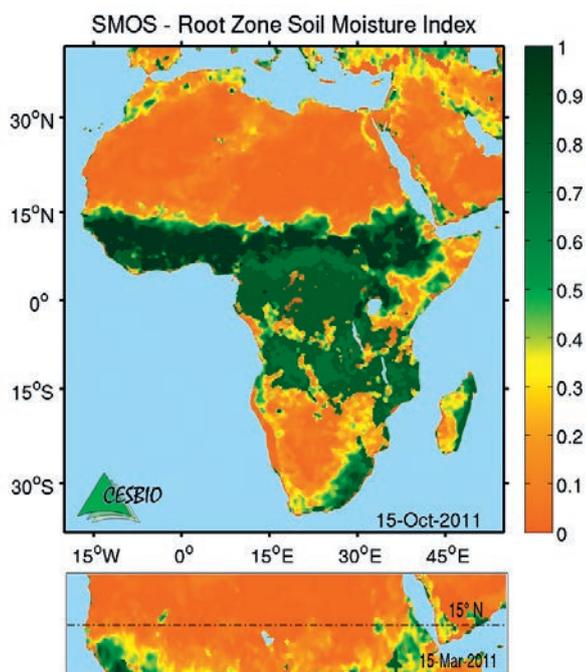
▼ Irrigation par pivot en Arabie Saoudite.

© Copernicus Sentinel data (2015)/ESA



Suivre l'humidité des sols à l'échelle continentale

Cette estimation de l'état hydrique des zones de culture, est complétée depuis peu par de nouvelles données globales, basées sur les micro-ondes passives, en provenance du satellite SMOS (*Soil Moisture Ocean Salinity*), lancé en 2009. Si, du fait de la faiblesse du signal mesuré la résolution n'est pas meilleure que 40 km, ces données permettent par contre une estimation du contenu en eau des sols. Ainsi, un indice d'humidité en zones racinaires a été mis au point (en combinant les humidités de surface et la modélisation des processus d'évaporation et d'infiltration de l'eau). La carte ci-dessous montre cet indice d'humidité calculé sur l'ensemble de l'Afrique à partir des données SMOS d'octobre 2011. Celui-ci varie entre 0 pour les conditions sèches à 1 pour les conditions humides. On y remarque la sécheresse exceptionnelle qui a touché la région de la Corne de l'Afrique à cette période. Elle montre aussi les conditions humides, normales en cette période de l'année, dans la partie ouest du Sahel. L'imagette en dessous de cette carte, centrée sur la latitude 15° N, montre, pour comparaison, les conditions sèches du Sahel durant le mois de mars alors que les régions du sud-est du Soudan et du centre du Mali restent humides.



▲ Carte de l'indice d'humidité du sol en Afrique en octobre 2011 (1 = maximum). La résolution est de l'ordre de 40 km. L'imagette du bas est un extrait sur le Sahel en mars 2011.

D'après l'équipe SMOS du CESBIO.

Pour plus d'informations : www.cesbio.ups-tlse.fr/SMOS_blog/?page_id=2589
Contact : Ahmad Albitar [CESBIO] - ahmad.albitar@cesbio.cnes.fr

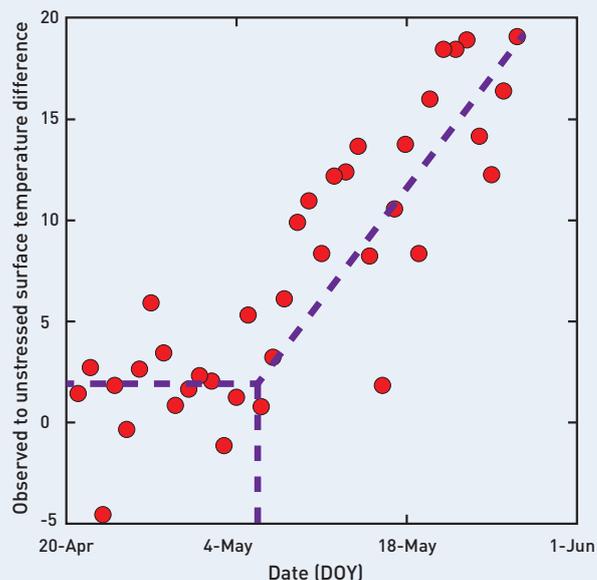
Cette nouvelle source d'informations paraît donc prometteuse pour le suivi et l'alerte de sécheresse ; les données sur l'état hydrique des sols sont par ailleurs essentielles pour alimenter les modèles de prévision et d'évolution du climat.

→ EXEMPLE | Utilisation des données satellitaires combinées avec celles d'un modèle de bilan d'énergie d'une culture de blé au Maroc

Un modèle de bilan d'énergie permet, à partir des informations météorologiques recueillies par les stations au sol et d'informations sur l'étendue du couvert végétal issues des données satellitaires, de calculer la température de surface théorique d'une culture lorsqu'elle se développe sur un sol bien alimenté en eau. Par ailleurs, les satellites permettent de mesurer la température de surface réelle. Il est alors intéressant de suivre l'évolution de l'écart entre ces deux températures.

Le graphique ci-dessous montre que cette différence mesurée sur une culture de blé au Maroc est stable jusqu'au 6 mai, puis elle augmente rapidement. La végétation devient donc plus chaude que ce qui est attendu. C'est le signe qu'elle souffre d'un manque d'eau et donc que la culture est en situation de stress hydrique. Ce type d'information peut ainsi, par exemple, servir à déterminer le bon moment pour irriguer.

D'après Boulet *et al.*, 2007.



Repérer les ressources en eau en profondeur

Dans la plupart des régions sèches, éloignées des grands bassins fluviaux, le captage et la gestion des eaux souterraines plus ou moins profondes sont essentiels à l'approvisionnement en eau des populations, du bétail et au développement de l'irrigation. L'imagerie satellitaire en hydrogéologie peut être utilisée avec deux objectifs distincts : d'une part, améliorer la connaissance des systèmes aquifères à partir des états de surface et, d'autre part, aider à l'implantation des ouvrages de captage sur les zones les plus favorables souvent peu visibles en surface.

À partir des images brutes ou traitées, ou bien en couplant images et modèles numériques de terrain, on s'attache à définir la structure, les limites des réservoirs et leurs éventuelles connections avec les systèmes aquifères voisins. L'association « végétation, humidité des sols (voir paragraphe précédent), géologie et géomorphologie » peut permettre de cartographier un potentiel d'infiltration et de délimiter ainsi les principales zones de recharge où l'eau s'infiltré dans le sol. Tous ces éléments sont autant de paramètres utiles pour le calage et la validation des modèles hydrogéologiques destinés à simuler et gérer l'évolution des ressources en eau souterraines.

En zone aride, on se trouve confronté à la nécessité de trouver des ressources en eau permanentes. Deux cas de figures, qui concernent des aquifères peu profonds, sont particulièrement représentatifs, celui du repérage des zones de fracturation et celui des anciens cours d'eau enfouis sous les dunes.

La fracturation et l'altération des formations rocheuses des zones de socle

Une des utilisations les plus anciennes de la télédétection dans le domaine de l'hydrogéologie est le repérage des zones de fracturation, qui sont autant d'indices utiles à l'hydrogéologue pour découvrir des aquifères, comme cela a été, par exemple, le cas en Afrique dès les années 1970. Les fractures ou les filons — qui peuvent jouer un rôle de drain ou de barrière hydraulique souvent favorable à l'implantation de forages — sont facilement repérables lorsque le socle affleure (*cf.* ci-dessous).

Lorsque la roche mère est recouverte d'une couche d'altération plus ou moins épaisse — comme c'est souvent le cas —, l'approche est plus complexe. Elle passe alors souvent par la détermination par télédétection des réseaux d'alignements, même si ces derniers ne correspondent pas toujours à des fractures. Cela nécessite d'appliquer des techniques de traitement d'images (rehaussement, filtres...) et d'y associer des calculs statistiques ainsi que des validations sur le terrain. Ces discontinuités (fractures, filons...) favorisent souvent l'altération et donc l'épaississement de la zone désagrégée et fissurée favorable au stockage et à la circulation des eaux souterraines.

D'une manière plus générale, lorsque les fractures productives sont peu nombreuses, cette zone d'altération joue un rôle prépondérant et peut être étudiée en combinant images (domaine visible et radar) et géomorphologie, à l'aide de modèles numériques de terrain (MNT qui sont des représentations du relief en 3D, obtenues notamment par satellite).



▲ **Fracture dans le socle : perte d'un écoulement d'oued à la faveur d'une fracture traversant l'oued El Mellaha, désert oriental d'Égypte.**

On remarque les traces d'humidité de surface interrompues sur la fracture, à gauche, et une zone de végétation et d'humidité disparaissant au niveau de la fracture sur l'image SPOT 5 multispectrale, à droite.

D'après Chorowicz & Guillaude, 2009.

Les anciens lits de rivières enfouis

Les premières images radar acquises par la navette spatiale de la NASA en 1982 au-dessus du désert égyptien, ont révélé des structures enfouies sous les sables. Le rayonnement radar traverse les sables du désert puis est réfléchi par les roches qu'ils recouvrent. C'est ainsi qu'il révèle, par exemple, l'existence d'anciens cours d'eau enfouis sous les dunes (Schaber *et al.*, 1986). C'est à la fois intéressant pour la connaissance de l'histoire de ces paysages et très utile pour localiser des nappes d'eau superficielle. En effet, ces anciens lits de rivières, aujourd'hui comblés par une épaisse couverture de sable, matériau très perméable, constituent des aquifères de bonne qualité mais d'extension latérale très limitée. Leur localisation précise permet ainsi de guider efficacement l'implantation des ouvrages de captage.

Cette approche est illustrée par la figure ci-contre qui correspond à la superposition de deux images : (1) une image dans le domaine visible en couleurs, montrant la surface actuelle couverte de sable et ses pivots d'irrigation alimentés par des forages captant l'eau souterraine, et (2) une image radar en gris révélant en profondeur les méandres d'un ancien cours d'eau justifiant l'emplacement de ces forages.



► Disques d'irrigation par pivot (surfaces irriguées circulaires engendrées par des pivots tournants) dans le désert saoudien. Un ancien réseau hydrographique enterré sous les sables est révélé par l'image radar superposée. © DLR TanDEM X/2010

Pour plus d'informations : www.dlr.de/blogs/en/desktopdefault.aspx/tabid-5919/9754_read-204/blogmonth-7/blogyear-2010

▼ Aïr. Niger.

P. Blanchon © IRD



LA SURVEILLANCE DE LA VÉGÉTATION VERTE

Le taux de couverture végétale

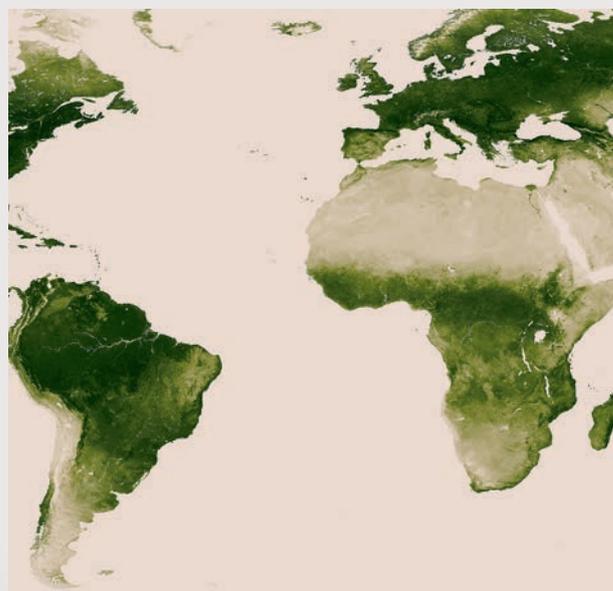
Hormis les utilisations en météorologie et connaissance du climat, l'application de la télédétection civile la plus répandue est la mesure et le suivi de l'indice de végétation. Utilisant les propriétés de réflexion de la lumière par les plantes, cet indice est basé sur le contraste entre le rayonnement réfléchi dans le rouge et celui dans le proche infrarouge. Divers indices de végétation existent et l'indice de végétation par différence normalisé, le NDVI — *normalized difference vegetation index* — est le plus connu (cf. p. 14). Il permet de produire des cartes de taux de recouvrement de la végétation verte. De très nombreuses études basées sur ce principe permettent le plus souvent de repérer les zones où la végétation s'est développée et celles où elle est faible ou absente.

Dans les zones à faibles taux de recouvrement de la végétation, le NDVI peut être influencé par les variations de signature spectrale du sol. Pour remédier à cette perturbation, des indices faisant abstraction des caractéristiques du sol ont été proposés (par exemple les indices de végétation ajustés aux sols SAVI, *soil-adjusted vegetation index* et MSAVI, *modified soil-adjusted vegetation index*), mais ils sont difficiles à exploiter car basés sur des paramètres supplémentaires qu'il est difficile de calibrer sur de grandes zones.

▼ Paysage sahélien.
© Bibelstudienkolleg, 2015

→ ZOOM | NDVI : un indicateur du suivi de la désertification préconisé par la CNUCLD

Le taux de couverture végétale du sol est un indicateur de suivi de l'état de désertification dont l'utilisation est recommandée par la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNUCLD). Sur la figure ci-dessous, on remarque cependant que les faibles taux de recouvrement de la végétation, caractéristiques des régions semi-arides et arides du pourtour saharien, s'y distinguent très peu des régions totalement désertiques comme les grands ergs et regs du cœur du Sahara. Il faut donc être prudent lors de l'utilisation de l'indice de végétation NDVI qui s'est révélé mieux adapté aux couverts végétaux moyens à denses et plus verts qu'à ceux des régions qui intéressent ce dossier.



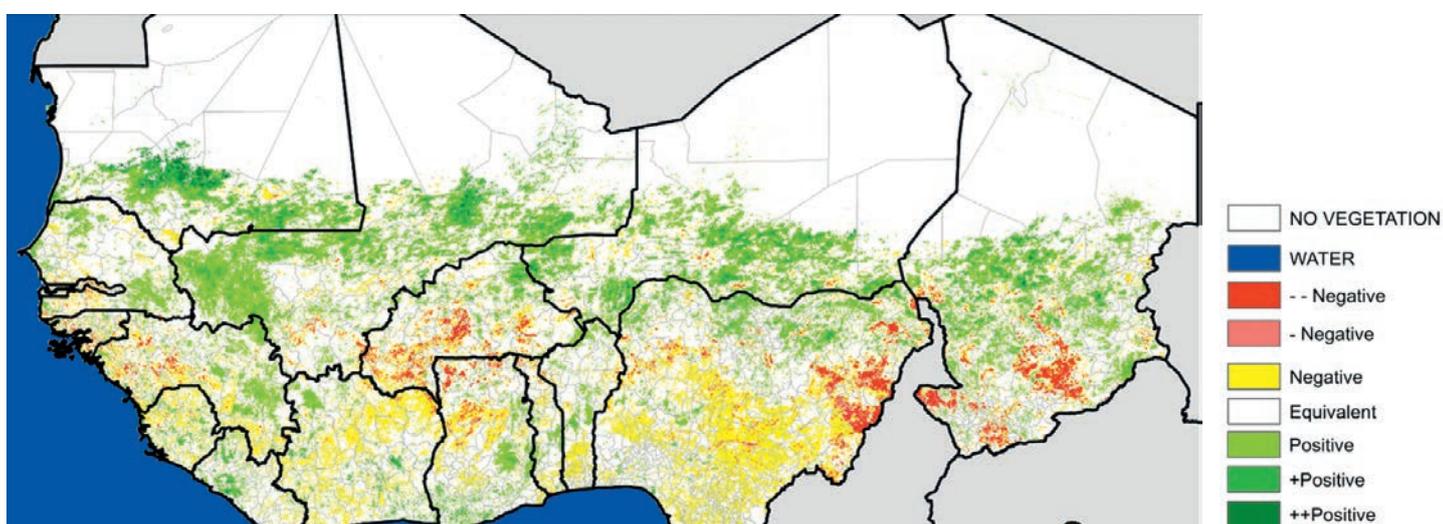
▲ Carte de la densité de couvert végétal sur l'Afrique et l'Amérique du Sud.

D'après les données NDVI de NOAA/NASA : www.nvnl.noaa.gov/green.php

Suivi opérationnel à court terme : les systèmes d'alerte précoce

La surveillance des sécheresses est une information très importante notamment pour la prévention des situations de crise alimentaire. C'est une des applications actuellement opérationnelles des méthodes de suivi par satellite basées sur l'indice de végétation. Utilisant les données des satellites de la série NOAA-AVHRR mais aussi de l'instrument VEGETATION embarqué sur les satellites SPOT, cette surveillance est notamment déployée en Afrique par des organismes régionaux comme AGRHYMET (cf. p. 41).

Dans l'exemple de la figure ci-dessous, l'état de développement de la végétation est suivi à intervalles réguliers (généralement par décade) et les écarts aux moyennes des années précédentes permettent de mettre en évidence des zones où la végétation s'est mieux développée que la moyenne et d'autres où elle l'est beaucoup moins. Lorsque ces dernières couvrent de vastes territoires, c'est une situation d'alerte qu'il faut alors suivre pour connaître son évolution. Les données météorologiques sont, bien sûr, utilisées en complément pour comprendre la situation et analyser les scénarios possibles.



▲ **Indice de végétation standardisé sur l'Afrique de l'Ouest.** Les couleurs indiquent les écarts à la moyenne historique pendant la dernière décennie de juillet 2013.

D'après AGRHYMET, extrait de Traoré *et al.*, 2014.

www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212094714000279

▼ Air. Niger.

P. Blanchon © IRD



→ EXEMPLE | Utilisation de la télédétection dans le suivi d'impact des projets de gestion des ressources naturelles

L'agence de coopération internationale allemande pour le développement (GIZ) a utilisé des images de télédétection pour suivre les impacts de ses programmes de gestion des ressources naturelles au Sahel, à partir d'une situation initiale.

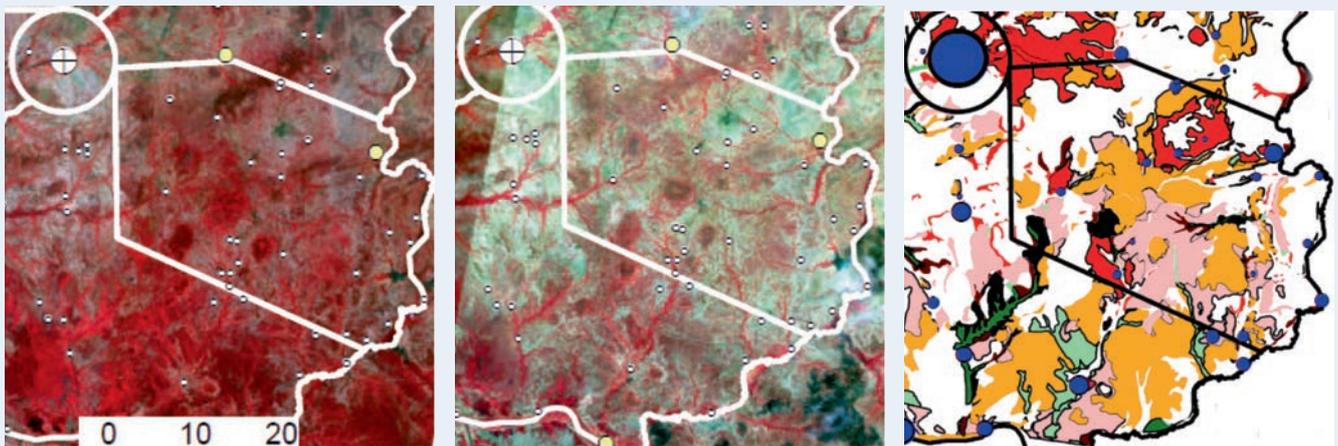
Au sud de la Mauritanie, une comparaison entre les images satellitaires SPOT datées de 1989 et de 1999 a permis de suivre l'évolution dans le temps et dans l'espace du couvert végétal, des agglomérations humaines, des pistes et des mares. Cette analyse des différences entre images satellitaires sur une période de dix ans a été utilisée pour dresser une carte de l'évolution de l'état de la végétation et des cultures pluviales. Les résultats des interprétations visuelles des images satellitaires ont été présentés sous forme de cartes détaillées, afin de suivre les évolutions dans lesquelles s'intègrent les projets, puis leurs impacts à moyen terme.

L'extrait présenté dans les images ci-dessous se situe à l'est de la capitale régionale de Sélibaby (cercle). Sur la carte des changements (à droite) obtenue à partir des images de 1989

(à gauche) et de 1999 (au centre), on décrit une augmentation des terres dégradées (représentées par des couleurs allant du rose au rouge) alors que de nouvelles cultures sont apparues au sud (en vert). L'échelle est en kilomètres. Mais attention, l'analyse de l'évolution d'une zone à partir de deux images seulement, une par année, est une opération très délicate. Il faut en effet veiller à comparer des dates de pluviométrie comparable pour être sûr d'observer des variations dues à des changements du milieu et non une simple variabilité pluviométrique.

Cette analyse a permis de conclure à une augmentation des terres dégradées de près de 14 % sur l'ensemble de la zone, attribuée surtout au surpâturage et à la coupe d'arbres, alors que les cultures annuelles auraient globalement diminué. Fort heureusement, la disponibilité de plus en plus grande d'images permet maintenant de surmonter les limitations de cet exemple d'application pionnier, où les images ne sont pas prises à des saisons identiques et les rendent difficilement comparables.

Pour plus d'informations : Kußerow *et al.*, 2002, dans le cadre de l'Atlas du Guidimakha (GTZ / ECO - Iram).



Suivre et comprendre à moyen et long termes les fluctuations

Les cartes d'indices de végétation peuvent être produites régulièrement et sur de vastes territoires grâce aux différentes séries de satellites défilant sans relâche autour de la Terre depuis près de 40 ans (*cf.* p. 4). Cela est particulièrement utile dans les régions sèches où il existe une variation saisonnière de la végétation (comme dans les milieux tempérés), mais, surtout, une forte variabilité interannuelle. Seule une analyse sur plusieurs décades, combinant les données de terrain, la pluviométrie et l'indice NDVI, permet de diagnostiquer une dégradation ou une amélioration de l'état des milieux qui ne soit pas une fluctuation passagère. Cette approche a particulièrement été appliquée au Sahel africain, avec des résultats contradictoires selon les études. Seule la

mise en relation avec des données et mesures de terrain permet de comprendre les évolutions observées depuis l'espace.

En effet, les images satellitaires seules ne permettent pas de trancher facilement. Une des difficultés est de relier ce que le satellite mesure avec la réalité sur le terrain. En effet, un point de mesure des satellites utilisés dans ce cas couvre 9x9 km et il est, le plus souvent, difficile d'avoir une mesure de la végétation sur le terrain couvrant la même aire au moment où le satellite est passé. De plus, l'atmosphère n'est pas toujours transparente — avec la présence de nuages et de poussières —, ce qui complique la mise en relation des deux types de mesures, au sol et par satellite.

Dans une étude récente, le taux de couverture végétale au sol a pu être comparé avec l'indice de végétation par satellite, sur deux sites de référence : l'un dans le Gourma au Mali, l'autre dans la région de Fakara au Niger (Dardel *et al.*, 2014). Cette comparaison a pu être faite de 1981 jusqu'à 2011 grâce à un dispositif de mesures de terrain qui a fonctionné sur ces sites à peu près tout au long de cette période (*cf.* photographies ci-dessous).

Pour resituer cette étude, la carte ci-dessous montre les résultats de l'évolution de l'indice de végétation sur la période 1981-2011 pour l'ensemble de la zone sahélienne. Elle illustre bien le « reverdissement » constaté dans cette région, car il existe une forte proportion de cette région en vert sur l'image, ce qui correspond à une tendance moyenne à

l'augmentation de l'indice de végétation sur les 30 ans pris en considération. Il y a donc un reverdissement global du Sahel dont on peut alors dire qu'il ne s'est pas désertifié. Les spécialistes s'accordent à dire que ce reverdissement est essentiellement dû à une augmentation des précipitations moyennes sur cette période.

Cependant on voit des disparités et, ainsi, les deux sites étudiés ici ont connu des destins différents. L'essentiel de la couverture végétale est composé de plantes annuelles. Si celle sur le site du Mali a augmenté en moyenne, elle a, au contraire, diminué sur celui du Niger. Dans les deux cas, les mesures par satellite sont confirmées par les observations de terrain. Cependant, les conclusions d'études précédentes sont parfois contradictoires.

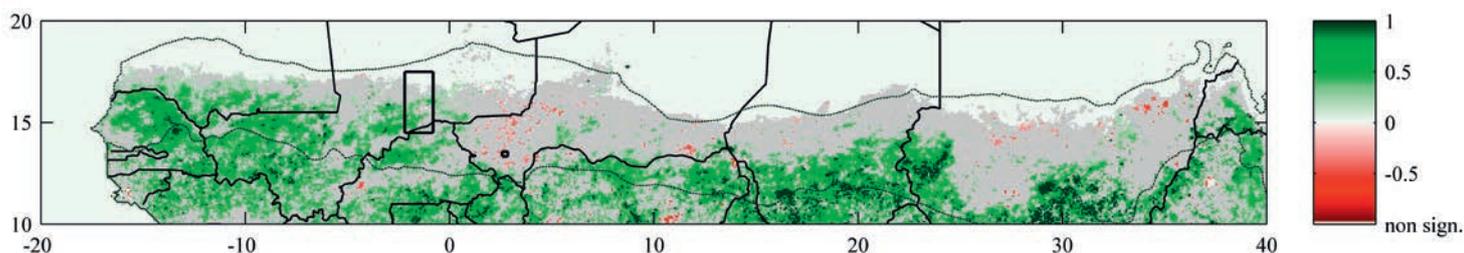


▲ Mesure du taux de couverture végétale sur les sols sableux du site dunaire de Louguéré Kilouki au nord du Mali.

À gauche : saison sèche.

À droite : saison humide.

© P. Hiernaux



▲ Évolution moyenne de l'indice de végétation satellitaire (NDVI GIMMS-3) sur la période 1981-2011.

En rouge : diminution de la couverture végétale.

En vert : augmentation de la végétation.

En gris : pas de tendance nette.

D'après Dardel *et al.*, 2014.

Le graphique ci-contre peut donner une explication à cela : selon la période prise en considération, les conclusions sont complètement opposées. En effet, on remarque sur ce graphique l'importance de la période considérée pour établir un diagnostic de tendance. Sur la période 1984-1999, on conclut au reverdissement alors que sur la période 1999-2004 on conclut, au contraire, à une dégradation du couvert végétal.

Ces séries temporelles d'images satellitaires permettent donc de suivre la couverture végétale et de détecter des tendances, mais il faut pouvoir les valider avec des

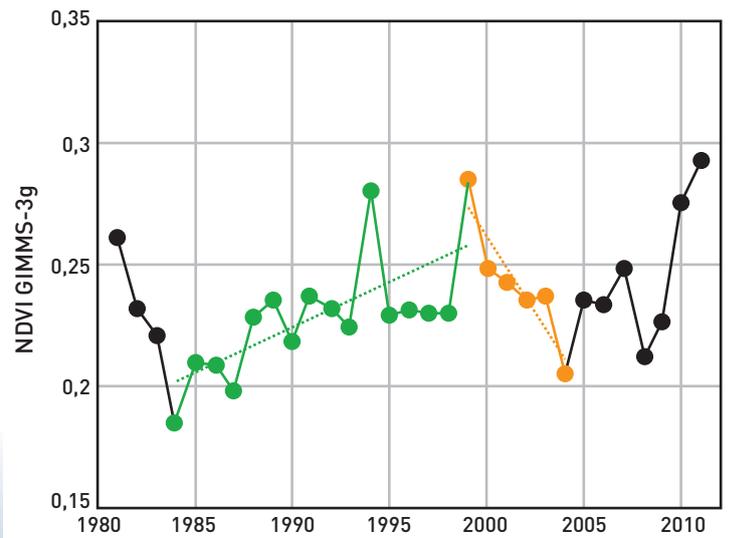
observations de terrain adaptées et être bien prudent dans leur interprétation. De plus, étant donnée la forte variabilité interannuelle de la couverture végétale liée notamment à celle de la pluviométrie, il est délicat de montrer son évolution entre deux années choisies arbitrairement. Il est nettement préférable de présenter des séries temporelles permettant de montrer cette variabilité et de calculer des tendances comme sur la figure ci-dessous. Des méthodes statistiques de détection de ruptures dans des séries temporelles permettent en outre d'identifier les périodes significatives.

→ ZOOM | **Quel indice de végétation utiliser quand elle est sèche ?**

Le NDVI est l'indice de végétation le plus utilisé, notamment parce qu'il peut être calculé à partir de toutes sortes d'images. Il suffit en effet de données dans les bandes spectrales rouge et infrarouge (voir p.8).

De nombreux autres indices ont cependant été proposés combinant, de façon plus élaborée, des bandes spectrales plus nombreuses. Comme la végétation des régions sèches n'est souvent pas verte, des indices spécifiques ont ainsi été testés, comme, par exemple, le *Soil Tillage Index*. Ce simple ratio entre deux bandes du moyen infrarouge s'est révélé capable d'estimer l'abondance des pailles et litières herbacées en saison sèche au Sahel

D'après Jacques *et al.*, 2014.

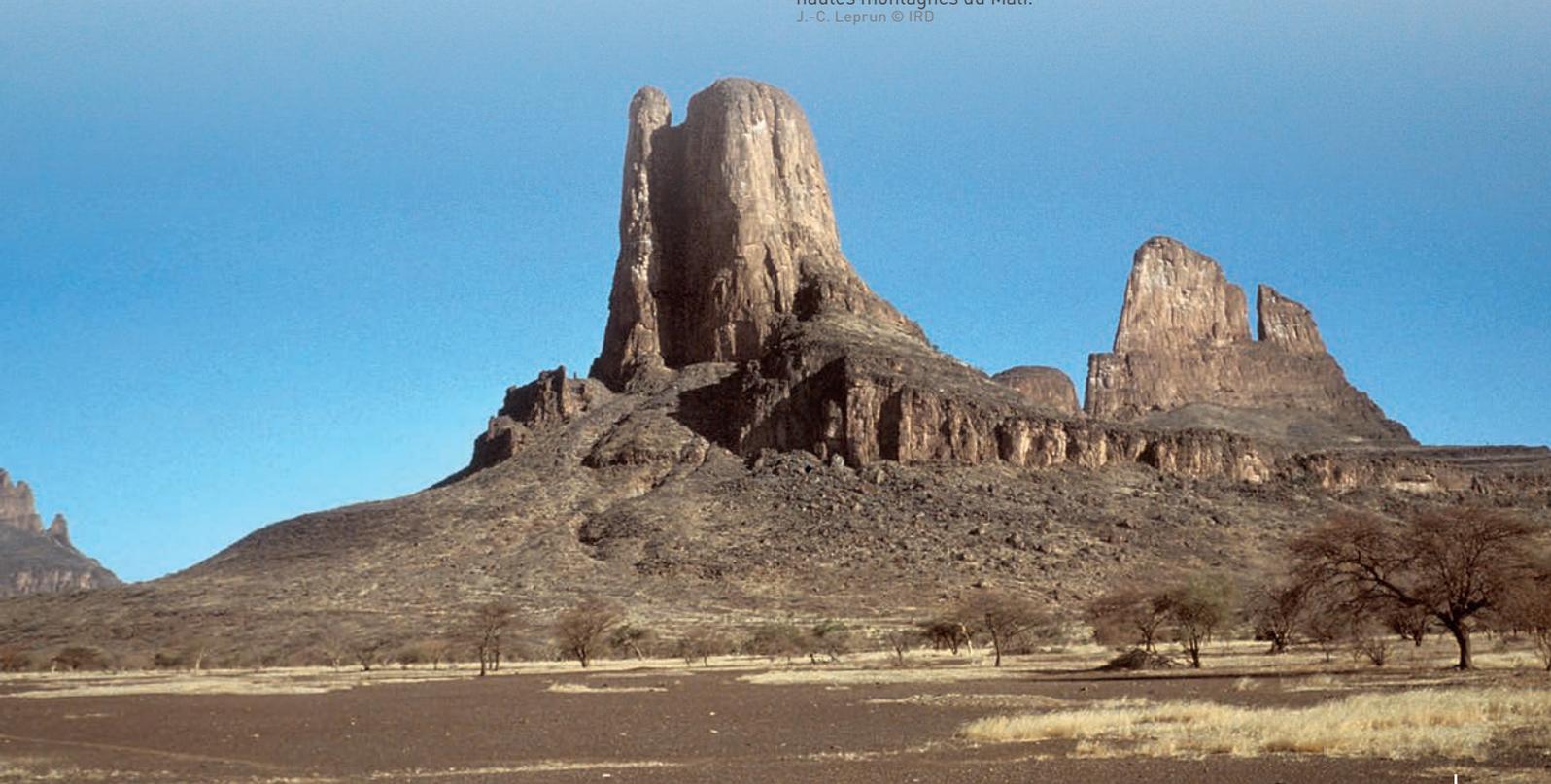


▲ Série temporelle de l'indice de végétation (NDVI GIMMS-3g) entre 1981 et 2011, région du Gourma au Mali.

D'après Dardel *et al.*, 2014.

▼ **Gourma malien.** Grès des doigts de fiancée. Paysage de « Far West », dans lesquelles se dressent, telles des sentinelles du Sahel, les plus hautes montagnes du Mali.

J.-C. Leprun © IRD



Il est généralement admis que les variations à long terme de la couverture végétale reflètent bien la productivité des terres. La fréquence de la végétation observée sur de longues périodes est en effet un bon indicateur des conditions écologiques ou des conditions de production changeantes — fertilité des sols, disponibilité en eau, utilisation des terres. C'est donc une mesure de la réponse des écosystèmes aux impacts extérieurs, qu'ils soient induits par l'activité humaine ou dus à la variabilité naturelle, et qui renseigne sur la dégradation des terres. De fait, la réduction ou la perte de productivité, principalement biologique et/ou économique, est un dénominateur commun aux différentes définitions de la dégradation des terres. La productivité des terres est donc un élément d'information essentiel pour la surveillance de leur dégradation.

Dans le cas présenté ici, une série temporelle d'images a permis de déterminer les indices de végétation globaux NDVI sur la période 1999-2013⁶. Pour chaque pixel de l'image, la mesure de la biomasse, intégrée sur une saison, a été comparée au niveau de production normalement attendu (par comparaison avec les pixels d'écosystèmes homologues). La carte de la dynamique

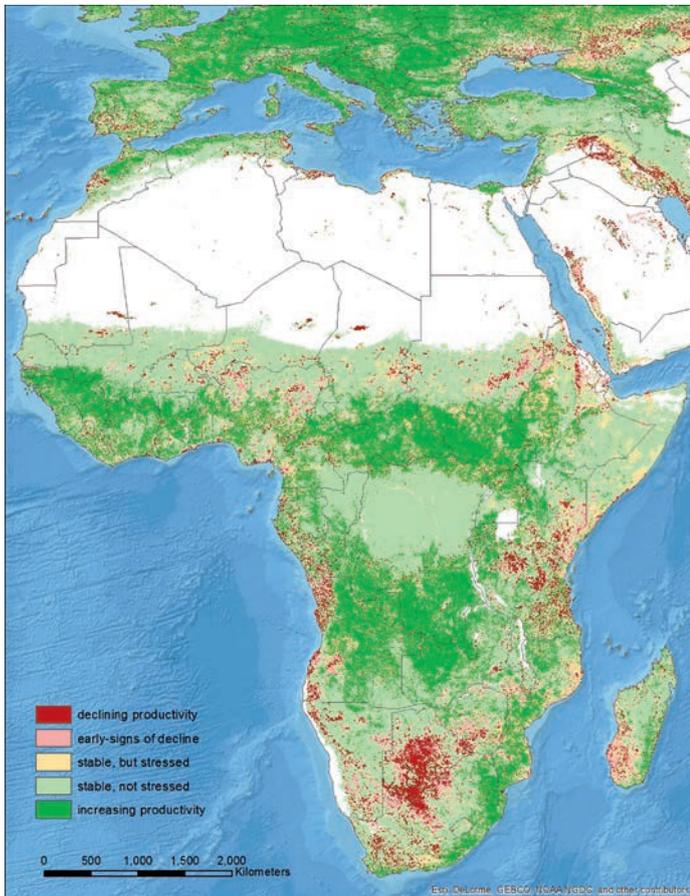
de productivité de la biomasse obtenue sur l'Afrique (cf. page suivante) fait apparaître cinq classes de variation de la production, de croissante à décroissante. C'est un indicateur des changements apparents de la capacité des terres à maintenir la production primaire, sur les 15 années d'observation.

Cette information peut ensuite être analysée de façon plus détaillée en regard des données locales disponibles sur les changements environnementaux observés et leurs causes potentielles comme la surexploitation des terres agricoles (voir l'exemple au Nigéria page suivante). La convergence de preuves permet alors de diagnostiquer et de cartographier la dégradation en cours des terres. Les régions où la dynamique de la productivité du couvert végétal baisse, sont le plus souvent des zones où plusieurs facteurs de stress se conjuguent menaçant l'utilisation durable des terres. Ces zones doivent retenir l'attention pour une analyse complémentaire. Ces facteurs de stress peuvent être naturels, tels que la sécheresse, ou bien dus à l'action de l'homme, tels que l'appauvrissement des terres par des cultures trop exigeantes.

▼ **Paysage rural en Afrique du Sud.** Contreforts du Drakensberg sous pâturage sur sols sableux acides. Ce paysage montre, à droite, l'occupation des terres par les petits paysans avec des cases traditionnelles Zoulou et des signes de dégradation (milieu de versant) consécutive au démantèlement de terrasses et, à gauche, une prairie naturelle colonisée par les espèces arbustives, probablement en raison d'un usage moins systématique du feu pour le contrôle des espèces invasives et/ou une exposition au Nord ce qui induit un réchauffement supérieur propice aux espèces arbustives du type acacia. Le premier plan montre une ravine qui se développe au sein des colluvions.
V. Chaplot © IRD

6. Données NDVI d'une série temporelle d'images SPOT VGT traitées par le *Joint Research Center* de la Commission européenne, en collaboration avec les experts et instituts impliqués dans la compilation du nouvel Atlas Mondial de la Désertification : <http://wad.jrc.ec.europa.eu>

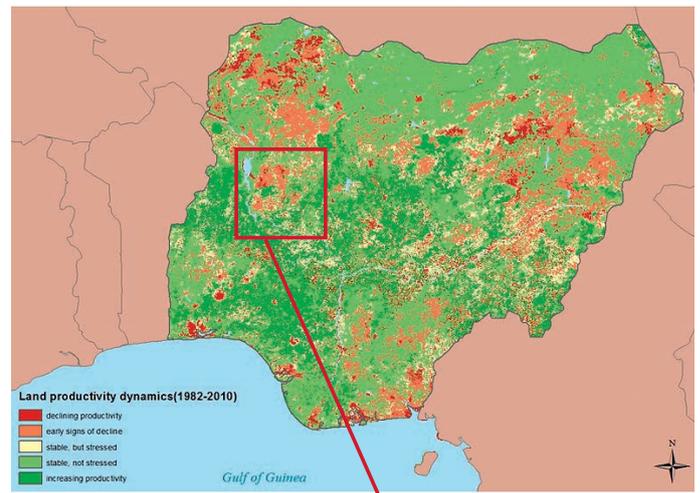




▲ Carte de la productivité dynamique de l'Afrique, 1985-2010.

Les cinq classes indiquent des zones de stabilité, de croissance ou de décroissance. Ces résultats sont issus du traitement d'une série d'images NDVI de SPOT VEGETATION, 1999-2013.

D'après Cherlet *et al.*, 2015.



Land productivity dynamics(1982-2010)

- declining productivity
- early signs of decline
- stable, but stressed
- stable, not stressed
- increasing productivity



▲ Interprétation des variations : exemple au Nigéria.

Le barrage de Kainji au Nigéria a permis une expansion des cultures autour de la réserve faunistique de Dagida (plage verte sur la carte ci-dessus indiquant une stabilité de la productivité sur le long terme). La carte suggère que la capacité des terres à soutenir durablement cette expansion des cultures est en train de décliner, mettant en évidence le besoin d'une analyse plus approfondie pour identifier les causes possibles et si celles-ci provoquent réellement une dégradation des terres.

D'après Cherlet *et al.*, 2015.



L'évolution de l'occupation des terres et son impact

Parmi les changements qui surviennent dans l'environnement, l'évolution de l'occupation des terres est souvent le plus frappant et elle est assez facile à détecter par télédétection (cf. page suivante). C'est le cas, par exemple, quand les peuplements d'arbres ou d'arbustes (brousse) sont défrichés pour implanter des cultures. Ce changement d'occupation, qui se traduit par des modifications de la couverture végétale, a, bien sûr, des conséquences entre autres sur l'alimentation (production agricole accrue) et l'approvisionnement en bois de feu (qui se raréfie). Mais, plus globalement, on constate également un effet sur le cycle de l'eau : le ruissellement peut augmenter, les ravines se creuser, les mares se remplissent alors.

Les passages de feux (cultures sur brûlis, feux de brousse) constituent un des changements d'occupation des terres les plus visibles en télédétection. L'importance des feux dans le cycle global du carbone a par ailleurs été démontrée.

→ ZOOM | Repérer et inventorier les feux de forêt et de brousse

Les feux sont un important élément de la gestion des milieux, particulièrement en Afrique et en Asie où ils font partie des pratiques culturelles.

Utilisant les images MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) disponibles en temps quasi-réel (dans les heures qui suivent leur acquisition), la NASA a développé un programme d'alerte et d'information sur les feux qui a pour ambition de couvrir tout le globe : le programme *Fire Information for Resource Management System* (FIRMS), relayé par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).

Pour plus d'informations : <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms>

▼ Champ défriché sur la forêt sèche près d'Odienné. Côte d'Ivoire.

C. Lévêque © IRD



→ EXEMPLE | Évolution de l'occupation des terres d'un affluent de la rive droite du fleuve Niger en région sahélienne

Les affluents de rive droite du Niger ont connu une forte augmentation de leur coefficient d'écoulement au cours de la grande période de sécheresse au Sahel ; c'est aussi le cas de tous les bassins qui ont été observés en zone sahélienne. Jean Albergel (1986) avait déjà noté ce fait sur les bassins versants expérimentaux du Burkina Faso. C'est ce qu'on a appelé le « paradoxe hydrologique du Sahel » (cf. ci-dessous) suite au programme AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine).

Les cartes ci-contre ont été réalisées par photo-interprétation à partir d'images CORONA (1965, en haut) et de scènes SPOT sur *Google Earth* (2010, en bas). Elles montrent l'ampleur des changements d'usage des sols entre les deux dates dans le bassin du Dargol, un affluent de rive droite du fleuve Niger (Burkina Faso, Niger), dont le bassin versant couvre 7 000 km².

Le graphique ci-contre montre, par ailleurs, la très forte augmentation, entre ces deux dates, des coefficients d'écoulement des trois affluents sahéliens de la rive droite du Niger ; les coefficients ont en effet quadruplé en 50 ans, les débits plus que triplés. Les processus en cause sont d'échelles spatiales et temporelles variables, et à expliquer avec précaution, puisque la mise en culture des sols à l'échelle de la région semble correspondre à une très forte augmentation des ruissellements, alors même qu'à l'échelle très locale, les champs sarclés sont les zones de plus forte infiltration des eaux. C'est l'encroûtement local des sols — pourtant très sableux — qui explique ce processus et la très forte occurrence des crues qu'il provoque.

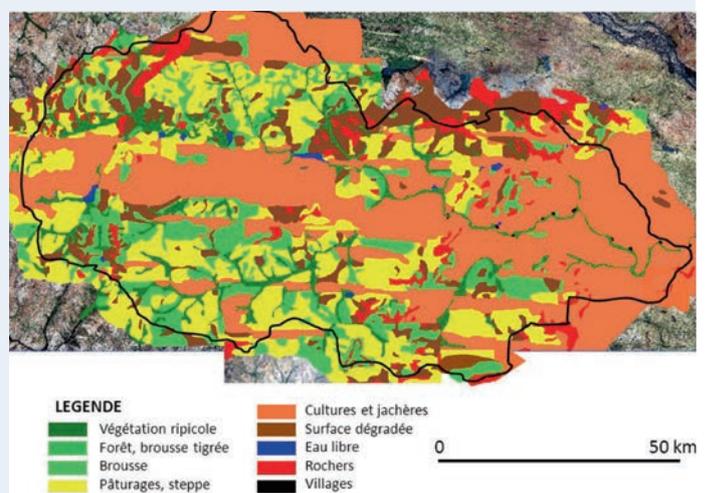
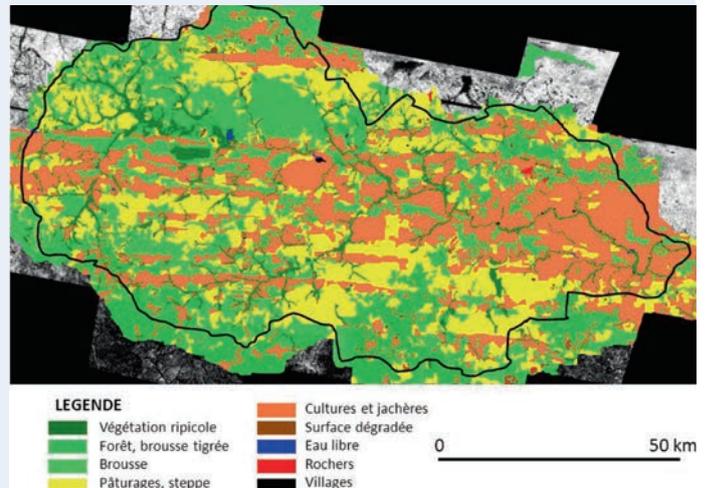
Pour plus d'informations : Descroix *et al.*, 2012 ; Descroix, 2017.

Le paradoxe sahélien

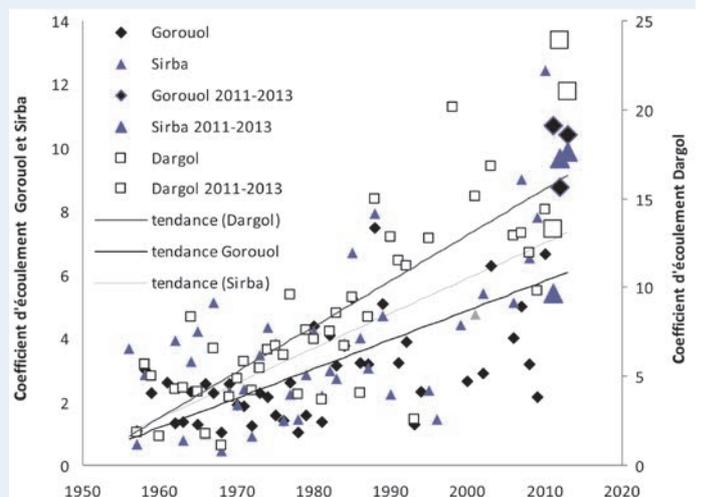
Depuis les années 1950, les hydrologues ont observé une augmentation des coefficients de ruissellement dans de nombreuses régions du Sahel. Une des conséquences de ce phénomène est que, malgré les faibles précipitations caractérisant la période 1970-2010, la quantité d'eau dans les mares et les rivières a augmenté : c'est ce que l'on appelle le « paradoxe sahélien ». Ce paradoxe est en apparence contradiction avec le reverdissement du Sahel, puisque la diminution du couvert végétal est l'hypothèse généralement avancée pour expliquer l'augmentation de l'érosion et donc du ruissellement sur les surfaces dégradées résultantes.

L'analyse des données de terrain de la région du Gourma au Mali permet de réconcilier ces deux théories, dans la mesure où nous pouvons avancer l'hypothèse qu'une dégradation concernant une petite partie du paysage uniquement, comme certains sols superficiels, peut expliquer l'augmentation des coefficients de ruissellement, alors que le signal global indique un reverdissement sur le Gourma.

Pour plus d'informations : Dardel *et al.*, 2014.



▲ Changement de l'occupation des terres entre 1965 et 2010 dans le bassin du Dargol (Burkina Faso, Niger). D'après Descroix, 2017.

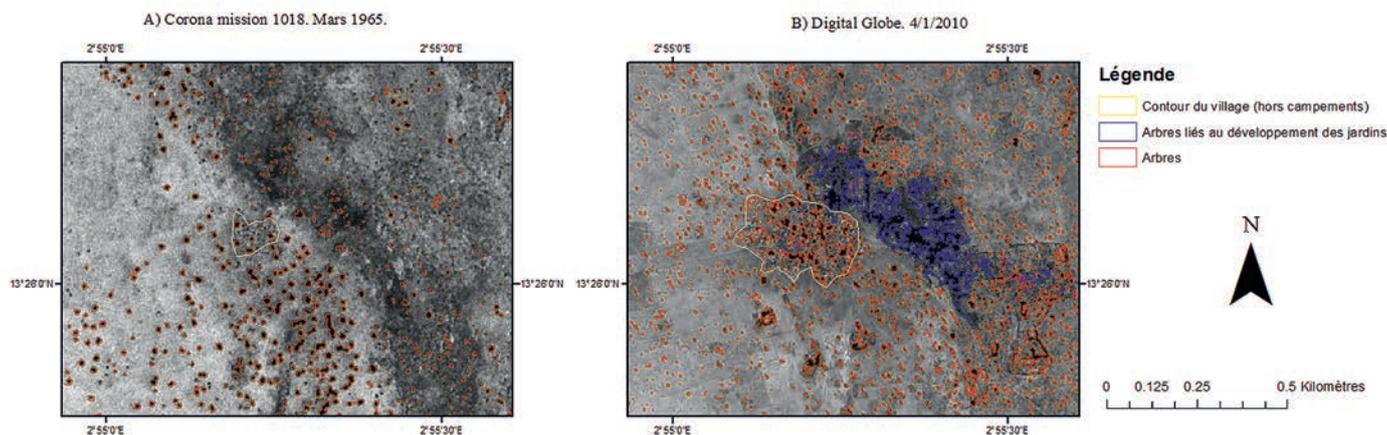


▲ Variation des coefficients d'écoulement des trois affluents sahéliens de la rive droite du Niger. D'après Descroix, 2017.

Grâce aux images de plus en plus détaillées que fournissent les satellites les plus récents, la télédétection spatiale « se rapproche » du terrain et les images à très haute résolution permettent, comme les photos aériennes, d'identifier facilement dans les paysages façonnés par les hommes, des objets très concrets : des champs avec leurs haies, des arbres et des plantations, des routes et des infrastructures, des habitations et leur extension. C'est d'ailleurs ce type d'images qui est utilisé dans les sites de cartographie sur internet tels que *Google maps* pour le monde entier ou le Géoportail pour la France (cf. p. 40).

Suite à leur déclassification, l'accès à des photographies prises par des satellites militaires des années 1960 en très haute résolution permet de faire des comparaisons avec les images de satellites civils actuels dotés

de résolutions comparables. En exploitant cette possibilité, plusieurs études se sont intéressées à l'évolution des paysages agricoles en Afrique sahélienne. Ainsi, dans le sud du Niger, l'effet de l'augmentation de la pression humaine sur le milieu est très net, et ce seulement en deux générations. Cela se traduit généralement par l'extension des défrichements, la diminution de la densité des buissons sur les plateaux (brousse « tigrée »). On remarque aussi l'agrandissement des villages et l'installation des jardins, ce qui se traduit dans l'exemple du village de Zindarou, par une augmentation du nombre d'arbres autour du village, et donc du couvert végétal (cf. images ci-dessous). Ces informations sur l'évolution de l'occupation des terres sont indispensables pour analyser et comprendre, entre autres, les relations environnement-société.



▲ Évolution du paysage végétal autour du village de Zindarou au sud du Niger entre 1965 et 2010.

D'après San Emeterio *et al.*, 2013.

▼ Mare de Sofia Bangou au Niger typique d'un plateau de brousse tigrée près du village de Banizoumbou, 60 km à l'est de Niamey.

J. Asseline © IRD



L'arrivée des drones civils : la « télédétection personnelle »

Alors que bon nombre des satellites commerciaux récemment lancés fournissent des images de plus en plus détaillées (résolution inférieure au mètre), le développement des systèmes de survol sans pilote (*unmanned aerial vehicle*, UAV), communément appelés « drones⁷ », donne à la télédétection une nouvelle dimension « personnelle » un peu à l'image de ce qu'a permis l'arrivée des ordinateurs personnels dans le domaine de l'informatique.

Ce vaste domaine initié par les applications militaires est en pleine expansion avec l'apparition de modèles civils plus simples et moins chers, les plus économiques étant plutôt du domaine du gadget ou du loisir amateur. Dans tous les cas, ils permettent la prise de vue photographique et/ou vidéo à basse altitude, voire très proche du sol, avec des caractéristiques d'image qui dépendent beaucoup de la caméra qu'ils transportent, de la stabilisation de la plateforme et du système de navigation. Le gros avantage par rapport aux meilleurs satellites actuels est que l'on accède à des résolutions spatiales centimétriques, ce qui est très intéressant pour le suivi des états de surface du sol.



▲ Un drone avec caméra en action.
©2015 Hootsuite Media Inc.

Dans ce nouveau domaine foisonnant, on remarque des applications dédiées à des observations scientifiques des milieux arides. Par exemple, on peut citer l'utilisation du cerf-volant en Tunisie, qui a connu ses premières tentatives en 1984 (Escadafal, 1989) et qui est maintenant utilisé pour l'établissement de modèles numériques de terrain pour le suivi de l'érosion (Feurer *et al.*, 2012). Le cerf-volant a été également décliné en version aile delta motorisée (drone Pixy de l'IRD). Plus récemment, des images à très haute résolution obtenues par un drone moderne ont été utilisées au Maroc pour cartographier des terres agricoles affectées par l'érosion (*cf.* image ci-contre). Les problèmes complexes de géométrie associés à ces prises de vues avec des angles très variables sont maintenant résolus puisque des outils logiciels très puissants sont capables de corriger géométriquement et de « mosaïquer » les séries d'images acquises de manière quasi-automatique.

À remarquer que des utilisations opérationnelles de la vidéo aéroportée ont été développées dès la fin des années 1990 pour le suivi de camps de réfugiés (par exemple au Kenya, Cambresy & Souris, 2000), et que son application aux actions humanitaires et d'urgence connaît un boom saisissant.

Le déploiement de moyens d'observation et de cartographie aérienne devient ainsi accessible au niveau individuel ou de petits groupes, pour répondre à un besoin local et immédiat (comme, par exemple, pour l'information journalistique⁸). Cette forme de « télédétection personnelle » va probablement se développer comme outil de suivi/évaluation des actions menées pour lutter contre la désertification.



▲ Traces d'érosion récente, photographie numérique par drone, région du Souss au Maroc, village de La Glalcha.

D'après Oleire-Oltmanns *et al.*, 2012.

Pour plus d'informations : Irène Marzolf, 2011 / <http://imaggeo.equ.eu/view/738>

7. L'appellation « drone » rend cependant ces appareils suspects à une grande majorité du public à cause de l'utilisation de drones militaires.

8. www.africanskycam.com

→ ZOOM | Le droit de regarder chez les autres en prenant de la hauteur

Si le droit civil a inventé les servitudes de vue pour protéger la vie privée contre les regards intrusifs du voisin, il a vite été dépassé par le progrès technique et les vues rapprochées sans proximité du regardant grâce à l'assistance d'appareils de plus en plus sophistiqués et invasifs. Des aspects juridiques nouveaux sont apparus, les cas les plus documentés sont pour le moment dans les pays développés, mais tout le monde est concerné...

À titre d'exemple, il a ainsi été jugé que le service en ligne *Google Street View* — qui contient des images de rues et de places sur lesquelles des personnes, véhicules, cours et jardins sont partiellement visibles — viole les droits de la personnalité en dépit de l'utilisation d'un logiciel de floutage des caractéristiques personnelles, dès lors que ce logiciel ne permet pas d'anonymiser totalement les données personnelles (personnes et plaques d'immatriculation des véhicules reconnaissables) ainsi que les signes distinctifs au voisinage d'établissements sensibles comme les écoles, hôpitaux, maisons de retraite, tribunaux et prisons (*Trib. Féd. Lausanne, 31 mai 2012, aff. n° 1C_230/2011, Google Inc.*)

Lorsque le point d'observation prend de la hauteur, ce sont des questions juridiques d'une toute autre nature qui se posent. Au-delà du problème du droit à l'image sur son bien et son exploitation, en effet, l'accès à des données sensibles (situation et configuration d'un bâtiment militaire, d'une centrale nucléaire, etc.) justifie que soient imposées des restrictions. Ainsi, sauf dérogation expresse qui précise l'usage qui peut être fait des images photographiques et enregistrements numériques, le Code français de l'aviation civile interdit « la prise de vue aérienne par appareil photographique, cinématographique ou par tout autre capteur des zones dont la liste est fixée par arrêté interministériel » [art. D. 133-10., la liste définie en annexe de l'arrêté du 15 mai 2007 est classifiée « Confidentiel Défense »]. Sont ainsi concernés les drones comme tout autre mode de survol (parapente...). D'autres États, comme les États-Unis adoptent des réglementations spécifiques, à l'instar de la réglementation fédérale sur les drones, qui limite à 400 pieds (122 m.) la hauteur de survol « amateurs » et envisage de créer un système d'enregistrement des « systèmes volant sans pilote » à des fins de sécurité des personnes dans les airs et au sol. La Californie a tenté de réduire cette hauteur à 350 pieds (107 m.) pour tout survol d'une propriété privée sans l'accord de son propriétaire, mais le Gouverneur de l'État a opposé son veto à l'entrée en vigueur de ce texte aux motifs, notamment, que la difficulté d'établir la hauteur de survol pourrait renchérir le contentieux et exposer l'amateur occasionnel et l'utilisateur commercial à des recours téméraires.

Le floutage qui permet de détériorer volontairement l'information, varie en fonction de la nature des données à protéger mais surtout, présente le paradoxe de révéler l'intérêt d'un site que l'on ne soupçonnerait pas sans cette dégradation. La protection de sa confidentialité passe donc par sa révélation nécessaire, sans laquelle aucune sanction pénale ne serait possible, dès lors que l'infraction d'atteinte au secret (défense nationale ou autre) n'est constituée que si le site est identifié comme protégé à ce titre. Cette solution pose la délicate question de la diffusion des images ainsi capturées par voie aérienne et plus encore, par voie satellitaire, qui échappent à l'autorité des États survolés. Ce n'est qu'une fois au sol qu'elles sont justiciables, pour autant que leur commercialisation, détention ou lecture soient repérées, ce que la démocratisation de l'accès à Internet rend quasiment impossible. L'essentiel des données n'est cependant pas soumis à ce régime exorbitant du droit commun mais fait au contraire l'objet d'une diffusion officielle organisée lorsqu'elles sont d'origine publique, notamment dans le cadre de la directive « Inspire pour l'ortho-imagerie » (dir. n° 2007/2/CE du 14 mars 2007 établissant une infrastructure d'information géographique dans la Communauté européenne) ou des systèmes nationaux dits « Géoportail » mis en place par de nombreux États.

Cette communautarisation des données n'a cependant pour effet de leur donner le statut de choses communes, qui n'appartiennent à personne et dont l'usage est commun à tous. Cette situation permet de mieux comprendre l'attitude de certaines communautés autochtones qui reprochent une tendance des États occidentaux à la géopiraterie, consistant à recueillir et utiliser les informations géographiques relatives à leur territoire sans leur consentement, voire à fixer leurs territoires dans des limites qui n'ont pas de réalité historique pour elles et utiliser les informations géographiques à des fins politiques, économiques et militaires à leur détriment. Cette irruption de l'éthique dans la capture et l'utilisation des données géographiques prolonge les réflexions développées dans le cadre du Comité des Nations unies pour l'utilisation pacifique de l'espace extra-atmosphérique (*United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, COPUOS*) dont la mission est d'examiner l'étendue de la coopération internationale et d'étudier les moyens pratiques et applicables d'exécuter des programmes touchant les utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique qui pourraient être utilement entrepris sous les auspices de l'Organisation des Nations Unies. Ses recommandations n'ont cependant pas de force contraignante.

Texte de Philippe Billet.
Pour aller plus loin : Hirt, 2009 ; Challéat & Larceneux, 2013 ; Dournes, 2015.

▼ Un bras du fleuve Niger 10 km en amont de Niamey (photo prise avec le drone Pixy). Le fleuve est proche de son niveau maximal. Noter les jardins maraîchers et fruitiers au bord du fleuve. J. Asseline © IRD



▲ Photo prise avec le Pixy : village de la communauté Zoulou de Posthini, traversé par une ravine profonde, région du KwaZulu Natal, Afrique du Sud. J.-L. Janeau © IRD

Vers une démocratisation de l'utilisation des images satellitaires ?

Le très grand intérêt des satellites est de recueillir des données, le plus souvent sous forme d'images, sur toute la surface de notre planète, y compris les endroits les plus inaccessibles. Ils le font à un coût modéré et de façon répétée dans le temps, ce qui permet de mesurer les évolutions, les changements. Si ces mesures doivent, bien sûr, être validées par des vérifications ponctuelles au sol, il est indéniable qu'il serait tout à fait impossible de réaliser une telle surveillance exhaustive des surfaces uniquement par des campagnes de mesures sur le terrain.



▲ Scène de la vie rurale dans un champ d'arganiers. Sud du Maroc.
G. Michon © IRD

La quantité d'informations produites par les satellites qui arrivent dans les stations de réception est chaque jour croissante et atteint des volumes vertigineux. Par exemple, les satellites Sentinel — que l'Europe est en train de déployer dans le cadre du programme Copernicus — à eux seuls produiront 4 téraoctets de données images par jour ! (cf. zoom page suivante).

Un des enjeux actuels est de faire usage de cette manne numérique qui tombe du ciel et, particulièrement, de la rendre utilisable et utile à celles et ceux qui en ont besoin. Dans les régions sèches, et encore peu développées techniquement, c'est un vrai challenge et

un véritable espoir. En effet, les nombreuses utilisations actuellement possibles (dont celles évoquées dans ce dossier) montrent que la télédétection peut grandement aider à faire face aux défis de ces régions, sans compter les développements en cours toujours plus nombreux et diversifiés.

Actuellement, la télédétection spatiale, couplée aux réseaux de mesure aux sols et aux modélisations de divers types, s'est imposée comme un outil pertinent, d'un usage de plus en plus aisé et opérationnel, pour fournir des informations sur la désertification et sa dynamique.



▲ Data center à Johns Hopkins.
Courtesy of Flickr user.

Ceci est le résultat de trois évolutions parallèles :

■ **Une triple révolution technologique :** (1) la révolution industrielle des technologies spatiales a permis de construire et de lancer des satellites d'observation de l'environnement de plus en plus performants, y compris sur le plan économique, et de recevoir leurs données brutes, de les rendre exploitables et de les traiter ; (2) la révolution d'Internet a conduit à banaliser les moyens de communication à haut débit et leurs usages publics et privés, facilitant la fluidité des échanges massifs d'informations numériques et leur mise à disposition au plus grand nombre ; (3) la révolution informatique a permis la constitution d'immenses bases de données et la mise à disposition d'outils performants de traitement de l'information, y compris sur des terminaux portables (tablettes, Smartphones, etc.).

■ **Une révolution scientifique et de ses applications,** avec (1) le développement et le perfectionnement de modèles validés permettant d'élaborer des indicateurs pertinents par « assimilation » de données provenant tant des satellites que du terrain et (2) la mise en service opérationnelle de ces modèles dans des centres exploitant à la fois les données des satellites et celles des réseaux de mesure au sol, comme, par exemple, les modèles de prévision météorologique, les modèles de prévision des récoltes, de risque et de propagation des feux de forêts, etc.

■ **Une révolution de la conscience publique et privée** prenant en compte l'importance des problèmes environnementaux, des échelles locales à globales, comme en témoigne la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, dans le cas des régions sèches.

Même si les grands opérateurs privés, gestionnaires du « *big data* » (dont Google bien sûr), sont apparus comme de nouveaux acteurs dans ce domaine de la surveillance de l'environnement mondial,

→ ZOOM | Une quantité toujours plus grande d'images satellitaires

Il est très difficile d'avoir une vue d'ensemble de la quantité totale d'images satellitaires qui sont accessibles. Les pays producteurs d'images sont nombreux et de plus en plus de données, jusque-là privées, ou du moins payantes, passent dans le domaine public. Citons trois exemples pour donner une idée du volume de ces données :

- Les satellites français de la série SPOT 1 à 5 ont produit, en 26 ans, une archive de plus de 30 millions d'images.
- L'EROS Data Center (*Earth Resources Observation System*) de l'*United States Geological Survey* (USGS) stocke plus de 5 pétaoctets* de données en provenance des satellites de la NOAA et de la NASA.
- Le nouveau système de satellites européens Sentinel va générer 4 téraoctets* de données par jour (soit 1,4 pétaoctet* par an).

* 1 pétaoctet (Po) = 1 000 téraoctets (To) = 1 million de gigaoctets (Go).

la connaissance du terrain et l'implication des utilisateurs finaux de ces observations restent un des enjeux majeurs. Cela sera sûrement facilité par l'apparition de ce que nous avons appelé la « télédétection personnelle » basée sur les drones civils.

La capacité des décideurs, des acteurs du développement, et, particulièrement, de la société civile, à s'approprier les outils que sont la télédétection et la géomatique, pour faciliter la maîtrise de la gestion de leurs territoires, sera déterminante pour l'orienter vers une plus grande durabilité et s'assurer que les écosystèmes rendent de meilleurs services à ceux qui les habitent. Profitant du mouvement généralisé de mise à la disposition du grand public des données et des applications pour les traiter, l'engouement pour ces outils est à encourager. Cette tendance permettra de produire des informations au niveau citoyen qui viendront s'ajouter à celles des larges canaux des organismes nationaux et internationaux en charge de l'information géographique et environnementale⁹. Nous souhaitons modestement que ce dossier contribue à cet effort.

9. Des organisations non gouvernementales (ONG) environnementales ont commencé à utiliser les « *big data* », par exemple Skytruth qui s'empare des données satellitaires pour surveiller les atteintes à l'environnement comme la pêche ou les activités minières illégales.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ouvrages de référence

Becker F., 2011. *Observation de la Terre par télédétection : fondements physiques, méthodologiques et technologiques*. Volume I. Sarrebruck, Omniscryptum. 598 p.

Bonn F. (Dir.), 1996. *Précis de télédétection. Volume 2, Applications thématiques*. Sillery, Québec, Presses de l'Université du Québec/AUPELF. 648 p.

Bonn F., Rochon G., 1996. *Précis de télédétection. Volume 1. Principes et méthodes*. Sillery, Québec, Presses de l'Université du Québec/AUPELF. 485 p.

Caloz R., Collet C., 2001. *Précis de télédétection. Volume 3. Traitements numériques d'images de télédétection*. Sillery, Québec, Presses de l'Université du Québec/AUPELF.

Charfi O., 2015. *Analyse et caractérisation de textures d'images de télédétection. Influence de la résolution spatiale et du mode d'acquisition des images sur l'identification texturale*. Allemagne, Sarrebruck, Éditions Universitaires Européennes. 96 p.

Cissokho R., Cavayas F., 2015. *Évaluation de la vulnérabilité à l'érosion éolienne par télédétection : application dans le bassin arachidier du Sénégal*. Saarbrücken, Omniscryptum.

Dubois C., Avignon M., Escudier P., 2014. *Observer la Terre depuis l'espace - Enjeux des données spatiales pour la société*. Paris, Dunod. 256 p.

Girard M.-C., Girard C.-M., 2010. *Traitement des données de télédétection. Environnement et ressources naturelles*. 2^e édition. Environnement et ressources naturelles. Paris, Dunod. 576 p.

Gomasca M.A., 2009. *Basics of Geomatics*. Dordrecht, London, Springer-Verlag New York Inc.

Lillesand T.R., Kiefer W., Chipman J., 2015. *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York, John Wiley & Sons, Inc.

Provencher L., Dubois J.-M.M., 2007. *Précis de télédétection. Volume 4. Méthodes de photo-interprétation et d'interprétation d'image*. Sillery, Québec, Presses de l'Université du Québec/Agence universitaire de la Francophonie. 468 p.

Références citées

Boulet, G., Chehbouni A., Gentine P., Duchemin B., Ezzahar J., Hadria R., 2007. Monitoring water stress using time series of observed to unstressed surface temperature difference. *Agricultural and Forest Meteorology*. 146(3-4): 159-172.

Cambresy, L., Souris M., 2000. Environnement et cartographie des camps de réfugiés au Kenya : une application de la vidéographie aérienne. *Bulletin du comité français de cartographie*. 166: 12-30.

Challéat S., Larceneux A., 2013. Intelligence stratégique et dissimulation dans les outils de géovisualisation en ligne. *M@ppemonde*. 112(2013.4). <http://mappemonde.mgm.fr/num40/articles/art13404.html>

Chebouni, A., Escadafal R., Duchemin B., Boulet G., Simonneaux V., Dedieu G., Mougnot B., Khabba S., Kharrour H., Maisongrande P., Merlin O., Chaponnière A., Ezzahar J., Er-Raki S., Hoedjes J., Hadria R., Abourida A., Cheggour A., Raibi F., Boudhar A., Benhadj I., Hanich L., Benkaddour A., Guemouria N., Chehbouni A.H., Lahrouni A., Oliosio A., Jacob F., Williams D.G., Sobrino J.A., 2008. An integrated modelling and remote sensing approach for hydrological study in arid and semi-arid regions: the SUDMED programme. *International Journal of Remote Sensing*. 29(17-18): 5161-5181.

Cherlet M., Kutnjak H., Smid M., Ivits E., Sommer S., 2015. Use of Remote Sensing-Derived Land Productive Capacity Dynamics for the New World Atlas of Desertification (WAD). In: G.T. Yengoh *et al.*, 2015: Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales. *Springer Briefs in Environmental Science*: 67-71. DOI 10.1007/978-3-319-24112-8.

Chorowicz, J., Guillaude R., 2009. *Approche multi-capteurs pour l'appui à la prospection hydrogéologique en milieu aride. Utilisation de l'imagerie satellite pour l'étude de l'eau dans le sol et le proche sous-sol*. Météo France, Toulouse, France. 8 p.

Dardel C., Kergoat L., Hiernaux P., Mougnot E., Grippa M., Tucker C.J., 2014. Re-greening Sahel: 30 years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger). *Remote Sensing of Environment*. 140(0): 350-364.

Descroix, L., 2017. *Eau : processus et enjeux en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne*. Éditions Tombouctou, Bamako/Éditions IRD Bondy, à paraître.

Descroix, L., Genthon P., Amogu O., Rajot J.-L., Sighomnou D., Vauclin M., 2012. Change in Sahelian Rivers hydrograph: The case of recent red floods of the Niger River in the Niamey region. *Global and Planetary Change*. 98-99: 18-30.

Dia, A., Duponnois R., Wade A., 2010. *Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte : concepts et mise en œuvre*. IRD, Marseille, France. 442 p.

Doumounia A., Gosset M., Cazenave F., Kacou M., Zougmore F., 2014. Rainfall monitoring based on microwave links from cellular telecommunication networks: First results from a West African test bed. *Geophysical Research Letters*. 41(16): 6016-6022.

Dournes M., 2015. *Les photographes et le droit : droit d'auteur et droit à l'image*. Ed. Eyrolles, Paris. 200 p.

Escadafal R., 1989. *Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection*. Ed. ORSTOM, Collection Études et thèses. Paris.

Escadafal R., Bellefontaine R., Bernoux B., Bonnet B., Cornet A., Cudennec C., D'Aquino P., Droy I., Jauffret S., Leroy M., Mainguet M., Malagnoux M., Requier Desjardins M., 2011. *Le projet africain de Grande Muraille Verte : quels conseils les scientifiques peuvent-ils apporter ?* Dossier d'actualité. CSFD, Montpellier, France. 41 p.

Feurer D., El Maaoui M.A., Boussema M.R., Planchon O., 2014 *Méthode opérationnelle de production d'orthophotos et de MNT décimétriques à l'échelle du kilomètre carré par cerf-volant*. In. Colloque scientifique francophone « Drones et moyens légers aéroportés d'observation ». SFPT, Montpellier, France : 11.

Hirt I., 2009. Cartographies autochtones. Éléments pour une analyse critique. *L'Espace géographique*. 38(2009/2): 171-186.



▲ Fillettes béla travaillant dans les maraîchers (ou bouli), village de Korizeina. Burkina Faso.
D. Rechner © IRD

Jacques D.C., Kergoat L., Hiernaux P., Mougouin E., Defourny P., 2014. Monitoring dry vegetation masses in semi-arid areas with MODIS SWIR bands. *Remote Sensing of Environment*. 153: 40-49.

Lagouarde J.-P., Bach M., Sobrino J.A., Boulet G., Briottet X., Cherchali S., Coudert B., Dadou I., Dedieu G., Gamet P., Hagolle O., Jacob F., Nerry F., Oliso A., Ottlé C., Roujean J.-L., Fargant G., 2012. The MISTIGRI thermal infrared project: scientific objectives and mission specifications. *International Journal of Remote Sensing*. 34(9-10): 3437-3466.

Mainguet M., Dumay F., 2006. Combattre l'érosion éolienne : un volet de la lutte contre la désertification. *Les dossiers thématiques du CSFD*. 3. CSFD/Agropolis International, Montpellier, France. 44 p.

Marticorena B., Kardous M., Bergametti G., Callot Y., Chazette P., Khatteli H., Le Hegarat-Masclé S., Maille M., Rajot J.L., Vidal-Madjar D., Zribi M., 2006. Surface and aerodynamic roughness in arid and semiarid areas and their relation to radar backscatter coefficient. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*. 111(F3): NIL_13-NIL_35.

Oleire-Oltmanns S., Marzolf I., Peter K., Ries J., 2012. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. *Remote Sensing*. 4(11): 3390-3416.

San Emeterio J.L., Alexandre F., Andrieu J., Génin A., Mering C., 2013. Changements socio-environnementaux et dynamiques des paysages ruraux le long du gradient bioclimatique nord-sud dans le sud-ouest du Niger (régions de Tillabery et de Dosso). *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*. 13, 27.

Schaber G.G., McCauley J.F., Breed C.S., Olhoeft G.R., 1986. Shuttle imaging radar: physical controls on signal penetration and subsurface scattering in the Eastern Sahara. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. GE-24(4): 603-623.

Schepanski K., Tegen I., Macke A., 2012. Comparison of satellite based observations of Saharan dust source areas. *Remote Sensing of Environment*. 123: 90-97.

Traore SB., Ali A., Tinni SH., Samake M., Garba I., Maigari I., Alhassane A., Samba A., Diao MB., Atta S., Dieye PO., Nacro HB., Bouafou KGM., 2014. AGRHYMET: A drought monitoring and capacity building center in the West Africa Region. *Weather and Climate Extremes*. 3: 22-30.

ACCÉDER À DES IMAGES SATELLITAIRES SUR INTERNET

Visualiser des images sur internet

Depuis la parution de la première version de ce dossier, la télédétection et la géomatique se sont considérablement démocratisées tant sur le plan technique — des outils très simples sont maintenant accessibles au grand public — que matériel — des images sont accessibles gratuitement en ligne à profusion. Cela est en grande partie dû au développement impressionnant de l'utilisation d'internet dans tous les domaines et à la forte contribution des grandes compagnies leader du secteur à la popularisation de l'utilisation des données satellitaires.

Microsoft et, surtout, **Google**, ont mis à disposition sur leurs sites des jeux d'images à différentes résolutions, couvrant l'ensemble du globe selon un système de tuiles, géré automatiquement. Les images ont été acquises auprès de nombreux fournisseurs (NASA, NOAA, SPOT Image, Digital Globe, etc.) et sont géoréférencées, c'est-à-dire qu'elles sont projetées sur un système cartographique.

Les sites **Google maps**, **Bing maps (Microsoft)** et **Flash Earth** permettent de consulter des images de satellites directement en ligne sur l'ensemble du globe, avec l'affichage des coordonnées (latitude, longitude) et des informations cartographiques pour s'y repérer facilement.

Le **Géoportail**, mis en place par l'**Institut Géographique National** (IGN, France), couvre le monde entier avec des images de moyenne résolution, ainsi que le territoire national en images satellitaires et aériennes à haute résolution, tout en permettant également d'y afficher de très nombreuses cartes thématiques (géologie, hydrographie, relief, limites administratives et cadastrales, etc.).

Pour aller plus loin — ce qui nécessite de solides notions de base en télédétection —, **Google Earth Engine** est la plateforme qui permet d'accéder directement aux milliers de téraoctets de données satellitaires que Google gère dans son « cloud » qui s'enrichit constamment au fur et à mesure des acquisitions, notamment des nouvelles images du programme européen Copernicus (cf. ci-après). C'est un accès convivial et gratuit aux séries d'images sur tout le globe, particulièrement celles des satellites Landsat. Il est même possible de lancer des traitements par programmation en ligne (réservés aux experts), une des applications phare étant l'analyse des changements intervenus dans les 30 à 40 dernières années.

L'**Agence spatiale européenne**, en collaboration avec l'Université catholique de Louvain (UCL, Belgique) a mis en place un géoportail mettant à disposition gratuitement des séries de cartes d'occupation du sol à l'échelle du globe, pour le suivi la dynamique du changement du couvert végétal.

visualiser des images sur Internet

Google maps : www.google.fr/maps
Bing maps (Microsoft) : www.bing.com/maps
Flash Earth : www.flashearth.com
Géoportail de l'IGN : <http://tab.geoportail.fr>
Google Earth Engine : <https://earthengine.google.org/#intro>
Géoportail de l'ASE/UCL : <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php>
Science on a Sphere : http://sos.noaa.gov/SOS_Explorer/download.html

Science on a Sphere (SOS) est une application développée par la NOAA qui, une fois installée, offre une interface proche de celle de *Google Earth*, avec de larges possibilités d'analyse et de visualisation des vastes ensembles d'images produites par les satellites de la série NOAA (couvert végétal, températures...).

Télécharger des images à partir des catalogues en ligne

L'accès aux images des satellites n'est plus réservé aux professionnels. En effet, de nombreux fournisseurs d'images permettent maintenant de télécharger des données gratuitement. Leur prise en main n'est pas aussi intuitive que les outils Google, mais les catalogues contiennent une quantité d'images absolument impressionnante.

À titre d'exemple, l'offre étant en perpétuelle évolution, voici ci-dessous quelques catalogues d'images accessibles gratuitement en ligne (à la date d'édition de ce dossier).

En France : *Theia* - www.theia-land.fr/fr

Cette nouvelle plateforme, à vocation plutôt scientifique, a été récemment ouverte au public. Elle met à disposition une collection d'images satellitaires sur la France et quelques autres parties du monde, dont une couverture récente par les satellites SPOT 6 et 7 ainsi que des séries temporelles Sentinel-2 prêtes à l'emploi (orthorectifiées et corrigées en réflectance sol).

Dans le cadre de cette initiative, le programme *Spot World Heritage* a pour objectif de mettre gratuitement à disposition l'ensemble des images des satellites SPOT 1 à 5, acquises depuis 1986. À son démarrage en juin 2015, une première série de 15 000 images sur la France a été rendue disponible. Au fur et à mesure de son déploiement, des images d'autres pays et continents, particulièrement d'Afrique, seront mises en ligne.

En Europe

Programme Copernicus de la Commission européenne

www.copernicus.eu

Ce programme rend accessibles les images du nouveau système européen de satellites Sentinel. Il couvre surtout l'Europe, mais comprend des données globales dans son volet terrestre : <http://land.copernicus.eu/global>

Les images Sentinel-2 du programme Copernicus/ESA sont distribuées à travers son site web, mais aussi par différentes bases de données et sont, par exemple, mises à disposition dans le « cloud » de la société Amazon.

Un portail permet de naviguer dans cette base de données en zoomant sur la zone d'intérêt. La sélection se fait alors sur la zone ainsi délimitée, on peut préciser la période et le taux maximal de nuages : <http://sentinel-pds.s3-website.eu-central-1.amazonaws.com/#ImagerySearch>

Les éléments sélectionnés sont des « tiles » (tuiles) de 100x100 km, constituées à partir des « datatakes » originaux, plus grands, et qui constituent le format actuellement géré sur le serveur de l'ESA.

Site « *Product Distribution Portal* »

www.vito-eodata.be

Un catalogue d'images des satellites européens, Proba-V et Envisat notamment, sont accessibles sur ce site. Seules les images en « temps réel » sont payantes et celles de plus de trois mois sont gratuites.

En Afrique

Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS)

Parmi ses activités, l'OSS a développé un ensemble d'outils et de services basés sur la valorisation des technologies géospatiales, notamment :

- L'appui à douze pays d'Afrique subsaharienne pour la réalisation de cartes nationales d'occupation du sol au 1/200 000 validées au niveau des pays et disponibles en ligne et sous forme d'atlas imprimés. www.oss-online.org/rep-sahel et <http://bricks.oss-intra.org:8080/geobricks>
- La réalisation d'un géoportail en appui à l'initiative de la Grande Muraille Verte pour le Sahara et le Sahel afin de faciliter l'accès aux données spatiales produites par les institutions régionales et internationales en rapport avec les thématiques de la gestion durable des terres. <http://bricks.oss-intra.org:8080/geobricks>
- L'utilisation des services web géographiques basés sur les technologies *Open Source* comme, par exemple, le système d'informations destiné à la gestion durable des terres au Mali (projet ILWAC, Gestion Intégrée de la Terre et de l'Eau pour l'Adaptation à la Variabilité et au Changement Climatique) — http://ilwac.oss-online.org/ml-ilwac-gn2_10 — et le portail sur le partage des connaissances sur les moyens de subsistance et les écosystèmes désertiques, dédié à la région MENA (Moyen-Orient et Afrique du Nord). www.oss-online.org/mena-delp/index.php/fr

Initiative GMES de surveillance mondiale de l'environnement et de la sécurité

Son volet africain est en cours de développement avec l'Union Africaine et l'Union européenne. L'OSS interviendra sur le suivi de l'état des ressources naturelles directement en lien avec la thématique de la désertification. Un premier jalon de ce vaste programme est en cours de réalisation avec le programme MESA (*Monitoring for Environment and Security in Africa*) rayonnant depuis Addis-Abeba sur les 48 pays de la zone Afrique, Caraïbes, Pacifique (ACP). <http://rea.au.int/mesa>

Centre régional AGRHYMET du Comité permanent Inter-États de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS)

Basé à Niamey (Niger), ce centre assure à la fois la distribution de produits cartographiques issus des données de satellites (dont des bulletins d'alerte) et des actions de formation et d'appui technique. www.agrhymet.ne/produit.html

Aux États-Unis

Portail de l'United States Geological Survey (USGS)

<http://earthexplorer.usgs.gov>

Ce portail — mis en place par l'USGS, agence publique américaine responsable de l'archivage national des données de satellites — permet d'accéder au catalogue le plus vaste. Il contient aussi des photographies aériennes et des images déclassifiées. La majorité des données est en accès libre (gratuit), mais certaines images d'archive nécessitent un prétraitement pour être téléchargeables (payant). Face à son étendue, un certain apprentissage est nécessaire pour s'y retrouver, identifier les données intéressantes et préparer leur téléchargement, même si l'interface est assez conviviale.

Site « Earthdata » de la NASA

<https://earthdata.nasa.gov/worldview>

La NASA propose ce site pour visualiser en temps quasi-réel les images globales (capteur MODIS) de ses satellites Aqua et Terra, et les télécharger. C'est particulièrement intéressant pour suivre les événements environnementaux en cours (tempêtes de sable, feux de forêt, inondations, sécheresses...), grâce à l'aspect multi-temporel,

particulièrement mis en valeur par une navigation entre les images acquises quotidiennement, à l'aide d'un calendrier à curseur.

Pour une vue d'ensemble des grands programmes d'observation de la Terre

Site de l'agence spatiale américaine (NASA) : « Visibleearth »

<http://visibleearth.nasa.gov>

Ce site donne est une bibliothèque de tout ce que la NASA produit en termes d'imagerie de la Terre.

Site de l'Agence Spatiale Européenne (ESA)

<https://earth.esa.int>

À noter que ces deux sites sont denses et les termes techniques omniprésents, il est donc difficile d'y trouver des informations simples.

TUTORIELS

Agence Spatiale Européenne (ESA)

L'ESA met à disposition des scolaires et du grand public son site web « EDUSPACE » disponible en huit langues. On y trouve une introduction à la télédétection, l'accès gratuit à des données des satellites européens et un logiciel téléchargeable gratuitement, LEOWorks, fourni avec un tutoriel et permettant des traitements d'images simples.

www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_FR (français)

www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_EN (anglais)

Un autre site présente les nombreuses activités de l'ESA en observation de la Terre, ainsi que les satellites et capteurs cités dans ce dossier : www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth

Autres supports destinés aux enseignants et étudiants (liste non exhaustive)

EOEdu « Observons notre planète »

Petit guide de la télédétection disponible à :

<http://eoedu.belspo.be/fr/guide/index.htm> (français)

<http://eoedu.belspo.be/en/guide/index.htm> (anglais)

FEGEPRO – Fédération des professeurs de Belgique Francophone

Des explications spécifiques à *Google Earth* (qui a par ailleurs ses propres pages d'aide).

www.fegepro.be/pages/google_earth.html

Gouvernement du Canada

Un cours (et le manuel correspondant téléchargeable) sur les fondamentaux de la télédétection, disponible sur le site « ressources naturelles » du Gouvernement canadien :

<http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/geomatique/imagerie-satellitaire-photos-aeriennes/imagerie-satellitaire-produits/ressources-educatives/9310> (français)

<http://www.rncan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9309> (anglais)

Serveur de cours de l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG, Champs-sur-Marne, France)

De nombreux contenus pédagogiques (niveau universitaire) consultables librement.

www.ensg.eu

Association « Planète Sciences Midi-Pyrénées » (Toulouse, France)
Actualité grand public sur <http://regard-sur-la-terre.over-blog.com>

Site de vulgarisation du CNES (Toulouse, France)
<https://cnes.fr/fr/page-intermediaire/Dossiers%20de%20vulgarisation> (français)
<https://cnes.fr/en/page-intermediaire/Pocket%20Guide> (anglais)

Site de la NASA sur les changements globaux
<http://neo.sci.gsfc.nasa.gov>

Cours introductif à la Télédétection et Vadémécum de M.-C. & C. Girard (AgroParisTech, France)
https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/TELEDETECTION/?id_session=0
https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/VADEMECUMTELEDETECTI/?id_session=0

Cours récent multilingue d'un projet européen (dont français et anglais)
http://lms.seos-project.eu/learning_modules#

LOGICIELS DE TRAITEMENT D'IMAGES ET GÉOMATIQUE

Pour des traitements simples

Pour aller plus loin et manipuler les images, en importer, tracer des limites, bref faire des traitements de type géomatique, il faut recourir à un logiciel dédié. Parmi les plus simples et faciles à utiliser, l'application *Google Earth* (particulièrement la version *Google Earth Pro*) peut être téléchargée gratuitement. Ce logiciel permet de visualiser, traiter et imprimer des images satellitaires mises à disposition par Google, mais aussi d'en ajouter d'autres, telles des cartes topographiques, des images provenant d'autres sources, et d'importer/d'exporter des fichiers contenant des informations géographiques au format KML, standard international que *Google Earth* a contribué à populariser.

Des tutoriels sont disponibles en anglais et dans plusieurs autres langues, dont le français, à : <https://support.google.com/earth#topic=4363013>



▲ Étudiants travaillant dans le centre de développement communautaire à Wahlé-Daba. Balbala, Djibouti.
L. Pasquier Doumer © IRD

Pour des traitements plus complexes

Pour des traitements plus complets et plus sophistiqués, il existe de nombreux logiciels commerciaux, dont l'évaluation sortirait du cadre de ce dossier. Par ailleurs, des logiciels gratuits sont apparus avec l'enseignement universitaire de la télédétection. Si de nombreux logiciels ont déjà disparu, parmi ceux dédiés aux images satellitaires encore disponibles, on remarque *Multispec* (de l'université Purdue, États-Unis), toujours maintenu, et qui propose une version légère en ligne. La documentation n'existe qu'en anglais.

<https://engineering.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/index.html>

L'ESA propose sur la *Sentinel Application Platform* (SNAP) ses boîtes à outils « *Toolboxes* », logiciels gratuits et performants développés spécialement pour les données des satellites Sentinel.

<http://step.esa.int/main/toolboxes/snap>

Orfeo toolbox : pour les utilisateurs les plus aventureux et aux besoins plus spécifiques, cette bibliothèque de modules de traitement d'images satellitaires développée par le CNES, bénéficie des améliorations et perfectionnements portés par une communauté d'utilisateurs chevronnés. Une interface appelée « Monteverdi » rend l'accès à certaines fonctions courantes (p. ex. la classification) plus convivial. Si les menus et les 800 pages de documentation sont en anglais, une traduction est prévue, notamment en français.

www.orfeo-toolbox.org

SIG libres et *Open source*

QuantumGIS (QGIS) : logiciel géomatique gratuit actuellement le plus répandu (soutenu par des agences gouvernementales). www.qgis.org/fr/site

Il n'est pas très simple d'apprentissage, car il s'agit d'un SIG très complet (notamment grâce à des « *plugins* ») et en constante amélioration grâce à une large communauté de développeurs et utilisateurs. Il existe en plusieurs langues — dont le français — avec une abondante documentation et des tutoriels disponibles sur Internet. C'est une option pour se lancer sans investir financièrement, mais il faut prévoir du temps !

Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) : gratuit, développé depuis les années 1990, essentiellement en anglais (ni menu ni tutoriel en français).

<https://grass.osgeo.org>

Pour un environnement complet d'outils géomatiques, la solution *OSGeo*, basée sur un ensemble de logiciels *OpenSource* actuellement disponibles, est une solution séduisante. Les outils les plus communs sont installés dans une seule machine virtuelle.

<http://live.osgeo.org/fr>



▲ Cultures maraîchères au Niger.

F. Boyer © IRD

Lexique

Absorption atmosphérique. Elle est due aux différents gaz et particules constituant l'atmosphère qui absorbent l'énergie du 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.

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 pour la représenter sous forme de plan dans une projection cartographique donnée.

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. L'objectif est de reproduire les valeurs de luminance ou de réflectance liées seulement à l'objet observé (on parle de valeur « au sol », par opposition à des valeurs « au sommet de l'atmosphère » s'agissant de données non corrigées).

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).

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

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

Résolution spatiale. 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.

Signature spectrale. Ensemble des valeurs mesurées pour un même objet dans différentes longueurs d'onde.

Téledétection active. Le système de téledétection émet et mesure le retour des signaux électromagnétiques (principe du radar).

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

ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

Pour les abréviations des noms de satellites, voir le tableau page 5.

AGRHYMET	Centre Régional de Formation et d'Application en Agrométéorologie et Hydrologie Opérationnelle, Niger	IRD	Institut de recherche pour le développement, France
AMMA	Programme « Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine »	MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>	NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration, USA</i>
CEOS	Comité sur les satellites d'observation de la Terre	NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index / Indice de végétation par différence normalisé</i>
CESBIO	Centre d'Études Spatiales de la Biosphère, France	NOAA	<i>National Oceanographic and Atmospheric Administration, USA</i>
CNES	Centre National d'Études Spatiales, France	OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel, Tunisie
CNULD	Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification	RSO	Radar à synthèse d'ouverture (SAR en anglais)
CSFD	Comité Scientifique Français de la Désertification	SIG	Système d'information géographique
ESA	<i>European Space Agency</i>	SMOS	Programme "Soil Moisture and Ocean Salinity"
GEOSS	Système de Systèmes pour l'Observation Globale de la Terre	USGS	<i>United States Geological Survey</i>
GIMMS	<i>Global Inventory Modeling and Mapping Studies</i>	GBEP	<i>Global Bioenergy Partnership</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>		

Résumé

En 2016, une centaine de satellites civils observent la Terre depuis l'espace. Ils permettent de recueillir des données, le plus souvent sous forme d'images, sur toute la surface de notre planète y compris dans les endroits les plus inaccessibles. Ils le font à un coût modéré et de façon répétée dans le temps, ce qui permet de mesurer, de modéliser et de suivre les évolutions de notre environnement à différentes échelles spatiales et temporelles. Les applications de la télédétection (ensemble des appareils et des techniques produisant des images satellitaires ou aériennes) sont ainsi variées — météorologie, environnement, urbanisme, etc.

Dans le contexte de la désertification, la télédétection apporte une aide irremplaçable pour la compréhension de ce phénomène. De multiples informations — du local au global — fournies par les satellites permettent de diagnostiquer les effets de la désertification, de mesurer son évolution dans le temps — extension, stabilisation, régression. Les systèmes d'alerte précoce et l'assimilation de données dans des modèles permettent même de prévoir des évolutions. Elles sont essentielles à l'établissement de scénarios et de prospectives à diverses échéances et contribuent de ce fait à la prise de décisions à court terme ainsi que la définition de stratégies à moyen et long termes dans un objectif de développement durable.

Ce dossier présente tout d'abord quelques notions physiques indispensables à la compréhension de la télédétection et les principaux paramètres observables par satellite. Il nous fait ensuite découvrir différentes utilisations possibles des images satellitaires au service de la lutte contre la désertification, au travers de plusieurs exemples récents. Il se conclut sur un guide pratique pour aller plus loin, grâce aux logiciels libres et aux images mises à disposition gratuitement notamment par les agences spatiales françaises, européennes et américaines.

Mots clés

télédétection, désertification, couvert végétal, état des surfaces, alerte précoce, suivi-évaluation, aide à la décision

Abstract

In 2016, roughly a hundred civil remote sensing satellites observe the Earth from space. These satellites collect data, usually in the form of images, on the entire surface of our planet including the most remote and inaccessible areas. They accomplish this at a reasonable cost and on a regular basis, allowing us to measure, model, and follow the evolution of our environment on different spatial and temporal scales. Remote sensing (the ensemble of technology and techniques that produce satellite or aerial images) has a wide variety of applications in fields such as meteorology, the environment, and urbanism.

In a desertification context, remote sensing provides critical support for the effort to understand evolutions in land degradation. The vast amount of information produced—from local to global—enables scientists to identify the effects of desertification, and measure the evolution of its extension, stabilization or regression over time. Early alert systems and the assimilation of data in models can even enable the anticipation of these evolutions. This information is essential for the development of scenarios and forecasts for various periods of time, which in turn facilitate short-term decision making as well as the formulation of medium and long-term strategies aimed at sustainable development.

This *Dossier* begins with the presentation of certain physical concepts indispensable to the understanding of remote sensing and a description of the main parameters that are observable by satellite. We then look at several recent examples which demonstrate the variety of possible uses for satellite images in combatting desertification. In conclusion we suggest possibilities for advancing the use of remote sensing by taking advantage of open software and free access to images provided by French, European, and American space agencies.

Keywords:

remote sensing, desertification, vegetation cover, land surface state, early warning systems, monitoring/assessment, decision support

Dans la même collection

Numéros déjà parus

La lutte contre la désertification : un bien public mondial environnemental ? Des éléments de réponse...
(M. Requier-Desjardins et P. Caron, janv. 2005)
Disponible aussi en anglais

La télédétection : un outil pour le suivi et l'évaluation de la désertification
(G. Begni, R. Escadafal, D. Fontannaz et A.-T. Nguyen, mai 2005)
Disponible aussi en anglais

Combattre l'érosion éolienne : un volet de la lutte contre la désertification
(M. Mainguet et F. Dumay, avril 2006)
Disponible aussi en anglais

Lutte contre la désertification : l'apport d'une agriculture en semis direct sur couverture végétale permanente (SCV)
(M. Raunet et K. Naudin, septembre 2006)
Disponible aussi en anglais

Pourquoi faut-il investir en zones arides ?
(M. Requier-Desjardins, juin 2007)
Disponible aussi en anglais

Sciences et société civile dans le cadre de la lutte contre la désertification
(M. Bied-Charreton et M. Requier-Desjardins, septembre 2007)
Disponible aussi en anglais

La restauration du capital naturel en zones arides et semi-arides Allier santé des écosystèmes et bien-être des populations
(M. Lacombe et J. Aronson, mars 2008)
Disponible aussi en anglais

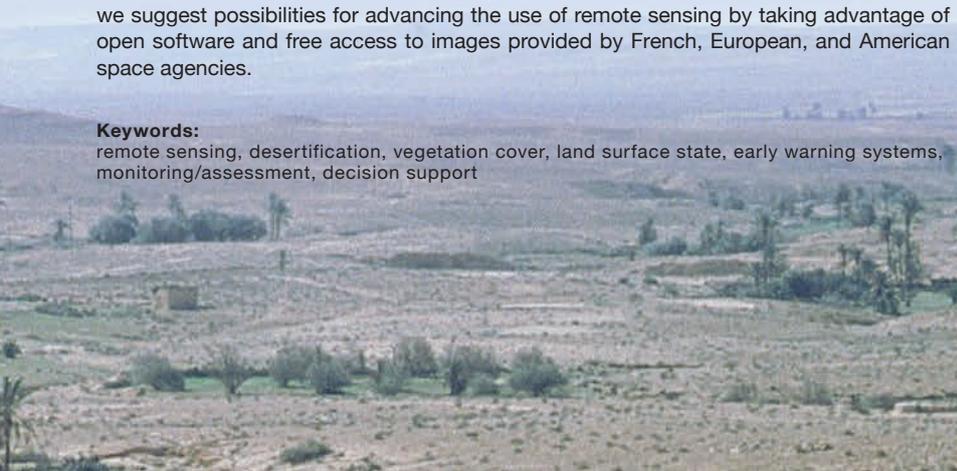
Une méthode d'évaluation et de cartographie de la dégradation des terres. Proposition de directives normalisées
(P. Brabant, août 2010)
Disponible aussi en anglais

Pastoralisme en zone sèche. Le cas de l'Afrique subsaharienne
(B. Toutain, A. Marty, A. Bourgeot, A. Ickowicz et P. Lhoste, février 2012)
Disponible aussi en anglais

Le carbone dans les sols des zones sèches. Des fonctions multiples indispensables
(M. Bernoux et T. Chevallier, décembre 2013)
Disponible aussi en anglais

L'ingénierie écologique pour une agriculture durable dans les zones arides et semi-arides d'Afrique de l'Ouest.
(D. Masse, J.-L. Chotte et E. Scopel, septembre 2015)
Disponible aussi en anglais

Surveiller la désertification par télédétection
(R. Escadafal et G. Bégni, novembre 2016)
Disponible aussi en anglais





Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche

1 rue Descartes
75231 Paris CEDEX 05
France
Tél. +33 (0)1 55 55 90 90

www.enseignementsup-recherche.gouv.fr



Ministère des Affaires étrangères et du Développement international

27, rue de la Convention
CS 91533
75732 Paris CEDEX 15
France
Tél. +33 (0)1 43 17 53 53

www.diplomatie.gouv.fr



Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

Tour Pascal A et B
Tour Sequoia
92055 La Défense CEDEX
France
Tél. +33 (0)1 40 81 21 22

www.developpement-durable.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 International

1000 Avenue Agropolis
34394 Montpellier CEDEX 5
France
Tél. +33 (0)4 67 04 75 75
www.agropolis.fr

NOUS CONTACTER



CSFD

Comité Scientifique
Français de la Désertification
Agropolis International
1000 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

Suivez-nous sur

facebook

twitter
twitter.com/csf_fr

Photos de couverture

1 : Extrait d'une image du satellite européen Envisat au-dessus de la Mauritanie, acquise le 16 septembre 2010. © ESA
2 : Le satellite Sentinel-2 tourne autour de la Terre à une altitude de 786 km. © ESA
3 : Érosion des sols en Afrique du Sud. J.-L. Janeau © IRD



Certifié PEFC
Ce produit est issu
de forêts gérées
durablement et de
sources contrôlées.
pefc-france.org

