



SUIVRE ET ÉVALUER LA DÉGRADATION DES TERRES POUR SOUTENIR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

SUIVRE ET ÉVALUER LA DÉGRADATION DES TERRES
POUR SOUTENIR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

GEF-PROJET DE SURVEILLANCE DE LA DÉGRADATION DES TERRES | ORIENTATION

CONSERVATION
INTERNATIONAL

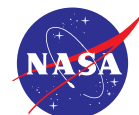


GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY
INVESTING IN OUR PLANET

VITAL SIGNS



LUND UNIVERSITY



Suivre et évaluer la dégradation des terres pour soutenir le développement durable

Évaluer la dégradation des terres pour soutenir le développement durable – Trends.Earth

GEF-Projet de surveillance de la dégradation des terres | Orientation

Genesis T. Yengoh¹, Lennart Olsson¹, Anna E. Tengberg¹, Mariano Gonzalez-Roglich², Alex Zvoleff², Monica Noon²

PHOTO DE COUVERTURE © CONSERVATION INTERNATIONAL / PHOTO DE BENJAMIN DRUMMOND

¹ Centre d'études de durabilité de l'Université de Lund - LUCSUS, Fingatan 10, SE – 223 62 Lund, Suède.

² Conservation International, The Betty and Gordon Moore Center for Science, 2011 Crystal Drive, Suite 500, Arlington, VA 22202 USA.

© 2018, Conservation International, Betty and Gordon Moore Center for Science, 2011 Crystal Drive, Suite 500, Arlington, VA 22202 United States.

Ce rapport a été produit en tant que produit du projet financé par le Fonds pour l'environnement mondial (FEM) «Permettre l'utilisation de sources de données mondiales pour évaluer et surveiller la dégradation des terres à des échelles multiples». Le projet vise à fournir des conseils sur les méthodes robustes et une boîte à outils pour évaluer et surveiller l'état de la dégradation des terres en utilisant la technologie de télédétection.

Pour plus d'informations sur le projet, voir <http://vitalsigns.org/gef-ldmp>.

Le projet de surveillance de la dégradation des terres est une collaboration de Conservation International, Vital Signs, l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA) et l'Université de Lund.

REMERCIEMENTS

Nous sommes reconnaissants aux membres du Conseil consultatif des sciences pour leurs conseils et leurs commentaires sur ce rapport :

STEFANIE HERRMANN	University of Arizona
GRACIELA METTERNICHT	University of New South Wales
SARA MINELLI	UNCCD Secretariat
MARC PAGANINI	ESA Centre for Earth Observation

Nous sommes également reconnaissants pour les contributions apportées tout au long du processus de révision par :

TRISTAN SCHNADER	Conservation International
-------------------------	----------------------------

Nous remercions également le comité de pilotage du projet pour ses conseils :

SANDY ANDELMAN	Organization for Tropical Studies
MICHAEL CHERLET	Joint Research Centre, European Commission
ANNETTE COWIE	Scientific and Technical Advisory Panel to the Global Environment Facility
STEPHEN MUWAYA	Ministry of Agriculture, Animal Industry, and Fisheries, Uganda
LENNART OLSSON	Lund University
ALEX ZVOLEFF	Conservation International

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction	09
2	Renforcement des capacités pour appuyer les évaluations et le suivi de la dégradation des terres	11
3	Objectif de ce document	13
4	Audience cible	15
5	Rappel sur la télédétection	17
	5.1 Télédétection active et passive	18
	5.2 Théorie du rayonnement	18
	5.3 Interaction du rayonnement avec l'atmosphère	19
	5.4 Interaction du rayonnement avec la surface de la Terre	20
	5.5 Données de télédétection	21
	5.6 Résolutions des données	22
	5.7 Informations contenues dans les données	23
6	Suivi de la végétation à l'aide de l'observation de la Terre	25
	6.1 Le NDVI comme indicateur de l'état de la végétation	26
	6.2 Le NDVI comme indicateur de substitution de la dégradation des terres	27
	6.3 Caractéristiques de l'imagerie pour les évaluations basées sur le NDVI	28
	6.4 Évolution des données pour les évaluations de la dégradation des terres basées sur le NDVI	28
7	Utilisation de la végétation pour évaluer les changements de conditions environnementales	31
	7.1 Contributions aux changements des caractéristiques spectrales de la végétation	32
	7.2 Séries temporelles dans les études des changements environnementaux	33
	7.3 Évaluation de changements environnementaux à l'aide d'une série temporelle d'images	34
	7.4 Sélection des données	35
	7.5 Prétraitement des données d'image	36
	7.6 Analyse des données	37
	7.7 Validation	44
8	Utilisation des évaluations basées sur le NDVI pour certaines conditions courantes des terres en Afrique	45
	8.1 Changements d'occupation et d'utilisation des terres (LULCC)	48
	8.2 Désertification	50
	8.3 Érosion du sol	51
	8.4 Sécheresse	52
	8.5 Conservation de la nature	53

TABLE DES MATIÈRES

9	Efforts d'évaluation de la dynamique de la végétation	55
9.1	Autres indices de végétation étroitement liés au NDVI	56
9.2	Classification des indices de végétation	57
10	Méthodes complémentaires à l'utilisation de la télédétection pour la recherche sur la dégradation des terres	59
10.1	Groupes de discussion	60
10.2	Entretiens avec les informateurs clés	63
10.3	Cartographie communautaire et SIG participatif	63
10.4	Observation	63
10.5	Enquêtes	65
10.6	Réflexions sur les sources complémentaires de données pour la recherche sur la dégradation des terres	65
11	Objectifs de développement durable (ODD) et indicateurs de la dégradation des terres	69
11.1	Notification des indicateurs clés pour la CNULCD et le FEM (productivité, couverture terrestre, carbone du sol)	71
11.2	Cadre de la neutralité en matière de dégradation des terres	73
11.3	Suivi et notification de la NDT	74
12	Références	75

LISTE DES ACRONYMES

AMP	Amplitude	NDT	Neutralité en matière de dégradation des terres
ANCR	Autoévaluation des capacités nationales à renforcer	NDVI	Indice de végétation par différence normalisée
ASTER	Radiomètre spatial avancé d'émission et de réflexion thermiques	NOAA	Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique
AVHRR	Radiomètre avancé à très haute résolution	ODD	Objectifs de développement durable
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques	ONG	Organisation non gouvernementale
CDB	Convention sur la diversité biologique	PIB	Produit intérieur brut
CEP	Coefficient d'efficacité pluviale	PPN	Productivité primaire nette
CNULCD	Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification	SOSN	Début de la saison – NDVI
COP	Conférence des Parties	SOST	Début de la saison - Date
DUR	Durée	SPOT	Satellite pour l'observation de la Terre
EOSN	Fin de la saison – NDVI	SWAT	Outil d'évaluation du sol et de l'eau
EOST	Fin de la saison - Date	SWIR	Infrarouge à ondes courtes
ESA	Agence spatiale européenne	TIN	NDVI intégrés dans le temps
ETM	Instrument de cartographie thématique amélioré	UNEP	Programme des Nations Unies pour l'environnement
EUROSEM	Modèle européen d'érosion des sols	USLE/RUSLE	Équation universelle révisée des pertes en terres
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture	WEPP	Projet sur la prévision de l'érosion hydrique
FEM	Fonds pour l'environnement mondial		
FuDSEM	Fuzzy-based Dynamic Soil Erosion Model		
IRS	Satellites indiens de télédétection		
LULCC	Changements d'occupation et d'utilisation des terres		
MAXN	NDVI maximum		
MAXT	Instant du maximum		
MERIS	Spectromètre pour l'imagerie de moyenne résolution		
MODIS	Spectromètre imageur à résolution modérée		

I. INTRODUCTION

1. INTRODUCTION

La Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD) définit la dégradation des terres comme « toute réduction ou perte de la capacité productive organique ou économique de la base des ressources des terres. Elle est généralement le fait d'activités humaines, exacerbées par les processus naturels, et souvent empirées par et étroitement liées au changement climatique et à la perte de la biodiversité » [1]. Cette définition souligne le trait fonctionnel des terres. Les formes de dégradation des terres peuvent être variées et dépendent du type de couverture du sol, de l'utilisation des terres, de la nature de la cause de la dégradation et du milieu naturel affecté par cette dégradation. Ponce-Hernandez [2] a identifié quelques manifestations de la dégradation de terres arides : diminution de la productivité des plantes cultivées ; altérations indésirables de la biomasse et de la diversité de la flore et faune micro et macro (biodiversité des sols) ; accélération de la détérioration physique, chimique et organique des sols ; altérations indésirables des services écosystémiques et risques accrus pour l'occupation humaine. La dégradation peut aussi être considérée en termes d'éléments spécifiques terrestres touchés par le processus. Par exemple, la dégradation de la végétation peut entraîner une réduction de la productivité de la biomasse ; une diminution de la diversité spécifique des plantes ou une détérioration de la valeur nutritionnelle des populations de plantes pour la biodiversité en faune du paysage. Par ailleurs, la dégradation des sols peut indiquer une dégradation de la qualité et de la fertilité des sols, à cause de dommages physiques, chimiques ou biologiques ; une perte de matière organique ou une modification de la structure, de la chimie et de la biologie des sols. Ces changements peuvent être provoqués par plusieurs facteurs comme l'érosion, la pollution et la déforestation.

Au tournant du siècle, environ 2,6 milliards de personnes, selon les estimations, étaient touchées par la dégradation des terres et la désertification, dans une centaine de pays, soit un peu plus de 33 % de la superficie terrestre [3]. La perte de revenus dans les régions touchées par la désertification représente à elle seule environ 42 milliards USD par an [4]. Sur le plan de l'environnement, la dégradation des terres a causé une perte totale estimée à $9,56 \times 10^8$ tonnes de carbone

entre 1981 et 2003, représentant 48 milliards USD en termes de pertes en fixation de carbone [5]. Au niveau d'un pays, le coût de la dégradation des terres peut varier entre 1 % et près de 10 % du produit intérieur brut agricole (PIB) [5].

Le continent africain est l'une des régions les plus concernées par la dégradation des terres. La plus vulnérable à la dégradation, elle est aussi la plus gravement touchée. Selon les estimations, la désertification concerne environ 45 % de la surface terrestre du continent. Près de 55 % de la superficie touchée présente un risque élevé ou très élevé d'aggravation de la dégradation [7]. Dans le cadre de leur analyse du coût économique de la dégradation des terres en Afrique de l'Est, Kirui et Mirzabaev (2015) ont estimé que la dégradation touchait respectivement 51 %, 41 %, 23 % et 22 % de la superficie terrestre de la Tanzanie, du Malawi, de l'Éthiopie et du Kenya. Le coût de cette dégradation représentait respectivement près de 14 %, 7 %, 23 %, et 5 % du PIB de la Tanzanie, du Malawi de l'Éthiopie et du Kenya [6]. De tels niveaux de dégradation sont nocifs pour les écosystèmes et les services qu'ils soutiennent, tels que la production agricole, la préservation de la biodiversité, la conservation et la purification de l'eau, entre autres. Malgré la gravité de la situation, les conditions semblent empirer, et il est aujourd'hui urgent d'agir pour résoudre le problème de la dégradation des terres. Nkonya et d'autres [7] ont estimé qu'à l'horizon 2030, l'inaction face à l'érosion des sols peut entraîner une perte des éléments nutritifs azote, phosphore et potassium d'environ 4,74 millions de tonnes/an, d'une valeur approximative de 72,40 milliards USD en parité de pouvoir d'achat (PPA), en valeur actualisée, pour le continent. Ils estiment que ceci équivaut à 5,09 milliards USD en PPA par an [7].

Pour les institutions internationales et régionales en charge du développement et de l'environnement, la dégradation des terres est un immense fardeau par rapport aux perspectives actuelles et futures de développement durable. La dégradation des terres a été identifiée comme un défi capital du développement dans les principales conventions internationales, telles que la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, la Convention sur la diversité biologique, le Protocole de Kyoto sur les changements climatiques et les Objectifs du Millénaire pour le développement.

II. RENFORCEMENT DES CAPACITÉS POUR APPUYER LES ÉVALUATIONS ET LE SUIVI DE LA DÉGRADATION DES TERRES

Une consultation d'experts organisée par la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD), la Convention sur la diversité biologique (CDB), la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et le Fonds pour l'environnement mondial (FEM)¹ a relevé qu'il était possible d'obtenir assez rapidement des capacités nationales adéquates d'utilisation de données et méthodes adaptées, afin d'évaluer et de suivre la dégradation des terres. Ces efforts peuvent porter sur le transfert de technologie et le renforcement des capacités d'utilisation des informations géospatiales et d'observation de la Terre ; l'utilisation de méthodologies et d'ensembles de données cohérents ; l'interprétation et la validation des données au niveau national et l'utilisation d'analyses dérivées pour orienter les politiques foncières nationales et les rapports internationaux. Bellamy et Hill [9] ont identifié cinq principales catégories de capacités nécessaires pour atteindre et pérenniser les objectifs mondiaux de protection de l'environnement. En voici un extrait :

1. ENGAGEMENT DES PARTIES PRENANTES

- Toutes les parties impliquées, y compris au niveau politique, doivent être prêtes à travailler, afin d'atteindre et de pérenniser les objectifs mondiaux de protection de l'environnement.
- La durabilité environnementale requiert l'engagement des parties prenantes, engagement qui repose sur leur niveau de prise de conscience et de connaissance, ainsi que sur les compétences nécessaires à l'action.
- Les organisations non gouvernementales (ONG) et les organisations communautaires doivent être totalement impliquées, afin d'atteindre les communautés marginalisées et impliquer des parties prenantes de la société civile.
- Des méthodologies de meilleures pratiques sont nécessaires pour impliquer les parties prenantes.
- Le processus d'autoévaluation des capacités nationales à renforcer (ANCR) est innovant,

tirant parti de la grande participation interactive des parties prenantes, qui a renforcé la pertinence des analyses.

2. GESTION DE L'INFORMATION ET CONNAISSANCE

- Même si elle n'est pas complète, l'information sur l'environnement existe. Cependant, les capacités d'accès à et de gestion de cette information, y compris la coordination avec d'autres systèmes de gestion de l'information, restent faibles.
- Il est nécessaire d'intégrer la connaissance traditionnelle / autochtone dans le système de gestion de l'information environnementale.

3. CAPACITÉS ORGANISATIONNELLES

- La structure organisationnelle de nombreux pays manque de la clarté nécessaire pour permettre un financement adéquat de la gestion de l'environnement.

4. GOUVERNANCE ENVIRONNEMENTALE

- De nombreux pays n'ont toujours pas un ensemble complet et adéquat de politiques environnementales ; les instruments législatifs et réglementaires sont soit absents soit non appliqués, entravant davantage la gestion environnementale.

5. SUIVI ET ÉVALUATION

- Les pays suivent et évaluent leurs projets, mais la connaissance générée n'est pas mise à profit de manière adéquate lors des prises de décision.

Ce document et la formation associée contribuent à combler les lacunes dans la première, la deuxième et la cinquième catégorie de capacités nationales, en relation avec les évaluations et le suivi de la dégradation des terres. Ces efforts renforceront les capacités locales de production, d'obtention et d'utilisation des informations et des connaissances aux fins de l'évaluation et le suivi de la dégradation des terres. Ce résultat concorde avec la stratégie du FEM-6 dans le domaine de la dégradation des terres².

III. OBJECTIF DE CE DOCUMENT

3. OBJECTIF DE CE DOCUMENT

Ce document est élaboré dans le cadre du projet du Fonds pour l'environnement mondial (FEM) intitulé : Faciliter l'utilisation des sources de données mondiales pour évaluer et suivre la dégradation des terres à des échelles multiples³. Ce projet vise à fournir des orientations, des méthodes et un outil, afin d'évaluer et de suivre l'état et les tendances de dégradation des terres, à l'aide de techniques de télédétection, qui peuvent être employées dans les décisions de gestion des terres et d'investissement, ainsi que pour améliorer les rapports à la CNULCD et au FEM.

Ce document a pour objectif principal d'améliorer la capacité des pays à appliquer les outils et les approches recommandées d'évaluation de la dégradation des terres, à l'aide de la télédétection. Dans ce but, ce document offre un ensemble condensé de ressources de référence, avec les connaissances de base pour évaluer et suivre la dégradation des sols à l'aide des données d'observation de la Terre. Il fournit une base théorique pour comprendre la dégradation des terres ; l'importance de l'état de la végétation comme indicateur de substitution pour identifier les tendances de dégradation des terres ; l'utilisation de techniques géospatiales pour évaluer et suivre la dégradation et enfin, les implications de ces résultats pour les politiques nationales et infranationales en matière de dégradation des terres. Ce manuel offre également les directives requises par la CNULCD pour combiner l'observation de la Terre aux données nationales et aux inventaires de terrain, pour évaluer la dégradation des terres. Cependant, ces directives sont aussi utiles pour suivre la neutralité en matière de dégradation des terres (NDT) et établir les rapports correspondants, à condition de faire le lien avec le cadre conceptuel scientifique sur la NDT et de les appliquer aux différentes étapes de suivi de la NDT et de la notification associée.

PAR CONSÉQUENT, CE DOCUMENT:

- a - Examinera la compréhension actuelle de la dégradation des terres et de son importance pour le développement durable, en particulier dans le contexte africain ;
- b - Offrira un contexte théorique à la connaissance scientifique actuelle sur l'importance de la végétation pour les ressources environnementales et les services écosystémiques ;
- c - Évaluera la relation entre l'état de la végétation et la dégradation des terres ;
- d - Fournira des directives pour établir un rapport sur les principaux indicateurs de condition des sols au FEM et à la CNULCD (productivité, couverture terrestre, carbone du sol) ;
- e - Servira de manuel d'utilisation de Trends.Earth pour évaluer l'état de la végétation comme indicateur de substitution de la dégradation ou de l'amélioration des terres.

Trends.Earth est un outil d'appui à la décision pour évaluer et suivre l'état de la végétation. Associé à l'outil Trends.Earth, ce document cherche à répondre au besoin urgent d'informations précises sur les tendances et l'envergure de la dégradation des terres. Il s'agit de renforcer les efforts infranationaux, nationaux et internationaux pour concevoir des interventions pertinentes, afin de garantir la pérennité des moyens de subsistance dans les endroits concernés. Ce document et les outils associés devraient constituer une ressource essentielle pour identifier les points froids et chauds de changement de la végétation, et orienter ainsi les efforts d'identification des causes de la dégradation et des réponses à y apporter, ainsi que les impacts de la dégradation des terres sur les moyens locaux de subsistance.

¹ Cadre et principes directeurs pour un indicateur de dégradation des terres: Suivre et faire rapport sur les progrès accomplis dans la réalisation de la cible 15.3 des objectifs de développement durable, des objectifs stratégiques des Conventions de Rio et d'autres objectifs et engagements pertinents. Résultats de la réunion des experts, Washington DC, 26 février 2016. Version provisoire à consulter ici.

² La stratégie dans le domaine de la dégradation des sols a pour objectif de « contribuer à stopper ou à inverser les tendances mondiales actuelles de dégradation des terres, spécifiquement la désertification et la déforestation », voir les Orientations de la programmation du FEM-6 : <https://www.thegef.org/sites/default/files/documents/GEF-6 Programming Directions.pdf>

³ Pour plus d'informations sur ce projet, voir ici : <https://www.thegef.org/project/enabling-use-global-data-sources-assess-and-monitor-land-degradation-multiple-scales>.

IV. AUDIENCE CIBLE

4. AUDIENCE CIBLE

Ce document et les outils associés sont destinés à servir de guide sur les méthodes et l'utilisation d'un outil afin d'évaluer et de suivre l'état et les tendances de la dégradation des terres, à l'aide de techniques de télédétection. Le but est de contribuer à la prise de décision sur la gestion des terres et les investissements, ainsi qu'à l'amélioration des rapports à la CNULCD et au FEM. Par conséquent, la principale cible est le groupe de parties prenantes nationales impliquées dans l'évaluation et le suivi de l'état de la végétation et des terres à l'échelle nationale et infranationale, qui contribuent aux obligations nationales de rapport sur les indicateurs de conditions des terres au FEM et à la CNULCD.

Ce document peut aussi bénéficier à de nombreuses autres parties prenantes qui ne sont pas directement impliquées dans l'établissement de rapports pour le FEM et la CNULCD. Elles comprennent des individus qui souhaitent avoir accès à et suivre directement l'état de la végétation à des échelles multiples, nationales et infranationales, tels que les gestionnaires et décideurs dans le domaine de l'environnement ou des ressources naturelles. La grande portée de ce document et de l'outil associé en fait un dispositif de formation idéal dans de nombreuses disciplines, qui requièrent la compréhension des changements de l'occupation et de l'utilisation des terres et de leurs implications sur les ressources environnementales, les services écosystémiques et le développement durable.



Yam Farm, pour vous. © Benjamin Drummond

V. RAPPEL SUR LA TÉLÉDÉTECTION

5. RAPPEL SUR LA TÉLÉDÉTECTION

5.1 TÉLÉDÉTECTION ACTIVE ET PASSIVE

Nous distinguons deux types de techniques de télédétection, les systèmes passifs et actifs. La télédétection passive utilise le rayonnement qui existe naturellement, comme la lumière visible, le proche-infrarouge et l'infrarouge thermique. Les systèmes de détection mesurent le rayonnement réfléchi ou émis. La plupart des systèmes de télédétection opérationnels fonctionnent sous ce mode. En ce qui concerne la télédétection active, le système émet lui-même des impulsions de rayonnement et capte les impulsions réfléchies (rétrodiffusion), afin d'analyser les propriétés de la surface de réfléchissement. Le radar est la technique la plus utilisée par la télédétection active. Ce rapport n'aborde pas la télédétection active.

5.2 THÉORIE DU RAYONNEMENT

Chaque corps /objet physique d'une température supérieure au zéro absolu (-273 °C) émet un rayonnement électromagnétique.

Plus le corps est chaud, plus le rayonnement est important. La longueur d'onde du rayonnement émis varie aussi en fonction de la température. Ceci est illustré par le spectre électromagnétique (EM) (Figure 1).

La partie du spectre EM intéressante pour la télédétection passive, en relation avec l'étude de la dégradation des terres, est la partie visible avec des longueurs d'onde entre 400 et 800 nm (ou 0,4 – 0,8 µm). Les relations entre la température du corps émetteur, la quantité de rayonnement et la longueur d'onde sont décrites par la loi de Planck sur le rayonnement, illustrée par deux graphiques dans la Figure 2.

La ligne rouge (échelle y à gauche) montre le spectre EM du Soleil (environ 5800 K), et la ligne verte (échelle y à droite) le spectre EM de la Terre (environ 300 K). Notez que les longueurs d'onde des courbes d'émission sont très différentes. La relation entre la température du corps radiatif et la longueur d'onde du rayonnement maximum ("λ_{max}") est décrite par une formule simple, la loi du déplacement de Wien. Selon la loi du déplacement de Wien, la longueur d'onde du pic d'émission d'un corps noir est inversement proportionnelle à sa température. Elle est énoncée ainsi :

$$\lambda_{\max} = b / T \quad \text{Équation 1}$$

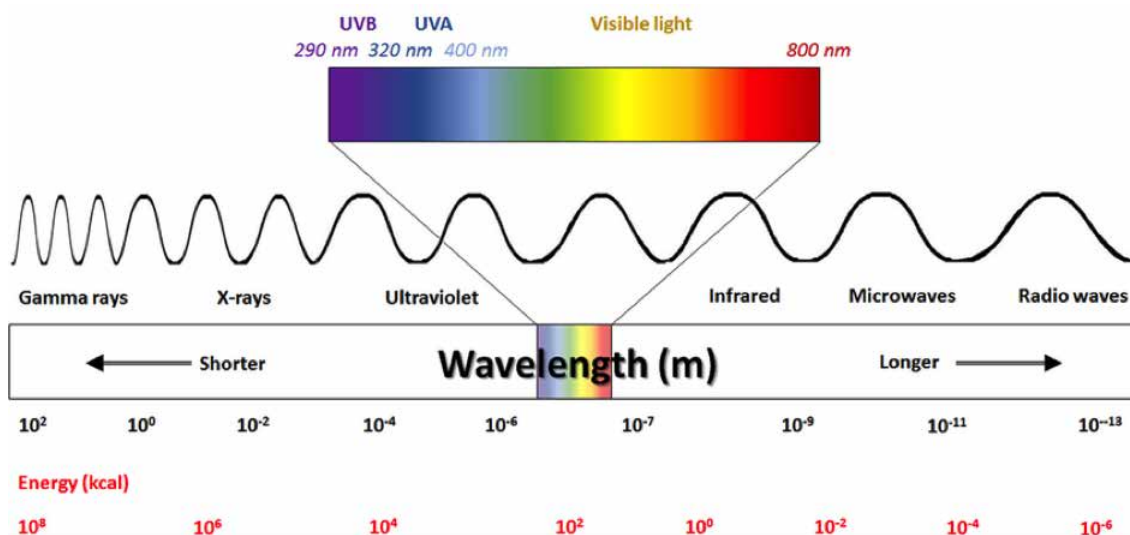


Figure 1. Spectre électromagnétique.

Où λ_{max} est le pic de la longueur d'onde en mètres, T est la température du corps noir en Kelvins (K) et b est une constante de proportionnalité, appelée constante de déplacement de Wien et égale à $2.90 \times 10^{-3} \text{ m-K}$ (mètre-Kelvins).

Pour les longueurs d'onde optique, il est souvent plus pratique d'utiliser le nanomètre plutôt que le mètre comme unité de mesure. Dans ce cas, $b = 2.90 \times 10^6 \text{ nm-K}$. Pour les infrarouges, nous utilisons le micron (μ) ou le micromètre (μm).

Dans ce cas, $b = 2900 \mu\text{m-K}$. Selon la loi du déplacement de Wien, plus un objet est chaud, plus la longueur d'onde du rayonnement émis le plus intensément est courte. Pour déterminer la longueur d'onde pour la luminance maximale, la constante de Wien est divisée par la température en Kelvins. Le pic de chaque courbe se déplace vers la gauche (λ plus courte) à mesure que la température augmente. Il s'ensuit que le rayonnement maximum du Soleil (température d'environ 5800 K) correspond à la lumière verte visible ($2900/5800 = 0,5 \mu\text{m}$), tandis que le rayonnement maximum de la Terre (estimation à 300 K) est proche de $10 \mu\text{m}$, qui est la partie du rayonnement infrarouge thermique du spectre EM.

5.3 INTERACTION DU RAYONNEMENT AVEC L'ATMOSPHÈRE

Le rayonnement solaire est la principale source utilisée par les systèmes de télédétection passive. Lorsque le rayonnement est émis par le Soleil, il traverse l'espace de façon plus ou moins intacte avant d'atteindre l'atmosphère.

Dans l'atmosphère, le rayonnement est soumis à deux processus, la diffusion et l'absorption. La Figure 3 illustre le rayonnement solaire (rayonnement de courte longueur d'onde ou SWR) pénétrant dans l'atmosphère et frappant la surface de la Terre. Une partie du rayonnement est réfléchi dans l'espace, à travers l'atmosphère, sous forme de rayonnement de courte longueur d'onde réfléchi. C'est le rayonnement mesuré par les satellites de télédétection habituels, comme Landsat et MODIS. Une partie du rayonnement de courte longueur d'onde frappant la surface de la Terre est absorbée et non réfléchi. L'absorption se traduit par une élévation de la température de la surface et une augmentation de l'émission du rayonnement, selon la loi de Planck sur le rayonnement. Ceci est illustré sous forme de rayonnement de grande longueur d'onde ou LWR (Figure 2).

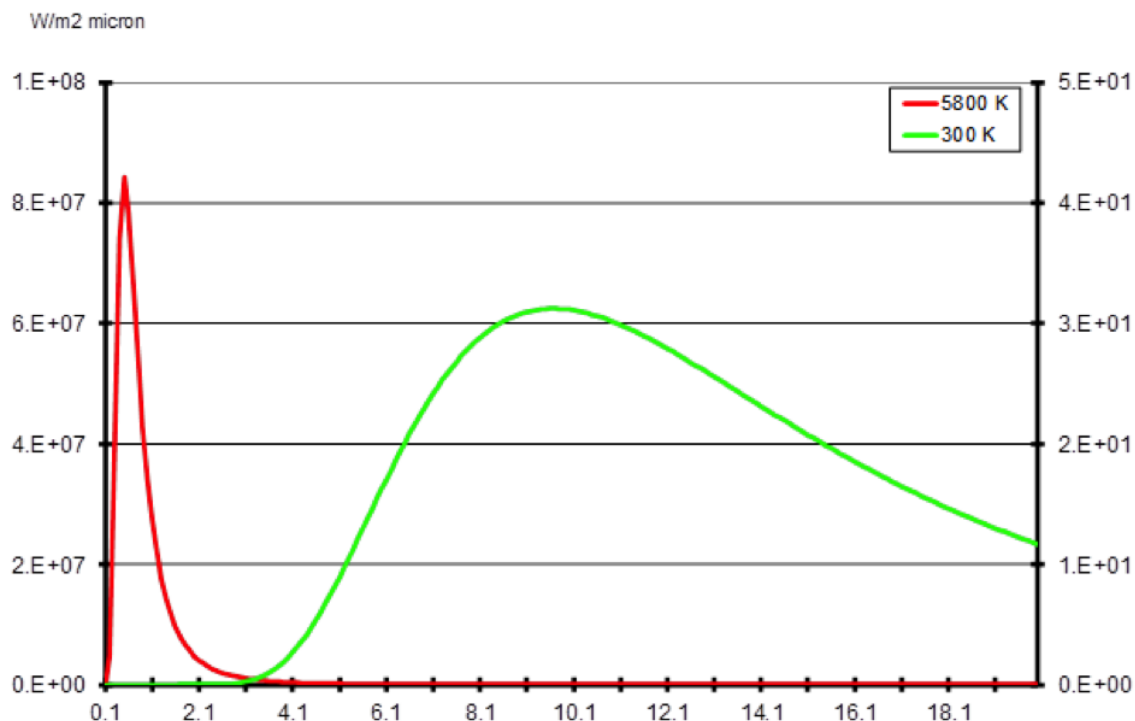


Figure 2. Illustration de la loi du déplacement de Wien.

Nous appelons ces longueurs d'onde le rayonnement thermique infrarouge. Lorsqu'il est décelé par un système de télédétection, il peut servir à mesurer la température de la surface de la Terre, à condition de connaître l'émissivité de la surface.

Lorsque le rayonnement solaire se déplace dans l'atmosphère, il est soumis à deux processus importants pour la télédétection, l'absorption et la diffusion (Figure 3).

Cette importance est due entre autres à leur spécificité en termes de longueurs d'onde. Dans le processus d'absorption, le rayonnement solaire est absorbé par les gaz, comme la vapeur d'eau, l'ozone et le dioxyde de carbone (CO₂), et les particules (aérosols), entraînant un réchauffement de l'atmosphère. Certains gaz, comme la vapeur d'eau, absorbent très fortement le rayonnement à des intervalles particuliers de longueur d'onde. Dans le processus de diffusion, le rayonnement rebondit sur les particules et le rayonnement solaire direct devient diffus. En résumé, l'absorption et la diffusion rendent l'atmosphère moins transparente à certains intervalles de longueur d'onde et plus transparentes à d'autres, ce qu'on appelle les fenêtres atmosphériques. La Figure 4 illustre le degré de transparence de l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde et les gaz les plus importants qui absorbent le rayonnement à différentes longueurs d'onde. La diffusion est moins spécifique

en termes de longueur d'onde mais concerne principalement les longueurs d'onde courtes, c'est-à-dire la lumière bleue visible et d'autres plus courtes. Dans la Figure 4, il est clair que la lumière visible, c'est-à-dire entre 0,4 et 0,7 μm , correspond à une fenêtre atmosphérique, tandis que le proche infrarouge est caractérisé par plusieurs intervalles de longueur d'onde à forte absorption par la vapeur d'eau. L'absorption signifie qu'il y a moins d'énergie détectée, ce qui limite l'utilisation de ces longueurs d'onde par la télédétection. Cependant, ces bandes d'absorption peuvent être utiles pour évaluer la teneur en humidité de l'atmosphère et, dans une certaine mesure, la végétation.

5.4 INTERACTION DU RAYONNEMENT AVEC LA SURFACE DE LA TERRE

Après avoir traversé l'atmosphère, le rayonnement solaire frappe la surface de la Terre. Une partie du rayonnement est réfléchi dans l'espace, ce qui signifie que les longueurs d'onde sont les mêmes que le rayonnement solaire initial (SWR dans la Figure 3), tandis qu'une partie est absorbée et contribue au réchauffement de la surface. L'élévation de la température de la surface de la Terre provient du renvoi du rayonnement de grande longueur d'onde vers la surface, selon la loi de Planck et la loi du déplacement de Wien (LWR dans la Figure 3).

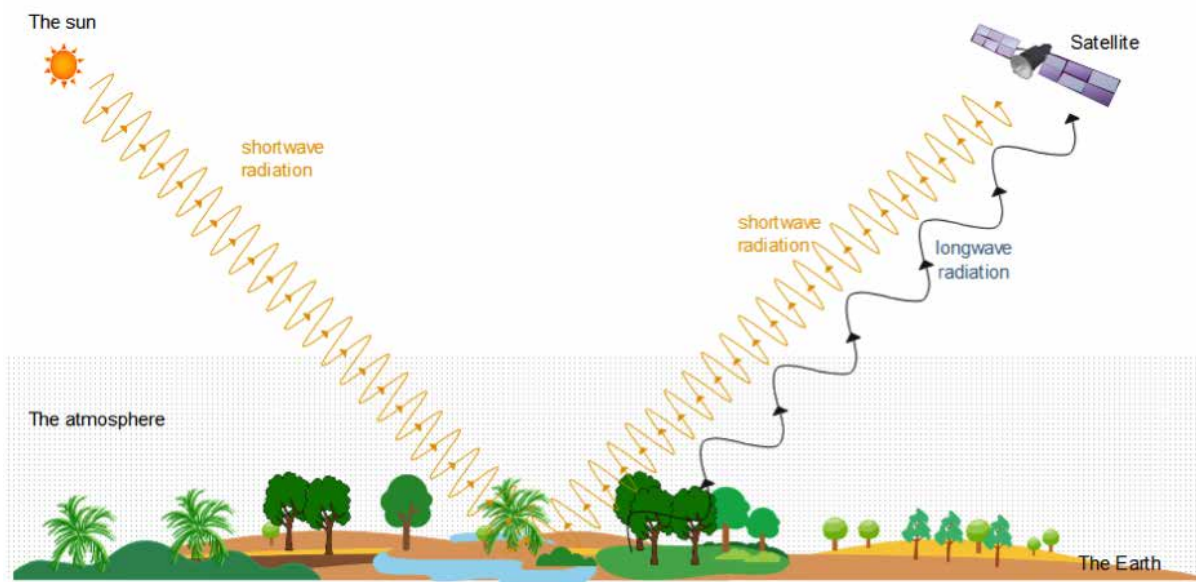


Figure 3. Transmission des rayonnements à travers l'atmosphère (Burai 2012).

Cette réflectance est très dépendante de la longueur d'onde, qui est utilisée par la télédétection pour déduire des informations sur la surface d'origine de la réflectance. La Figure 5 montre la réflectance de trois surfaces différentes, le sol, la végétation et l'eau (IR visible – intermédiaire). En détectant le rayonnement solaire reflété dans les différentes bandes de longueur d'onde, comme l'illustre la Figure 5, il est possible de déduire plusieurs caractéristiques importantes de la surface, en particulier la végétation. La photosynthèse est le processus de vie de la végétation verte : les plantes vertes utilisent l'eau et les nutriments (du sol), le dioxyde de carbone (de l'atmosphère) et l'énergie du soleil pour créer de la biomasse. L'énergie absorbée par les plantes vertes (par la chlorophylle) est principalement de la lumière rouge visible (environ 0,5 μm), d'où le creux de la courbe de réflectance dans la bande Landsat 3. Les plantes vertes ont aussi une réflectance élevée dans le proche infrarouge du spectre (bande 4 dans les séries 1 à 7 de Landsat et bande 5 dans Landsat 8). Ce phénomène particulier (différentes combinaisons de rouge et de proche infrarouge) est exploité pour élaborer des indices de végétation tels que l'indice de végétation par différence normalisée ou NDVI (voir plus loin).

5.5 DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION

Le satellite est la plateforme la plus courante pour mesurer le rayonnement solaire reflété (ou les LWR émis). Les satellites sont soit en orbite quasi polaire autour de la Terre, c'est-à-dire que tous les orbites convergent vers les pôles, soit placés en position géostationnaire au-dessus d'un endroit du globe. Les orbites polaires sont souvent héliosynchrones, c'est-à-dire que l'heure locale de passage du satellite est toujours la même, une condition importante pour obtenir des images non biaisées. Ces orbites se situent généralement entre 700 et 800 km au-dessus de la Terre, tandis que les orbites géostationnaires sont plus précises (35780 km), avec un équilibre entre la gravité de la Terre et la force centrifuge (« boulet de canon de Newton »). Il faut environ 100 minutes à un satellite en orbite polaire pour effectuer une orbite complète autour de la Terre ; pendant cette durée, il détecte continuellement le rayonnement provenant du sol (pendant le passage nocturne, seulement le rayonnement émis). Il faut ainsi plusieurs jours pour couvrir la Terre toute entière. Pour les orbites géostationnaires, le satellite peut détecter continuellement la moitié de la Terre, même si la résolution se détériore vers l'infini aux marges.

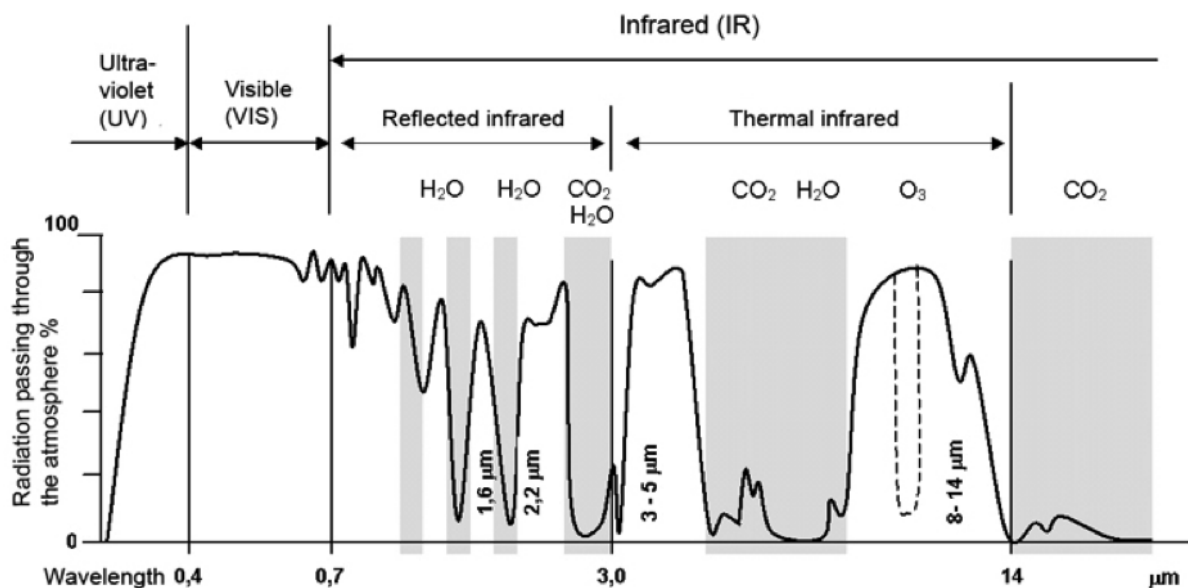


Figure 4. Transmission des rayonnements à travers l'atmosphère (Burai 2012⁴).

⁴ Applied remote sensing. Disponible ici : http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0010_02_Applied_Remote_Sensing/adatok.html

Les données satellite sont transmises en continu à des stations de réception au sol, où elles sont traitées en termes de géométrie et de corrections radiométriques variées pour préparer l'analyse. Deux groupes de caractéristiques contribuent à la différenciation des données satellite, en particulier concernant leur utilisation pour l'étude des phénomènes de changements des terres. Ces groupes comprennent les différentes caractéristiques de résolutions et la nature des informations contenues dans les données (spectrales, texturales et contextuelles) (voir également le Tableau 1).

5.6 RÉOLUTIONS DES DONNÉES

LA RÉOLUTION SPATIALE fait référence à la taille au sol d'un pixel. Elle varie de moins d'un mètre pour la très haute résolution (par exemple Quickbird) à plusieurs kilomètres (par exemple le radiomètre avancé à très haute résolution - AVHRR). La plupart des systèmes satellites en opération ont une résolution spatiale de 0,25 – 1 km (MODIS) ou de 10-30 m (Landsat ou Spot). En principe, les séries temporelles continues de données ont une résolution spatiale moins précise que les images individuelles.

LA RÉOLUTION SPECTRALE fait référence au nombre de bandes de longueurs d'onde utilisées par le satellite pour mesurer le rayonnement venant de la Terre. Les données panchromatiques ne séparent pas le rayonnement mesuré en bandes spectrales, mais utilisent une seule bande large, correspondant souvent à la lumière visible (à comparer avec une photographie en noir et blanc). Les données multispectrales divisent la mesure du rayonnement en deux bandes spectrales ou plus (voir la Figure 5).

LA RÉOLUTION TEMPORELLE est l'intervalle de temps, exprimé en jours, avant le nouveau passage du satellite au-dessus du même point sur la surface de la Terre (au nadir, c'est-à-dire directement sous le satellite). En principe, plus la résolution spatiale est importante, plus la résolution temporelle est grossière. Le compromis entre la résolution spatiale et temporelle peut être compensé par l'utilisation simultanée de deux satellites ou plus, par un basculement latéral de l'instrument ou par un grand angle de fauchée. L'utilisation de séries temporelles continues est essentielle pour l'analyse des processus dans le temps.

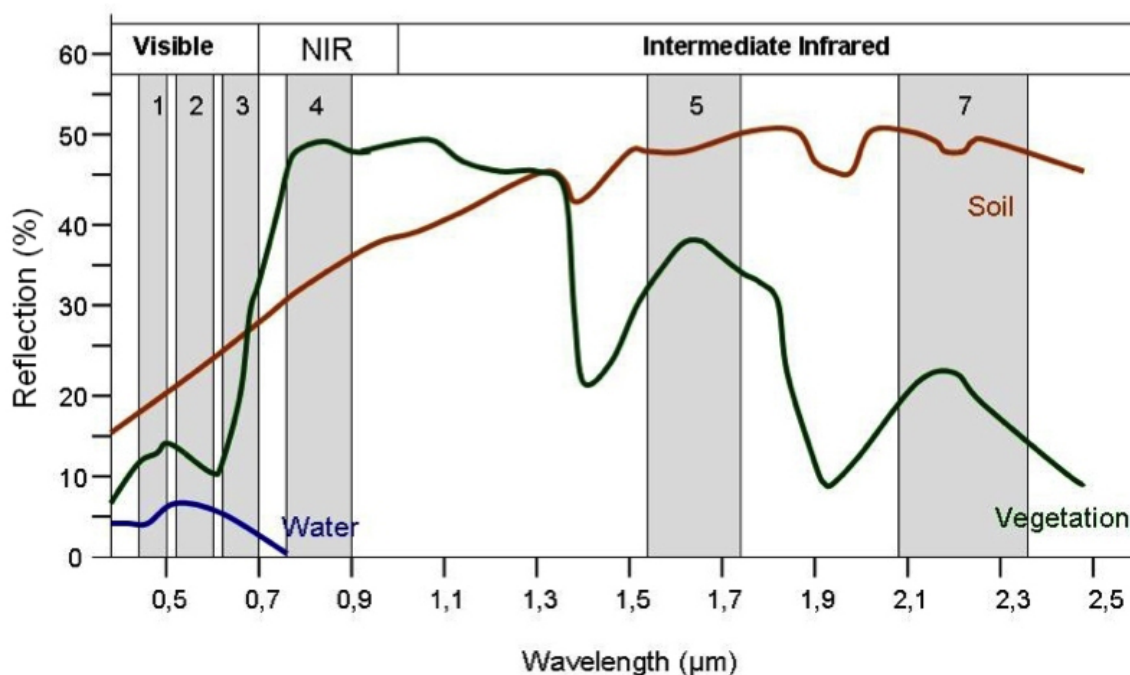


Figure 5. Réflectance spectrale de trois surfaces : végétation verte, sol et eau. Les bandes spectrales Landsat 7-8 ont été superposées.

LA RÉOLUTION RADIOMÉTRIQUE fait référence à la sensibilité du système de détection pour quantifier le rayonnement en niveaux numériques, souvent exprimés en bits (1 bit = 2 niveaux ; 8 bits = 256 niveaux, 10 bits = 1028 niveaux, 12 bits = 4096 niveaux). Plusieurs systèmes plus anciens, comme Landsat et AVHRR, n'utilisent que 8 bits, tandis que les nouveaux capteurs vont jusqu'à 12 bits (par exemple Sentinel). Lors de l'analyse des données de télédétection, nous pouvons distinguer trois types d'information à exploiter : spectrale, texturale et contextuelle.

5.7 INFORMATIONS CONTENUES DANS LES DONNÉES

L'INFORMATION SPECTRALE (bandes et combinaisons spectrales, indices de végétation) fait référence aux informations dans chaque pixel, quel que soit le contexte. Ce type d'information est analysé et utilisé sur la base de principes biophysiques, par exemple le lien entre le processus de photosynthèse et la physique des rayonnements, les caractéristiques de rayonnement de l'eau claire et turbide, etc. Les séries temporelles de données sont particulièrement utiles à l'analyse de processus bio-géo-physiques tels que la dégradation des terres.

L'INFORMATION TEXTURALE est l'information obtenue en analysant chaque pixel par rapport à son environnement. Par exemple, un chatoiement sur une image peut être un signe d'agriculture à petite échelle, tandis que son absence peut signaler un pâturage. Dans les régions forestières, les zones lisses peuvent indiquer des forêts intactes, tandis qu'un chatoiement peut être un signe d'exploitation forestière sélective et/ou illégale.

L'INFORMATION CONTEXTUELLE fait référence à l'information que nous pouvons déduire de l'image, associée à des informations complémentaires, par exemples des données de cartes numériques ou des connaissances locales sur les conditions au sol. Il existe plusieurs types de données d'observation de la Terre, ayant un vaste ensemble d'utilisations potentielles. Le Tableau 1 résume quelques missions parmi les plus importantes de la télédétection, classées par catégorie de champ d'application potentiel.

Trends.Earth utilise deux principales séries de données pour calculer les trajectoires du NDVI – les données du spectromètre imageur à résolution modérée MODIS et celles des capteurs du radiomètre avancé à très haute résolution AVHRR. Les indices de végétation MODIS sont produits sur des intervalles de 16 jours, à des résolutions spatiales de 250m, 500m et 1000m. Les produits NDVI de cette série de données (comme l'Indice de végétation amélioré EVI produit par la même mission) résultent de la réflectance corrigée pour prendre en compte les conditions atmosphériques dans les longueurs d'onde du rouge, du proche infrarouge et du bleu. Trends.Earth utilise à la fois MODIS Terra et MODIS Aqua pour les différents processus. Les données du capteur AVHRR à bord des satellites météorologiques en orbite polaire de l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA) sont aussi une source précieuse de séries temporelles de NDVI. Trends.Earth offre l'option d'utiliser ces données en alternative aux données MODIS. Les données NDVI d'AVHRR sont des composites réunis pour obtenir des images quasiment sans nuages, avec une verdure maximale à une résolution spatiale d'1km. Compte tenu de leur résolution temporelle quotidienne, les données AVHRR sont utilisées pour produire régulièrement des images basées sur le NDVI de la surface terrestre de la planète, permettant d'assembler des séries d'images montrant les changements globaux saisonniers et annuels de végétation. Pendant plus de 35 ans, Compton J. Tucker et ses collègues ont développé les imageries NDVI à partir des données AVHRR [10, 11]. Dans le cadre du projet GIMMS (Global Inventory Monitoring and Modeling System), ces données ont été systématiquement corrigées en termes d'étalement, de géométrie de visée, d'aérosols volcaniques et d'autres effets non liés aux changements de végétation. Le résultat a été minutieusement monté et mis à jour pour produire la 3^{ème} génération de cette archive, – GIMMS NDVI3g [12].

TABLEAU 1.

RÉCAPITULATIF DES JEUX DE DONNÉES COURANTS, DE LEURS UTILISATIONS POTENTIELLES, DES RÉOLUTIONS SPATIALES ET TEMPORELLES AINSI QUE DE LA PÉRIODE COUVERTE.

VARIABLE D'OBSERVATION DE LA TERRE	MISSION / CAPTEUR	JEU DE DONNÉES / PRODUIT ^b	RÉSOLUTION SPATIALE	RÉSOLUTION TEMPORELLE	DISPONIBILITÉ
TEMPÉRATURE DE SURFACE	MODIS	MOD11	1 - 5.6 km	Quotidienne-mensuelle	2000 -
	AVHRR	IR thermique	4 - 8 km	Quotidienne-mensuelle	1981 -
	ASTER	IR thermique	90 m	Périodique/à la demande	2000 -
	Meteosat	IR thermique	3/5 km	Toutes les 15 minutes	1997 -
	LANDSAT	IR thermique	60 - 120 m	Périodique, 5-16 jours	1982 -
PRÉCIPITATIONS	TRMM/TMPA		0,25 degrés	3 heures	2008 -
	Var.	RFE	8 km	10 jours	
INONDATIONS	MODIS	MOD09, réflectance	250 - 500 m	Quotidienne-mensuelle	2000 -
	LANDSAT	Thermique	60 - 120 m	Périodique, 5-16 jours	1982 -
HUMIDITÉ DU SOL	AMSR-E/AQUA	Hyperfréquences passives	25 km	Quotidienne	2002 -
	SMAP	Hyperfréquences passives/actives	1 - 10 km	2-3 jours	2015 - 2018
COUVERTURE DE VÉGÉTATION ET TERRESTRE, DÉTAIL SPATIAL ÉLEVÉ, IMPACTS DES ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES	LANDSAT	TM, EMT+, OLI	30 m	Périodique, 5-16 jours	1982 -
	SPOT	HRV/HRVIR/HRG	2,5 - 20 m	Périodique/à la demande	1986 -
	Ikonos, Quickbird, GeoEye		0,5 - 1 m	Périodique/à la demande	2000 -
	SENTINEL-2 ^a		10 - 60 m	3-5 jours	2015 -
COUVERTURE DE VÉGÉTATION ET TERRESTRE, FAIBLE DÉTAIL SPATIAL, DYNAMIQUE TEMPORELLE	MODIS	MOD09 Réflectance	250 - 500	Quotidienne-hebdomadaire	2000 -
	SPOT/VEGETATION		1 km	Composites de 10 jours	1998 -
	AVHRR	GIMMS	8 km	Composites de 15 jours	1982 -
	MODIS	MDC12 couverture terrestre	0,5 - 5,6 km	Annuelle	2000 -
	MODIS	MOD44 changement de la végétation	250 m	3 mois	2000 - 2013

VI. SUIVI DE LA VÉGÉTATION À L'AIDE DE L'OBSERVATION DE LA TERRE

6. SUIVI DE LA VÉGÉTATION À L'AIDE DE L'OBSERVATION DE LA TERRE

La végétation est un élément d'importance vitale dans quasiment tous les écosystèmes terrestres. Organismes à activité photosynthétique, les plantes vertes convertissent l'énergie solaire en biomasse et forment la base de toutes les chaînes alimentaires terrestres. La végétation influence l'équilibre énergétique de la surface de la Terre, ainsi que de la couche limite atmosphérique, contribuant à l'atténuation des extrêmes du climat local. La végétation produit l'oxygène indispensable pour la plupart des organismes, tout en séquestrant le carbone de l'atmosphère, aide à maintenir les sols en place et donc à les développer, et offre l'habitat et la nourriture à de nombreux organismes, participant ainsi à la subsistance de la biodiversité. Compte tenu de ces rôles cruciaux dans la plupart des écosystèmes, la végétation est un élément fondamental pour la régulation de différents cycles biogéochimiques, comme l'eau, le carbone et les nutriments. La végétation contribue directement au bien-être social et au développement économique des populations, en fournissant des ressources directes (bois, nourriture, ressources médicinales), ainsi que des services indirects (protection des bassins versants, protection contre les déplacements massifs et autres services écosystémiques). La végétation est aussi source d'expérience spirituelles et culturelles pour de nombreuses populations et cultures en Afrique et dans différentes régions du monde.

6.1 LE NDVI COMME INDICATEUR DE L'ÉTAT DE LA VÉGÉTATION

Les cinquante dernières années ont vu le développement et l'utilisation de plusieurs indices de végétation. L'hypothèse sous-jacente de conception et d'utilisation de ces indices est qu'une combinaison algébrique des bandes spectrales télédétections peuvent révéler des informations précieuses, comme la structure de la végétation, l'état du couvert végétal, la densité et la distribution foliaire, la teneur en eau des feuilles, les carences en minéraux et les preuves de chocs ou d'attaques de parasites [13]. Par conséquent, la combinaison algébrique doit être sensible à un ou plusieurs de ces facteurs. À l'inverse, un bon indice de végétation doit être moins sensible aux facteurs qui affectent les réflectances spectrales, tels que les propriétés du sol, les conditions atmosphériques, l'éclairement solaire et la géométrie de visée du capteur [13, 14].

Les plantes ajustent leur structure interne et externe pour effectuer la photosynthèse. Cette structure et son interaction avec l'énergie électromagnétique ont une influence directe sur l'apparence spectrale des feuillages et des canopées, relevée à l'aide d'instruments de télédétection. La majorité des plantes ont une réflectance spectrale maximum dans l'infrarouge (Figure 6).

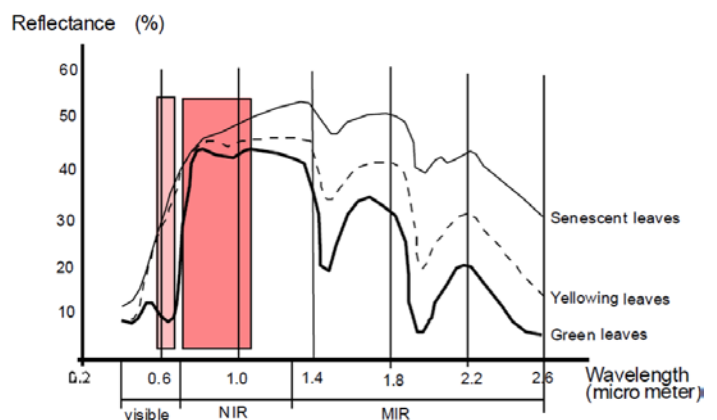


Figure 6. Caractéristiques de réponse spectrale de la végétation à trois étapes de développement⁵.

⁵ Les bandes spectrales du capteur le plus utilisé pour les études du NDVI, NOAA AVHRR, sont superposées sur la courbe de réponse spectrale. La chlorophylle de la feuille a une forte absorption à 0,45 μm et 0,67 μm et une réflectance élevée dans le proche infrarouge (0,7 – 1,1 μm). Dans l'infrarouge de courte longueur d'onde, la végétation présente trois caractéristiques d'absorption, qui peuvent être directement liées à l'absorption de l'eau contenue dans la feuille (Yengoh et al. 2015).

La réflectance est influencée par la présence de cellules palissadiques et de mésophylle spongieux. Les cellules palissadiques comprennent des chloroplastes avec le pigment chlorophyllien. La chlorophylle absorbe la plupart de la lumière rouge et bleue incidente et reflète environ 20 % de la lumière verte incidente.

Dans une feuille verte typique, la réflectance dans le proche infrarouge augmente considérablement vers 0,7-1,2 μm (environ de 76 % à 0,9 μm). Les couverts sains reflètent autant d'énergie proche infrarouge, car une feuille reflète déjà 40 à 60 % d'énergie incidente du proche infrarouge du mésophylle spongieux. Les 45-50 % restants d'énergie sont transmis à travers la feuille et peuvent être reflétés à nouveau par les feuilles situées en-dessous. La formule du NDVI est exprimée ainsi :

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{Équation 2}$$

Où NIR est la réflectance dans la bande proche infrarouge et RED la réflectance dans la bande rouge visible.

L'algorithme du NDVI profite du fait que la végétation verte reflète moins de lumière visible et plus de proche infrarouge, tandis que la végétation épaisse ou moins verte reflète une portion plus élevée de la lumière visible et moins de proche infrarouge. L'algorithme du NDVI combine ces caractéristiques de réflectance dans un ratio, un indice utile de l'activité de photosynthèse. L'échelle de valeurs obtenues par le NDVI se situe entre -1 et +1. Seules les valeurs positives correspondent à des zones de végétation. Plus l'indice est élevé, plus la teneur en chlorophylle de la cible est importante.

6.2 LE NDVI COMME INDICATEUR DE SUBSTITUTION DE LA DÉGRADATION DES TERRES

Safriel (2007) souligne que la couverture de végétation est l'indicateur le plus courant de l'état des terres. Par conséquent, les modifications de

la quantité, de la qualité et de la distribution de la végétation peuvent indiquer des changements de la capacité des écosystèmes à soutenir les communautés, en termes de ressources et de services environnementaux. Elles peuvent aussi indiquer un changement de la capacité de l'environnement à fonctionner comme avant, par exemple à contribuer aux cycles biochimiques et à subvenir aux besoins de la biodiversité. L'évaluation et le suivi des changements de la végétation (couverture, composition, structure et fonction) peuvent ainsi permettre de clarifier l'état, la santé et la qualité des ressources et des services environnementaux de la zone.

Le potentiel d'utilisation du NDVI comme indicateur de substitution à la productivité des terres (l'un des indicateurs de l'état de dégradation des terres) est basé sur des études, qui ont identifié une forte relation entre le NDVI et la productivité primaire nette (PPN) [15-17]. Les indicateurs de la dégradation des terres varient en fonction du type de dégradation examiné, de la gravité du processus de dégradation et de l'étendue spatiale de la dégradation. Par exemple, les indicateurs les plus courants de la désertification sont le changement de végétation et d'utilisation des terres, la sécheresse, les sols, l'érosion et l'urbanisation [18]. Le potentiel d'utilisation du NDVI comme variable de substitution à la productivité des terres (l'un des indicateurs de l'état de dégradation des terres) est basé sur des études ayant identifié une relation étroite entre le NDVI et la PPN [15-17].

Les fichiers de données multitemporelles fournis par les satellites simplifient l'utilisation d'images et de techniques de télédétection, afin d'évaluer les indices pertinents et de suivre l'évolution de ces indices dans le temps. Les fichiers de données disponibles pour cette analyse varient en termes de résolution d'image (spatiale, spectrale et radiométrique), de couverture spatiale, de résolution temporelle et de coût. La résolution peut être faible (AVHRR), moyenne (Landsat TM, Landsat MSS, OLI et IRS-I, ISS-II) et haute (SPOT, IKONOS, QuickBird, GeoEye- 1, Worldview-1, et WorldView-2).

6.3 CARACTÉRISTIQUES DE L'IMAGERIE POUR LES ÉVALUATIONS BASÉES SUR LE NDVI

Les produits obtenus de l'imagerie satellite viennent en plusieurs bandes spectrales, chacune correspondant à une échelle spécifique de longueurs d'onde sur le spectre électromagnétique. Pour les applications axées sur le NDVI et des indices associés, les bandes dans les longueurs d'onde de lumière visible et infrarouge sont les plus utilisées. Lors de l'utilisation de produits obtenus par satellite pour des applications environnementales, il est important de prendre en compte certaines caractéristiques des capteurs et des images. Ces caractéristiques incluent la taille de l'image, la région de la Terre où ces images ont été acquises, la résolution spatiale des images, le nombre de bandes et de longueurs d'onde détectées, les caractéristiques spectrales des bandes, la fréquence d'acquisition des images et la date d'origine du capteur [19].

Pour la plupart des applications environnementales, les produits de télédétection ne satisfont généralement pas toutes les exigences en matière de taille de l'image, de résolution spatiale et temporelle et de disponibilité. Ainsi, il faut toujours trouver un compromis entre ces caractéristiques [14, 19]. Les images à large fauchée ont tendance à être associées à une faible résolution spatiale, un volume limité de données et une résolution temporelle plus courte. Par conséquent, leur archive de séries de données cohérentes est souvent plus longue et permet d'évaluer les changements sur le long terme. Grâce à la largeur de champ des images à faible résolution, on peut couvrir et analyser de grandes superficies de la Terre en une ou quelques images. Inversement, les données à haute résolution spatiale couvrent souvent une fauchée plus limitée, sont associées à un important volumes de données et une résolution temporelle plus longue. Ainsi, les données à haute résolution spatiale demandent plus de ressources en termes de stockage, de manipulation et d'analyse. La plupart des données

à haute résolution coûtent plus cher et sont hors de portée pour de nombreux utilisateurs potentiels, en dehors des chercheurs du programme ou du pays de lancement du satellite. En général, les données à haute résolution spatiale (comme IKONOS, GeoEye et QuickBird) sont utiles pour des évaluations fines et des analyses au niveau local, tandis que les données à résolution spatiale moyenne (comme Landsat TM et Terra ASTER) sont utiles au niveau régional. Au niveau continental ou mondial, les données à résolution spatiale grossière (comme AVHRR et MODIS) forment la base des archives de séries sur le long terme et sont préférées pour certaines évaluations et analyses basées sur le NDVI [14, 19].

Les jeux de données multitemporelles fournies par les satellites simplifient l'utilisation d'images et de techniques de télédétection afin d'évaluer les indices pertinents. Elles élargissent aussi les possibilités pour suivre l'évolution de ces indices dans le temps [18, 20-26]. La résolution peut être faible (NOAA-AVHRR), moyenne (Landsat TM, Landsat MSS et IRS-I, ISS-II) et haute (SPOT, IKONOS, QuickBird, GeoEye- 1, Worldview-1, et WorldView-2).

Des efforts sont déployés pour intégrer ces jeux de données de différentes résolutions spatiales et temporelles, par exemple pour tirer le profit implicite des différentes échelles de résolution. Un exemple est l'addition de la bande panchromatique (large champ spectral, avec une grande partie de la portion visible et proche infrarouge du spectre électromagnétique et une haute résolution spatiale) à certains capteurs, afin d'améliorer la résolution spatiale. C'est le cas avec la bande panchromatique (15 mètres) du capteur Landsat 7 ETM+, dont les autres bandes font 30 mètres ou plus. En intégrant la bande panchromatique, la netteté visuelle de l'image peut être améliorée [19].

6.4 ÉVOLUTION DES DONNÉES POUR LES ÉVALUATIONS DE LA DÉGRADATION DES TERRES BASÉES SUR LE NDVI

Si les données à faible résolution spatiale ont une grande valeur d'application à l'échelle mondiale,

elles n'ont pas le niveau thématique et spatial souhaité pour les évaluations de l'habitat de pays spécifiques, de régions moins étendues et de contextes locaux, comme les études de la distribution des espèces végétales ou le suivi de la qualité des changements forestiers. La cartographie, le suivi et les évaluations au niveau national et infranational reposent surtout sur des capteurs à résolution moyenne, comme le Spectromètre imageur à résolution modérée MODIS, avec des résolutions spatiales entre 250m et 1000 m, ainsi que Landsat, le Radiomètre spatial avancé d'émission et de réflexion thermiques ASTER, le Satellite pour l'observation de la Terre (SPOT HRV) et les Satellites indiens de télédétection IRS, aux résolutions spatiales entre 15 et 60 mètres. Des capteurs optiques plus récents à haute résolution (5 mètres ou moins), comme IKONOS, Quickbird, OrbView et GeoEye, fournissent aujourd'hui suffisamment de détails spatiaux et spectraux pour distinguer des arbres individuels et parfois des espèces [27].

Même si les données de télédétection à haute et moyenne résolutions offrent de meilleures opportunités pour l'évaluation de la dégradation des terres, et pour les études et les décisions politiques associées aux niveaux national, sous-régional et local, certaines données (en particulier l'imagerie à haute résolution) ont un coût prohibitif, en termes d'acquisition et de traitement, pour de nombreux gouvernements et institutions de recherche [27].

La famille de produits Landsat pour les évaluations et le suivi des changements d'occupation et d'utilisation des terres est de plus en plus utilisée depuis son lancement au début des années 1970, principalement grâce à la résolution relativement fine de Landsat pour les études des changements d'utilisation des terres, ainsi que la cohérence temporelle du jeu de données et sa couverture mondiale [26].



Cerrado, sustainable agriculture, © Renato Moreira, Oréades

Les produits Landsat ont prouvé le potentiel d'utilisation de données gratuites pour l'évaluation⁶ et le suivi des changements environnementaux (principalement de l'évolution de la couverture forestière) au niveau mondial [26]. Kim et al. [28] ont examiné et proposé des solutions aux principaux défis de création de produits mondiaux sur la couverture forestière et ses changements, aux résolutions de Landsat. Ces défis comprennent entre autre les processus et les outils de correction atmosphérique, les coefficients corrects d'étalonnage, les différentes phénologies des compilations, la correction du relief, l'évaluation correcte de la précision et l'automatisation de la caractérisation de l'occupation terrestre et de la détection des changements [26]. Cette étude démontre que les jeux de données existants peuvent permettre une évaluation solide de certaines formes de dégradation des terres, à condition de faire preuve de vigilance pour remédier aux lacunes connues.

⁶ La phénologie est l'étude scientifique des relations entre le climat et des phénomènes biologiques périodiques tels que les migrations et la reproduction des oiseaux, la floraison et la fructification des plantes, etc.

VII. UTILISATION DE LA VÉGÉTATION POUR ÉVALUER LES CHANGEMENTS DE CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES

7. UTILISATION DE LA VÉGÉTATION POUR ÉVALUER LES CHANGEMENTS DE CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES

Il est essentiel de comprendre les changements de l'état de végétation qui sont associés à des facteurs environnementaux, afin de savoir comment utiliser la végétation comme indicateur de substitution pour l'évaluation et le suivi, dans le temps et dans l'espace, de la situation des terres. Le calendrier et la récurrence des événements du cycle de vie des plantes sont déterminés par des facteurs environnementaux dans les systèmes naturels, tels que les forêts conservées et d'autres formations naturelles de végétation qui ne sont pas affectées par les activités humaines, mais sont aussi dépendants de facteurs humains dans les systèmes gérés, tels que les zones de cultures.

7.1 CONTRIBUTIONS AUX CHANGEMENTS DES CARACTÉRISTIQUES SPECTRALES DE LA VÉGÉTATION

Du fait d'influences humaines et naturelles, la végétation subit des changements dans l'espace et dans le temps. Ces changements peuvent altérer les propriétés spectrales de la végétation, et peuvent ainsi être évalués à l'aide des données et des méthodes d'observation de la Terre. Les changements spatiaux du NDVI peuvent refléter des différences ou des modifications de types d'espèces, la présence de végétation perturbée dans une zone présentant un type de végétation similaire, voire des variations de conditions climatiques.

Les changements temporels reflètent plutôt l'évolution de facteurs qui varient dans le temps, certains récurrents à intervalles réguliers et d'autres non. Il peut s'agir de changements de saisons, d'étapes du cycle de culture et de facteurs humains comme la récolte. Les changements de la végétation qui peuvent être suivis à l'aide de méthodes d'observation de la Terre sont classés en quatre grandes catégories [29, 30] :

LES CHANGEMENTS ABRUPTS sont provoqués par des perturbations qui peuvent transformer un paysage, du moins à court terme. Ces perturbations incluent des activités telles que l'exploitation forestière, la déforestation, l'expansion agricole et la combustion de la végétation par le feu. Ces événements peuvent altérer radicalement les propriétés spectrales de la surface terrestre et sont facilement visibles sur l'imagerie satellite.

LES CHANGEMENTS SAISONNIERS suivent le profil cyclique intra-annuel et interannuel de la phénologie, avec des tendances prévisibles, et en grande partie reproductibles, de verdissement et de sénescence (voir dans le Tableau 2 et la Figure 11 la répartition annuelle des cycles phénologiques des plantes). Les changements phénologiques peuvent aussi avoir des impacts marqués sur les caractéristiques spectrales de la végétation. La reproductibilité facilite l'identification de ruptures dans le profil prévisible en cas de perturbation de la végétation.

LES CHANGEMENTS GRADUELS sont des modifications subtiles de l'état des communautés végétales. Ils ne sont généralement pas associés aux cycles phénologiques normaux. Ces changements d'état des communautés de plantes peuvent être liés à la succession naturelle, à la pression du pâturage et à des variations du biome dues au climat. Les changements peuvent aussi être liés à des dégâts sur la végétation provoqués par des insectes, des maladies, la sécheresse ou des tempêtes [31, 32].

LES CHANGEMENTS ANODINS DE LA VÉGÉTATION SUR LE COURT-TERME sont des événements qui provoquent des changements spectraux de la végétation que l'on considère sans importance à long terme

sur le plan écologique. Il peut s'agir, par exemple, d'épisodes de pluie, qui affectent les propriétés spectrales du sol, ou de vent qui influence l'angle des feuilles, au moment de l'acquisition des données.

7.2 SÉRIES TEMPORELLES DANS LES ÉTUDES DES CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX

Une série temporelle est une collection d'observations d'éléments quantitatifs obtenues par des mesures répétées dans le temps (voir l'exemple de la Figure 7). Cette série de points de données est indexée par ordre chronologique (heures, jours, semaines, mois, années). Il est courant qu'une séquence de série temporelle soit prise à des intervalles de temps successifs égaux, ce qui en fait une séquence de données en temps discret. Les données des séries temporelles peuvent être générées pour une variété d'analyses dans presque toutes les disciplines scientifiques.

L'utilisation la plus courante en télédétection est l'analyse temporelle de trajectoires, en opposition à la détection bitemporelle des changements [33]. Pour l'évaluation et le suivi de la dégradation des terres à l'aide d'indicateurs environnementaux de substitution, le NDVI est utilisé comme variable dépendante pour l'établissement de trajectoires de changement.

Il existe deux principaux types de série temporelle : le stock et le flux. Dans le cas du stock, on mesure certains attributs (valeur ou quantité) à un moment donné (nombre de fermes en jachère ou taux de chômage par exemple). Pour le flux, une activité est mesurée sur une période donnée (précipitations sur les jours de la semaine ; NDVI sur les mois de l'année ou débit d'un cours d'eau sur les années de la décennie). La principale différence réside dans le fait que le flux est plus susceptible d'être affecté par des effets liés au calendrier. Par exemple, la saison des pluies (associée à une augmentation de l'activité végétale dans les milieux arides et semi-arides) est généralement une période

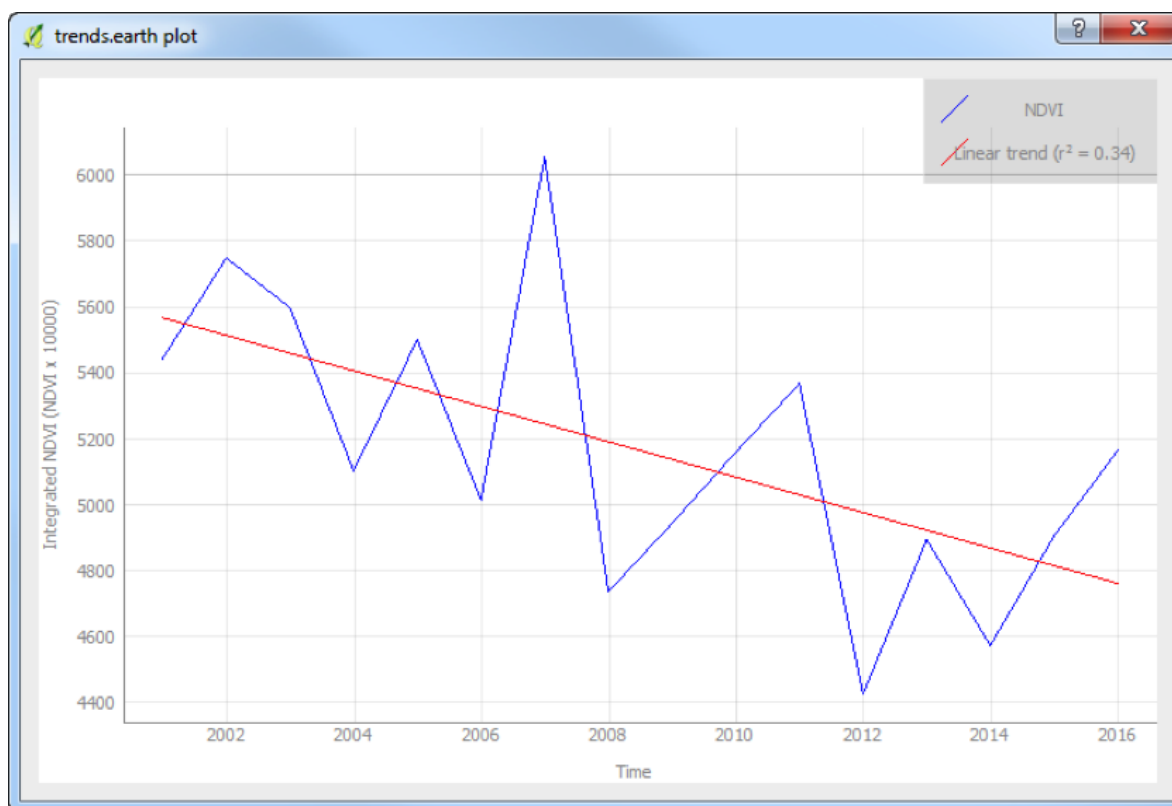


Figure 7. Extrait de Trends.Earth de séries temporelles de NDVI d'une rizière dans l'ouest du Kenya. Les données proviennent d'images MODIS (MOD13Q1) à 250 mètres, à des intervalles de 16 jours pour un seul pixel.

clairement déterminée de l'année calendaire dans beaucoup de régions. Le stock et le flux peuvent être corrigés des variations saisonnières à l'aide du même processus d'ajustement. La correction des variations saisonnières est le processus d'estimation, puis de suppression, des influences systématiques et calendaires d'une série temporelle. Cette correction des données observées est importante, car les effets saisonniers peuvent occulter la vraie tendance. Les effets saisonniers peuvent aussi masquer des caractéristiques non saisonnières qui peuvent être importantes pour les analystes. Malgré son importance, la correction des variations saisonnières ne doit être effectuée qu'après examen attentif. Lorsqu'une série temporelle est dominée par des éléments tendanciels ou irréguliers, il est quasiment impossible d'identifier et de supprimer le peu de variations saisonnières présent. Dans ce cas, ajuster une série non-saisonnière est irréalisable, et une telle correction introduira souvent un élément saisonnier artificiel dans la série.

Les séries temporelles sont importantes, car elles peuvent servir à identifier et à analyser des schémas caractéristiques de comportement ou de performance dans le temps. Ainsi, elles permettent de rajouter dans les estimations une perspective historique sur la variable étudiée, ainsi que d'établir des prévisions sur cette variable.

Une série temporelle peut être décomposée en quatre composantes (voir les illustrations de la Figure 14) : la tendance durable (direction régulière à long terme), la composante cyclique (des hauts et des bas de durée non constante) ; la composante saisonnière (changements systématiques, liés au calendrier) et la composante irrégulière (fluctuations non systématiques, à court terme, appelées aussi résidus).

La **TENDANCE DURABLE** est le profil à long terme d'une série temporelle. Une tendance peut être positive ou négative, selon que la série temporelle présente une hausse sur le long terme ou une baisse sur le long terme. La tendance durable peut être linéaire ou non linéaire (exponentielle ou quadratique).

Une **COMPOSANTE CYCLIQUE** existe lorsqu'il y a un mouvement à la hausse et à la baisse sur une période. Les variations cycliques sont ainsi des fluctuations quasi-régulières de la tendance à long terme. Elles peuvent durer plus qu'une année calendaire et existent souvent dans les cycles conjoncturels. La durée de chaque cycle dépend du type d'entreprise ou d'industrie étudié.

Une **COMPOSANTE SAISONNIÈRE** existe lorsqu'il est montré qu'une série est influencée par des facteurs saisonniers (comme la saison de l'année). La saisonnalité est toujours d'une période fixe et connue, et peut être identifiée par des pics et des creux à intervalles réguliers dans une série temporelle, d'une direction constante et approximativement de la même amplitude par rapport à la tendance.

La **COMPOSANTE IRRÉGULIÈRE** est l'élément résiduel après l'estimation et la suppression des composantes saisonnières et tendanciennes. Elle porte aussi le nom de résidu. La composante irrégulière provient des fluctuations sur le court terme, qui ne sont ni systématiques ni prévisibles. Dans une série très irrégulière, ces fluctuations peuvent dominer les mouvements, ce qui masquera la tendance et la saisonnalité de la série.

7.3 ÉVALUATION DE CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX À L'AIDE D'UNE SÉRIE TEMPORELLE D'IMAGES

Avant de se lancer dans l'évaluation et la notification des changements, quelle que soit la source de données et de méthodologies, il est important de définir ce qu'est un changement et ce qui peut être compris comme un changement dans le contexte étudié. Ce qui peut être accepté comme un changement peut parfois être contextuel, voire controversé. Ceci s'applique particulièrement à la définition et à l'interprétation de changements censés indiquer l'évolution du bien-être socioéconomique et culturel des populations. Il est conseillé d'adopter une approche holistique pour parvenir à cette définition, en impliquant toutes les parties prenantes associées au phénomène étudié.

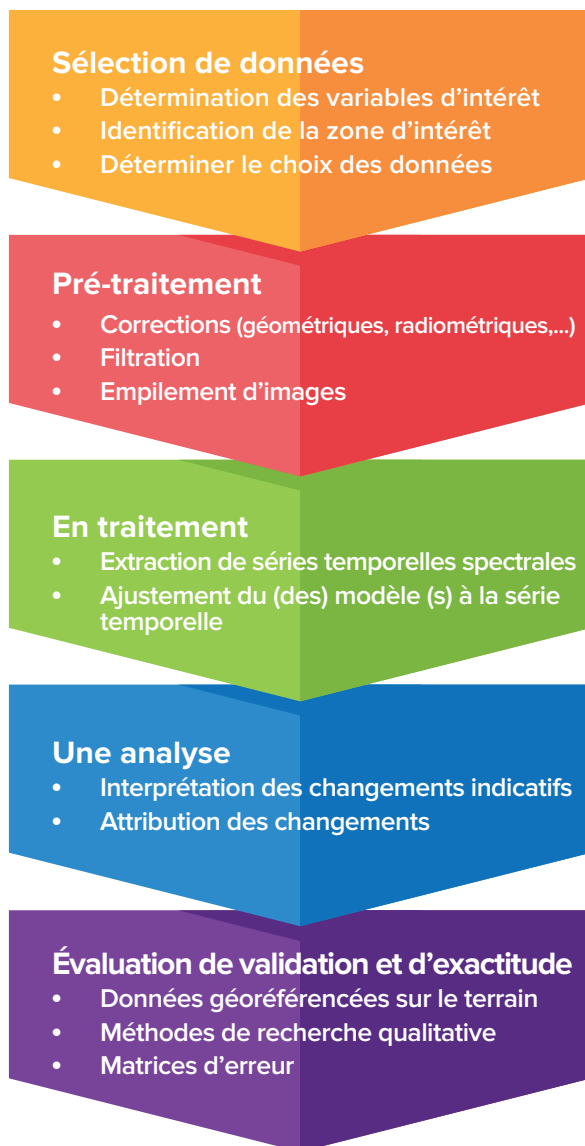


Figure 8. Flux du processus général de déduction et d'analyse de séries temporelles de NDVI pour les études des changements de la couverture terrestre.

7.4 SÉLECTION DES DONNÉES

L'étape initiale consiste à sélectionner les images adaptées à la tâche (Figure 8). Plusieurs éléments sont à considérer afin de déterminer le choix des données pour une étude de série temporelle de changement du couvert terrestre ou de la dynamique de la végétation. Les résolutions (temporelle, spatiale et radiométrique) des données sont parmi les éléments les plus importants. Les intervalles entre les données sont aussi importants,

car les différentes applications d'une analyse de série temporelle peuvent requérir différentes options. Certaines analyses demandent des données à intervalles égaux (par exemple, la période du pic annuel de phénologie), tandis que d'autres peuvent se contenter d'un relevé entier de séries à intervalles irréguliers. Les applications des données d'observation de la Terre pour l'évaluation des changements de la couverture terrestre doivent prendre en compte plusieurs caractéristiques de capteur et d'image :

1. La **RÉSOLUTION SPATIALE** fait référence à la taille du plus petit élément que peut détecter un capteur satellite ou qui peut être visible sur une image. Elle est limitée par la taille du pixel, qui dépend du champ de vision instantané du capteur (mesure de la surface au sol captée à un instant donné). Par conséquent, une image à haute résolution détaillée a une taille de pixels réduite, tandis qu'une image à faible résolution a de grands pixels, qui ne révèlent que des caractéristiques grossières. Lorsqu'on utilise une image satellite pour détecter des changements, le pixel est l'unité fondamentale de l'analyse et sert à détecter et à mesurer les changements sans tenir compte du contexte spatial.
2. La **RÉSOLUTION TEMPORELLE** fait référence à l'intervalle de temps entre les images pendant lequel une zone donnée peut être enregistrée. Par exemple, l'intervalle entre les passages de SeaWiFS est de 2 jours, 16 jours pour Landsat TM, 26 jours pour SPOT et 35 jours pour IKONOS. Certaines applications du NDVI peuvent se contenter de données à longues résolutions temporelles ; d'autres, comme les systèmes d'alerte précoce en cas de perte soudaine d'habitats à cause de phénomènes tels que les feux ou l'exploitation forestière illégale, peuvent exiger des acquisitions quotidiennes ou hebdomadaires.

3. La **TAILLE DE L'IMAGE** fait référence à la surface couverte par une image, définie par la largeur de fauchée et la distance du satellite. Les largeurs de fauchée vont de 8 km à 2000 km.
4. La **DISPONIBILITÉ DES IMAGES** est un élément crucial ; l'accès à des sources abordables de données ayant les résolutions spatiales et temporelles correctes détermine la portée d'une évaluation. En dépit du nombre de types et de sources d'images satellites, seules certains conviennent à l'évaluation de nombreux phénomènes environnementaux à l'échelle d'un pays, à cause de coûts trop élevés ou de taille trop réduite des archives. .

Les jeux de données multitemporelles sont essentiels à l'évaluation et au suivi de la dégradation des terres [18, 20, 22, 26]. Pour la plupart des applications environnementales, les produits de télédétection disponibles satisfont rarement les exigences indiquées ci-dessus. Il faut ainsi faire des compromis. Une large fauchée à faible résolution spatiale signifie que de grandes surfaces peuvent être couvertes par une ou quelques images, et ainsi le volume de données est modeste. Ces systèmes ont généralement une longue archive de données cohérentes, permettant d'évaluer une évolution sur le long terme. Les données à haute résolution spatiale sont associées à une fauchée moins large, un intervalle de passage plus long et un volume important de données, qui exige un effort conséquent de stockage, de manipulation et d'analyse. Ces jeux de données sont généralement chers et hors de portée de la plupart des utilisateurs potentiels, en-dehors des chercheurs du programme ou du pays de lancement du satellite. Les données à haute résolution spatiale (IKONOS, GeoEye, QuickBird, Worldview-1 et 2) sont appliquées aux évaluations de détail, par exemple l'agriculture de précision. Les données à résolution spatiale moyenne, comme Landsat TM et Terra ASTER sont utilisées à l'échelle régionale. Les données à faibles résolution spatiale comme AVHRR et MODIS alimentent des longues archives de séries temporelles, précieuses pour les évaluations fondées sur le NDVI, de l'échelle nationale à mondiale.

Pour un résultat optimal, des efforts sont entrepris pour intégrer les jeux de données de différentes résolutions spatiales et temporelles. Un exemple est le rajout de la bande panchromatique (une grande partie de la portion de lumière visible et proche infrarouge du spectre électromagnétique, avec une résolution de 15 mètres) du capteur Landsat 7 ETM+, à d'autres de 30 mètres ou plus, améliorant ainsi la netteté visuelle des images.

7.5 PRÉTRAITEMENT DES DONNÉES D'IMAGE

Après la sélection du jeu de données, plusieurs étapes de traitement initiale sont nécessaires pour ajuster les données à l'analyse (Figure 8). Une série temporelle provenant d'images satellites contient une combinaison de changements saisonniers, graduels et abrupts de l'écosystème, en parallèle aux données. Elle présente aussi un bruit introduit par l'environnement de télédétection, des erreurs géométriques, une dispersion atmosphérique, des nuages [34], et de nombreux autres phénomènes qu'il convient de traiter pour obtenir un format parfait pour l'analyse. Le prétraitement des données implique plusieurs tâches de correction des erreurs et du « bruit », généralement à l'aide de pratiques établies. L'objectif final est d'améliorer la qualité des images, en réduisant ou en éliminant les erreurs radiométriques et géométriques provoquées par des conditions internes et externes lors de la capture de l'image.

Lorsqu'un capteur à bord d'un engin spatial ou d'un avion observe l'énergie électromagnétique reflétée par un corps au sol, cette énergie est influencée par des facteurs tels que l'azimut du soleil, la brume, les aérosols, l'élévation du terrain, etc. Le rayonnement électromagnétique peut être décrit comme présentant un « bruit », qui le différencie de l'énergie observée du corps, et des distances bien plus courtes. La correction radiométrique implique la suppression du « bruit » du capteur ou de l'atmosphère, afin d'obtenir la vraie irradiance ou réflectance. Ceci peut induire une modification des valeurs du compte numérique pour prendre en compte le « bruit » provenant de l'atmosphère entre le capteur et la surface terrestre, la géométrie soleil-capteur, ainsi que les erreurs et les écarts du capteur lui-même.

Les images peuvent présenter une déformation géométrique, à cause soit d'une distorsion interne provenant de la géométrie du capteur, soit d'une distorsion externe provoquée par la forme de l'objet ou la géométrie de la surface d'observation. Ces déformations peuvent entraîner un décalage entre les coordonnées réelles de l'image et les coordonnées de projection et d'utilisation de l'image. La correction géométrique est le processus consistant à établir le lien entre le système de coordonnées de l'image et le système de coordonnées géographiques, à l'aide d'éléments tels que les données d'étalonnage du capteur et les données mesurées de position et d'altitude. La correction géométrique vise à éviter les déformations géométriques.

Après avoir effectué les différentes corrections, les étapes suivantes dépendent du type d'analyse souhaité. Pour les classifications de la couverture terrestre par exemple, pour lesquelles une évaluation visuelle et la contribution des utilisateurs peuvent être requises, les images sont améliorées en termes d'apparence visuelle des objets. Il existe de nombreuses techniques d'amélioration d'image [35]. Parmi les plus courantes, on peut citer la réduction de l'image, son agrandissement, le réglage du contraste, le rapport des bandes, l'extraction du transect, le filtrage spatial, les transformations de Fourier, l'analyse des principales composantes et la transformation de la texture. Les procédures de rehaussement de l'image servent à améliorer l'interprétabilité visuelle, en renforçant la distinction apparente entre les éléments de la scène. Le but est de tirer une image, à partir de l'image originale, qui permette d'interpréter visuellement plus d'informations [35]. Les opérations de rehaussement sont généralement appliquées aux données après les procédures de restauration, particulièrement d'élimination du bruit, un prélude important à la plupart des procédures de rehaussement. Au-delà de ces techniques, les données pour l'analyse pixel par pixel d'une série temporelle peuvent requérir l'application de filtres spéciaux pour lisser les données brutes. Ces processus utilisent différents filtres pour différentes tâches.

7.6 ANALYSE DES DONNÉES

L'analyse des séries temporelles implique des méthodes d'extraction de la signification et d'autres caractéristiques des données. Le traitement des images numériques dépend principalement de la luminance des éléments de l'image (appelés pixels) dans chaque bande. La luminance de chaque pixel est ensuite traduite en compte numérique. Il s'agit d'une échelle d'intensité de gris allant du plus faible (noir) de 0 au plus élevé, qui dépend de la taille en bits du pixel. Par exemple, pour une image de 8 bits, l'intensité maximale sera de 255 (ou blanc) ; 65535 pour une image de 16 bits ; 16777215 pour une image de 24 bits. Un compte numérique dans une bande spécifique indiquera l'intensité de la luminance à cette longueur d'onde.

Lorsque les données d'une série temporelle servent à analyser l'activité de la végétation, nous nous intéressons à quelques questions au niveau conceptuel :

- Existe-t-il une tendance perceptible de l'activité de la végétation, et quelle est son importance ? En d'autres termes, les mesures ont-elles tendance à augmenter (ou à diminuer) dans le temps ?
- Y a-t-il une saisonnalité, c'est-à-dire un schéma de hauts et de bas qui se répète régulièrement, en relation avec les saisons calendaires ?
- Des valeurs irrégulières sont-elles présentes, qui sortent de la tendance générale de la végétation ? En d'autres termes, observe-t-on des cas de performance très positive ou très négative de la végétation (signalée par des valeurs aberrantes sur la ligne de régression) ?
- Des changements abrupts sont-ils notés au niveau de la série ou de la variance ?

Pour l'analyse statistique de séries temporelles sur plusieurs décennies (en particulier les variations liées au climat), les paramètres statistiques les plus courants, dérivés de séries temporelles sur une base par pixel sont : la moyenne, le minimum/

maximum, l'écart type, la variabilité, les anomalies, les tournants décisifs et les tendances [36]. Les valeurs de ces paramètres statistiques pour le NDVI peuvent être utilisées pour examiner la série temporelle (Figure 9).

PROPRIÉTÉS PHÉNOLOGIQUES : Une série multiannuelle de l'activité de la végétation comprend plusieurs cycles annuels, concaténés pour former une telle série. Chaque cycle annuel d'activité de la végétation présente des caractéristiques phénologiques et des termes spécifiques pour les comprendre et les évaluer. United States Geological Survey a compilé ces termes, qui comprennent la plupart des aspects d'activité phénologique des plantes, ainsi que les implications associées pour l'interprétation des données de NDVI. Ces termes (Tableau 2)

sont définis dans une optique phénologique pour l'évaluation et le suivi de la végétation, à l'aide du NDVI.

TIMESAT est un progiciel développé par Per Jonsson et Lars Eklundh pour l'analyse des séries temporelles de données satellite de télédétection [37]. Le logiciel examine la saisonnalité des données des séries temporelles et leur relation avec les propriétés dynamiques de la végétation [37-39]. Ces paramètres de saisonnalité comprennent (a) le début de la saison, (b) la fin de la saison, (c) la durée de la saison, (d) la valeur de base, (e) le milieu de la saison, (f) la valeur maximale, (g) l'amplitude, (h) petite valeur intégrée, (h+i) grande valeur intégrée (voir la Figure 10).

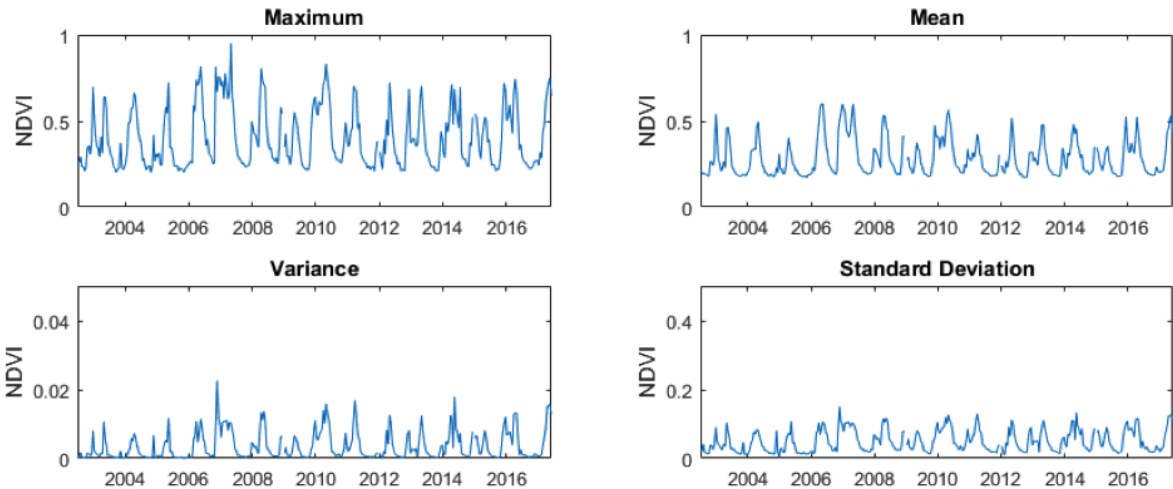


Figure 9. Statistiques du NDVI pour une zone à Boka Dovu, près d'Arusha en Tanzanie. Ce sont des statistiques sommaires pour des images MODIS (MOD13Q1) de 81 pixels, à une résolution de 250 mètres, sur des intervalles de 16 jours.

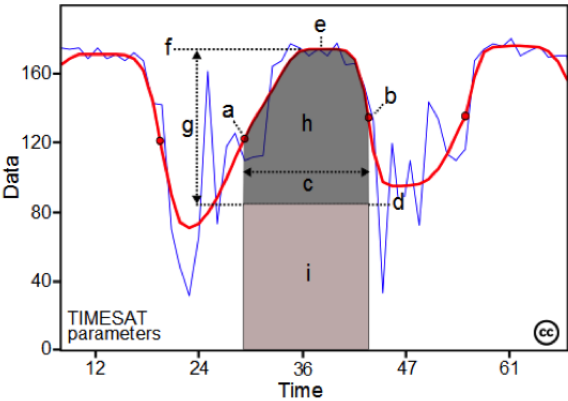


Figure 10. Paramètres de saisonnalité générés par une session de TIMESAT. Source : page web de TIMESAT à <http://web.nateko.lu.se/timesat/timesat.asp>

TABLEAU 2.

INTERPRÉTATION DES DONNÉES PHÉNOLOGIQUES ANNUELLES⁷

ACRONYME	INTERPRÉTATION PHÉNOLOGIQUE	LA DESCRIPTION
SOST : DÉBUT DE LA SAISON - DATE	Début de la photosynthèse mesurable dans la canopée de la végétation	Jour de l'année identifié comme présentant une tendance à la hausse soutenue dans une série temporelle de NDVI
SOSN : DÉBUT DE LA SAISON – NDVI	Niveau d'activité photosynthétique au début de la photosynthèse mesurable	Valeur du NDVI (référence) correspondant au jour de l'année identifié comme présentant une tendance à la hausse soutenue dans une série temporelle de NDVI
EOST : FIN DE LA SAISON – DATE	Fin de la photosynthèse mesurable dans le couvert végétal	Jour de l'année identifiée comme ayant une tendance à la baisse soutenue dans une série temporelle de NDVI
EOSN : FIN DE LA SAISON– NDVI	Niveau de l'activité photosynthétique à la fin de la photosynthèse mesurable	Valeur du NDVI correspondant au jour de l'année identifié à la fin d'une tendance à la baisse soutenue dans une série temporelle de NDVI
MAXT : DATE DU MAXIMUM	Date de la photosynthèse maximum du couvert	Jour de l'année correspondant au NDVI maximum dans une série temporelle annuelle
MAXN : NDVI MAXIMUM	Niveau maximum d'activité photosynthétique du couvert végétal	NDVI maximum dans une série temporelle annuelle
DUR : DURÉE	Durée de l'activité photosynthétique (saison de croissance)	Nombre de jours entre SOST et EOST
AMP : AMPLITUDE	Augmentation maximum de l'activité photosynthétique du couvert au-dessus de la référence	Différence entre MAXN et SOSN
DIFFÉRENCE ENTRE MAXN ET SOSN	Activité synthétique du couvert pendant toute la saison de croissance	Intégration quotidienne interpolée du NDVI supérieur à la référence pour toute la durée de la saison de croissance

⁷ Source USGS : https://phenology.cr.usgs.gov/methods_metrics.php

TIMESAT est un logiciel open source, offrant trois fonctions différentes de lissage pour ajuster les données des séries temporelles (Gaussienne asymétrique, double logistique et filtrage adaptatif de Savitzky–Golay), ainsi qu'un système de pondération, défini par l'utilisateur et à appliquer au processus de lissage.

RÉGRESSION LINÉAIRE : La régression linéaire des intégrales annuelles de données NDVI est l'une des méthodes les plus courantes d'analyse des tendances de la dynamique de la végétation. Selon cette procédure, les tendances linéaires sont estimées par une régression des données comme fonction du temps sur le(s) pixel(s) d'intérêt (Figure 12). Les tendances sont un élément commun des données de séries temporelles. À l'aide de la régression, nous pouvons modéliser et prévoir la tendance des données d'une série temporelle en incluant $t=1,...,T, t=1,...,T$, comme variable de prévision :

$$y_t=\beta_0+\beta_1t+\epsilon_t.$$

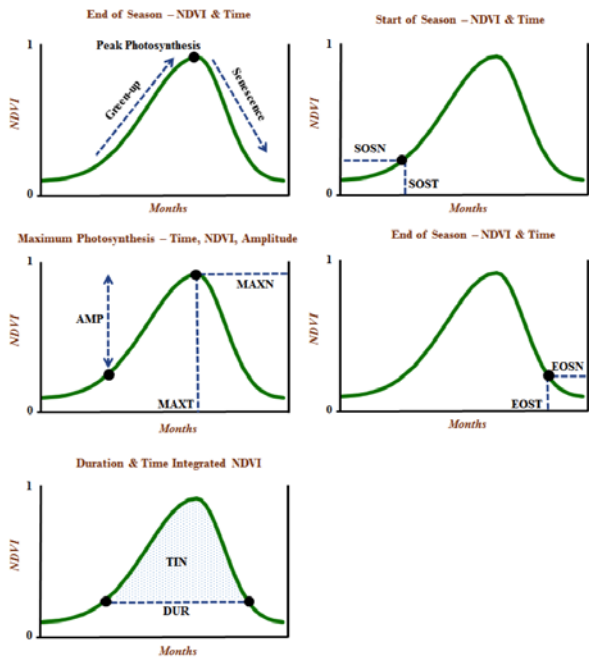


Figure 11. Illustration du cycle de végétation, indiquant des métriques phénologiques clés. Voir le tableau 2 à la page 39 pour l'interprétation des acronymes.

Une analyse de régression linéaire produit une équation de la droite de régression linéaire, qui explique la relation entre les valeurs du NDVI et la date des cellules d'intérêt. Une pente positive indique une tendance à la hausse, et une pente négative une tendance à la baisse. Il s'agit d'une procédure courante pour vérifier la signification des pentes, à l'aide d'un test de signification avec un niveau de confiance prédéterminé, pour cerner la force de la tendance positive ou négative. Lors de l'examen de la dégradation des terres, la simple présence d'une tendance négative du NDVI n'indique pas nécessairement une manifestation de la dégradation. Plusieurs facteurs peuvent contribuer aux tendances négatives du NDVI. Par exemple, dans les écosystèmes agricoles, la modification du type de culture peut contribuer à une tendance négative, sans forcément signifier une dégradation des terres.

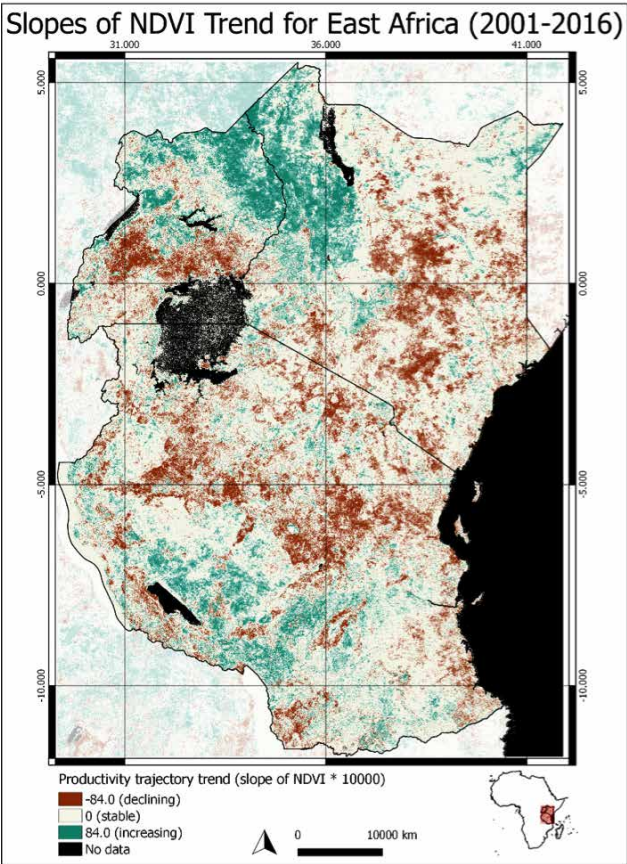


Figure 12. Pentas des tendances de NDVI dans trois pays d'Afrique de l'Est (Kenya, Tanzanie et Ouganda) pour la période 2000-2016. Les données sont dérivées d'images MODIS (MOD13Q1) à 250 mètres sur des intervalles de 16 jours.

ANALYSE DE LA TENDANCE SAISONNIÈRE : L'analyse de la tendance saisonnière sert à identifier les tendances du caractère essentiel du cycle saisonnier, tout en en rejetant le bruit et la variabilité à court terme. Eastman et al. [40] expliquent en détail ce mécanisme et son utilisation. Le processus est basé sur une analyse en deux étapes de la série temporelle. Lors de la première étape, une régression harmonique est appliquée à chaque année d'images de la série temporelle, pour extraire une séquence annuelle de la verdure globale et l'amplitude et la phase des cycles annuels et semi-annuels [41]. Pour ces paramètres de verdure, l'amplitude 0 représente le NDVI moyen annuel et la verdure globale chaque année, l'amplitude 1 représente le pic de verdure annuelle et la phase 1 indique la date du pic de verdure annuel, représenté par la position du point de départ du signal sinusoïdal représentant la verdure annuelle. Une augmentation de l'angle de la phase indique un déplacement de la période plus tôt dans l'année, tandis qu'une baisse de l'angle de la phase indique un déplacement de la période plus tard dans l'année. Eastman et al. [41] ont identifié que les valeurs de la phase peuvent varier de 0 à 359, chaque 30° indiquant un déplacement d'environ un mois calendaire. Lors de la deuxième étape, les tendances au cours des années des paramètres de verdure ont été analysées à l'aide de l'estimateur de pente médiane de Theil-Sen. Ce processus est solide pour une variabilité interannuelle à court-terme, jusqu'à 29 % de la longueur de la série [40].

ANALYSE DE LA TENDANCE MONOTONE DE MANN-KENDALL : L'analyse de la tendance monotone de Mann-Kendall est un indicateur de tendance non paramétrique, calculant le degré auquel une tendance baisse ou augmente de façon soutenue [42]. Le test de tendance détermine si les données augmentent ou diminuent entre deux points de données successifs (combinaisons de paires de valeurs), en temps et en valeur, avec un incrément de 1 et un décrétement de -1. La statistique de Mann-Kendall produite est ainsi la fréquence relative des baisses moins la fréquence relative des hausses et varie de -1 à 1. Une tendance positive indiquera que les données augmentent plus souvent qu'elles ne baissent dans le temps, et vice versa (Figure 13). Si la simple régression linéaire a tendance à être sensible aux valeurs aberrantes, le test de tendance de Mann-Kendall y est résistant [42].

PENTE DE THEIL-SEN (TS) : La procédure de Theil-Sen (TS) est une méthode statistique non paramétrique, basée sur le classement des valeurs, pour calculer la médiane des pentes entre des combinaisons de paires dans le temps, et peut tolérer jusqu'à environ 30 % d'observations bruyantes sans influencer l'estimation de la tendance [43, 44]. Le test de Theil-Sen est résistant à la saisonnalité, à la non normalité et à la dépendance sérielle [43, 44]. Il est employé pour quantifier les tendances temporelles dans les séries temporelles de NDVI. Ainsi, la procédure de Theil-Sen est efficace pour déterminer les tendances d'une série bruyante, car elle effectue des estimations multiples de la pente dérivées de toutes les paires d'observations [43, 44].

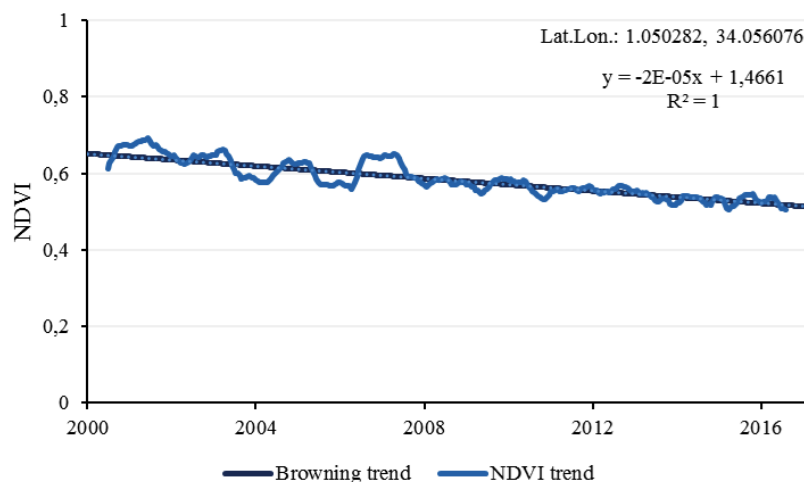


Figure 13. Tendance de brunissement d'une vallée faisant l'objet de cultures intensives dans l'est de l'Ouganda. Les données portent sur des valeurs de NDVI brutes pour un seul pixel MODIS (MOD13Q1) à 250 mètres, sur des intervalles de 16 jours.

BFAST (BREAKS FOR ADDITIVE SEASONAL AND TREND) :

Les calculs des tendances du NDVI sur le long terme, telles que celles dérivées de la méthode des moindres carrés ou d'une analyse de Mann-Kendall, indiquent la tendance générale de la végétation sur toute la période d'étude. Cette analyse ne permet pas de voir si certains épisodes de performance de la végétation ne suivent pas la tendance générale de toute la série. En d'autres termes, on pourrait souhaiter savoir si la végétation a connu des périodes de tendances différentes du schéma général, sur la durée. La tendance générale observée a-t-elle été interrompue ? Une rupture dans une série temporelle indique un changement entre les tendances positives et négatives sur une période d'analyse [45]. BFAST [29, 46] est devenu l'un des

dans une série temporelle. BFAST⁸ intègre la décomposition d'une série temporelle en composantes de tendance, de saison et de résidu (Figure 14 et Figure 15).

Le processus estime de façon itérative le moment et le nombre de changements abrupts dans la série temporelle et caractérise le changement en termes de magnitude et de direction [29, 46]. Le progiciel *BFAST* en R a permis de classifier les tendances selon les classes suivantes : hausse monotone ; baisse monotone ; hausse monotone – avec une rupture positive ; baisse monotone – avec une rupture négative ; interruption – hausse avec une rupture négative ; interruption – baisse avec une rupture positive ; inversion – hausse à baisse ; inversion – baisse à hausse (Figure 15).

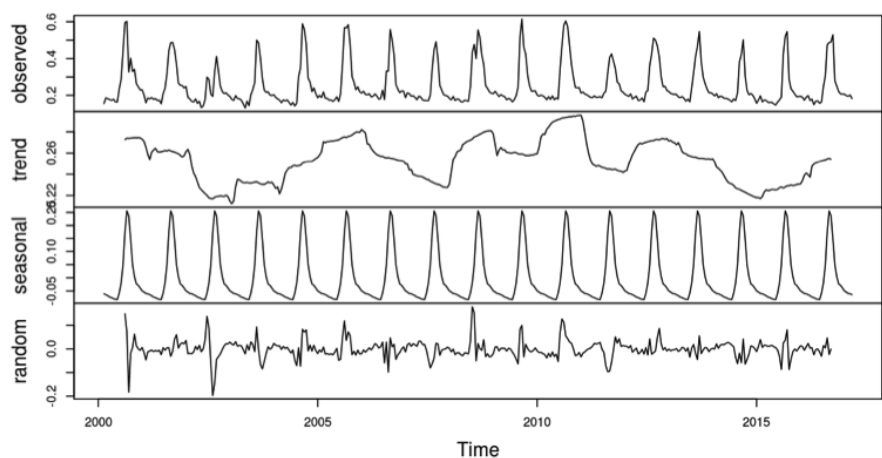


Figure 14. Décomposition à l'aide de BFAST d'une série temporelle en composantes principales (tendance, saisonnière et aléatoire) pour une zone très pâturée de six hectares à Dodji au Sénégal. Les données proviennent d'images MODIS (MOD13Q1) à 250 mètres sur des intervalles de 16 jours.

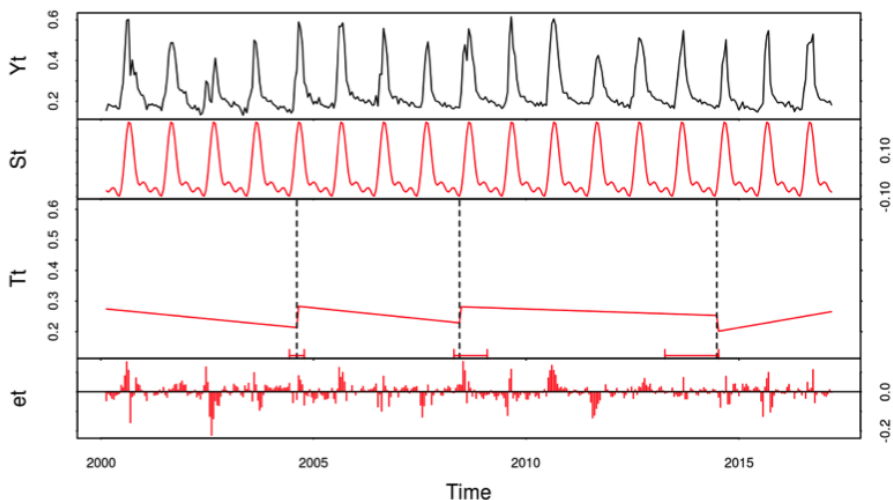


Figure 15. Graphe BFAST pour Dodji au Sénégal. Yt = données originales ; St = composante saisonnière ajustée ; Tt = tendances avec points de rupture ; et = résidu (bruit estimé).

⁸ Le progiciel BFAST pour une mise en œuvre dans un environnement de R (<http://bfast.r-forge.r-project.org>) a été conçu par le Laboratoire des sciences de l'information géographique et de télédétection de l'Université de Wageningen. Description par Jan Verbesselt : Le progiciel BFAST offre des fonctionnalités génériques pour le suivi continu des changements, l'analyse des tendances et la détection en temps quasi-réel de toute forme de perturbation ou de processus de changement (dégradation forestière graduelle à plus abrupte, sécheresse). Les méthodes peuvent être appliquées à n'importe quelle série d'images satellite, par exemple MODIS, Landsat, Rapid Eye ou RADAR (voir les publications ci-après). En outre, des fonctions génériques bfast de détection de changement, pour la segmentation d'une série temporelle, ou bfastmonitor, pour un suivi en temps quasi réel, peuvent être appliquées à tout type de série temporelle, comme les précipitations, la température ou la dendrochronologie.

COEFFICIENT D'EFFICACITÉ PLUVIALE⁹ (CEP) : Le concept de coefficient d'efficacité pluviale (CEP) a été défini pour la première fois par Le Houerou (1984). Le CEP est le rapport entre la PPN aérienne et les précipitations annuelles [47-49] et présente une tendance à la baisse avec l'augmentation de l'aridité et de l'évapotranspiration potentielle [25, 49]. Comme la PPN est le taux de fixation du dioxyde de carbone par la végétation après les pertes par respiration végétale [21], la PPN est ainsi étroitement liée au NDVI. Le CEP est calculé en exprimant la PPN comme un rapport des précipitations annuelles, ce qui explique son utilisation courante comme indicateur de substitution pour évaluer la dégradation des terres. Le CEP a servi à cet objectif au niveau local, régional, national et mondial. Il a été observé que le CEP est généralement plus bas pour les terres dégradées que non-dégradées [25]. Fensholt et al. [48] indiquent que le CEP est « une propriété conservatrice du couvert végétal dans les zones arides, si le couvert végétal n'est pas sujet à une dégradation des terres qui n'est pas liée aux précipitations ». Néanmoins, l'utilisation du CEP comme indicateur de la dégradation des terres a été fortement contestée, en raison des approches méthodologiques et des différences d'échelle et de contexte écologique [47, 48, 50-52]. Comme la végétation réagit aux variations naturelles à court terme, le CEP doit être examiné sur la durée pour exclure les fausses alertes [5]. La pratique habituelle d'estimation du CEP est d'utiliser la somme des NDVI comme indicateur de substitution, basé sur l'observation de la Terre, pour la PPN [48]. La nature de la relation entre Σ NDVI et les précipitations annuelles (proportionnalité, linéarité et non-linéarité) est perçue comme un point important lors de l'estimation des séries temporelles de CEP utilisant des images par satellite [53]. Dans les paysages semi-arides où l'élevage de bétail domine, la dégradation par le surpâturage entraîne

souvent une diminution ou un changement de la composition des communautés végétales et une baisse du CEP [54]. Le CEP continue d'être l'une des approches privilégiées pour distinguer les effets de la pluie (naturels) des impacts anthropogéniques sur la productivité de la végétation et la détectabilité de la dégradation des terres. On n'est pas encore parvenu au consensus scientifique sur son application et son interprétation [47, 55].

RESTREND (Residual Trends Analysis) : L'analyse RESTREND consiste à faire une régression de Σ NDVI à partir des précipitations annuelles puis de calculer les résidus – la différence entre la Σ NDVI observée et la prévision de Σ NDVI à partir des précipitations [48, 51, 56]. Les deux méthodes ont été testées (CEP et RESTREND), en utilisant le NDVI AVHRR de la période 1985-2003 et en modélisant la PPN de la période 1981-2000 pour estimer la production végétale en Afrique du Sud [56]. L'étude a montré que le CEP n'était pas un indicateur aussi fiable que RESTREND pour la dégradation des terres. Si RESTREND offre de meilleures perspectives, l'étude souligne la nécessité d'effectuer des enquêtes au niveau local pour identifier la cause des tendances négatives [56].

Bien que la technique RESTREND s'est avérée utile pour estimer le CEP, il serait plus efficace pour les pixels pour lesquels une forte corrélation linéaire existe entre Σ NDVI et les précipitations annuelles – en d'autres termes, lorsque la pluie est le facteur dominant qui contrôle Σ NDVI [57]. On note aussi que comme les tendances résiduelles positives et négatives peuvent provenir de processus écologiques naturels, la technique RESTREND peut être adaptée à l'identification de problèmes à l'échelle régionale, tandis que les enquêtes locales seraient plus appropriées pour identifier les causes des tendances négatives [56].

⁹ Dans Trends.Earth l'analyse du CEP comme de Pixel RESTREND est effectuée à l'aide des données MODIS ou AVHRR pour le NDVI, et une sélection de séries de données sur les précipitations comme série de données explicative. Ces séries de données sur les précipitations comprennent (i) PERSIANN-CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks Climate Data Record) fournit des estimations quotidiennes des précipitations à une résolution spatiale de 0,25 degrés dans la bande de latitude 60S - 60N, de 1983 à quasiment aujourd'hui ; (ii) CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) est une série de données quasi mondiale, de plus de 30 ans, sur les précipitations. Portant sur 50°S-50°N (et toutes les longitudes) de 1981 à quasiment aujourd'hui ; (iii) GPCP (Global Precipitation Climatology) fournit des estimations des précipitations sur une grille de un degré, pour tout le globe, entre octobre 1996 et aujourd'hui ; (iv) la série de données mensuelles sur les précipitations du GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) entre 1901 et aujourd'hui est calculée à partir de données des stations mondiales ; (v) les données ERA I de l'ECMWF pour les couches de données volumétriques sol et eau et (vi) les données MERRA 2 (Moderate-Era Retrospective Analysis for Research and Applications) de la NASA.

7.7 VALIDATION

La précision de l'identification de changements à l'aide de la télédétection dépend de plusieurs facteurs. Jiangya [33] identifie comme déterminants clés de la précision la disponibilité et la qualité de données de référence au sol, un enregistrement et étalonnage ou une normalisation géométrique précis, la complexité du paysage et de l'environnement, les méthodes ou algorithmes employés, les capacités et l'expérience de l'analyste ainsi que les restrictions en temps et en coût. Les autres déterminants comprennent les caractéristiques spectrales, spatiales et temporelles de l'imagerie multitemporelle et les types de processus qui affectent la dynamique de changement des terres. La réalité de terrain est un terme utilisé dans plusieurs domaines en référence aux informations obtenues par observation directe (preuve empirique), en opposition aux informations par inférence. Dans le domaine de la télédétection, la réalité de terrain décrit le processus de vérification des informations obtenues par images satellite et des résultats des analyses, en les recoupant avec ce qui est connu au sol. Notre définition de la réalité de terrain dans ce rapport repose fortement sur les évaluations in situ pour la triangulation et l'interprétation des résultats de données de télédétection¹⁰. La réalité de terrain est le processus de vérification, par observation directe, ou par détermination via d'autres formes de validation de terrain (enquêtes ou entretiens), d'une information qui est postulée, supposée ou déduite. Voir à la section 10 quelques méthodes de triangulation et de validation de résultats d'analyse de données de télédétection, à l'aide d'autres méthodes de recherche. Les informations réelles de terrain sont souvent appelées « données de

référence », impliquant la collecte de mesures ou d'observations sur des objets, des zones ou des phénomènes télédétectés¹¹. Tom Server souligne deux principales utilisations de la réalité de terrain : les données peuvent servir à l'interprétation, à l'analyse et à la validation de données de télédétection ; cette information contribue à comprendre les forces socioéconomiques à l'origine des modifications du couvert terrestre, dues aux activités humaines. La vérification de la réalité de terrain est un exercice coûteux, car elle nécessite de voyager (parfois loin et dans des circonstances difficiles) et d'engager tout un ensemble de coûts en logistique et en matériel. Il faut également du temps, avec potentiellement un long processus de négociation d'accès aux endroits ou aux communautés concernés. Ceci s'applique particulièrement aux zones rurales et aux communautés de petits exploitants agricoles, ainsi qu'à d'autres utilisateurs des ressources des terres, qui n'ont pas l'habitude que des chercheurs les interrogent sur leurs activités de subsistance. Il faut une négociation appropriée pour réduire les soupçons éventuels des communautés locales. Dans sa description des sources de données pour la vérification de la réalité de terrain dans le domaine de la télédétection, Nicholas M. Short utilise la réalisation de critères tels que multi-étapes, multi-niveaux, multisensoriel, multispectral, multitemporel, multi-sources et multi-phases¹². Il est souhaitable d'obtenir des données de terrain, afin de valider l'analyse du changement de végétation, qui valident les critères de multitemporel – obtention à différents moments ; multi-sources – provenant de plusieurs sources pertinentes, mais pas forcément liées et multi-phases – les données peuvent être corrélées entre elles et avec d'autres types de données de télédétection.

¹⁰ Il existe des études et des guides spécialisés pour la triangulation, l'évaluation et la notification de la dégradation des terres sur le terrain. Voir par exemple le travail de Michael A. Stocking et Niamh Murnaghan (2001), Manuel pour l'évaluation sur le terrain de la dégradation des terres. Plus sur les approches, les outils et les technologies pour soutenir la prise de décision sur les pratiques de gestion durable des terres peuvent être trouvées dans la vaste gamme ou les ressources fournies par le World Overview of Approaches and Technologies (WOCAT). Cette initiative est reconnue par le secrétariat de la Convention comme la principale base de données recommandée pour les meilleures pratiques de la Convention sur les technologies de gestion durable des terres (GDT). Des outils tels que des questionnaires pouvant être utilisés dans la validation des études de dégradation des terres sur ordinateur au niveau du terrain et du paysage peuvent également être trouvés dans la base de données WOCAT <https://www.wocat.net/>.

¹¹ Un exemple pratique de validation sur le terrain décrit par le chercheur de la NASA Tom Sever se trouve ici. https://weather.msfc.nasa.gov/archeology/peten_groundtruth.html

¹² Plus d'informations sur les caractéristiques des données de validation sur le terrain dans la Section 13 de l'ouvrage en ligne de Nicholas M. Short intitulé : Remote Sensing and Image Interpretation & Analysis. (<http://priede.bf.lu.lv/GIS/Descriptions/RST/TofC/toc1.shtml>).

UTILISATION DES ÉVALUATIONS BASÉES SUR LE NDVI POUR CERTAINES CONDITIONS COURANTES DES VIII. TERRES EN AFRIQUE

8. UTILISATION DES ÉVALUATIONS BASÉES SUR LE NDVI POUR CERTAINES CONDITIONS COURANTES DES TERRES EN AFRIQUE

Si la dégradation des terres est un phénomène mondial qui touche 30-40 % de la surface terrestre [21], certains biomes et régions sont plus exposés que d'autres. Les influences majeures du changement du couvert terrestre comprennent les conditions climatiques, des processus géomorphologiques comme l'érosion des sols, des processus écologiques comme la succession végétale et l'utilisation des terres par l'homme qui entraîne des altérations du couvert et modifie le rythme de certains processus géomorphologiques [58]. Les autres facteurs incluent la variabilité climatique interannuelle, les changements climatiques, les catastrophes naturelles, les modifications de la composition de la biodiversité et des relations associées proies-prédateurs, ainsi que les modifications des chaînes trophiques et des interactions dans les écosystèmes [59]. Près de 65 % des terres agricoles en Afrique ont subi une forme ou une autre de dégradation physique et chimique, provoquée par des activités humaines et la variabilité climatique [60, 61]. Les activités humaines et la variabilité climatique sont responsables de la dégradation de plus de 30 % des pâturages du continent, de près de 19 % de ses forêts et de certaines de ses ressources en eau [60-62]. Les moteurs de la dégradation des terres sont nombreux et divers (voir le Tableau 3). L'envergure, la gravité et l'impact de la dégradation des terres sur l'environnement et les habitants dépendent de plusieurs facteurs.

Ces derniers comprennent le type de dégradation, sa situation géographique et son ampleur, et dans de nombreux cas, sa perception et les efforts entrepris par les populations humaines pour faire face au phénomène. Plusieurs moteurs directs et indirects expliquent la dégradation des terres (Tableau 3). Les activités qui y contribuent comprennent l'exploitation minière, les pratiques agricoles non durables, le surpâturage, la pollution d'origine industrielle et non industrielle et la modification du paysage. La dégradation des terres provoquée par la conversion anthropique des habitats naturels est plus répandue dans les forêts sèches tropicales (69 % de conversion en Asie du Sud-Est), dans les forêts de feuillus et mixtes tempérées, dans les prairies et savanes tempérées (plus de 50 % de perte en Amérique du Nord) et dans les forêts et les zones de bois et de brousaille méditerranéennes [63]. Les activités humaines responsables de la dégradation des terres vont au-delà des pratiques agricoles, de la déforestation et d'autres interactions humaines directes avec la terre. Les causes de la désertification (un processus de dégradation des terres qui affecte les populations des climats arides et semi-arides) vont d'activités économiques internationales à des pratiques non durables d'utilisation des terres de la part des communautés locales [18].

L'impact de la dégradation a tendance à être plus sévère dans les zones à forte incidence de pauvreté. Les populations pauvres ont souvent moins de marges de ressources face à l'adversité. Par conséquent, leur capacité est généralement plus faible pour faire face aux conséquences directes de la dégradation des terres, telles que le déclin de services écosystémiques et de ressources environnementales qui leur sont peut-être nécessaires. En Afrique, où la majorité de la population dépend de la culture et de l'élevage pour sa subsistance, la dégradation des terres peut avoir des impacts importants sur le bien-être socioéconomique de communautés entières, voire de pays.

TABLEAU 3.

CATÉGORIES DES MOTEURS DE LA DÉGRADATION DES TERRES. CERTAINS FACTEURS SOUS-JACENTS AU PROCESSUS RÉVÉLÉS PAR L'IMAGERIE SATELLITE – À EXAMINER LORS D'UNE RECHERCHE COMPLÉMENTAIRE À L'OBSERVATION DE LA TERRE.

CATÉGORIE DE PILOTES	FACTEURS SPÉCIFIQUES DE LA DÉGRADATION DES TERRES
PILOTES DIRECT	Utilisation excessive de produits chimiques
	Élimination inappropriée des déchets
	Drainage insuffisant
	Surpâturage
	Raccourcissement de l'élimination des périodes de jachère
	Mauvaise gestion des terres
	La déforestation
	Surexploitation de la couverture de bois
	Utilisation du feu sur des paysages pour différentes raisons
	Mauvaises pratiques d'irrigation
	Introduction d'herbivores non indigènes
	Pollution et autres causes industrielles
	L'engorgement
	La culture des terres marginales
PILOTES INDIRECTS	Croissance démographique
	Disponibilité limitée des terres associée à la mauvaise gestion des terres
	Systèmes fonciers et locatifs médiocres
	Les pressions économiques à court terme sur les petits agriculteurs limitent l'adoption de méthodes de conservation
	Des ressources économiques limitées restreignent l'investissement dans la gestion des terres
NATUREL	Fortes pluies
	Inondations
	Vents forts
	Variations et changements climatiques
	Mouvements de masse
	Sécheresses
	Infestations de ravageurs de la biomasse aérienne

8.1 CHANGEMENTS D'OCCUPATION ET D'UTILISATION DES TERRES (LULCC)

La couverture terrestre est la couverture biophysique observée sur la surface de la Terre [64]. Au sens strict, elle devrait se limiter à la description des éléments végétaux et artificiels (construits par l'homme) à la surface terrestre. Par conséquent, les zones de sol dénudé ou d'affleurements rocheux dénudés constituent la terre elle-même et non la couverture terrestre [64]. Bien que l'inclusion des surfaces d'eau dans la définition de la couverture terrestre soit un sujet de discorde, la communauté scientifique le fait généralement, donnant ainsi à la couverture terrestre une définition plus large que son sens strict.

Le changement d'occupation et d'utilisation des terres (LULCC) est un terme général faisant référence à la modification humaine de la surface terrestre [65]. Si les modifications humaines de la terre et de la couverture terrestre ont eu cours depuis des milliers d'années, pour obtenir de la nourriture, des combustibles, des fibres et d'autres matières, les taux et l'intensité actuelle des LULCC sont bien plus importants que jamais [66, 67]. Ces LULCC ont des impacts sans précédent sur les écosystèmes et les processus environnementaux (avec la capacité d'entraîner ou d'accélérer la dégradation des terres) aux niveaux local, régional et mondial, tels que les changements climatiques, la disparition de la biodiversité et la pollution de l'eau, des sols et de l'air [62, 65]. Selon Townsend et al. (2014), parmi toutes les formes de changement de la couverture terrestre, le changement de la couverture forestière liée à la « déforestation est l'un des plus importants, en raison de l'ampleur des transformations provoquées des propriétés biophysiques et écologiques ».

Les LULCC proviennent des interactions entre différentes composantes des systèmes couplés humains-environnementaux. Ils résultent de forces motrices à multiples échelles et de facteurs plus immédiats de dégradation des terres et sont une fonction de la combinaison de systèmes socioéconomiques et environnementaux [68]. L'intérêt pour l'évaluation des LULCC s'est ainsi accru au sein des conventions internationales, telles

que la CCNUCC, la CDB et la CNULCD. Cet intérêt est maintenant présent dans plusieurs évaluations internationales importantes comme l'Évaluation pour le Millénaire, l'Évaluation de la FAO des ressources forestières mondiales, ainsi que le Projet de suivi mondial de la sécurité alimentaire. Mayaux et al. [67] ont identifié cinq principaux attributs des LULCC : (1) la nature des changements observés ; (2) la permanence temporelle de ces changements ; (3) la direction du changement (4) l'intensité (5) la distribution spatiale des changements. Les changements de la couverture terrestre peuvent varier considérablement sur l'échelle temporelle – le paysage peut affecté pendant quelques jours (inondations), quelques semaines (feux de végétation), une année (densité de la biomasse dans la ceinture du Sahel), quelques années (déforestation) ou plus longtemps (urbanisation) [67]. La plupart de ces changements affecte la végétation.

La quantité et la qualité de la couverture de végétation sont importantes pour l'évolution du paysage, sa dégradation [25] et la qualité des services environnementaux qu'ils peuvent fournir. Les changements de la couverture végétale sont par exemple l'un des facteurs qui causent d'autres formes de dégradation des terres comme la sécheresse, l'érosion des sols et la désertification [25]. Les changements de la couverture végétale (par la déforestation par exemple) contribuent à l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et peuvent avoir un impact négatif sur la biodiversité [69]. La couverture végétale est l'un des principaux éléments de la biosphère terrestre [70] est un bon indicateur du changement à l'échelle mondiale. Les mesures de séries temporelles de végétation peuvent servir d'indicateur de substitution pour comprendre la dynamique des processus sur la surface terrestre [14].

Les changements de la végétation représentent aussi une indication importante de la santé des écosystèmes et un bon indicateur de substitution à la vulnérabilité terrestre à différentes formes de dégradation [23, 53, 71, 72]. À l'échelle locale ou régionale, la modification ou la conversion de la végétation peut avoir des conséquences majeures sur la qualité du sol, l'érosion éolienne et hydrique, le transport et le dépôt de sédiments, la productivité de

la terre et la biodiversité locale. Au niveau mondial, les changements à grande échelle de la couverture végétale peuvent affecter les cycles biogéochimiques mondiaux et contribuer à la variabilité climatique et à la perte de la biodiversité mondiale.

8.1.1 LE NDVI DANS LES ÉVALUATIONS DES LULCC

Des efforts de recherche importants ont été consacrés à l'utilisation du NDVI pour évaluer l'emplacement et l'ampleur des changements d'occupation des terres et de couverture terrestre à tous les niveaux spatiaux [54, 62, 73-76]. L'évaluation des changements de la couverture terrestre est l'un des usages les plus courants du NDVI. Depuis le début du développement et du perfectionnement de l'indice, il a été très utilisé pour l'évaluation et le suivi du changement de la couverture terrestre (en particulier pour l'utilisation des terres liée à la dynamique de la végétation). L'application du NDVI dans les études de la couverture terrestre a été effectuée à différents niveaux. Au niveau mondial, le NDVI a servi aux classifications et à la cartographie de la couverture terrestre [77-80]. Ceci a aussi été fait à l'échelle régionale et nationale [74, 81, 82]. Des études localisées à l'aide du NDVI pour la recherche sur la couverture terrestre ont aussi été réalisées [24, 76, 83, 84]. Si plusieurs approches ont été appliquées pour déterminer la couverture de végétation à partir du NDVI, deux techniques majeures se démarquent. Celle qui utilise le NDVI échelonné ou N^* (proposée par Choudhury et al. 1994), définie ainsi :

$$N^* = \frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_s - NDVI_0} \quad \text{Équation 3}$$

where $NDVI_s$ is the value of NDVI at 100% vegetation cover ($N^* = 1.0$) and $NDVI_0$ is the value for bare soil ($N^* = 0$). The second method involves estimating a linear relationship between green vegetation cover (V_c) and NDVI by measuring vegetation cover in the field and comparing it to satellite NDVI data [85, 86]. The regression relationship found and applied by Symeonakis and Drake (2010) in their study that monitored desertification and land degradation over sub-Saharan Africa was:

$$V_c = 1.33 + 131.877 NDVI \quad \text{Equation 4}$$

with fit statistics of $R^2 = 0.73$, $F = 241.63$, and $p = 4.26 \times 10^{-27}$.

Pour évaluer les changements du couvert arboré sahélien, Horion et al. (2014) ont utilisé les tendances à long terme du NDVI minimum en saison sèche, dérivées de SPOT-VGT, MODIS Terra et du jeu de données GIMMS dérivée d'AVHRR, comme variable de substitution pour le couvert arboré. Les séries temporelles de NDVI minimum en saison sèche n'étaient pas corrélées aux résidus d'herbe sèche de la saison de croissance précédente ni à la fréquence saisonnière et aux moments des feux dans quasiment tout le Sahel [71]. Cette étude indique que le NDVI minimum peut servir d'indicateur de substitution pour évaluer les changements du couvert arboré dans de tels écosystèmes arides et semi-arides [71]. Les points chauds mondiaux de changement du couvert terrestre sont associés à des formes majeures de dégradation. Ils comprennent des régions comme l'Asie, qui a aujourd'hui la plus grande concentration de zones subissant une déforestation et une dégradation rapides et à grande échelle des terres arides [87]. Le bassin amazonien au Brésil est aussi concerné, un point chaud majeur de la déforestation tropicale et de la raréfaction associée des espèces [87]. Dans certaines régions du continent européen, comme la Sibérie, l'augmentation de l'exploitation forestière contribue à une dégradation importante des forêts [87]. Si les changements d'occupation des terres et de couverture terrestre peuvent servir d'indication de l'existence (ou de l'inexistence) de la dégradation des terres, il convient d'interpréter les résultats de ces études avec précaution. Veldkamp et Lambin (2001) soulignent la nécessité d'identifier l'emplacement et la quantité des changements, ainsi que les causes de ces changements. Par exemple, si l'utilisation du NDVI peut aider à déterminer l'existence de la déforestation (le taux et la surface touchée), les facteurs sous-jacents de ce phénomène (qui ont un énorme effet potentiel sur la dégradation des terres) sont souvent éloignés dans le temps et dans l'espace, impliquant des transformations macroéconomiques et des changements de politiques, peut-être à un niveau hiérarchique supérieur [75]. Il faut aussi noter que dans certains cas, un changement de la couverture terrestre n'entraîne pas forcément une dégradation, mais peut être positive pour le paysage [24, 66].

La disponibilité de séries de données gratuites, à couverture mondiale, qui remontent aux années 1980, offre une opportunité de recherche à long terme sur la dynamique de la végétation, distribuée dans l'espace et pour de grandes surfaces géographiques [16]. Quatre principaux capteurs d'observation de la Terre sont employés couramment pour la cartographie mondiale de la couverture terrestre. Il s'agit de NOAA-AVHRR (résolution spatiale de 1 km, 5 bandes spectrales) ; SPOT-Vegetation (résolution spatiale de 1 km, 4 bandes spectrales) ; Terra ou Aqua-MODIS (résolution spatiale de 0,25 km / 0,5 km / 1 km, 36 bandes spectrales) et Envisat-MERIS (résolution spatiale de 0,3 km, 15 bandes spectrales) [14]. Si la majorité des études à l'échelle mondiale et régionale se sont initialement fortement basées sur les séries temporelles de NDVI dérivées de l'AVHRR de NOAA, l'utilisation de données SPOT-VEGETATION, MODIS de la NASA et MERIS de l'ESA gagne du terrain [53, 88].

8.2 DÉSERTIFICATION

Le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) a pris des mesures en 1992 pour faire face au problème de l'intrusion du désert dans les régions voisines, en adoptant la Convention sur la lutte contre la désertification et en désignant l'année 2006 comme Année internationale des déserts et de la désertification. L'une des premières étapes de la CNULCD fut de développer une définition de la désertification qui désigne « la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines » [89]. La désertification est une menace grave au niveau mondial, qui touche des pays développés et en développement [90].

Depuis les années 1980, la télédétection a été amplement utilisée dans l'étude de la désertification dans différentes régions du monde [5, 25, 48, 62, 91-94]. Les études se sont largement basées sur différents indices de végétation, dérivés de produits satellitaires, afin d'examiner des propriétés de la végétation (en milieu semi-aride ou aride), tels que la productivité de la biomasse, l'indice de surface

foliaire, l'accumulation totale de matière sèche et la productivité primaire nette annuelle. Le Sahel (une ceinture semi-aride qui s'étend en Afrique depuis l'Atlantique jusqu'à la mer Rouge) est particulièrement sujet à des déficits pluviométriques prolongés [90, 95]. L'un de ces événements a démarré en 1968 et a causé la mort de 100.000 à 250.000 personnes [95]. Dans la recherche sur la désertification, le NDVI est employé pour (a) déterminer l'état et les tendances de la désertification, (b) catégoriser les zones en fonction de la gravité de la désertification et (c) identifier ou mesurer les effets des politiques et des actions sur la désertification [59].

8.2.1 LE NDVI DANS LES ÉVALUATIONS DE LA DÉSERTIFICATION

Lors de la détermination de l'état et des tendances de la désertification, les chercheurs se sont basés sur la relation entre le NDVI et la productivité de la biomasse, bien établie dans les publications [14, 72]. Ce lien a servi de base à l'application des informations par satellite (en particulier le NDVI) pour la détection, le suivi et l'évaluation de la dynamique de la biomasse dans le monde entier. Les initiatives bénéficient de la disponibilité de séries temporelles mondiales et continues de la végétation, disponibles depuis le début des années 1980 (De Jong et al., 2012).

On peut dire que les années 1990 ont vu un intérêt accru pour la recherche sur la désertification, en particulier pour le Sahel. Durant cette décennie, le Sahel a connu une pluviométrie anormalement élevée, capturée par l'imagerie satellite, analysée à l'aide de séries temporelles de NDVI et désignée dans les rapports comme le « verdissement du Sahel » [93]. Les études de suivi ont utilisé les séries temporelles de NDVI pour examiner les schémas temporels et spatiaux du verdissement du Sahel et de la variabilité pluviométrique, ainsi que leurs interactions [96, 97]. Herrmann et al. [96] ont conclu que si les précipitations ont été le facteur causal dominant de la hausse du verdissement, il y avait de manière hypothétique un changement d'origine humaine, qui s'est superposé à la tendance climatique.

Anyamba et Tucker [98] ont utilisé le NDVI pour identifier la relation étroite entre les précipitations et la réponse de verdissement de la végétation dans l'écosystème africain du Sahel. Ils ont aussi souligné que lorsque ces changements sont examinés dans le contexte de l'histoire du climat au Sahel, ces conditions plus vertes restent bien inférieures aux conditions plus humides qui régnaient dans cet écosystème entre 1930 et 1965. Ces études (et de nombreuses autres) ont renforcé la capacité du NDVI comme indicateur de substitution à la réponse de la végétation à la variabilité pluviométrique (en particulier dans les écosystèmes arides et semi-arides du monde). Herrmann et al. [96] ont aussi démontré la possibilité d'utiliser le NDVI comme indicateur de substitution à la réponse environnementale à la gestion. L'effet de ce facteur de gestion (généralement signalé par « C » dans les modèles) a été inclus dans certaines études du changement environnemental [99].

8.3 ÉROSION DU SOL

L'érosion est définie comme le déplacement des éléments solides de la terre (sol, boue, roche) par les courants comme le vent, l'eau ou la glace, par mouvement descendant en réponse à la gravité [100]. Les formes les plus communes d'érosion dans le monde sont hydriques et éoliennes [101]. Les taux naturels d'érosion du sol sont faibles, sauf si la surface du sol est directement exposée au vent et à la pluie. Les taux d'érosion dépendent de plusieurs facteurs du paysage, tels que la texture du sol, l'inclinaison et la couverture terrestre, et de facteurs climatiques comme le volume, l'intensité et la durée des pluies et la vitesse du vent. Les facteurs humains d'utilisation des terres (déforestation, labour) et la modification du paysage (gestion de l'eau de surface et souterraine) peuvent aussi influencer les taux d'érosion [100].

Les effets de l'érosion du sol peuvent être sur place (l'endroit de détachement et de déplacement du sol) ou hors-site (lieux où le sol érodé est déposé). Les impacts sur place comprennent la réduction de la qualité du sol, suite à une perte des couches supérieures riches en nutriments, la réduction de l'infiltration de l'eau dans le sol et le déclin de la

capacité du sol à retenir l'eau [102]. Le déclin de la qualité et la fertilité du sol à cause de l'érosion représente un problème important sur le plan mondial et menace sérieusement et à long terme la durabilité de la productivité agricole mondiale [100]. Les impacts hors site de l'érosion du sol peuvent inclure l'accumulation de sédiments et de polluants agricoles dans les cours d'eau, entraînant un ensablement des barrages, la perturbation des écosystèmes de lacs, avec une perte potentielle de la biodiversité, et la contamination de l'eau destinée à la consommation et des cours d'eau en aval [102]. Tous ces impacts constituent des problèmes environnementaux et socioéconomiques majeurs dans les régions touchées, qui exigent des ressources financières, techniques et technologiques importantes.

L'érosion du sol est critique car elle peut entraîner la perte de l'horizon organique de surface – l'horizon qui contient le plus de matière organique et un médium pour le transfert de nutriments du sol à la plante [59]. L'érosion du sol entraîne une baisse de la productivité dans les zones touchées, et de plus, peut réduire les taux d'infiltration de l'eau dans le sol, augmentant le transport de sédiments vers les cours d'eau ou les écosystèmes en aval et occasionnant des dégâts potentiels.

8.3.1 LE NDVI DANS LES ÉVALUATIONS DE L'ÉROSION DU SOL

Dans les études sur l'érosion du sol, le NDVI est généralement utilisé en conjonction avec d'autres modèles classiques d'estimation de l'érosion, tels que FuDSEM (Fuzzy-based dynamic soil erosion model), USLE/RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), WEPP (Water Erosion Prediction Project) EUROSEM (European Soil Erosion Model) et SWAT (Soil and Water Assessment Tool) [103]. Dans Mulianga et al. [104] et Ai et al. [105], le NDVI est utilisé pour caractériser l'état de l'écosystème (hétérogénéité spatiale et temporelle des conditions de la végétation) et comme l'un des paramètres d'entrée pour estimer le potentiel d'érosion au Kenya et en Chine, appliquant respectivement la théorie des ensembles flous et les processus de prise de décision. Dans d'autres cas, le NDVI est

utilisé comme un facteur de gestion – représentant l'effet sur l'érosion d'activités perturbatrices du sol, des plantes, de la séquence des cultures et du niveau de productivité, de la couverture du sol et de la biomasse souterraine. C'est le cas dans l'étude sur l'effet de la couverture végétale sur l'érosion du sol du bassin versant du cours supérieur de la rivière Min, dans le bassin supérieur du Yangtsé en Chine [99]. Il sert aussi de facteur de gestion de la couverture terrestre (entrée dans RUSLE) pour déterminer la vulnérabilité des sols à l'érosion dans un sous bassin versant forestier montagneux dans le Kerala en Inde [103].

Pour une grande partie de la recherche sur l'érosion du sol, le NDVI est généralement dérivé des données Landsat TM/ETM (Instrument de cartographie thématique amélioré) à une résolution spatiale de 30 m [105, 106] ou des données MODIS (spectromètre imageur à résolution modérée) à une résolution spatiale de 250m [104, 107]. Ces données sont habituellement utilisées en conjonction avec le Modèle numérique de terrain qui a une résolution spatiale de 30 m [103-105, 107].

8.4 SÉCHERESSE

Drought generally refers to a substantial decline in the amount of precipitation received over a prolonged period [108]. Droughts occur in practically all climatic zones and are recognized as an important environmental and developmental hazard, especially in the face of growing global water demand and climate change [4]. Droughts vary in severity and duration and may be associated with some effects that are immediate while others may be delayed [108, 109]. Some of its effects may also be directly observable, while others are insidious and difficult to either attribute, measure or decouple from the effects of other environmental causes [109]. Droughts can affect both surface and groundwater resources, leading to reduced flows, availability, and supply for human and ecosystem needs. Regarding land degradation, droughts can lead to deteriorated water quality, the decline in primary productivity of ecosystems which increases their vulnerability to agents such as erosion, and disturbed riparian habitats with the potential loss of biodiversity [108, 109].

Four main classes of droughts are commonly known [108]. These include meteorological drought which is a lack of precipitation over a region for a period of time. Hydrological drought refers to a period with inadequate surface and subsurface water resources for established water users of a given resources management system. Agricultural drought refers to a period with declining soil moisture and resulting crop failure without any reference to surface water resources. The socio-economic drought which is associated with a failure of water resources systems to meet water demands and thus associating droughts with supply of and demand for an economic good (water).

Droughts can affect ecosystems both ecologically and socioeconomically. In the short term, drought can decrease biomass yield for humans and forage availability for wildlife and livestock. Over extended periods, droughts have the potential of decreasing surface and sub-surface water supplies, robbing soils of their protective vegetal cover and exposing them to erosion, and driving the die-out of native plant and some animal species. Droughts are expected to increase in frequency, severity, and extent in the near future [110].

8.4.1 NDVI IN DROUGHT ASSESSMENTS

Les études ont utilisé le NDVI (et d'autres indices de végétation associés) pour la détection et l'examen de la sécheresse météorologique, hydrologique et agricole dans différentes parties du monde. Un exemple en est l'utilisation de l'anomalie de NDVI¹³ pour identifier la persistance de la sécheresse au Sahel entre 1982 et 1993, avec une sécheresse marquée à grande échelle pendant la période 1982-1985 [20]. Une autre méthode a consisté à combiner les anomalies des indices du phénomène d'oscillation austral El Niño (ENSO) aux anomalies du NDVI pour édifier un modèle de prédiction du début d'une sécheresse induite par ENSO dans le nord-est du Brésil, à l'aide d'une régression linéaire multiple [111]. Enfin, l'anomalie du NDVI a été combinée à l'Indice d'anomalie des précipitations pour analyser la tendance spatiale et temporelle, la prévalence, le niveau de gravité et la persistance de la sécheresse météorologique et végétative dans le Gujarat en Inde [112].

Le capteur spatial le plus souvent utilisé pour étudier et analyser la sécheresse météorologique et végétative est NOAA–AVHRR, utilisant à la fois le NDVI (bandes de réflectance) et la température de la surface terrestre (bandes thermiques) [20, 92, 113].

Un indice apparenté utilisé dans les études de la sécheresse est l'indice de teneur en eau par différence normalisée (NDWI) [114]. Le NDWI est dérivé des canaux du proche infrarouge et de l'infrarouge à courtes longueurs d'onde (SWIR), qui reflètent les changements de la teneur en eau et du mésophylle spongieux dans le couvert végétal [114]. Il est défini ainsi :

$$NDWI = \frac{\rho(0.86\mu m) - \rho(1.24\mu m)}{\rho(0.86\mu m) + \rho(1.24\mu m)} \quad \text{Équation 5}$$

Où $\rho(\lambda)$ est la réflectance apparente et λ la longueur d'onde. $\rho(\lambda)$ est égal à $\pi L(\lambda) / [\cos(\theta_0) E_0(\lambda)]$, et $L(\lambda)$, θ_0 , et $E_0(\lambda)$ respectivement la luminance mesurée, l'angle zénithal du soleil et l'irradiance solaire au-dessus de l'atmosphère de la Terre. Le NDWI (calculé à partir de la bande SWIR MODIS à 500 m) a été utilisé pour détecter et suivre la condition d'humidité du couvert végétal sur des vastes surfaces [115-117]. Mishra et Singh [108] avancent que le NDWI pourrait être un indicateur plus sensible que le NDVI pour le suivi de la sécheresse, car le NDWI est plus sensible à la dessiccation et au flétrissement du couvert végétal. Tout en reconnaissant la sensibilité du NDWI aux changements de la teneur en eau du couvert végétal, les développeurs du NDWI [114] souhaitent souligner que cet indice « complète mais ne remplace pas le NDVI ».

8.5 CONSERVATION DE LA NATURE

Parmi les activités humaines qui menacent de bouleverser la planète, on peut citer les contributions anthropiques au changement climatique, l'acidification des océans, la réduction de la couche d'ozone stratosphérique, l'utilisation mondiale accélérée et non durable d'eau douce, les

taux élevés de disparition de la diversité biologique et les changements à grande échelle d'utilisation des terres [118]. Ces activités humaines induisent des changements environnementaux qui affectent la distribution et la dynamique de la végétation, les populations animales, les systèmes soutenus et les services apportés [119]. Un corpus de connaissances développe les outils et les techniques pour évaluer et prévoir les réponses des écosystèmes à ces changements de l'environnement mondial. Lors de sa cartographie et étude de terres protégées, par exemple, Yeqiao [120] a relevé la grande diversité et portée des informations géospatiales fournies par la télédétection. Cette diversité se manifeste dans les différentes échelles spatiales (haute résolution spatiale, couverture étendue), les différentes fréquences temporelles (observations quotidiennes, hebdomadaires, mensuelles, annuelles), les différentes propriétés spectrales (lumière visible, proche infrarouge, micro-ondes) et les contextes spatiaux (zones immédiatement adjacentes aux terres protégées vs. contexte plus large) [120]. La composante spatiale, qui fait le lien entre l'écologie, la biogéographie, les sciences environnementales et la télédétection par satellite joue un rôle de plus en plus important dans le développement de cette connaissance [121]. Cependant, la fusion des disciplines en est encore à ses balbutiements, qui pourtant est nécessaire pour obtenir des résultats optimaux de développement et d'utilisation de la télédétection pour la recherche sur la biodiversité, la conservation de la nature et l'utilisation durable des ressources naturelles, [121]. Néanmoins, plusieurs études ont démontré le potentiel de la télédétection dans de nombreux domaines de la recherche sur la biodiversité et la conservation de la nature [27, 120, 122, 123].

8.5.1 LE NDVI DANS LA RECHERCHE POUR LA CONSERVATION DE LA NATURE

Si les approches classiques de mesure de la richesse spécifique fournissent des informations utiles, ces méthodes sont spatialement limitées quant à leur application à de vastes zones

¹³ La composante terrestre du Programme Copernicus (<http://land.copernicus.eu/global>) définit l'anomalie du NDVI comme étant la déviation de la valeur du NDVI de la moyenne sur 10 ans ($\text{avgNDVI}_{10\text{ans}}$) pour la même période : $\text{aNDVI}_t = \text{NDVI}_t - \text{avgNDVI}_{10\text{ans}}$. Une anomalie positive signifie un NDVI supérieur à la moyenne et peut être interprétée comme une période de bonne ou très bonne productivité et/ou une saison de croissance précoce, et inversement pour une valeur négative.

géographiques [124]]. Les outils de télédétection offrent des opportunités de description de la biodiversité sur de grandes zones, de manière systématique, reproductible et exhaustive dans l'espace [123, 124]. Le NDVI joue un rôle majeur dans l'élaboration des cartes de couverture terrestre – un outil important de « l'approche directe » ou « de l'analyse de premier ordre » de la présence d'espèces [123]. En fonction de l'échelle du biome ou de l'écosystème en question, les cartes de la couverture terrestre fournissent des données implicites ou explicites sur la composition, l'abondance et la distribution d'espèces individuelles ou d'ensembles spécifiques [121, 123, 124]. Les données dérivées de la productivité de la végétation, associées à d'autres paramètres environnementaux (climatiques et géophysiques), sont statistiquement liées aux données sur l'abondance ou la présence des espèces [124]. Un exemple inclut l'utilisation du NDVI pour expliquer l'expansion du chevreuil dans la péninsule scandinave [125]. Le NDVI contribue aussi à « l'approche indirecte » de mesure de la composition, de l'abondance et de la distribution des espèces. Différents aspects de la condition de la végétation (dérivés d'indices de végétation comme le NDVI) contribuent aux variables environnementales, qui, lorsqu'évaluées, apportent des indications (à travers des principes biologiques) sur la composition, l'abondance et la distribution des espèces [121, 124]. Une abondance importante des ressources (indiquée par des valeurs élevées du NDVI) a servi à expliquer la présence et la distribution de l'espèce dévastatrice de criquet *Schistocerca gregaria* en Mauritanie et sur les côtes de la mer Rouge [122].

Le suivi des réponses de la végétation aux changements environnementaux, au niveau des interactions trophiques, est l'une des principales utilisations du NDVI dans la recherche sur la nature et la conservation. L'utilisation du NDVI pour le suivi et l'évaluation de la végétation vise à améliorer nos connaissances et nos prédictions, ainsi que les impacts des perturbations telles que la sécheresse, les feux, les inondations et le gel, sur les ressources mondiales de végétation [119, 121]. Les données sur la végétation ont joué un rôle déterminant dans l'évaluation et le suivi des conditions de certains biomes mondiaux importants. Par exemple, les données MODIS ont été essentielles au suivi de la biomasse tropicale [126]. La première carte de la biomasse pantropicale a été développée à l'aide d'une fusion des données MODIS-GLAS¹⁴ par Saatchi et al. [126]. Cette initiative a constitué une carte de « référence » des stocks du carbone de la biomasse, afin de contribuer aux évaluations de la REDD¹⁵ au niveau de projets et de pays.

¹⁴ GLAS signifie Geoscience Laser Altimeter System

¹⁵ La réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation forestière (REDD+) est un mécanisme élaboré par les Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Il établit une valeur financière pour le carbone stocké dans les forêts en offrant des incitations aux pays en développement pour réduire les émissions dans les zones de forêts et pour investir dans des modèles de développement durable à faibles émissions de carbone.

IX. EFFORTS D'ÉVALUATION DE LA DYNAMIQUE DE LA VÉGÉTATION

9. EFFORTS D'ÉVALUATION DE LA DYNAMIQUE DE LA VÉGÉTATION

9.1 AUTRES INDICES DE VÉGÉTATION ÉTROITEMENT LIÉS AU NDVI

L'Indice de différence de végétation (DVI) est sans doute le plus simple. Le DVI permet de distinguer le sol de la végétation, tout en étant sensible à la quantité de végétation. Le DVI (Équation 6) ne prend pas en compte la différence entre la réflectance et la luminance causée par l'atmosphère ou les ombres. Il est défini ainsi [128] :

$$DVI = NIR - RED \quad \text{Équation 6}$$

NIR est la réflectance de la bande proche infrarouge et RED la réflectance de la bande rouge visible. Le Simple Ratio (SR) ou Indice de végétation par quotient (RVI) est quasiment aussi simple que le DVI. Birth et McVey l'ont décrit pour la première fois en 1968 [129]. Le RVI (Équation 7) est l'un des indices les plus utilisés, car il est courant dans le domaine de la télédétection d'utiliser les ratios de bandes pour éliminer différents effets de l'albédo. Le rapport entre le proche infrarouge et le rouge, en tant qu'élément de la végétation d'une scène, est à la base du RVI. Le RVI est élevé pour la végétation et faible pour le sol, la glace et l'eau. Le RVI peut indiquer la quantité de végétation, tout en réduisant les effets de l'atmosphère et de la topographie. Il est défini ainsi [129] :

$$RVI = \frac{NIR}{RED} \quad \text{Équation 7}$$

NIR est la réflectance de la bande proche infrarouge et RED est la réflectance de la bande rouge visible. La plupart des indices de végétation s'appuient sur une « ligne des sols » dans la longueur d'onde rouge et proche infrarouge [13]. La ligne des sols est un axe principal de la variation spectrale des sols, s'étendant de l'origine vers l'extérieur avec une luminosité croissante.

Comme la plupart des spectres des sols sont sur ou près de la ligne des sols, et puisque l'ordonnée d'une telle ligne est proche de l'origine, les valeurs du RVI et du NDVI de sols dénudés (ratios) seront quasiment identiques pour une variété de conditions du sol [13, 130]. L'Indice de végétation ajusté aux sols (SAVI) est basé sur le NDVI et a été proposé par Huete [130]. Le SAVI (Équation 8) est une technique de transformation pour minimiser la luminosité du sol, à partir d'indices de végétation impliquant les longueurs d'onde du rouge et du proche infrarouge (principalement le NDVI et l'Indice perpendiculaire de végétation). La principale caractéristique de la transformation est de déplacer l'origine des spectres de réflectance, représentés dans l'espace de longueur d'onde proche infrarouge-rouge, pour prendre en compte les interactions de premier niveau sol-végétation et l'extinction du flux différentiel rouge et infrarouge dans les couverts végétaux [13, 130].

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{(NIR + RED + L)} * (1+L) \quad \text{Équation 8}$$

L est le coefficient qui doit varier en fonction de la densité de la végétation (allant de 0 pour un couvert végétal très dense à 1 pour très peu de couverture végétale). Il s'ensuit que si $L = 0$, $SAVI = NDVI$. Une faiblesse du SAVI est que nous connaissons rarement la densité de la végétation, ce qui complique l'optimisation de cet indice [13]. Pour résoudre ce qui est un problème de la poule et de l'œuf (connaître la couverture de la végétation avant de pouvoir calculer l'indice de végétation, qui détermine la couverture de végétation), une modification du SAVI a été proposée par Qi et al. [131]. Le SAVI modifié (MSAVI). Dans le MSAVI (Équation 9), le facteur L est ajusté de façon dynamique à l'aide des données d'image. Lors d'une évaluation du MSAVI sur des champs de coton, Qi et al. [131] ont déterminé que le MSAVI avait une plus grande sensibilité à la végétation, définie par un rapport entre le « signal de végétation » et le « bruit du sol ».

$$MSAVI(1+L) = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{(R_{NIR} + R_{red} + L)} \quad \text{Équation 9}$$

$L = 1 - (2 \times \text{pente} \times \text{NDVI} \times \text{WDVI})$. WDVI (Équation 10) est l'indice de différence de végétation pondéré, fonctionnellement équivalent au PVI. Il est calculé ainsi : $\text{WDVI} = \text{NIR} - (\text{pente} \times \text{RED})$

$$\text{WDVI} = R_{\text{nir}} - R_{\text{vis}} \left(\frac{R_{\text{Svis}}}{R_{\text{S_nir}}} \right) \quad \text{Équation 10}$$

Développé par le MODIS Land Discipline Group et proposé pour être utilisé avec les données MODIS, l'Indice de végétation amélioré (EVI) est une modification du NDVI avec un facteur d'ajustement des sols, L , et deux coefficients, C_1 and C_2 qui décrivent l'utilisation de la bande bleue pour corriger la bande rouge de la dispersion des aérosols dans l'atmosphère. C_1 , C_2 et L sont des coefficients déterminés de façon empirique comme étant respectivement 6,0, 7,5 et 1,0 [72]. Le principal avantage de l'algorithme de l'EVI est de dissocier le signal de fond du couvert et une réduction des influences atmosphériques [72, 132]. Huete et al. [132] ont démontré que l'EVI (Équation 11) a une meilleure sensibilité à une biomasse élevée et ne sature pas aussi facilement que le NDVI.

Équation 11

$$\text{EVI} = 2.5 * \frac{(\text{NIR} - \text{RED})}{(\text{NIR} + C_1 * \text{RED} - C_2 * \text{BLUE} + L)}$$

Un défi important de l'utilisation des indices de végétation qui tentent de minimiser l'effet de sols divers est l'augmentation de la sensibilité aux variations de l'atmosphère [131, 133]. Des efforts ont été faits pour mettre au point des indices de végétation moins sensibles à différents aspects de la contamination atmosphérique. L'Indice de végétation robuste au sol et à l'atmosphère (SARVI) est une variante du NDVI (Équation 12).

Équation 12

$$\text{SARVI} = (1 - L) \cdot (R_{800} - R_{rb}) / (R_{800} + R_{rb} + L)$$

where $R_{rb} = R_y - y \cdot (R_b - R_r)$

La technique implique une correction préalable pour prendre en compte la dispersion moléculaire et l'absorption d'ozone des données de télédétection dans le rouge, le bleu et le proche infrarouge [72, 134]. R_x est la valeur de la réflectance, avant la correction pour prendre en compte la dispersion moléculaire et l'absorption d'ozone.

y est une constante pour stabiliser l'indice face aux variations de la teneur en aérosols [13, 72, 134]. Huete et al. [134] l'ont proposé en intégrant la fonction L du SAVI et une normalisation de la bande bleue, élaborant ainsi un indice SARVI qui corrige à la fois le bruit du sol et de l'atmosphère.

9.2 CLASSIFICATION DES INDICES DE VÉGÉTATION

Plusieurs publications ont tenté de classer les indices de végétation [13, 135-137]. Le type de classification est généralement déterminé par le mode d'utilisation d'un indice. En examinant la sensibilité des indices de végétation à l'illumination et à la géométrie de visée du capteur, Verrelst et al. [137] ont classé les indices de végétation en quatre groupes. Les indices de verdure dans la bande large sont des mesures de la qualité globale de la matière photosynthétique de la végétation. Les indices de verdure dans la bande étroite mesurent la quantité et la qualité de la teneur en pigment de la végétation. Les indices d'efficacité d'utilisation de la lumière mesurent l'efficacité à laquelle la végétation utilise la lumière incidente pour la photosynthèse. Enfin, les indices de pigment foliaire mesurent les pigments liés au stress dans la végétation [137]. Le NDVI, le SAVI, l'EVI et le SRI sont des exemples d'indices dans la bande large tandis que le DVI, le RVI, le TSAVI et le MSAVI sont des exemples d'indices dans la bande étroite [137, 138]. En ce qui concerne les applications, Bullock et Jewitt [138] avancent que les indices de verdure dans la bande étroite offrent des mesures plus fines de la quantité et de la vigueur de la végétation verte, surtout parce ces indices utilisent les mesures de réflectance dans les régions du rouge et de l'infrarouge pour échantillonner le « point d'inflexion dans le rouge » de la courbe de réflectance [138].

Jackson et Huete [135] classent les indices de végétation en deux groupes : ceux basés sur la pente et ceux basés sur la distance. Les indices de végétation basés sur la pente sont des combinaisons arithmétiques, qui s'attachent au contraste entre les schémas de réponse spectrale de la végétation dans les portions du rouge et de l'infrarouge du spectre électromagnétique [136].

Les indices basés sur la pente ont pour principal objet de rendre compte de l'état et l'abondance de la végétation [136]. Les indices de végétation basés sur la distance s'appuient fortement sur la représentation bispectrale de la réflectance du rouge par rapport à l'infrarouge. Ils mesurent le degré de végétation présente, en estimant la différence entre la réflectance d'un pixel et la réflectance du sol dénudé (le ligne des sols sur le schéma bispectral) [13, 135, 136]. Les indices de végétation basés sur la distance visent principalement à annuler la luminosité du sol lorsque la végétation est rare, et quand les pixels contiennent un mélange de végétation verte et de sol en arrière-plan, comme en milieu aride et semi-aride [136]. Des exemples de différents groupes d'indices sont présentés dans Silleos et al. [136]. En plus des indices basés sur la pente et la distance, Verrelst et al [137] incluent le groupe d'indices dérivés de techniques de transformation orthogonale. Il s'agit de l'Analyse en composantes principales (ACP) et de l'Indice de végétation verte (GVI) de la Transformation Tasseled Cap de Kauth-Thomas.

MÉTHODES COMPLÉMENTAIRES À L'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR X. LA RECHERCHE SUR LA DÉGRADATION DES TERRES

10. MÉTHODES COMPLÉMENTAIRES À L'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR LA RECHERCHE SUR LA DÉGRADATION DES TERRES

L'utilisation de la technologie de télédétection pour l'évaluation de la dégradation des terres a de nombreux avantages : économie de temps, couverture d'une grande superficie, possibilités de révision de l'analyse, sauvegarde de projets et de données pour faciliter le suivi sur le long terme. La disponibilité de séries de données gratuites, à couverture mondiale, qui remontent aux années 1980, offre une opportunité de recherche à long terme sur la dynamique de la végétation, distribuée dans l'espace et sur de grandes surfaces géographiques [16]. Les images satellitaires à résolution grossière et moyenne conviennent à la détection et au suivi de la dynamique de la couverture végétale dans le temps, car elles fournissent des mesures cohérentes, précieuses et reproductibles à une échelle spatiale. Ceci permet de déceler les effets de nombreux processus qui provoquent la dégradation. Ainsi, les techniques de télédétection permettent d'avoir accès à des zones, de manière peut-être moins difficile et moins cher que par d'autres moyens. En raison de la diversité des échelles, des techniques offertes par la télédétection, de la disponibilité de données riches sur les paysages, sur l'utilisation des terres et sur d'autres aspects de l'interaction de l'homme avec les ressources naturelles, la télédétection est de plus en plus utilisée pour suivre un ensemble d'activités humaines à différentes échelles et sur différentes périodes de temps [59].

Malgré leur importance, les techniques de télédétection sont moins efficaces pour identifier les forces motrices qui influencent la condition des terres que pour déterminer des zones potentielles de changement récent ou en cours. Pour aller au-delà de l'identification de l'emplacement, de l'étendue et de la tendance d'un changement de la condition des terres, d'autres outils de recherche scientifique doivent compléter les techniques, les données et les outils de télédétection. De plus en plus, les chercheurs associent les indices de végétation (principalement le NDVI) et d'autres techniques géospatiales à des méthodes de collecte de données, au sein de méthodologies intégrées, afin d'évaluer l'ampleur, la gravité et les tendances de la dégradation des terres. Comprendre les causes et les conséquences potentielles de la dégradation ou de l'amélioration des terres est nécessaire pour identifier les types de méthodes de recherche qui peuvent contribuer à la triangulation¹⁶ des données, des outils et des méthodes de télédétection (Tableau 4).

10.1 GROUPES DE DISCUSSION

Un groupe de discussion comprend un nombre limité d'individus (généralement 10 ou moins) rassemblés pour participer à une discussion guidée par un modérateur sur un sujet spécifique ou un ensemble de sujets (Figure 16). La discussion est centrée et suit la direction prédéterminée par un modérateur [140, 141]. Les groupes de discussion donnent un aperçu de ce que pensent les gens et permettent de mieux comprendre le phénomène examiné [141]. Ils peuvent remplir différents objectifs pour l'évaluation et le suivi de la dégradation des terres.

EXPLORATION : Les groupes de discussion peuvent servir à connaître les perceptions des individus sur l'état, la condition et les tendances des terres. L'enquêteur peut être intéressé par leurs avis sur la dégradation des terres dans une communauté donnée.

PLANIFICATION PARTICIPATIVE : Pour comprendre l'impact de la dégradation des terres et trouver des solutions potentielles, l'enquêteur peut souhaiter impliquer les communautés locales dans l'identification des problèmes et la recherche de solutions. Les groupes de discussions peuvent servir de cadre à cet engagement.

RECHERCHE SYSTÉMATIQUE : Les groupes de discussion sont des outils de collecte de données en soi. Des méthodologies de collecte et d'analyse des données liées aux groupes de discussion ont été mises au point et peuvent être appliquées au domaine des changements d'occupation et d'utilisation des terres, ainsi que de dégradation des terres.

ÉVALUATION : Les groupes de discussion servent de cadre pour évaluer le résultat des interventions de gestion de la dégradation des terres. Les chercheurs auront l'opportunité de générer des données détaillées sur les impacts des interventions en matière de dégradation des terres sur un ensemble des services aux communautés, ainsi que sur les avis des communautés quant au succès de ces efforts.

TABLEAU 4.
MÉTHODES COMPLÉMENTAIRES À L'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR LES ÉVALUATIONS ET LE SUIVI DE LA DÉGRADATION DES TERRES.

ÉCHELLE SPATIALE	PROCESSUS / CARACTÉRISTIQUES ÉVALUÉS	MÉTHODES COMPLÉMENTAIRES	SYSTÈMES POTENTIELS D'INTÉRÊT
CHAMP OU FERME	<ul style="list-style-type: none"> Types de dégradation des terres ; Ampleur, gravité, causes, impacts, risques Condition des terres changement de couverture terrestre ; biodiversité 	<ul style="list-style-type: none"> Enquêtes de terrain Groupes de discussion Entretiens Modèles Mesures sur le terrain Cartographie participative 	<ul style="list-style-type: none"> Terres (cultures, pâturages) Sols Hydrologie de surface Biodiversité
INFRANATIONAL ET NATIONAL	<ul style="list-style-type: none"> Dégradation des terres Types, ampleur, gravité, cause, impacts, risques Condition des terres Changement de la couverture terrestre, biodiversité Budgets nationaux de carbone ODD nationaux basés sur la terre Potentiel pour l'écotourisme 	<ul style="list-style-type: none"> Enquêtes de terrain Groupes de discussion Entretiens Modèles Mesures sur le terrain Cartographie participative Sites pilotes Échantillonnage par GPS 	<ul style="list-style-type: none"> Terres (cultures, pâturages, terres conservées) Sols Hydrologie de surface Biodiversité Écosystèmes Zones agroécologiques

¹⁶ L'idée de la triangulation repose sur la notion que des multiples points de vue permettent d'améliorer la précision. La triangulation mélange les approches et les données de la recherche qualitative et quantitative. Une méthode de recherche ainsi conçue a tendance à être plus riche et plus détaillée, et peut révéler des informations qui n'auraient pas été évidentes en utilisant seulement une approche 136. Neuman, L.W., *Social research methods: Qualitative and quantitative approaches*. 2002.



Interview d'un agriculteur à Morogoro, Tanzanie, à l'aide d'un questionnaire structuré.



Tous les entretiens approfondis avec les informateurs clés des utilisateurs des terres à Kisumu, dans l'ouest du Kenya.



Séances de groupes de discussion avec des agriculteurs et d'autres utilisateurs des terres dans la division de Boyo, région du nord-ouest du Cameroun.

Figure 16. Processus de collecte de données qualitatives qui peuvent compléter les résultats des données de télédétection.

10.2 ENTRETIENS AVEC LES INFORMATEURS CLÉS

Les entretiens avec les informateurs clés sont des entretiens individuels intensifs, concernant un petit nombre d'enquêtés (2 ou 3), afin d'obtenir leurs avis sur un sujet particulier (Figure 16). Ces entretiens sont particulièrement utiles lorsqu'un enquêteur a une connaissance limitée de la situation et souhaite connaître les opinions préliminaires des participants. Cette forme de collecte de données peut servir à approfondir un sujet spécifique, et rassembler ainsi des données de la part « d'informateurs clés » qui connaissent bien la situation. Les informateurs clés peuvent inclure des leaders communautaires, des professionnels locaux, des décideurs ou des résidents qui ont une connaissance de première main de la communauté. Les entretiens avec les informateurs clés sont souvent détaillés et peu structurés, laissant à l'enquêteur et à la personne interrogée la liberté d'examiner des points supplémentaires ou de changer d'orientation, le cas échéant [140]. Dans les études de l'utilisation des terres, des changements de couverture terrestre et de dégradation des terres, les informateurs clés à considérer (en fonction du sujet) seraient des fermiers, des éleveurs et des utilisateurs de ressources naturelles liées aux terres (bois de chauffage et d'œuvre, produits forestiers non ligneux). Les responsables des groupes d'appui agricoles et de ressources naturelles, les experts en matière de ressources terrestres et les décideurs des secteurs des ressources naturelles et de l'agriculture seront aussi des informateurs très utiles.

10.3 CARTOGRAPHIE COMMUNAUTAIRE ET SIG PARTICIPATIF

La cartographie participative est un processus pour rendre visible l'association entre les terres et les communautés locales, en utilisant la langue communément comprise et reconnue de la cartographie [142]. Le SIG participatif est la pratique de collecte et d'enregistrement des données spatiales, à l'aide de méthodes traditionnelles telles que les entretiens, les questions et les groupes de discussion avec des membres des communautés

locales [143]. La cartographie et le SIG participatifs reposent sur l'idée que les populations locales ont une connaissance de leur propre environnement, qui peut être exprimée dans un cadre géographique facilement compréhensible et universellement reconnaissable. Les cartes participatives sont planifiées sur la base d'un objectif commun et d'une stratégie d'utilisation, et souvent élaborées avec la contribution d'une communauté entière, selon un processus ouvert et intégrateur [143]. Plus le processus est ouvert et intégrateur, plus la carte finale reflètera l'expérience collective du groupe qui l'a produite. Dans les projets d'évaluation et de suivi de la dégradation des terres, la cartographie communautaire et le SIG participatif peuvent servir à créer des cartes qui représentent le profil d'utilisation des terres et des ressources, identifient les zones qui ont connu ou non des changements, selon les indicateurs principaux de la dégradation des terres, et identifient des zones menacées. La cartographie communautaire et le SIG participatif peuvent aussi fournir des données sur les valeurs des communautés et leurs perceptions des différentes formes et de la gravité de la dégradation des terres, ainsi que des informations sur le savoir traditionnel et les pratiques liées à la situation des terres. Les communautés peuvent être des parties prenantes précieuses pour fournir des données pour les évaluations ou le suivi des changements d'utilisation des terres et pour le développement de scénarios alternatifs dans les paysages où ils vivent et opèrent¹⁷.

10.4 OBSERVATION

Plusieurs aspects de la dégradation des terres et leurs conséquences peuvent avoir des manifestations physiques sur les terres, les paysages ou les activités humaines soutenues par ces paysages. Ces manifestations peuvent comprendre la présence visible d'une érosion des sols, un ravinement ou un mauvais rendement des cultures. L'observation et la notification de ces phénomènes vers d'autres formes de données et d'analyses peuvent être utiles pour trianguler les résultats d'une recherche. L'observation est une méthode selon laquelle le chercheur a un accès physique à la communauté qu'il examine, dans le but de mieux comprendre le contexte physique, social, culturel et économique dans lequel vivent les participants à l'étude [140, 144].

Grâce à l'observation des participants, le chercheur peut découvrir des facteurs qui sont essentiels à la compréhension du problème, mais qui n'étaient pas connus lors de la conception de l'étude. Dans la recherche sur la dégradation des terres, il peut s'agir d'aspects essentiels de la situation des terres, comme la gravité d'une forme particulière de dégradation, de facteurs principaux contribuant à l'état des terres et de perspectives données par une communauté donnée sur l'avenir de l'occupation des terres. Lors d'une observation, certains indicateurs biophysiques peuvent servir de guide quant à l'état des terres, le niveau de dégradation et les tendances possibles (Figure 17). Ces observations peuvent être approfondies lors de processus complémentaires de recherche tels que groupes de discussion, entretiens avec les informateurs clés, ou recoupées avec les sources et les analyses de données satellite. Ces observations peuvent inclure :

LA SITUATION DE LA VÉGÉTATION : degré de couverture végétale ; nombre d'arbres par unité

de surface et types ; qualité de la végétation et indications d'interactions récentes entre la communauté et le couvert végétal, déforestation par exemple (voir la Figure 17).

LA CONDITION DU SOL : degré d'exposition du sol aux éléments de l'érosion ; indications d'érosion hydrique (dans les nappes, rigoles et ravins) ; indications d'érosion éolienne telles que des particules de sol meuble dans un environnement venteux ou brume de poussière avec des particules fines minérales et organiques qui contiennent le plus de nutriments.

LES RESSOURCES EN EAU : présence de petite biodiversité aquatique dans les eaux de surface ; présence ou absence de polluants visibles dans les eaux de surface (comme une pellicule d'huile à la surface) ; indications de pollution d'origine domestique et industrielle, sources d'approvisionnement en eau des ménages et disponibilité de l'eau.

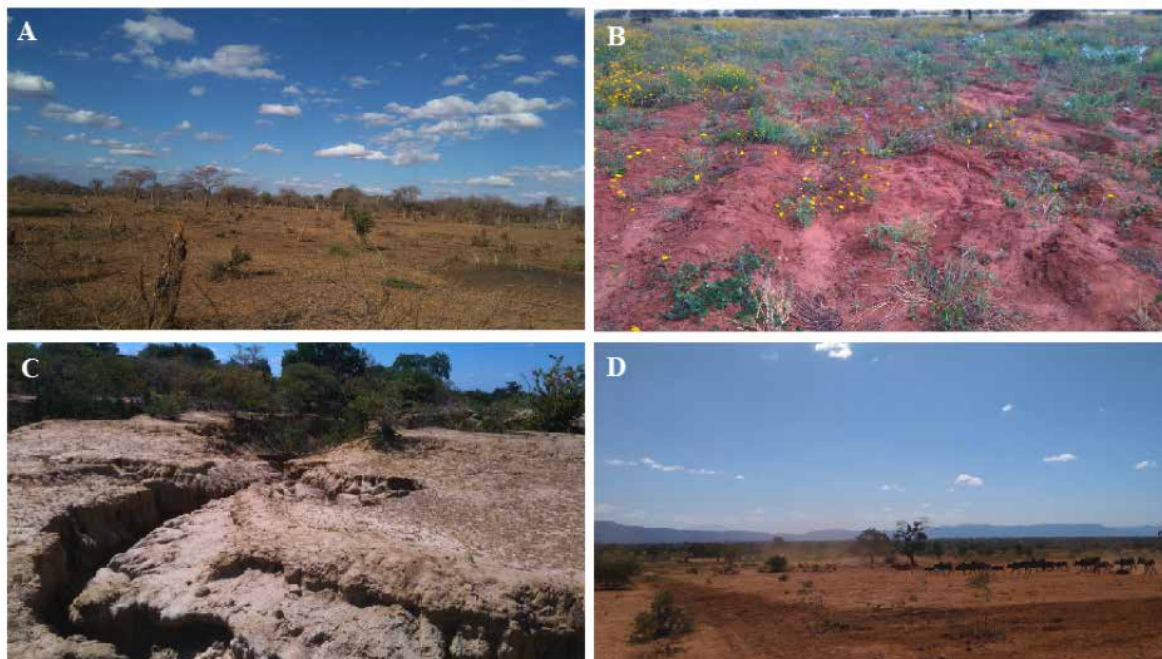


Figure 17. Exemples d'éléments facilement visibles de l'état des terres lors d'observations sur le terrain dans les districts centraux de la Tanzanie. A – Déforestation récente à Ndaleta ; B – Terres mal protégées contre les forces de l'érosion après la récolte de haricots à Simanjoro ; C – Ravinement à Masange ; D – Zone surpâturée souffrant d'une érosion éolienne à Pahi. Notez le nuage de poussière au centre de l'image.

¹⁷ Le Fonds international de développement agricole (FIDA) propose des meilleures pratiques en matière de cartographie participative. Les informations se trouvent ici : <https://www.ifad.org/documents/10180/d1383979-4976-4c8e-ba5d-53419e37cbcc>

10.5 ENQUÊTES

L'enquête est la pratique de collecte d'informations de la part d'un échantillon d'individus, à travers leurs réponses à des questions [145]. Cette pratique peut mettre à l'usage différents instruments de collecte de données. Le principal instrument est généralement un questionnaire structuré pour rassembler des informations purement qualitatives. On peut aussi utiliser des questionnaires semi-structurés avec des questions ouvertes [146]. L'emploi des deux pratiques peut conduire à des méthodes mixtes de recherche [146, 147]. L'instrument d'enquête peut prendre plusieurs formes : il peut s'agir d'un document écrit à remplir par la ou les personne(s) interrogée(s), d'un questionnaire en ligne, d'un entretien en face à face, ou d'un entretien par téléphone.

Les enquêtes peuvent servir à différents aspects de la recherche sur la dégradation des terres. Une *enquête de référence*¹⁸ peut servir de point de départ au suivi des changements d'utilisation des terres, de couverture terrestre et de situation des terres. L'enquête de référence fournira une caractérisation détaillée de l'état des terres (à l'aide d'indicateurs soigneusement formulés) pour une année donnée, qui servira de seuil aux mesures, aux comparaisons et aux références futures. Une enquête sur les tendances peut servir au suivi des progrès des activités. Dans les études de la dégradation des terres, ces activités peuvent être celles réalisées pour répondre à un problème sous-jacent d'utilisation des terres ou à une situation. Les enquêtes sur les tendances sont généralement moins complètes que les enquêtes de référence. Les enquêtes basées sur un événement servent à cerner la manifestation d'un événement particulier à un moment précis. Une déforestation rapide d'un bassin versant peut déclencher une enquête basée sur un événement pour en évaluer les aspects immédiats. Cette enquête peut inclure des questions comme : Qui est responsable ?

Quelles sont les conséquences immédiates de la déforestation ? Que peut-on faire dans l'immédiat pour améliorer la situation ? Que faut-il prendre en considération lors des efforts à long terme pour résoudre les problèmes associés à cet événement

10.6 RÉFLEXIONS SUR LES SOURCES COMPLÉMENTAIRES DE DONNÉES POUR LA RECHERCHE SUR LA DÉGRADATION DES TERRES

L'organisation de la recherche et de la collecte des données, ainsi que la sélection des types de sources complémentaires de données pour évaluer et suivre la dégradation des terres dépendront des objectifs du projet sur la dégradation des terres, ainsi que du but du type de recherche. Chaque méthode de collecte de données présente des forces et des faiblesses dont il faut tenir compte lors de la conception du projet (Tableau 5).

Le type de recherche est un facteur important pour le type de méthode employé en complément de l'analyse des données de télédétection sur la dégradation des terres. Les types de recherche rentrent dans plusieurs catégories. La recherche peut par exemple être classée selon le mode de collecte de données (recherche continue ou ponctuelle) ; le type de données rassemblées et utilisées (recherche quantitative ou qualitative) et les sources de données (recherche primaire ou secondaire). Une catégorisation courante est fondée sur le mode de réalisation de la recherche (exploratoire, descriptive ou explicative). Les pratiques exploratoires, descriptives et explicatives sont applicables à la recherche sur la dégradation des terres à différents niveaux. Il faut noter que ces catégories ne s'excluent pas mutuellement ; il s'agit plutôt de savoir sur quoi on met l'accent. L'objectif peut être multiple, car toute recherche peut changer ou évoluer.

¹⁸ Une enquête de référence constitue un exemple d'enquête transversale. Les enquêtes transversales servent à rassembler des informations sur une population de façon ponctuelle. Les enquêtes longitudinales rassemblent des informations sur une période de temps ou d'un instant à un autre, pour obtenir des données et examiner les changements. Les enquêtes sur les tendances sont des enquêtes longitudinales.

TABLEAU 5.

FORCES ET FAIBLESSES DES MÉTHODES POSSIBLES POUR COMPLÉTER LES RÉSULTATS OBTENUS DE L'ANALYSE DES DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION SUR L'ÉTAT ET LES TENDANCES DES TERRES.

MÉTHODE	FORCES	FAIBLESSES
OBSERVATION	<ul style="list-style-type: none"> • Donne des informations sur le contexte, les relations et les comportements • Peut apporter des informations qui n'étaient pas connues des chercheurs et qui sont essentielles à la conception du projet, la collecte de données et l'interprétation d'autres données 	<ul style="list-style-type: none"> • Prend beaucoup de temps • La documentation repose sur la mémoire, la discipline personnelle et la rigueur du chercheur • Demande un effort conscient d'objectivité, car la méthode est intrinsèquement subjective
ENTRETIENS AVEC LES INFORMATEURS CLÉS	<ul style="list-style-type: none"> • Stimule des réponses détaillées avec des nuances et des contradictions • Emploie une perspective interprétative – connexions et relations sur les principaux sujets d'intérêt • Des données détaillées et fournies peuvent être rassemblées sur chaque sujet, car l'enquêteur peut explorer chaque sujet librement • Peut être facilement combiné à d'autres techniques de recherche 	<ul style="list-style-type: none"> • Il faut beaucoup de temps pour organiser et effectuer les entretiens et la collecte des données primaires • Il faut du temps pour sélectionner des bons informateurs et établir la confiance • Peut être coûteux, avec les coûts d'organisation et de conduite des entretiens, déplacement • Biais potentiel lié à l'enquêteur • Les informations obtenues peuvent être difficiles à quantifier
GROUPES DE DISCUSSION	<ul style="list-style-type: none"> • Obtention d'informations de différentes normes et opinions en peu de temps • La dynamique de groupe stimule la conversation, les réactions 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas aussi efficace pour couvrir en profondeur un sujet par rapport aux entretiens avec les informateurs clés • Biais potentiel lié au modérateur, qui peut influencer fortement le résultat d'une discussion de groupe
ENQUÊTE	<ul style="list-style-type: none"> • Peut produire une grande quantité de données en peu de temps pour un coût relativement bas • Flexible et peut être réalisé sous différents formats • Produit beaucoup de réponses • Les données peuvent être généralisées si l'échantillonnage est effectué soigneusement 	<ul style="list-style-type: none"> • Peut prendre beaucoup de temps • Assurer un niveau élevé de réponse à une enquête peut être difficile à contrôler (faible taux de réponse) • Saisit ce que les personnes interrogées disent penser et croire mais pas forcément ce qu'elles font dans la vie réelle • Les données risquent de manquer de détails ou de profondeur sur le sujet

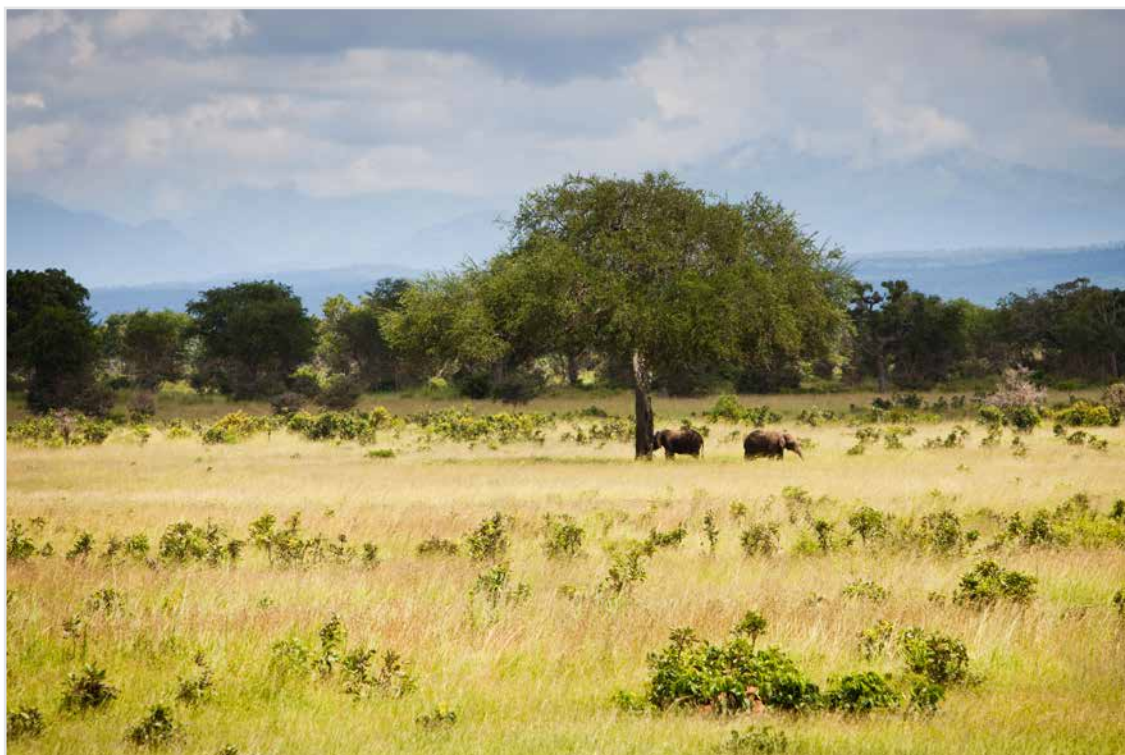
10.6.1 RECHERCHE EXPLORATOIRE

La recherche exploratoire vise à identifier des aspects et des variables clés pour une piste d'investigation. Le chercheur peut avoir besoin de cette connaissance pour lui permettre de tester la faisabilité d'une autre étude plus large, déterminer les meilleures méthodes à employer dans une étude à venir, voire affiner les questions pour mieux traduire la situation sur le terrain. Les méthodes d'une recherche exploratoire peuvent inclure une revue de publications, des groupes de discussion et des entretiens. Un exemple de recherche exploratoire dans le domaine de la dégradation des terres peut être une requête d'opinions d'un échantillon d'utilisateurs des terres sur les pratiques d'utilisation des terres.

10.6.2 RECHERCHE DESCRIPTIVE

La recherche descriptive a pour objectif de fournir une description précise des observations d'un phénomène ou d'un problème [148]. Dans ce cas, le chercheur souhaite autant d'informations que possible sur le sujet en question.

Une bonne planification est nécessaire pour arriver au niveau souhaité de profondeur et de précision. La recherche descriptive cherche à répondre aux questions Qui ? Quoi ? Où ? Quand ? Comment ? Combien ?. Dans le cadre du processus de planification, les questions peuvent être : Que doit-on décrire ? Comment parvenir à cette description ? Quelles limites de la description doivent-elles être appliquées à l'étude (limites temporelles ou spatiales par exemple) ? Quels sont les unités et les indicateurs à utiliser ? La description peut consister en mesures, analyses, prévisions, etc. L'analyse quantitative de données primaires et secondaires, les observations, les entretiens, les enquêtes et les questionnaires sont des méthodes courantes de la recherche descriptive. La dernière décennie a vu plusieurs tentatives pour comprendre l'état et les tendances de la dégradation des terres en Afrique, qui constituent des exemples de recherche descriptive.



Parc national de Mikumi, Afrique, Tanzanie. © Benjamin Drummond

10.6.3 RECHERCHE EXPLICATIVE

Connue aussi sous le nom de recherche causale, ce type de recherche cherche à identifier l'ampleur et la nature des relations de cause à effet, ainsi que d'expliquer les schémas des interactions entre les variables qui influencent une situation ou un résultat donné [148]. La recherche explicative vise à expliquer les relations entre les variables qui affectent un phénomène ou influencent un résultat. Elle peut aussi servir à évaluer les impacts de changements spécifiques sur des pratiques, des normes ou des processus, etc. existants. La collecte et l'utilisation de données primaires par différentes méthodes sont courantes dans la recherche explicative. Les études visant à clarifier les liens entre les changements d'occupation et d'utilisation des terres et la dégradation des terres sont un exemple de recherche explicative.

XI. OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE (ODD) ET INDICATEURS DE LA DÉGRADATION DES TERRES

11 OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE (ODD) ET INDICATEURS DE LA DÉGRADATION DES TERRES

Le Programme mondial de développement durable à l'horizon 2030 adopté par l'Assemblée générale des Nations Unies en 2015 inclut 17 nouveaux Objectifs de développement durable (ODD) ainsi que 169 cibles¹⁹ :

- Objectif 1.** Éliminer la pauvreté sous toutes ses formes, et partout dans le monde
- Objectif 2.** Éliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir l'agriculture durable
- Objectif 3.** Permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous à tout âge
- Objectif 4.** Assurer l'accès de tous à une éducation de qualité, sur un pied d'égalité, et promouvoir les possibilités d'apprentissage tout au long de la vie
- Objectif 5.** Parvenir à l'égalité des sexes et autonomiser toutes les femmes et les filles
- Objectif 6.** Garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement et assurer une gestion durable des ressources en eau
- Objectif 7.** Garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes à un coût abordable
- Objectif 8.** Promouvoir une croissance économique soutenue, partagée et durable, le plein emploi productif et un travail décent pour tous
- Objectif 9.** Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et encourager l'innovation
- Objectif 10.** Réduire les inégalités dans les pays et d'un pays à l'autre
- Objectif 11.** Faire en sorte que les villes et les établissements humains soient ouverts à tous, surs, résilients et durables
- Objectif 12.** Établir des modes de consommation et de production durables
- Objectif 13.** Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions
- Objectif 14.** Conserver et exploiter de manière durable les océans, les mers et les ressources marines aux fins du développement durable
- Objectif 15.** Préserver et restaurer les écosystèmes terrestres, en veillant à les exploiter de façon durable, gérer durablement les forêts, lutter contre la désertification, enrayer et inverser le processus de dégradation des terres et mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité
- Objectif 16.** Promouvoir l'avènement de sociétés pacifiques et inclusives aux fins du développement durable, assurer l'accès de tous à la justice et mettre en place, à tous les niveaux, des institutions efficaces, responsables et ouvertes à tous
- Objectif 17.** Renforcer les moyens de mettre en œuvre le Partenariat mondial pour le développement durable et le revitaliser

¹⁹ Assemblée générale des Nations Unies : Transformer notre monde : Le Programme de développement durable à l'horizon 2030. Disponible ici, [Accès 1er décembre 2015].

L'évaluation et le suivi de la dégradation des terres participent à la réalisation de trois principaux ODD. Il s'agit de :

- 2.4 - D'ici à 2030, assurer la viabilité des systèmes de production alimentaire et mettre en œuvre des pratiques agricoles résilientes qui permettent d'accroître la productivité et la production, contribuent à la préservation des écosystèmes, renforcent la capacité d'adaptation aux changements climatiques, aux phénomènes météorologiques extrêmes, à la sécheresse, aux inondations et à d'autres catastrophes et améliorent progressivement la qualité des terres et des sols
- 15.2 - D'ici à 2020, promouvoir la gestion durable de tous les types de forêt, mettre un terme à la déforestation, restaurer les forêts dégradées et accroître nettement le boisement et le reboisement au niveau mondial
- 15.3 - D'ici à 2030, lutter contre la désertification, restaurer les terres et sols dégradés, notamment les terres touchées par la désertification, la sécheresse et les inondations, et s'efforcer de parvenir à un monde sans dégradation des terres

La réalisation des cibles ci-dessus rentre dans le cadre des objectifs fixés par plusieurs initiatives et programmes mondiaux et régionaux pour arrêter et infléchir la dégradation des terres ainsi que pour restaurer les écosystèmes dégradés. Le souhait de la CNULCD de remplir la cible 15.3 pour parvenir à la neutralité en matière de dégradation des terres²⁰ (NDT) d'ici 2030 est à souligner [149].

Ce document, ainsi que les méthodologies et l'outil associés, permet aux parties prenantes nationales d'effectuer le suivi et l'analyse de la dégradation

des terres, afin d'appuyer les priorités nationales établies d'ODD basés sur les terres. Il fournit des données mondiales harmonisées pour tester les trois indicateurs basés sur les terres, aux niveaux national et infranational. Il aide les pays à planifier et à mettre en œuvre des approches par étapes de l'évaluation et du suivi de la dégradation des terres, notamment l'identification, la cartographie et la quantification des points chauds et des tendances de dégradation des terres. Grâce à cet appui, les pays peuvent ensuite identifier des options de gestion des terres qui peuvent arrêter ou infléchir ces tendances négatives (actions qui contribuent à la réalisation de la NDT). Ils peuvent aussi revoir leurs Programmes d'action nationaux (PAN) et identifier l'ensemble d'options financières, scientifiques, administratives et de gestion des terres pour faire face aux tendances observées dans les points chauds de dégradation des terres et fixer des cibles nationales réalistes de NDT.

11.1 NOTIFICATION DES INDICATEURS CLÉS POUR LA CNULCD ET LE FEM (PRODUCTIVITÉ, COUVERTURE TERRESTRE, CARBONE DU SOL)

La CNULCD et le FEM utilisent la productivité des terres, la couverture terrestre et les stocks de carbone dans le sol et en surface pour suivre la dégradation des terres et rendre compte du progrès de la lutte contre ce fléau. Les indicateurs de progrès de la CNULCD (auparavant appelés indicateurs d'impacts) montrent les progrès réalisés dans l'obtention d'avantages à long terme pour les populations vivant dans les zones affectées par la désertification, la dégradation des terres et la sécheresse, pour les écosystèmes touchés et pour l'environnement mondial. Lors de sa onzième session, la Conférence des Parties (COP)

²⁰ La Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD, 2016) définit la neutralité en matière de dégradation des terres comme « un état où la quantité et la qualité des terres nécessaires pour soutenir les fonctions et les services des écosystèmes et améliorer la sécurité alimentaire restent stables ou augmentent dans le cadre d'écosystème et d'échelle spatiale et temporelle définis ». Selon la CNULCD, l'objectif de la NDT est de « maintenir voire d'améliorer dans le temps la quantité de ressources foncières saines et productives, conformément aux priorités nationales de développement durables ». Elle considère que la NDT est une cible « qui peut être mise en œuvre aux niveaux local, national et même régional » à travers deux pistes d'action complémentaires : la gestion durable des terres (GDT) et la restauration des écosystèmes. La NDT est une cible convenue à l'échelle mondiale pour galvaniser l'action de lutte contre la dégradation des terres, en fournissant des objectifs clairs permettant de suivre les avancées, ou l'absence de progrès, en matière d'amélioration des terres. La CNULCD a adopté trois indicateurs de progrès liés aux terres, qui seront au cœur de la notification du progrès de la NDT : Niveau 1 : évolution de la structure du couvert terrestre ; Niveau 2a : évolution de la productivité ou du fonctionnement des terres et Niveau 2b : évolution des stocks de carbone dans le sol et en surface.

TABLEAU 6.

INDICATEURS DE PROGRÈS DU CNULCD POUR LA NOTIFICATION NATIONALE

INDICATEUR	UTILISATION POTENTIELLE DU NDVI
OBJECTIF STRATÉGIQUE 1 : AMÉLIORER LES CONDITIONS DE VIE DES POPULATION TOUCHÉES	
OS1-1: ÉVOLUTION DE LA POPULATION VIVANT SOUS LE SEUIL DE PAUVRETÉ RELATIF ET/OU DE L'INÉGALITÉ DES REVENUS DANS LES	Pas applicable.
OS1-2 : ÉVOLUTION DE L'ACCÈS À L'EAU POTABLE DANS LES ZONES TOUCHÉES	Le NDVI peut être combiné à l'Indice de teneur en eau par différence normalisée (NDWI) pour le suivi de la sécheresse et lié l'utilisation de l'eau dans les systèmes d'occupation des terres.
OBJECTIF STRATÉGIQUE 2 : AMÉLIORER LA SITUATION DES ÉCOSYSTÈMES TOUCHÉS	
OS2-1: ÉVOLUTION DE LA STRUCTURE DU COUVERT TERRESTRE	Le NDVI est l'indice de végétation le mieux testé, avec la plus longue série temporelle de suivi de l'évolution du couvert terrestre (33 ans), ce qui compense la faible résolution. Cependant, la prudence est requise dans l'interprétation des résultats et des moteurs du changement.
OS2-2: ÉVOLUTION DE LA PRODUCTIVITÉ OU DU FONCTIONNEMENT DES TERRES	La relation entre le NDVI et la productivité de la biomasse a été bien établie dans les publications et le NDVI peut servir à estimer la productivité des terres et en faire le suivi dans le temps.
OBJECTIF STRATÉGIQUE 3 : DÉGAGER DES AVANTAGES GÉNÉRAUX À TRAVERS LA MISE EN ŒUVRE EFFICACE DE LA CNULCD	
S03-1: ÉVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE DANS LE SOL ET EN SURFACE	Le NDVI peut être combiné à des données à plus haute résolution pour estimer l'évolution des stocks de carbone, par exemple pour la REDD et l'évaluation des stocks de carbone organique du sol.
OS3-2: ÉVOLUTION DE L'ABONDANCE ET DE LA RÉPARTITION DE CERTAINES ESPÈCES	Le NDVI peut servir au suivi de la fragmentation et de la connectivité des habitats, qui influencent fortement l'abondance et la distribution des espèces.

a adopté un ensemble révisé de six indicateurs de progrès (Décision 22/COP.11). Le Tableau 6 inclut un guide pour l'utilisation du NDVI par rapport à ces indicateurs, selon le rapport de Yengoh et al., (2015) :

La CNULCD et le FEM prévoient aussi d'utiliser le sous-ensemble d'indicateurs : productivité des terres, couverture terrestre et stocks de carbone dans le sol et en surface pour le suivi et la notification de la NDT examinée ci-après.

11.2 CADRE DE LA NEUTRALITÉ EN MATIÈRE DE DÉGRADATION DES TERRES

La réalisation de la NDT demande une approche qui donne aux décideurs la possibilité d'équilibrer les pertes et les gains, en termes d'intention (saisir les résultats attendus des décisions d'utilisation et de gestion des terres, de façon à favoriser la neutralité) et de résultats (évaluer l'impact de ces décisions). Le cadre de la NDT inclut ainsi la vision (résultats attendus de NDT), le cadre de référence (ligne de base) qui permettent de mesurer les réalisations, le mécanisme de neutralité (contrebalancer les changements négatifs anticipés par des actions prévues pour obtenir des avantages et suivre l'effet cumulatif des décisions d'utilisation des terres), la réalisation de la neutralité (préparer et rechercher la NDT) et le suivi de la neutralité (évaluer le progrès et la réalisation de la NDT). La Figure 18 illustre les principaux éléments du cadre conceptuel scientifique de la NDT et les liens entre eux, présentés dans ce rapport.

La cible en haut de la Figure 18 exprime la vision de la NDT, soulignant le lien entre la prospérité humaine et le capital naturel de la terre – la réserve de ressources naturelles qui apporte des flux de biens et services précieux. La balance au centre illustre le mécanisme pour parvenir à la neutralité : s'assurer que la dégradation future des terres (les pertes) soit contrebalancée par des actions positives ailleurs (les gains) dans le même type de terres (même écosystème et potentiel foncier). Le point clé de la balance présente la hiérarchie de réponses : éviter la dégradation est la première priorité, suivie par la réduction de la dégradation et enfin par l'inversion de la dégradation passée.

La flèche au bas du diagramme illustre que la neutralité est évaluée à travers le suivi des indicateurs de la NDT par rapport à une référence fixe. La flèche indique aussi que la neutralité doit être maintenue dans le temps, à travers une planification des terres qui anticipe les pertes et prévoit les gains. La gestion adaptative applique les leçons du suivi intermédiaire pour des ajustements à mi-parcours, afin de s'assurer de parvenir à la neutralité et de la maintenir.

Le suivi de la réalisation de la neutralité quantifiera l'équilibre entre la zone de gains et la zone de pertes, dans chaque type de terre du paysage. Les indicateurs de la NDT sont les mêmes indicateurs globaux de la CNULCD examinés ci-dessus : le couvert terrestre (le changement de la couverture terrestre), la productivité des terres (la production primaire nette) et les stocks de carbone (carbone organique du sol).

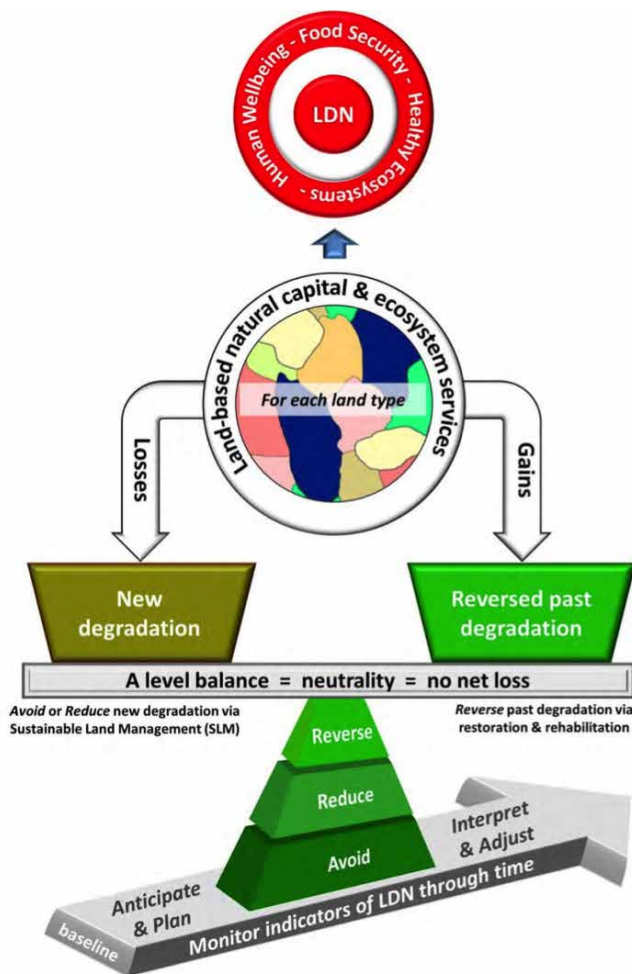


Figure 18. Éléments clés d'un cadre conceptuel de NDT [150].

11.3 SUIVI ET NOTIFICATION DE LA NDT

Les principes de suivi et de notification sur la cible 15.3 des ODD ont été développés lors d'une réunion d'experts à Washington en mars 2016, organisée par la CNULCD, la FAO et le STAP du FEM. En 2017, l'organisation fédérale australienne pour la recherche scientifique et industrielle (CSIRO) a élaboré des directives de bonnes pratiques pour l'évaluation et le suivi de l'indicateur d'ODD 15.3.1²¹. Ce document d'orientation a servi à développer des méthodologies d'évaluation des indicateurs de dégradation des terres dans l'outil Trends.Earth. Les principes d'évaluation et de suivi de la dégradation des terres sont similaires aux Lignes directrices 2006 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre²²) en ce qui concerne les méthodes d'estimation à trois niveaux de détail : du niveau 1 (méthode par défaut) au niveau 3 (méthode la plus détaillée) :

NIVEAU 1 : Observation de la Terre, information et modélisation géospatiale

NIVEAU 2 : Statistiques sur la base de données estimatives des frontières administratives ou naturelles

NIVEAU 3 : Enquêtes, évaluations et mesures sur le terrain

À partir de ces principes directeurs, des meilleures pratiques plus techniques seront nécessaires afin que les pays puissent :

1. Établir des lignes de base pour déterminer le statut initial des sous-indicateurs en valeurs absolues. Ceci inclurait : 1) la préparation d'informations de base sur le couvert terrestre, sur la base de l'ontologie standard ; 2) l'établissement d'une référence pour la productivité des terres (comme la PPN/le NDVI) et 3) l'établissement d'une référence pour les stocks de carbone, en surface et dans le sol, en mettant l'accent sur le

carbone organique du sol et en s'appuyant sur le travail du GIEC sur le carbone en surface.

2. Détecter les changements de chaque sous-indicateur, y compris l'identification de zones susceptibles de changer et leur validation ou évaluation par un inventaire national participatif de la dégradation des terres, en particulier lorsque des changements de deux ou trois sous-indicateurs coïncident ou se chevauchent spatialement.
3. Dédurre l'indicateur 15.3.1 en additionnant toutes les zones susceptibles de changer, dont la situation est considérée négative par les autorités nationales (dégradation des terres), tout en utilisant le cadre pour les mesurer et évaluer les changements de chaque sous-indicateur, ainsi que leur combinaison.
4. Utiliser les données nationales autant que possible pour déduire les sous-indicateurs et autres informations et indicateurs pertinents au niveau du pays, incluant les conditions biophysiques, de gouvernance et socioéconomiques, ainsi que l'état des ressources foncières. Les données nationales peuvent être rassemblées de sources existantes (cartes, bases de données, rapports), incluant des inventaires participatifs sur les systèmes existants de gestion des terres et leurs caractéristiques.

²¹ CSIRO, 2017. Guide de bonnes pratiques. Indicateur ODD 15.3.1: Proportion de terres dégradées sur la superficie totale. Septembre 2017.

²² http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/0_Overview/V0_1_Overview.pdf.

XII. RÉFÉRENCES

12. RÉFÉRENCES

1. UNCCD, *Land Degradation Neutrality: Resilience at local, national and regional levels*. 2014, UNCCD United Nations Convention to Combat Desertification: Bonn, Germany. p. 24.
2. Ponce-Hernandez, R. *Land degradation assessment in drylands: Approach and development of a methodological framework*. 2008 [cited 2015 July 2].
3. Adams, C. and H. Eswaran, *Global land resources in the context of food and environmental security*. Advances in land resources management for the 20th century. Soil Conservation Society of India, New Delhi, 2000: p. 35-50.
4. Sivakumar, M.V. and R. Stefanski, *Climate and land degradation—an overview, in Climate and Land Degradation*. 2007, Springer. p. 105-135.
5. Nkonya, E., et al., *The economics of desertification, land degradation, and drought: toward an integrated global assessment*. 2011, ZEF Discussion Papers on Development Policy.
6. Kirui, O. and A. Mirzabaev, *Costs of land degradation in Eastern Africa, in ZEF Working Paper Series No. 128, ISSN 1864-6638, J.v. Braun, et al., Editors*. 2015, Department of Political and Cultural Change, Center for Development Research, University of Bonn: Bonn, Germany.
7. Nkonya, E., et al., *Economics of Land Degradation in Sub-Saharan Africa, in Economics of Land Degradation and Improvement – A Global Assessment for Sustainable Development*, E. Nkonya, A. Mirzabaev, and J. von Braun, Editors. 2016, Springer International Publishing: Cham. p. 215-259.
8. Thiombiano, L. and I. Tourino-Soto, *Status and trends in land degradation in Africa*. Climate and land degradation, 2007: p. 39-53.
9. Bellamy, J. and K. Hill, *National Capacity Self-Assessments: Results and Lessons Learned for Global Environmental Sustainability*. Global Support Programme, Bureau for Development Policy, United Nations Development Programme: New York, NY, USA, 2010.
10. Tucker, C.J., et al., *Global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) satellite drift corrected and NOAA-16 incorporated normalized difference vegetation index (NDVI), monthly 1981-2002*. University of Maryland, 2004.
11. Tucker, C.J., et al., *An extended AVHRR 8 km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data*. International Journal of Remote Sensing, 2005. 26(20): p. 4485-4498.
12. Pinzon, J.E. and C.J. Tucker, *A non-stationary 1981–2012 AVHRR NDVI3g time series*. Remote Sensing, 2014. 6(8): p. 6929-6960.
13. Liang, S., *Quantitative remote sensing of land surfaces*. Vol. 30. 2005: John Wiley & Sons.
14. Purkis, S.J. and V.V. Klemas, *Remote sensing and global environmental change*. 2011: John Wiley & Sons.
15. Prince, S.D. and S.N. Goward, *Global primary production: a remote sensing approach*. Journal of biogeography, 1995: p. 815-835.
16. Vlek, P., Q. Le, and L. Tamene, *Assessment of land degradation, its possible causes and threat to food security in Sub-Saharan Africa, in Food security and soil quality*. Advances in Soil Science, R. Lal and B.A. Stewart, Editors. 2010, Taylor & Francis: Boca Raton, FL, USA. p. 57-86.
17. Field, C.B., J.T. Randerson, and C.M. Malmström, *Global net primary production: combining ecology and remote sensing*. Remote Sensing of Environment, 1995. 51(1): p. 74-88.

18. Albalawi, E.K. and L. Kumar, *Using remote sensing technology to detect, model and map desertification: A review*. Journal of Food, Agriculture and Environment, 2013. 11: p. 791-797.
19. Strand, H., et al., *Sourcebook on Remote Sensing and Biodiversity Indicators*. Vol. Technical Series no. 32. 2007, Montreal, Canada: Secretariat of the Convention on Biological Diversity.
20. Anyamba, A. and C.J. Tucker, *Historical perspective of AVHRR NDVI and vegetation drought monitoring*. Remote Sensing of Drought: Innovative Monitoring Approaches, 2012: p. 23.
21. Bai, Z.G., et al., *Proxy global assessment of land degradation*. Soil use and management, 2008. 24(3): p. 223-234.
22. Cook, B.I. and S. Pau, *A global assessment of long-term greening and browning trends in pasture lands using the GIMMS LAI3g dataset*. Remote Sensing, 2013. 5(5): p. 2492-2512.
23. de Jong, R., et al., *Quantitative mapping of global land degradation using Earth observations*. International Journal of Remote Sensing, 2011. 32(21): p. 6823-6853.
24. Shalaby, A. and R. Tateishi, *Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt*. Applied Geography, 2007. 27(1): p. 28-41.
25. Symeonakis, E. and N. Drake, *Monitoring desertification and land degradation over sub-Saharan Africa*. International Journal of Remote Sensing, 2004. 25(3): p. 573-592.
26. Townshend, J.R., et al., *Global characterization and monitoring of forest cover using Landsat data: opportunities and challenges*. International Journal of Digital Earth, 2012. 5(5): p. 373-397.
27. Strittholt, J. and M. Steininger, Trends in Selected Biomes, Habitats, and Ecosystems: *Forests*, in *Sourcebook on Remote Sensing and Biodiversity Indicators*, H. Strand, et al., Editors. 2007, Secretariat of the Convention on Biological Diversity: Montreal. p. 203.
28. Kim, D.-H., et al., *Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000*. Remote Sensing of Environment, 2014. 155: p. 178-193.
29. Verbesselt, J., et al., *Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series*. Remote Sensing of Environment, 2010. 114(12): p. 2970-2980.
30. Vogelmann, J.E., et al., *Monitoring gradual ecosystem change using Landsat time series analyses: Case studies in selected forest and rangeland ecosystems*. Remote Sensing of Environment, 2012. 122: p. 92-105.
31. Vogelmann, J.E., et al., *Perspectives on monitoring gradual change across the continuity of Landsat sensors using time-series data*. Remote Sensing of Environment, 2016. 185: p. 258-270.
32. Williams, C.J., et al., *Application of Ecological Site Information to Transformative Changes on Great Basin Sagebrush Rangelands*. Rangelands, 2016. 38(6): p. 379-388.
33. Jianya, G., et al., *A review of multi-temporal remote sensing data change detection algorithms*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008. 37(B7): p. 757-762.
34. Verbesselt, J., A. Zeileis, and M. Herold, *Near real-time disturbance detection using satellite image time series*. Remote Sensing of Environment, 2012. 123: p. 98-108.
35. Lillesand, T., R.W. Kiefer, and J. Chipman, *Remote sensing and image interpretation*. 2014: John Wiley & Sons.
36. Kuenzer, C., S. Dech, and W. Wagner, *Remote sensing time series revealing land surface dynamics: Status quo and the pathway ahead*, in *Remote Sensing Time Series*. 2015, Springer. p. 1-24.
37. Jönsson, P. and L. Eklundh, *TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data*. Computers & Geosciences, 2004. 30(8): p. 833-845.

38. Eklundh, L. and P. Jönsson, *TIMESAT: A Software Package for Time-Series Processing and Assessment of Vegetation Dynamics*, in *Remote Sensing Time Series: Revealing Land Surface Dynamics*, C. Kuenzer, S. Dech, and W. Wagner, Editors. 2015, Springer International Publishing: Cham. p. 141-158.
39. Eklundh, L. and P. Jönsson, *TIMESAT for Processing Time-Series Data from Satellite Sensors for Land Surface Monitoring*, in *Multitemporal Remote Sensing: Methods and Applications*, Y. Ban, Editor. 2016, Springer International Publishing: Cham. p. 177-194.
40. Eastman, J.R., et al., *Global trends in seasonality of normalized difference vegetation index (NDVI), 1982–2011*. *Remote Sensing*, 2013. 5(10): p. 4799-4818.
41. Ronald Eastman, J., et al., *Seasonal trend analysis of image time series*. *International Journal of Remote Sensing*, 2009. 30(10): p. 2721-2726.
42. Neeti, N. and J.R. Eastman, *A contextual mann-kendall approach for the assessment of trend significance in image time series*. *Transactions in GIS*, 2011. 15(5): p. 599-611.
43. Fensholt, R. and S.R. Proud, *Evaluation of earth observation based global long term vegetation trends—Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series*. *Remote sensing of Environment*, 2012. 119: p. 131-147.
44. Liu, Y., et al., *Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: Correlations with climate and human factors*. *Remote Sensing*, 2015. 7(10): p. 13233-13250.
45. Jong, R., et al., *Trend changes in global greening and browning: contribution of short-term trends to longer-term change*. *Global Change Biology*, 2012. 18(2): p. 642-655.
46. Verbesselt, J., et al., *Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series*. *Remote sensing of Environment*, 2010. 114(1): p. 106-115.
47. Dardel, C., et al., *Rain-use-efficiency: What it tells us about the conflicting Sahel greening and Sahelian paradox*. *Remote Sensing*, 2014. 6(4): p. 3446-3474.
48. Fensholt, R., et al., *Assessing land degradation/recovery in the African Sahel from long-term earth observation based primary productivity and precipitation relationships*. *Remote Sensing*, 2013. 5(2): p. 664-686.
49. Le Houerou, H.N., *Rain use efficiency: a unifying concept in arid-land ecology*. *Journal of Arid Environments*, 1984. 7(3): p. 213-247.
50. Wessels, K.J., *Letter to the editor: comments on 'Proxy global assessment of land degradation' by Bai et al.(2008)*. 2009.
51. Wessels, K., F. Van Den Bergh, and R. Scholes, *Limits to detectability of land degradation by trend analysis of vegetation index data*. *Remote Sensing of Environment*, 2012. 125: p. 10-22.
52. Wessels, K.J., et al., *Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa*. *Journal of Arid Environments*, 2007. 68(2): p. 271-297.
53. Fensholt, R. and S.R. Proud, *Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends — Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series*. *Remote Sensing of Environment*, 2012. 119(0): p. 131-147.
54. Diouf, A. and E. Lambin, *Monitoring land-cover changes in semi-arid regions: remote sensing data and field observations in the Ferlo, Senegal*. *Journal of Arid Environments*, 2001. 48(2): p. 129-148.
55. Mbow, C., et al., *Advances in monitoring vegetation and land use dynamics in the Sahel*. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 2014. 114(1): p. 84-91.
56. Wessels, K.J., et al., *Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa*. *Journal of Arid Environments*, 2007. 68(2): p. 271-297.

57. Fensholt, R. and K. Rasmussen, *Analysis of trends in the Sahelian 'rain-use efficiency' using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data*. Remote Sensing of Environment, 2011. 115(2): p. 438-451.
58. Lambin, E.F. and A.H. Strahler, *Indicators of land-cover change for change-vector analysis in multitemporal space at coarse spatial scales*. International Journal of Remote Sensing, 1994. 15(10): p. 2099-2119.
59. Yengoh, G.T., et al., *The Potential for Assessment of Land Degradation by Remote Sensing, in Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales*. 2015, Springer. p. 9-15.
60. WRI, *The wealth of the poor: Managing ecosystems to fight poverty*. 2005, World Resources Institute: Washington DC. USA.
61. UNEP, Africa: *Atlas of our Changing Environment* 2008, Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme. 393.
62. UNEP, *Sahel Atlas of Changing Landscapes: Tracing trends and variations in vegetation cover and soil condition*. 2012, Nairobi: United Nations Environment Programme.
63. Hoekstra, J.M., et al., *Confronting a biome crisis: global disparities of habitat loss and protection*. Ecology letters, 2005. 8(1): p. 23-29.
64. Di Gregorio, A., *Land Cover Classification System: Classification Concepts and User Manual: LCCS*. FAO Environment and Natural Resources Service Series, No. 8. 2005, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
65. Bajocco, S., et al., *The impact of land use/land cover changes on land degradation dynamics: a Mediterranean case study*. Environmental management, 2012. 49(5): p. 980-989.
66. Lambin, E.F., H.J. Geist, and E. Lepers, *Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions*. Annual review of environment and resources, 2003. 28(1): p. 205-241.
67. Mayaux, P., et al., *Remote sensing of land-cover and land-use dynamics, in Earth Observation of Global Change*. 2008, Springer. p. 85-108.
68. Reynolds, J.F., et al., *Scientific concepts for an integrated analysis of desertification*. Land Degradation & Development, 2011. 22(2): p. 166-183.
69. Tucker, C. and J.R. Townshend, *Strategies for monitoring tropical deforestation using satellite data*. International Journal of Remote Sensing, 2000. 21(6-7): p. 1461-1471.
70. de Jong, R., et al., *Spatial relationship between climatologies and changes in global vegetation activity*. Global Change Biology, 2013. 19(6): p. 1953-1964.
71. Horion, S., et al., *Using earth observation-based dry season NDVI trends for assessment of changes in tree cover in the Sahel*. International Journal of Remote Sensing, 2014. 35(7): p. 2493-2515.
72. Jensen, J., *Remote Sensing of the Environment*. 2007: Pearson Prentice Hall.
73. Mas, J.-F., *Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques*. International journal of remote sensing, 1999. 20(1): p. 139-152.
74. Stow, D.A., et al., *Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems*. Remote Sensing of Environment, 2004. 89(3): p. 281-308.
75. Veldkamp, A. and E.F. Lambin, *Predicting land-use change*. Agriculture, ecosystems & environment, 2001. 85(1): p. 1-6.
76. Yuan, D. and C. Elvidge, *NALC land cover change detection pilot study: Washington DC area experiments*. Remote sensing of environment, 1998. 66(2): p. 166-178.

77. DeFries, R. and J. Townshend, *NDVI-derived land cover classifications at a global scale*. International Journal of Remote Sensing, 1994. 15(17): p. 3567-3586.
78. Friedl, M.A., et al., *Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results*. Remote Sensing of Environment, 2002. 83(1): p. 287-302.
79. Hansen, M., et al., *Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach*. International Journal of Remote Sensing, 2000. 21(6-7): p. 1331-1364.
80. Turner, B.L. and W.B. Meyer, *Global land-use and land-cover change: an overview*. Changes in land use and land cover: a global perspective, 1994. 4(3).
81. Lambin, E.F. and D. Ehrlich, *Land-cover changes in sub-Saharan Africa (1982–1991): Application of a change index based on remotely sensed surface temperature and vegetation indices at a continental scale*. Remote sensing of environment, 1997. 61(2): p. 181-200.
82. Sobrino, J. and N. Raissouni, *Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco*. International Journal of Remote Sensing, 2000. 21(2): p. 353-366.
83. Sternberg, T., et al., *Tracking desertification on the Mongolian steppe through NDVI and field-survey data*. International Journal of Digital Earth, 2011. 4(1): p. 50-64.
84. Lunetta, R.S., et al., *Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data*. Remote sensing of environment, 2006. 105(2): p. 142-154.
85. Symeonakis, E. and N. Drake, *10-Daily soil erosion modelling over sub-Saharan Africa*. Environmental monitoring and assessment, 2010. 161(1): p. 369-387.
86. Zhang, X., et al., *Comparison of slope estimates from low resolution DEMs: Scaling issues and a fractal method for their solution*. Earth Surface Processes and Landforms, 1999. 24(9): p. 763-779.
87. Lepers, E., et al., *A synthesis of information on rapid land-cover change for the period 1981–2000*. BioScience, 2005. 55(2): p. 115-124.
88. Mao, D., et al., *Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012. 18: p. 528-536.
89. UNCCD, *Elaboration of an International Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa*. 1994, United Nations Convention to Combat Desertification, Paris.
90. Grainger, A., *The threatening desert: controlling desertification*. 2013: Routledge.
91. Erian, W.F. *Arab network of the remote sensing centers for desertification monitoring and assessment in Remote Sensing and Geoinformation Processing in the Assessment and Monitoring of Land Degradation and Desertification*. 2005. Trier, Germany.
92. Karnieli, A. and G. Dall'Olmo, *Remote-sensing monitoring of desertification, phenology, and droughts*. Management of Environmental Quality: An International Journal, 2003. 14(1): p. 22-38.
93. Olsson, L., L. Eklundh, and J. Ardö, *A recent greening of the Sahel—trends, patterns and potential causes*. Journal of Arid Environments, 2005. 63(3): p. 556-566.
94. Tucker, C.J. and S.E. Nicholson, *Variations in the size of the Sahara Desert from 1980 to 1997*. Ambio, 1999: p. 587-591.
95. Holzapfel, C., *Deserts*, in *Encyclopedia of Ecology*, S.E. Jorgensen and B. Fath, Editors. 2008, Elsevier B.V.: Amsterdam. p. 879-897.

96. Herrmann, S.M., A. Anyamba, and C.J. Tucker, *Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate*. Global Environmental Change, 2005. 15(4): p. 394-404.
97. Hickler, T., et al., *Precipitation controls Sahel greening trend*. Geophysical Research Letters, 2005. 32(21).
98. Anyamba, A. and C.J. Tucker, *Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003*. Journal of Arid Environments, 2005. 63(3): p. 596-614.
99. Zhou, P., et al., *Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed*. Catena, 2008. 75(3): p. 319-325.
100. Comoss, E.J. and D.A. Kelly, *Erosion*, in *Encyclopedia of Ecology*, S.E. Jorgensen and B. Fath, Editors. 2008, Elsevier B.V.: Amsterdam. p. 1403-1407.
101. Foth, H.D., *Fundamentals of soil science*. 1991: John Wiley and Sons, Inc.
102. Favis-Mortlock, D., J. Boardman, and V. MacMillan, *The limits of erosion modeling*, in *Landscape erosion and evolution modeling*. 2001, Springer. p. 477-516.
103. Prasannakumar, V., et al., *Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology*. Geoscience Frontiers, 2012. 3(2): p. 209-215.
104. Mulianga, B., et al. *Estimating potential soil erosion for environmental services in a sugarcane growing area using multisource remote sensing data*. in *SPIE Remote Sensing*. 2013. International Society for Optics and Photonics.
105. Ai, L., et al., *Broad area mapping of monthly soil erosion risk using fuzzy decision tree approach: integration of multi-source data within GIS*. International Journal of Geographical Information Science, 2013. 27(6): p. 1251-1267.
106. Chen, T., et al., *Regional soil erosion risk mapping using RUSLE, GIS, and remote sensing: a case study in Miyun Watershed, North China*. Environmental Earth Sciences, 2011. 63(3): p. 533-541.
107. Fu, B., et al., *Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China*. Ecological Complexity, 2011. 8(4): p. 284-293.
108. Mishra, A.K. and V.P. Singh, *A review of drought concepts*. Journal of Hydrology, 2010. 391(1–2): p. 202-216.
109. Zargar, A., et al., *A review of drought indices*. Environmental Reviews, 2011. 19(NA): p. 333-349.
110. Zhang, Y., et al., *Monitoring and estimating drought-induced impacts on forest structure, growth, function, and ecosystem services using remote-sensing data: recent progress and future challenges*. Environmental Reviews, 2013. 21(2): p. 103-115.
111. Liu, W. and R.N. Juárez, *ENSO drought onset prediction in northeast Brazil using NDVI*. International Journal of Remote Sensing, 2001. 22(17): p. 3483-3501.
112. Bandyopadhyay, N. and A.K. Saha, *Analysing Meteorological and Vegetative Drought in Gujarat*, in *Climate Change and Biodiversity*. 2014, Springer. p. 61-71.
113. Karnieli, A., et al., *Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: merits and limitations*. Journal of Climate, 2010. 23(3): p. 618-633.
114. Gao, B.-C., *NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space*. Remote sensing of environment, 1996. 58(3): p. 257-266.
115. Chen, D., J. Huang, and T.J. Jackson, *Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands*. Remote Sensing of Environment, 2005. 98(2-3): p. 225-236.

116. Delbart, N., et al., *Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index*. Remote Sensing of Environment, 2005. 97(1): p. 26-38.
117. Jackson, T.J., et al., *Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans*. Remote Sensing of Environment, 2004. 92(4): p. 475-482.
118. Rockström, J., et al., *A safe operating space for humanity*. Nature, 2009. 461(7263): p. 472-475.
119. Pettorelli, N., et al., *Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change*. Trends in ecology & evolution, 2005. 20(9): p. 503-510.
120. Yeqiao, W., *Remote Sensing of Protected Lands, in Remote Sensing of Protected Lands*. 2011, CRC Press. p. 1-26.
121. Pettorelli, N., K. Safi, and W. Turner, *Satellite remote sensing, biodiversity research and conservation of the future*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2014. 369(1643): p. 20130190.
122. Despland, E., J. Rosenberg, and S.J. Simpson, *Landscape structure and locust swarming: a satellite's eye view*. Ecography, 2004. 27(3): p. 381-391.
123. Turner, W., et al., *Remote sensing for biodiversity science and conservation*. Trends in ecology & evolution, 2003. 18(6): p. 306-314.
124. Duro, D.C., et al., *Development of a large area biodiversity monitoring system driven by remote sensing*. Progress in Physical Geography, 2007. 31(3): p. 235-260.
125. Andersen, R., et al., *When range expansion rate is faster in marginal habitats*. Oikos, 2004. 107(1): p. 210-214.
126. Saatchi, S.S., et al., *Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011. 108(24): p. 9899-9904.
127. Thenkabail, P.S., et al., *Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications*. Remote sensing of environment, 2004. 91(3): p. 354-376.
128. Richardson, A.J. and C. Weigand, *Distinguishing vegetation from soil background information*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1977. 43(12).
129. Birth, G.S. and G.R. McVey, *Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrophotometer*. Agronomy Journal, 1968. 60(6): p. 640-643.
130. Huete, A.R., *A soil-adjusted vegetation index (SAVI)*. Remote sensing of environment, 1988. 25(3): p. 295-309.
131. Qi, J., et al., *A modified soil adjusted vegetation index*. Remote Sensing of Environment, 1994. 48(2): p. 119-126.
132. Huete, A., et al., *Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices*. Remote sensing of environment, 2002. 83(1): p. 195-213.
133. Leprieux, C., Y. Kerr, and J. Pichon, *Critical assessment of vegetation indices from AVHRR in a semi-arid environment*. Remote Sensing, 1996. 17(13): p. 2549-2563.
134. Huete, A.R. and H.Q. Liu, *An error and sensitivity analysis of the atmospheric-and soil-correcting variants of the NDVI for the MODIS-EOS*. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 1994. 32(4): p. 897-905.
135. Jackson, R.D. and A.R. Huete, *Interpreting vegetation indices*. Preventive Veterinary Medicine, 1991. 11(3): p. 185-200.
136. Silleos, N.G., et al., *Vegetation indices: advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years*. Geocarto International, 2006. 21(4): p. 21-28.
137. Verrelst, J., et al. *Directional sensitivity analysis of vegetation indices from multi-angular Chris/PROBA data*. in ISPRS Commission VII Mid-term symposium. 2006.

138. Bulcock, H. and G. Jewitt, *Spatial mapping of leaf area index using hyperspectral remote sensing for hydrological applications with a particular focus on canopy interception*. Hydrology and Earth System Sciences, 2010. 14(2): p. 383-392.
139. Neuman, L.W., *Social research methods: Qualitative and quantitative approaches*. 2002.
140. Flick, U., *An introduction to qualitative research*. 2014: Sage.
141. Short, S.E., *Focus groups*, in *A handbook for social science field research: Essays & bibliographic sources on research design and methods*, E. Perecman and S.R. Curran, Editors. 2006, Sage Publications, Inc. California, USA. p. 103-115.
142. Corbett, J., *Good practices in participatory mapping: a review prepared for the International Fund for Agricultural Development (IFAD)*. 2009.
143. Forrester, J. and S. Cinderby, *A guide to using community mapping and participatory-GIS*. Available on line, 2013. 19.
144. DeWalt, K.M. and B.R. DeWalt, *Participant observation: A guide for fieldworkers*. 2011: Rowman Altamira.
145. Check, J. and R.K. Schutt, *Research methods in education*. 2011: Sage Publications.
146. Ponto, J., *Understanding and evaluating survey research*. Journal of the advanced practitioner in oncology, 2015. 6(2): p. 168.
147. Park, A., *Surveys and secondary data sources*, in *A handbook for social science field research: Essays & bibliographic sources on research design and methods*, E. Perecman and S.R. Curran, Editors. 2006, Sage Publications, Inc. California, USA. p. 117-134.
148. De Vaus, D., *Surveys in social research*. 2013: Routledge.
149. UNCCD, *Report of the Conference of the Parties on its twelfth session, held in Ankara from 12 to 23 October 2015*. 2016, United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD): Part two: Actions. ICCD/COP(12)/20/Add.1. Bonn. See Decision3/COP. p. 8.
150. Orr, B.J., et al., *Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A Report of the Science-Policy Interface* 2017, United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD): Bonn, Germany. p. 98.



VILLAGE DE PÊCHEURS SUR L'ÎLE DE KIWAIYU. © GEORGE STEINMETZ