

Observation spatiale pour l'agriculture en Afrique : potentiels et défis



Auteurs Agnès BEGUE, Louise LEROUX, Danny LO SEEN,
Jean-Philippe TONNEAU et Philippe MORANT (CIRAD)

Coordination Bertrand CHARRIER et Claude TORRE (AFD)

Pays

Afrique

Mots-clés

**Télédétection, agriculture,
politiques publiques,
cartographie, système d'alerte**



AUTEURS

Agnès BEGUE, Louise LEROUX, Danny LO SEEN, Jean-Philippe TONNEAU et Philippe MORANT sont chercheurs à l'UMR TETIS du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), basée à Montpellier. TETIS a pour mission le développement de méthodes pour la maîtrise de l'information spatiale au service de la connaissance et de la gestion des milieux et des territoires. Ont également participé à cette étude : X. AUGUSSEAU, C. BARON, B. BELLON, A. CLOPES, S. DUPUY, S. FORTUNO, A. JOLIVOT, V. LEBOURGEOIS, C. LELONG, C. PIOU, V. SOTI, I. TOURE et A. TRAN du CIRAD, F. SEYLER de l'IRD, et les membres du comité de pilotage : G. DEDIEU (CNES), M. DESHAYES (GEOGLAM), F. KAYITAKIRE (JRC) et O. LEO (JRC).

Contact : agnes.begue@cirad.fr

RÉSUMÉ

Ce rapport a pour objectif de faire un état des lieux des usages des technologies satellitaires dans le développement et l'analyse des agricultures africaines, afin de mieux cerner les difficultés actuelles, identifier les contraintes sur lesquelles la recherche et le partenariat peuvent avoir un effet, et imaginer les actions nécessaires pour lever ces contraintes à court et moyen termes. L'ensemble du continent africain est traité, avec un focus sur l'Afrique de l'Ouest. L'échelle abordée est l'échelle nationale à laquelle se mettent en place les politiques publiques agricoles. Dans une 1^{ère} partie est dressé le panorama de la télédétection en Afrique pour l'agriculture, avec l'analyse des besoins prioritaires en informations, et les principaux programmes et projets en cours pour le développement de services. La 2^{ème} partie présente l'offre actuelle et future en imagerie satellitaire et en outils logiciels, et les produits globaux descriptifs des états de surface aux échelles globale et régionale. Les principales applications de la télédétection sont illustrées en 3^{ème} partie.

LANGUE ORIGINALE

Français

ISSN

En cours

DÉPÔT LÉGAL

1^{er} trimestre 2016

Les *Notes techniques* sont téléchargeables sur le site des publications de l'AFD : <http://librairie.afd.fr>

AVERTISSEMENT

Les analyses et conclusions de ce document ne reflètent en aucun cas le point de vue de l'Agence Française de Développement ou de ses tutelles institutionnelles.

SOMMAIRE

Résumé opérationnel	5
1. Pour quoi faire ?	5
2. Quels acteurs ?	6
3. Avec quelles données spatiales ?	6
4. Les défis à relever	7
5. Principales recommandations pour promouvoir la télédétection en Afrique	8
Acronymes	9
Introduction	12
Panorama de la télédétection en Afrique pour l'agriculture	15
I. Analyse des besoins prioritaires pour les politiques publiques agricoles en Afrique	15
1. Nature et diversité des politiques agricoles en Afrique	15
2. Conditions d'élaboration et de mise en œuvre des politiques agricoles	17
3. Acteurs, échelles et informations	20
4. Apports de l'information spatiale et de la télédétection	25
5. L'agriculture africaine : des spécificités contraignantes pour la télédétection	26
II. Expériences et projets en cours en Afrique dans le domaine de la télédétection et de l'agriculture	30
1. Le contexte international de l'Observation de la Terre.....	30
2. Le contexte européen de l'Observation de la Terre	37
3. Le contexte français de l'Observation de la Terre.....	41
4. Le contexte africain de l'Observation de la Terre.....	44
Images, outils et produits satellitaires	50
I. Imageries satellitaires	50
1. Généralités	50
2. L'offre en imagerie satellitaire	55
3. Comment choisir et accéder aux images ?	61
II. Les outils logiciels	65
1. Les logiciels de télédétection	65
2. Les logiciels SIG	66
3. Des outils en évolution	66
III. Les produits "biophysiques"	68
1. L'état de la végétation	70
2. Le cycle de l'eau.....	76

3.	Le bilan d'énergie	79
4.	Le relief	81
5.	Bilan.....	82
Les applications de la télédétection		83
I.	L'occupation du sol.....	84
1.	Echelle globale	86
2.	Echelle régionale	90
3.	Echelle Nationale.....	91
II.	Les zonages	94
1.	Notion de zonage	94
2.	Différents type de zonages.....	94
3.	Bilan et perspectives	101
III.	Les Systèmes d'Alerte Précoce (SAP)	103
1.	Les systèmes internationaux.....	105
2.	Les systèmes régionaux et nationaux	108
3.	Bilan et perspectives	108
IV.	Le suivi des dynamiques pastorales	109
1.	La production de biomasse	111
2.	Les feux de brousse	112
3.	Le suivi des plans d'eau	113
V.	L'estimation des rendements des cultures.....	114
1.	Approches statistiques	115
2.	L'utilisation de modèles de développement de plante	116
3.	Des solutions mixtes.....	116
4.	Bilan et perspectives	120
VI.	Les statistiques agricoles	122
1.	Les systèmes de statistiques existants	122
2.	Les apports de la télédétection	123
3.	La cartographie des cultures	127
4.	Bilan et perspectives	130
VII.	Les assurances agricoles.....	131
1.	Les assurances indicielles pour le pastoralisme	131
2.	Les assurances indicielles pour les cultures	132
3.	Perspectives et contraintes de la télédétection et des systèmes indiciels.....	133
VIII.	Les crues et inondations	136
1.	Systèmes pré-opérationnels de suivi des inondations	136

2.	Téledétection et crues	139
IX.	Les changements climatiques	140
1.	Les variables climatiques essentielles	141
2.	Les analyses de tendance de NDVI	143
3.	Les tendances de NDVI en Afrique de l'Ouest.....	143
4.	Conclusion.....	145
X.	La lutte préventive acridienne.....	145
1.	La cartographie des habitats potentiels	146
2.	Le suivi dynamique de l'état des habitats	146
3.	Perspectives	149
XI.	La santé animale	149
1.	Les principaux indicateurs issus de la télédétection utilisés	149
2.	Les méthodes	150
3.	Bilan et perspectives	152
XII.	La sécurisation foncière des espaces agricoles	153
XIII.	Bilan sur les produits d'aide à la décision.....	157
	Conclusions et perspectives.....	159
I.	Bilan.....	159
1.	Des difficultés	160
2.	... mais un environnement porteur	161
II.	Des priorités pour le continent africain.....	162
1.	Garantir l'accès aux données.....	162
2.	Susciter la demande.....	162
3.	Développer des applications opérationnelles.....	162
4.	Structurer et accompagner les utilisateurs finaux	163
	Bibliographie	165
	Annexes	169
	Annexe 1 : Tableaux synthétiques des produits « Etat de la végétation »	169
	Annexe 2 : Tableaux synthétiques des produits « Cycle de l'eau »	175
	Annexe 3 : Tableaux synthétiques des produits « Bilan d'énergie » ...	178
	Annexe 4 : Tableaux synthétiques des produits « Topographie »	180
	Précédentes publications de la collection	182
	Qu'est-ce que l'AFD ?	183

Résumé opérationnel

Le besoin en information agricole est très élevé en Afrique car les systèmes statistiques nationaux traditionnels sont souvent défaillants. Les technologies spatiales présentent de grandes potentialités pour renforcer les dispositifs d'information sur l'agriculture du continent africain. Dans ce document sont analysés les usages des technologies satellitaires en relation avec : i) le développement et l'analyse des agricultures africaines à l'échelle nationale ; ii) l'identification des principaux freins au développement et à l'adoption de cette technologie ; iii) les perspectives de recherche et de partenariat.

1. Pour quoi faire ?

Les potentialités offertes par la télédétection sont nombreuses, couvrant des applications aussi variées que la cartographie de l'utilisation des sols, le suivi des conditions de développement des cultures et des pâturages en cours de saison, la sécurisation foncière ou la gestion des risques climatiques et sanitaires.

En termes d'usage, les données de télédétection sont utilisées aux échelles nationales et régionales pour la production en routine de produits biophysiques de surface (NDVI, surface foliaire, évapotranspiration, humidité du sol, etc.) et de produits climatiques (précipitations, rayonnement, etc.), permettant le suivi de la végétation, du cycle de l'eau, du bilan d'énergie, et de la caractérisation du relief sur l'ensemble du globe. A partir de ces produits de base sont élaborés toute une gamme de produits et services dits « d'aide à la décision » pour les politiques agricoles. Si certains produits d'aide à la décision mis en œuvre à des échelles nationale et régionale sont d'ores et déjà opérationnels (cartographie du domaine cultivé, systèmes d'alertes précoces), la grande majorité d'entre eux sont réalisés « à la carte » et mis en œuvre à des échelles plus fines, comme cela est le cas des spatio-cartes ou des cartes d'occupation et utilisation du sol.

Ainsi, contrairement aux produits biophysiques, il n'existe pas de « catalogue » pour les produits d'aide à la décision, l'élaboration de ces derniers nécessitant généralement la prise en compte de données complémentaires et une adaptation des méthodes aux conditions locales. Ainsi, de nombreuses applications nécessitant une cartographie précise de l'utilisation des sols, comme les estimations de rendement, sont limitées par l'imprécision spatiale et thématique de ces cartes à l'échelle locale.

2. Quels acteurs ?

Historiquement, le développement de l'observation spatiale en Afrique s'est appuyé essentiellement sur des projets de télédétection, financés par des bailleurs de fonds internationaux. Ces projets de recherche, ou projets pilotes, ont permis de développer nombre d'applications prometteuses, mais n'ont pas encore atteint le niveau opérationnel nécessaire. Ils ont principalement soutenu les institutions publiques nationales et régionales et ont permis d'équiper des centres, de former des cadres et des techniciens et de démarrer des applications en appui au développement agricole. Mais, ces dernières années, la plupart des centres publics nationaux ont réduit leurs activités ; leurs produits ne répondaient que partiellement à l'attente des utilisateurs et les financements ont diminué au profit des centres régionaux. Aujourd'hui, la demande en informations émane des planificateurs, des opérateurs économiques et des agriculteurs ; elle est plus importante et plus exigeante. La relative efficacité des services étatiques contribue à l'apparition de nouveaux acteurs : structures privées ou semi-privées, microsociétés de services ou ONG locales.

3. Avec quelles données spatiales ?

Depuis le lancement du premier satellite Landsat en 1972, l'observation spatiale a évolué régulièrement, avec des sauts technologiques importants, notamment dans les années 2000 avec l'arrivée des images satellitaires à résolution métrique (Ikonos, QuickBird, etc.) et des missions globales de suivi de la végétation (MODIS, SPOT-VGT). Dans les années 2010 le lancement de systèmes satellitaires nationaux et les récentes constellations Sentinel, combinées à d'autres systèmes, ouvrent à leur tour une nouvelle ère pour le suivi de la végétation.

Actuellement, une centaine de satellites opérationnels sont en orbite autour de la Terre pour observer tout point du globe. En parallèle de l'augmentation de l'offre, la dissémination des images a été démultipliée grâce aux nombreux globes virtuels (par exemple *Google Earth*®) proposés sur internet et aux initiatives de facilitation d'accès aux données (comme l'initiative française THEIA ou les nouvelles politiques de l'ESA et de la NASA basées sur le *free access*). Le développement des logiciels libres de traitement d'images et de gestion de systèmes d'information géographique a mis à mal le monopole des solutions coûteuses et favorisé la démocratisation de l'utilisation des technologies satellitaires. L'émergence de nouvelles solutions technologiques d'acquisition et de traitement des données (tablettes et mobiles) facilite

grandement la récolte de données et l'envoi d'information pour l'aide à la gestion agricole.

L'offre satellitaire dans sa globalité et sa diversité reste cependant difficilement appréhendable par les non-spécialistes. Le choix d'un capteur satellite est étroitement lié aux besoins et aux moyens techniques et/ou budgétaires disponibles. Chaque famille de capteurs a ses propres méthodes de traitement d'images, lesquelles nécessitent des connaissances et compétences spécifiques. Le temps de travail et le niveau de technicité nécessaires pour produire des informations pertinentes sont souvent sous-estimés. Le volume de données à traiter peut atteindre plusieurs Giga octets pour une seule image ! Un début de solution est apporté par les développements de type cloud-computing qui permettent un accès au traitement des images en ligne et la récupération de l'information sans avoir besoin de télécharger les données. Ces traitements automatisés en ligne restent toutefois confinés à des opérations très simples. La réalisation de produits plus aboutis, tels qu'une cartographie de l'utilisation des sols ou des cartes d'état de surface, nécessite de fusionner différentes sources de données, dont des données de terrain, et d'injecter dans les traitements de l'expertise locale thématique et géographique.

4. Les défis à relever

En matière de partenariat, l'Afrique a fortement bénéficié de la coopération internationale, ce qui a permis une amélioration globale et certaine des capacités des instituts nationaux et régionaux opérant dans les systèmes d'information liés à l'agriculture et à la sécurité. Cependant, cette coopération a aussi eu des effets pervers car les projets ont surtout favorisé les institutions des pays les plus avancées, mis en avant des industriels et experts du Nord au détriment des experts africains et enfin, de nombreux projets pilotes n'ont pas été menés jusqu'au niveau opérationnel donnant ainsi une image de la télédétection non aboutie.

L'offre locale de formation en télédétection et géomatique est sous-dimensionnée pour le continent. Le personnel national apte à traiter les images et à produire des outils d'aide à la décision est insuffisant compte tenu des besoins. De même, la capitalisation et l'animation autour des méthodes de mobilisation de l'information spatiale et d'intégration d'informations multisources sont encore insuffisantes. Le faible nombre de services opérationnels sur le continent témoignent de ces difficultés, qui sont connues. Elles sont à l'origine d'initiatives telles que GEOGLAM-Pays à risque (Léo *et al.*, 2014) ou

AFRIGEOSS (Traoré et al., 2014), qui tendent à promouvoir l'utilisation des technologies spatiales.

En conclusion, l'offre actuelle de données de télédétection offre un panel diversifié d'applications potentielles au service du renseignement agricole. Pour les mettre en œuvre, et ainsi répondre aux enjeux à venir de ce continent en pleine transition, des investissements importants seront nécessaires, à l'instar de ce qui est à l'œuvre en Europe.

5. Principales recommandations pour promouvoir la télédétection en Afrique

Le constat de la sous-utilisation de la télédétection pour les politiques publiques agricoles en Afrique conduit à plusieurs recommandations.

L'amélioration des applications existantes et le développement de nouveaux produits d'aide à la décision passent par un accès libre aux données satellitaires, par l'adoption d'approches intégrées images/modèles/savoirs locaux permettant de mieux prendre en compte les spécificités locales, et par la mise en place de démarches en partenariat.

La filière africaine ne se développera que s'il y a une demande solvable pour des applications et si la télédétection devient un outil reconnu dans les différentes expertises et études que le secteur agricole génère. Susciter et recommander l'utilisation de l'observation spatiale en prévoyant des financements ad hoc, en particulier ceux octroyés par les grands bailleurs de fonds, est une nécessité. Une action de sensibilisation pour faire connaître les technologies géo-spatiales auprès des universités, gouvernements, agences de développement et du secteur privé est nécessaire, en insistant sur les potentialités mais aussi les contraintes pour éviter des attentes inconsidérées.

Pour répondre à cette demande, l'Afrique a besoin de constituer une masse critique de techniciens, professionnels et de chercheurs pour maîtriser la technologie et surtout, pour développer et maintenir des applications adaptées à son environnement. Dans la constitution de ce noyau, compte tenu de la modestie des instituts publics nationaux, une place importante doit être faite aux bureaux d'études et aux ONG professionnelles. Les centres régionaux de recherche et de formation peuvent assurer ce renforcement de compétences.

Acronymes

De très nombreux acronymes sont utilisés dans le document. Ci-dessous est donnée une sélection des principaux acronymes utilisés en télédétection.

AARSE	African Association of Remote Sensing of the Environment
AMESD	Africa Monitoring of the Environment for Sustainable Development
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BRS	Basse Résolution Spatiale
CEOS	Committee on Earth Observation Satellites
CHIRPS	Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Station data
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales (France)
CRU	Climate Research Unit
EARS	Environmental Analysis and Remote Sensing
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ENVISAT	ENVIronmental SATellite
EOS	Earth Observing System
ERS	European Remote-sensing Satellite
ESA	European Spatial Agency
EUMETSAT	European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites
EVI	Enhanced Vegetation Index
FEWS-Net	Famine Early Warning System - Network
GEO	Group on Earth Observations
GEOGLAM	GEO-GLobal Agricultural Monitoring
GEOSS	Global Earth Observing System of Systems
GIEWS	Global Information and Early Warning System
GIMMS	Global Inventory Modeling and Mapping Studies group

GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GMFS	Global Monitoring of Food Security
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
HRS	Haute Résolution Spatiale
IBLI	Index-Based Livestock Insurance
JECAM	Joint Experiment for crop Assessment and Monitoring
JRC	Joint Research Centre
LST	Land Surface Temperature
MARS	Monitoring of Agriculture with Remote Sensing
MCYFS	Mars Crop Yield Forecasting System
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer
MESA	Monitoring of Environment and Security in Africa
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MRS	Moyenne Résolution Spatiale
MSG	Meteosat Second Generation
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PIAO	Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur
PIR	Proche InfraRouge
PROBA	Project for On-Board Autonomy
PUMA	Preparation for the Use of Meteosat Second Generation in Africa
RCMRD	Regional Center for Mapping of Resources for Development
RFE	RainFall Estimates
SAP	Système d'Alerte Précoce
SAR	Synthetic Aperture Radar
SIGMA	Simulation Innovation for Global Monitoring of Agriculture
SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity mission

SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SSM	Soil Surface Moisture
TAMSAT	Tropical Applications of Meteorology using SATellite data and ground-based observations
TCI	Temperature Condition Index
THRS	Très Haute Résolution Spatiale
TIR	Thermal Infrared
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
USGS	United States Geological Survey
VCi	Vegetation Condition Index
VHI	Vegetation Health Index

Introduction

Des images satellitaires au service de l'information agricole

L'imagerie satellitaire civile est en passe de devenir un véritable outil opérationnel d'aide à la décision. L'information spatiale est de plus en plus disponible. Depuis le programme américain Landsat en 1972, de nombreuses nations se sont lancées dans l'Observation de la Terre, et l'on compte aujourd'hui une centaine de satellites opérationnels en orbite. Ces satellites donnent accès à une information géographique en tout point du globe, avec une régularité et une répétitivité des données qui sont croissantes. Ces systèmes satellitaires permettent un suivi des surfaces continentales des échelles locale (capteurs à résolution sub-métrique) à globale (résolution hectométrique et décimétrique), avec une fréquence d'observation de quotidienne à pluriannuelle, et ce dans différentes longueurs d'onde (du visible aux micro-ondes). La multiplication des systèmes permet le développement d'applications de plus en plus spécialisées. L'arrivée de la THRS (Très Haute Résolution Spatiale), dans les années 2000, a ouvert le champ des applications cartographiques réservées jusque-là à la photographie aérienne. Aujourd'hui, les programmes européens Copernicus et Sentinel (Sentinel-1 et Sentinel-2) par leur accès gratuit à des données décimétriques, avec une revisite hebdomadaire ou décadaire, ouvrent la voie au développement de nouveaux services dans le domaine de l'agriculture.

Les images sont utilisées pour un grand nombre d'applications agricoles aussi variées que le suivi de l'évolution des terres cultivées, le contrôle des déclarations des agriculteurs pour la politique européenne de subventions agricoles, les systèmes d'alerte précoce pour la sécurité alimentaire, les assurances agricoles, la réalisation de cadastres ruraux, fiscaux ou juridiques ou les services en agriculture de précision.

Cependant le foisonnement de la donnée satellitaire et de l'information géographique en général cache des difficultés d'exploitation de ces données qui sont d'ordre technique, économique et organisationnelle. Ces difficultés sont exacerbées sur le continent africain où les spécificités des systèmes agricoles en place nécessitent l'adaptation des méthodes développées pour les agricultures du Nord, et même assez souvent, des développements propres. Peu de pays africains ont une agence spatiale. Cette absence a un impact sur

l'accès à la donnée. Le nombre de centres de formation aux technologies est limité et peu d'universités proposent des cursus en télédétection et géomatique. Le personnel national apte à traiter les images, à préparer des produits d'aide à la décision est insuffisant. Le faible nombre de services opérationnels sur le continent témoignent de ces difficultés.

Objectif de l'étude

Ce rapport a pour objectif de faire un état des lieux des usages des technologies satellitaires dans le développement et l'analyse des agricultures africaines, afin de mieux cerner les difficultés actuelles, identifier les contraintes sur lesquelles la recherche et le partenariat peuvent avoir un effet, et imaginer les actions nécessaires pour lever ces contraintes à court et moyen termes.

La zone géographique d'intérêt est l'ensemble du continent africain, avec un focus sur l'Afrique de l'Ouest. L'échelle abordée est celle des politiques publiques agricoles qui se mettent en place essentiellement à l'échelle nationale.

Structure du document

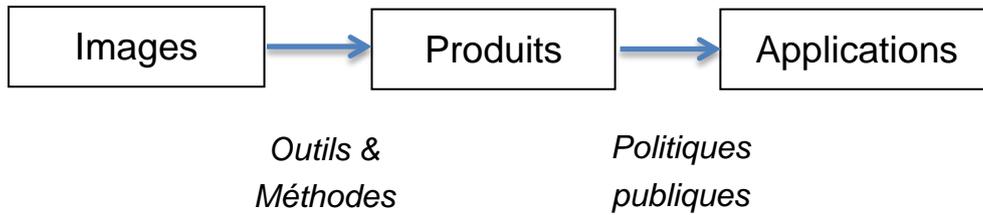
Le rapport est structuré en trois parties :

La 1^{ère} partie "**Panorama de la télédétection en Afrique pour l'agriculture**" présente l'analyse des besoins prioritaires et des informations nécessaires pour élaborer, mettre en œuvre, suivre, évaluer et réorienter les politiques publiques. Sont ensuite présentés les principaux programmes et projets en cours œuvrant pour le développement de services basés sur des données d'observation de la Terre, en Afrique.

La 2^{ème} partie "**Images, outils et produits satellitaires**" présente l'offre actuelle et future en imagerie satellitaire et en outils logiciels permettant de traiter ces données. Elaborés à partir de ces images, les produits globaux descriptifs des états de surface aux échelles globales et régionales sont présentés par grande famille (végétation, eau, énergie et relief).

La 3^{ème} partie "**Les applications de la télédétection**" présente les principales applications de la télédétection pour les politiques publiques agricoles. Ces applications sont développées à partir des produits globaux descriptifs des états de surface existants présentés dans la 2^{ème} partie.

En **conclusion**, sont faits (i) un bilan sur les conditions d'utilisation des images pour les applications agricoles en Afrique, et (ii) des recommandations pour développer les services dans ce domaine.



Panorama de la télédétection en Afrique pour l'agriculture

I. Analyse des besoins prioritaires pour les politiques publiques agricoles en Afrique

Pour définir quelle est la contribution potentielle de la géomatique et, plus particulièrement, de la télédétection aux politiques publiques agricoles, une première étape est de déterminer quels sont les besoins en informations pour l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation de ces politiques. Nous émettons l'hypothèse que ces informations vont dépendre (i) de la nature des différentes politiques agricoles ; (ii) des conditions d'élaboration, de mise en œuvre et d'évaluation des politiques publiques ; (iii) des besoins spécifiques des différents partenaires, "policy makers", impliqués.

1. Nature et diversité des politiques agricoles en Afrique

Selon Pouch (2002), la politique agricole est à la fois (i) « *un mode d'allocation des ressources plus efficace que le marché* » si l'on met en avant l'existence de défaillances du dit marché et le besoin de les corriger ; (ii) « *un système social visant à préserver les intérêts de certaines catégories de la population ou groupes de pression* » si l'on se place du point de vue de l'économie politique ; (iii) « *un ensemble de moyens permettant aux agriculteurs de préserver ou d'étendre leur compétitivité interne et externe et de dégager des parts de marché au détriment de leurs principaux concurrents* » si l'on privilégie une approche en termes d'économie internationale.

Ces différentes définitions traduisent des conceptions différentes des politiques publiques, plus ou moins volontaristes et interventionnistes, plus ou moins marquées par les idées néo-libérales. Nous travaillerons avec une définition plus neutre qui fait largement consensus et qui associe la politique agricole à un ensemble de mesures dirigées vers le secteur agricole. Pour Ribier (2008), une politique agricole est « *un ensemble de mesures réglementaires, dispositifs structurels, moyens financiers et humains interdépendants, mis en œuvre par la puissance publique pour contribuer à la progression du secteur agricole* ».

L'expression "politique agricole" est utilisée dans un sens générique et englobe les politiques d'appui à la production agricole, mais aussi les politiques qui ont

un objectif plus large tel que la performance économique du secteur agricole ou le développement environnemental et rural, dont l'assurance agricole.

Ces dernières années, des objectifs complémentaires, liés aux impératifs du développement durable, sont apparus : lutte contre la pauvreté, amélioration du niveau de vie des populations rurales, emploi, sécurité alimentaire, atténuation des risques climatiques, préservation des ressources naturelles et de la biodiversité, entretien des paysages, équilibres territoriaux entre territoires et au sein des territoires entre des activités rurales de plus en plus diversifiées.

Les politiques publiques agricoles ont pour objectif de contribuer à mobiliser des ressources naturelles (terre, eau, sol, biodiversité), du travail, des capitaux, des techniques, des intrants... pour produire des biens et services, en réponse à des besoins de la population et de la société. Les politiques publiques viennent en appui à des acteurs. Le terme "bénéficiaire" traduit des choix d'acteurs "privilégiés" en termes d'accès aux ressources et à des mesures incitatives. Les politiques publiques réglementent ces accès et incitent à des systèmes techniques. Elles contribuent aussi à l'organisation des filières et des territoires. Ces objectifs multiples ont fait l'objet de **lois d'orientations agricoles**, promulguées lors des dernières années dans les différents pays sub-sahariens. Elles dessinent des perspectives pour le futur de l'agriculture. Elles fixent des priorités sur le long terme. Elles identifient des instruments et des outils de mise en œuvre.

De manière habituelle, les priorités concernent :

- les objectifs : une agriculture performante (durable, moderne, compétitive) pour le développement durable (garantir la sécurité et la souveraineté alimentaire ; réduire la pauvreté rurale ; contribuer à la protection de l'environnement ; etc.) ;
- les structures de productions : exploitations de l'agriculture familiale et entreprises agricoles ;
- l'accès aux facteurs de production : foncier, travail, capitaux ;
- la production de biens agricoles, alimentaires et non alimentaires de qualité et diversifiés, répondant aux besoins des marchés (besoin des industries et des consommateurs) et satisfaisant aux conditions de sécurité sanitaire ;
- l'innovation et l'intensification (augmenter la productivité) ;
- l'organisation économique des marchés, des producteurs et des filières ;

- les services d'accompagnement aux producteurs agricoles pour leur garantir appui et conseil techniques, financement, recherche, formation ;
- la gestion des risques climatiques, économiques, sociaux, etc.

Les lois d'orientations agricoles sont déclinées en programmes, sous formes de mesures, définies par des décrets ou parfois par des lois complémentaires. Les mesures sont habituellement regroupées en cinq grands types : (i) les politiques foncières ; (ii) les politiques d'investissement d'infrastructures rurales et territoriales ; (iii) les transferts publics (politiques de crédit, politiques de soutien des prix du marché, politiques de subvention -au produit, à la surface, aux intrants, liées au revenus.... ; exonérations fiscales) ; (iv) les politiques de services (recherche, vulgarisation, formation et développement, inspection... dont les politiques d'assurances agricoles) ; (v) les politiques de réglementations (sécurité sanitaire, protection de l'environnement, normalisation et labellisation des produits...).

2. Conditions d'élaboration et de mise en œuvre des politiques agricoles

Ces dernières années, l'élaboration (la formulation) et la mise en œuvre des politiques agricoles se sont profondément transformées, en Afrique comme ailleurs. Le concept de "*policy makers*" traduit la multiplication des acteurs impliqués dans la définition et la mise en œuvre des politiques publiques. L'Etat national a encore un rôle prédominant (ministères...) mais la constitution d'Unions Supranationales (UEMOEA, par exemple), l'importance des groupes internationaux dans l'économie, le volume des investissements dépendants des bailleurs de fonds (malgré la diminution de l'aide publique), l'émergence de la société civile, la participation et la décentralisation ont fait que l'Etat national a perdu de ses prérogatives.

Ainsi les récentes lois d'orientations agricoles ont été formulées dans des processus combinant initiative gouvernementale et participation significative de la société civile. Par exemple, au Sénégal, au Mali et au Burkina Faso leur élaboration a suscité des discussions et de véritables débats sur les projets de société. Par leur durée, leur qualité et le nombre d'acteurs qui s'y sont impliqués, ces processus semblent déboucher sur « *une nouvelle vision à long*

terme qui découle d'un ensemble d'idées consensuelles capables d'insérer l'agriculture sénégalaise dans une dynamique de compétitivité et de durabilité¹ » pour reprendre les formulations concernant le Sénégal. Ces processus ont été rendus possibles par l'émergence de représentation des ruraux, sous la forme de fédération de producteurs et l'implication de la société civile, principalement les ONGs.

Ces processus se caractérisent par des positions plus ou moins conflictuelles, par des relations de forces où le lobbying est plus ou moins officiel. Les acteurs n'ont pas toujours des objectifs clairs. Ces objectifs peuvent évoluer au fil du temps selon les contraintes, les opportunités, les intérêts et les événements. Les comportements ne sont pas toujours rationnels, parfois trop fortement marqués par des visions idéalistes, et donc non réalistes de ce que peut être le développement. Les décisions ne sont que peu informées. Les tensions et les contradictions qui en résultent se révèlent surtout lors de la mise en œuvre.

Les lois d'orientations agricoles ont surtout exploré le "domaine du possible". Les débats ont permis la prise en compte de l'existence de plusieurs modèles d'agriculture (agriculture familiale versus agro-industrie), de l'affirmation de la légitimité d'une agriculture familiale pluriactive et multifonctionnelle et des enjeux de l'environnement. Le consensus autour des orientations résiste mal aux difficultés de leur mise en œuvre. En effet, si les lois d'orientations agricoles peuvent rester dans une imprécision facilitatrice de consensus, la mise en œuvre impose des choix de répartition de la terre (de l'eau et de la biodiversité, afférentes) et des moyens des politiques publiques. C'est au moment de l'élaboration des schémas d'aménagement directeurs et des plans et programmes de développement que ces choix s'affirment.

Dans le cadre de la décentralisation, les schémas d'aménagements territoriaux sont souvent menés dans des démarches associant les différents acteurs du territoire. Ces schémas d'aménagements directeurs de type SCOT (Schéma de COhérence Territoriale) fixent dans l'espace la place de l'agriculture par rapport à la ville (et sa croissance²), les parcs et zones de conservation.

Les plans cadastraux - sous leurs différentes formes - fixent les droits et les contraintes d'usage, mais sont en général absents dans la majorité des pays sub-sahariens. L'accès à la terre ou la sécurité d'usage est désormais

¹ [Le Matin, 26 mai 2004. \[2\]](#)

² Sa croissance se fait souvent aux détriments des terres de plaines, souvent les plus riches.

clairement identifiée comme une priorité pour assurer la sécurité alimentaire et le développement rural, dans un contexte de pression accrue sur les ressources. Quelques soient les démarches de médiation et d'arbitrage, détecter ces droits, les caractériser et les attribuer n'est guère facile en Afrique, compte tenu de la coexistence de droits d'inspiration différente (droit de l'Etat souverain, coutume dans leur diversité, concession, droit romain...) et des héritages de la période coloniale et des réformes foncières depuis les indépendances. Cette coexistence de droits se traduit aussi par des institutions relevant de l'administration, des chefs coutumiers, des projets de développement ou de la justice. Cette situation ne facilite pas la résolution des conflits : une décision peut toujours être remise en question devant une autre instance ou autorité.

Les plans et programmes, d'une part, listent et caractérisent les contenus exacts des mesures (par exemple, des incitations à une agriculture d'abord intensive et productive ou une agriculture respectueuse de l'environnement) et, d'autre part, décident qui en seront les bénéficiaires. L'élaboration de ces plans et programmes reste souvent du ressort des services de l'Etat.

Les orientations laissent de fortes marges d'interprétation et de manœuvre aux ministères et aux services, soumis à des pressions d'acteurs, défendant leurs intérêts propres et qui ne se sentent pas forcément concernés par les applications de l'ensemble des orientations des lois du même nom. Les choix sont faits dans un cadre de rapports de force qui, compte tenu des pratiques et des moyens en jeu, reste défavorables à certaines catégories d'acteurs. Les Organisations de Producteurs de la sphère de l'agriculture familiale ont accru leur capacité à peser dans les débats de politique agricole, débats nationaux ou au sein des organismes d'intégration régionale³. Ces organisations portent une double exigence de clarification des choix de développement agricole et de mise en adéquation des moyens pour que ces choix se traduisent concrètement en actions. Mais ces différentes évolutions sont lentes et demandent du temps pour avoir des répercussions visibles sur les processus de politique agricole, d'autant plus que les Etats ne peuvent jouer que difficilement leurs rôles.

D'une manière générale, les États ne disposent pas des budgets nécessaires pour financer les structures et institutions nécessaires à la mise en œuvre des

³ Le ROPPA (Réseau des organisations paysannes et de producteurs de l'Afrique de l'Ouest) a participé à la définition de la politique agricole de la CEDEAO.

politiques agricoles. De plus en plus, faute de capacités d'investissement, les Etats font appel aux contrats de partenariat public/privé pour financer les infrastructures, et même pour garantir l'appui technique et le financement de l'agriculture familiale. Peu présents dans les débats sur les lois d'orientations agricoles, les privés négocient leur implication au niveau politique, notamment pour se libérer de ce qu'ils considèrent comme des contraintes. Ils s'affranchissent des obligations réglementaires et obtiennent des exonérations d'impôts et des taxes qui paradoxalement privent les Etats des ressources nécessaires à leur action. L'aide publique, en diminution, des bailleurs de fonds institutionnels tend d'ailleurs à financer prioritairement ces partenariats, les financements dits catalytiques⁴, contribuant à la pauvreté des moyens des Etats, incapables de jouer leur rôle de régulation.

La faiblesse des structures d'Etat entraîne souvent, par défaut, la non-application de règlements édictés. Par exemple, les obligations accompagnant les concessions de terres du domaine public (étude préalable d'impacts environnementaux et sociaux ; consentement libre et informé ; mise en valeur dans des délais de 3 à 5 ans ; etc.) ne sont souvent respectées que sous la contrainte des ONGs internationales et de campagnes de presse.

Une autre évolution contribuant à l'affaiblissement des Etats nationaux est que les politiques agricoles s'internationalisent (le changement climatique ; la sécurité alimentaire ; etc.) ou se territorialisent (décentralisation et déconcentration).

3. Acteurs, échelles et informations

Les acteurs des politiques publiques

L'élaboration et la mise en œuvre des politiques agricoles associent des acteurs de plus en plus nombreux, intervenants à des échelles multiples. Elaborer des politiques publiques agricoles ou non est d'abord une question d'articulation entre des acteurs, mais aussi des échelles. Pour faciliter ces articulations, l'information, spatiale, peut aider à (i) renseigner les débats et à le rationaliser

⁴⁴ Fonds destiné à faire appel à d'autres fonds, qui peuvent parfois s'assimiler à des *matching funds* pour assurer le co-financement et pour lever d'autres fonds de financement.

par la référence à des faits ; (ii) à permettre des alliances et la recherche des consensus.

La distinction habituelle entre "acteurs" en charge de la conception (les décideurs), en charge de la mise en œuvre des mesures (les intermédiaires) et les destinataires finaux (les bénéficiaires), n'est probablement plus totalement pertinente. Nous avons vu la place des citoyens, ordinaires, plus ou moins organisés dans la formulation des politiques. Parmi les acteurs chargés de la mise en œuvre des politiques publiques (les « intermédiaires »), les nouvelles relations publics/privés font que de nouveaux acteurs apparaissent (ONGs, entreprises privées...) au côté des services de l'Etat, de plus en plus confinés dans des fonctions d'accompagnement, de suivi et de contrôle, fonctions qu'ils peuvent souvent difficilement assurer faute de moyens. Les destinataires des politiques publiques sont les entreprises agricoles (liées ou non à l'agro-industrie) et les agriculteurs. Ces acteurs ne peuvent plus être confinés à une simple fonction de bénéficiaires, ce qui sous-entend une certaine passivité. Par leurs innovations, par leurs pratiques et leur dynamisme, ils modifient la nature des politiques agricoles.

La classification habituelle des échelles d'actions et des informations nécessaires qui accompagnait cette typologie nous semble aussi devoir évoluer. En effet, elle nous semble refléter une conception dépassée d'un Etat centralisé qui définit des politiques qui sont mises en œuvre par des services pour des bénéficiaires finaux. Rappelons-en le schéma : les « décideurs » utilisent des informations permettant le diagnostic, la prospective et les choix, principalement au niveau de l'Etat ou de la grande région ; les "intermédiaires" sont surtout préoccupés par les procédures et le fonctionnement opérationnel des dispositifs et des mesures. Leur besoin en informations relève davantage du domaine du suivi, c'est à dire des informations nécessaires à la mise en œuvre de la politique, tout au long de sa durée, pour son pilotage. Ils travaillent à l'échelle du bassin de projets ; les « bénéficiaires » sont principalement concernés par l'application des mesures des politiques publiques et les impacts de celles-ci sur le fonctionnement de l'exploitation (conséquences économiques, conséquences en termes de temps de travail et de pénibilité, etc.).

Echelles/unités d'observation

Les **notions d'échelles** et plus encore de changement d'échelles⁵ sont complexes. En sciences politiques, elles sont liées à la gouvernance et prennent en compte des Unions supranationales, l'Etat national, les territoires et le local. Le changement d'échelle est abordé par l'analyse de la cohérence entre actions menées et les modes de gestion, à chaque échelle. Si cette dimension est importante, elle ne peut suffire. Les acteurs agissent à différentes échelles ou tout au moins ont besoin, pour agir à une échelle, de comprendre les dynamiques existantes à d'autres échelles. La capacité à intégrer de l'information relative à d'autres échelles est d'ailleurs considérée comme un atout : comprendre les demandes d'un marché international ne peut qu'aider à définir la qualité des produits ; comprendre les contraintes réelles des agriculteurs ne peut qu'aider à la définition de politiques d'appui adaptées.

En ce sens, les échelles sont aussi des unités d'observations, lieu de mobilisation de l'information nécessaire à l'action. La réflexion théorique sur les échelles-niveaux d'observation s'est développée dans un premier temps en géomorphologie (Tricart, 1952), puis en géographie physique (Bertrand, 1968). Dans son article, « Paysage et géographie physique globale », Bertrand (1968) distingue six échelles : *zone, domaine, région naturelle, géosystème, géofaciès* et *géotope* et cinq domaines permettant de caractériser chacune des échelles : *relief, climat, botanique, biogéographie* et *unités de mise en valeur*. Ce dernier champ est une ouverture à la géographie humaine, « *le paysage est, sur une certaine portion d'espace, le résultat de la combinaison dynamique, donc instable, d'éléments physiques, biologiques et anthropiques qui, en réagissant dialectiquement les uns sur les autres, font du paysage un ensemble unique et indissociable* ». D'autres auteurs font référence à des unités de milieu (Raunet, 1989) ou des unités géo-environnementale. Deffontaines et Caron (2007) parlent d'Unités Agro-Paysagères. Caron and Cheylan (2005) proposent le terme d'Unité Spatiale Homogène. Mais quelle que soit la dénomination, l'unité retenue est considérée comme un « système » où le paysage est vu comme un « tout » systémique et complexe, dépendant de facteurs biotiques, abiotiques et construits évoluant dans le temps (Zonneveld, 1989). La difficulté est de réussir à définir ce qui fait système, or « *tous ces phénomènes ne sont pas*

⁵ Cette notion de changement d'échelles devient nécessaire car tous les acteurs agissent à différentes échelles,

indépendants les uns des autres. Il ne faut donc pas les envisager séparément, mais dans leurs relations » (Raunet, 1989).

La **définition des unités** est le produit du croisement entre une analyse physionomique (ce qui est vu ou plus exactement ce qui est perçu) et une analyse spatiale hypothético-déductive qui a pour objectif de comprendre les logiques, les causes et les conséquences de la localisation des peuplements et des activités humaines. Toutes les méthodes décrites insistent sur l'aller-retour permanent, et de fait jamais achevé, entre des modèles qui sont construits sur un corpus d'hypothèses et l'observation de la réalité (Brunet, 1980).

La caractérisation des unités (le choix des éléments à décrire et des relations entre ces éléments) est déterminée par la question traitée. Les "catégories" d'information à mobiliser sont les mêmes, à chaque échelle, incluant des caractéristiques du milieu, l'occupation des sols, les systèmes de productions, les modes de gouvernance, en fait tous les éléments qui caractérisent les relations des hommes avec son milieu. Les informations ne se différencient entre les différentes échelles que par leur précision et leur niveau de détails.

Quelles informations pour quelles politiques ?

Dans cette conception d'échelles/unités d'observation, les informations produites ont pour objet de permettre aux acteurs de prendre des décisions informées, les plus rationnelles possibles. Maurel (2012) a identifié les fonctions de l'information dans l'élaboration et la mise en œuvre des politiques publiques. Ce sont des fonctions d'analyse (comprendre, diagnostiquer, suivre les évolutions), de prospective (imaginer, élaborer des scénarios, penser des solutions potentielles), d'apprentissage (partager des données, des informations, des représentations et des connaissances), de structuration des acteurs (identifier les acteurs, caractériser leurs projets, mobiliser, créer des communautés de projets partagé), mettre en œuvre (choisir des stratégies, planifier, organiser, gérer, créer des communautés d'actions...). Ces fonctions sont à rapprocher du cycle de projet. Les informations dont doivent disposer les décideurs sont celles nécessaires pour renseigner les différentes étapes de diagnostic, d'élaboration, de programmation, de mise en œuvre, de suivi et l'évaluation des politiques agricoles. De manière plus précise, ces informations servent à :

- déterminer si un sujet de préoccupation nécessite une intervention des pouvoirs publics (décidé grâce à un diagnostic de l'intérêt d'une politique publique) ;

- identifier des objectifs précis (une politique agricole est construite en fonction d'objectifs et les différentes mesures convergent toutes vers l'atteinte de ces objectifs) ;
- choisir les instruments et dispositifs adéquats pour atteindre ces objectifs ;
- déterminer les paramètres de l'instrument et du dispositif (choisir les mesures réglementaires) ;
- suivre et superviser la mise en œuvre ;
- évaluer les impacts sur des variables et la population cible.

Le Tableau 1 résume pour les principales politiques étudiées les grandes catégories d'informations nécessaires.

Tableau 1 - Quelles informations nécessaires pour quelles politiques ?

Politiques	Informations
Politiques d'aménagement du territoire	Occupation du sol actuelle et à venir (dynamiques) ; principales contraintes d'aménagement ; localisation des différents investissements, existants et à réaliser ; analyses d'opportunité ; études de sites et d'impact.
Politiques foncières	Parcelles cadastrales ; droits d'usage et les bénéficiaires.
Politiques d'appui à la production agricole	Occupation du sol ; localisation des systèmes de production ; dynamiques ; état des ressources ; localisation des intrants ; niveaux de production.
Alertes précoces sur le déroulement de la campagne agricole	Localisation des unités paysagères et des différents types de végétation ; caractérisation des états des cultures ; prévision des rendements ; estimation de la biomasse et de la disponibilité fourragère.
Services d'assurance agricole	Idem. Les informations sont les mêmes que pour les services d'alerte.
Evaluations des risques environnementaux	Occupation du sol ; identification et localisation des différents risques ; localisation des mesures anti-risques.

Ces informations sont à mesurer dans les différentes étapes de l'élaboration des politiques publiques : le diagnostic (l'état de lieux et la définition des enjeux), l'élaboration (définition des objectifs), la programmation (stratégie et moyens nécessaires), la mise en œuvre (le suivi des réalisations) et l'évaluation (mesure de la pertinence des objectifs en fonction des enjeux ; efficacité des réalisations et de leurs effets en fonction des objectifs ; cohérence entre les moyens et les objectifs ; efficacité des moyens en fonction des réalisations).

4. Apports de l'information spatiale et de la télédétection

Le traitement des images de télédétection permet de répondre en partie aux besoins en information des politiques publiques agricoles, notamment aux besoins :

- d'occupation et d'usage du sol, et de leurs dynamiques dans le temps et dans l'espace. En fonction des échelles spatio-temporelles utilisées, la télédétection permet notamment de déterminer la répartition et les transitions entre différents types d'occupation du sol à une échelle régionale, mais également de déterminer les pratiques culturales associées à une échelle plus fine ; les unités paysagères et les différents types de végétation ;
- de différents paramètres biophysiques de surface permettant de caractériser l'état et l'évolution de la végétation, ainsi que les conditions dans lesquelles se développent les cultures et ce tout au long de l'année. Les conditions des cultures (type de culture, l'humidité du sol, la santé des cultures, phénologie, etc.), l'estimation de la biomasse et des rendements ;
- de référentiel cartographique permettant la mise en cohérence spatiale de données d'origine et de nature diverses.

C'est en fait la combinaison de ces trois grandes familles d'information qui permet la fourniture d'informations nécessaires aux différentes politiques publiques.

5. L'agriculture africaine : des spécificités contraignantes pour la télédétection

Malgré tout le potentiel qu'offre actuellement la télédétection, la diversité des traits spatio-temporels des conditions environnementales et des pratiques agricoles des pays du Sud rend difficile l'utilisation de méthodes de télédétection développées pour les agricultures du Nord (Encadré 1).

Une grande variabilité spatiale des systèmes

Sur le continent africain, à l'exception de l'Afrique Australe, du Maghreb, de l'Egypte et de quelques pays côtiers d'Afrique de l'Ouest, les systèmes de production sont de petite agriculture (Dixon *et al.*, 2001). Cette « petite agriculture » est caractérisée par des parcelles de petite taille (Figure 1) présentant une forte variabilité inter- et intra-parcellaire. L'hétérogénéité spatiale des surfaces agricoles est souvent exacerbée par la présence de nombreux arbres dans le parcellaire et par l'association de différentes espèces sur une même parcelle. L'utilisation des jachères dans les systèmes agricoles africains est une difficulté supplémentaire pour la télédétection. Quand elles sont de longue durée, elles sont difficiles à distinguer de la végétation naturelle ; quand elles sont de courte durée, elles se confondent avec les cultures annuelles.

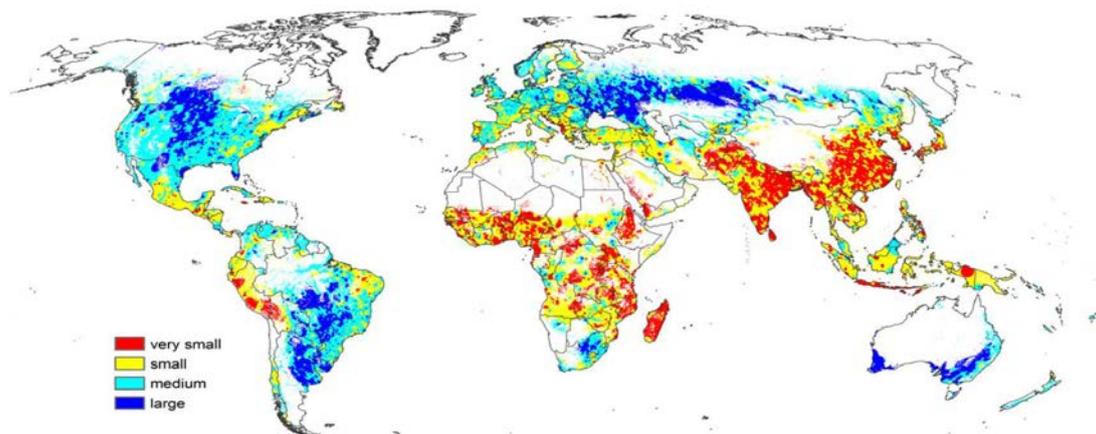


Figure 1 - Carte globale de la taille des parcelles (Fritz *et al.*, 2015).

Une grande variabilité temporelle des systèmes

La majorité des produits d'aide à la décision pour l'agriculture sont basés sur le traitement de séries temporelles d'images. En effet, seules les séries

temporelles permettent de rendre compte de la phénologie des surfaces qui est un élément clé dans la différenciation de l'utilisation des sols (culture/non culture, groupes de culture). Cette approche est performante, mais souffre d'un certain nombre de limites sur le continent africain : (i) dans les zones tropicales humides, la phénologie n'est pas liée au climat, mais aux pratiques ; (ii) dans les zones tropicales sèches où la saison des pluies est courte, cultures et végétation naturelle ont un développement végétatif synchronisé ; (iii) les systèmes de cultures mixtes peuvent avoir des cultures intercalaires avec un cycle très court « brouillant » le signal de la culture principale.

Des conditions climatiques peu favorables

Concernant les conditions environnementales atmosphériques, la forte nébulosité de la saison des pluies nuit au suivi des cultures pluviales qui représentent la grande majorité des systèmes agricoles africains. Les récentes publications de Whitcraft (Whitcraft *et al.*, 2015a ; Whitcraft *et al.*, 2015b) montrent que le besoin de revisite satellitaire pour obtenir des synthèses d'images sur 8 jours avec 70% de surfaces cultivées dégagées est de l'ordre de 1 à 3 jours au mois d'août en Afrique de l'Ouest et de l'Est subsahariennes ; cette fréquence passe à 3-6 jours pour les mois de juillet et septembre. Actuellement seuls les satellites à basse résolution spatiale offrent une fréquence de revisite suffisante pour couvrir l'ensemble de la saison de croissance. Pour un suivi à haute résolution spatiale, le lancement du deuxième satellite Sentinel-2B, prévue en juin 2016, permettra de caractériser correctement le début et la fin de la saison de croissance (revisite de 5 jours avec Sentinel-2A et 2B).

Un environnement en données peu fourni et peu accessible

Le traitement et l'analyse des images satellite exigent des données complémentaires. Ainsi, le prétraitement radiométrique des images nécessite des données atmosphériques acquises à partir de station sol pour calibrer les modèles de corrections. De même, des données sur le relief, les types de sol, le climat et les statistiques agricoles sont très utiles pour le traitement des images et l'évaluation des produits réalisés. Malheureusement, depuis les années 80, la qualité des systèmes météorologiques et des systèmes de statistiques agricoles de nombreux pays africains ne cessent de décroître, pour

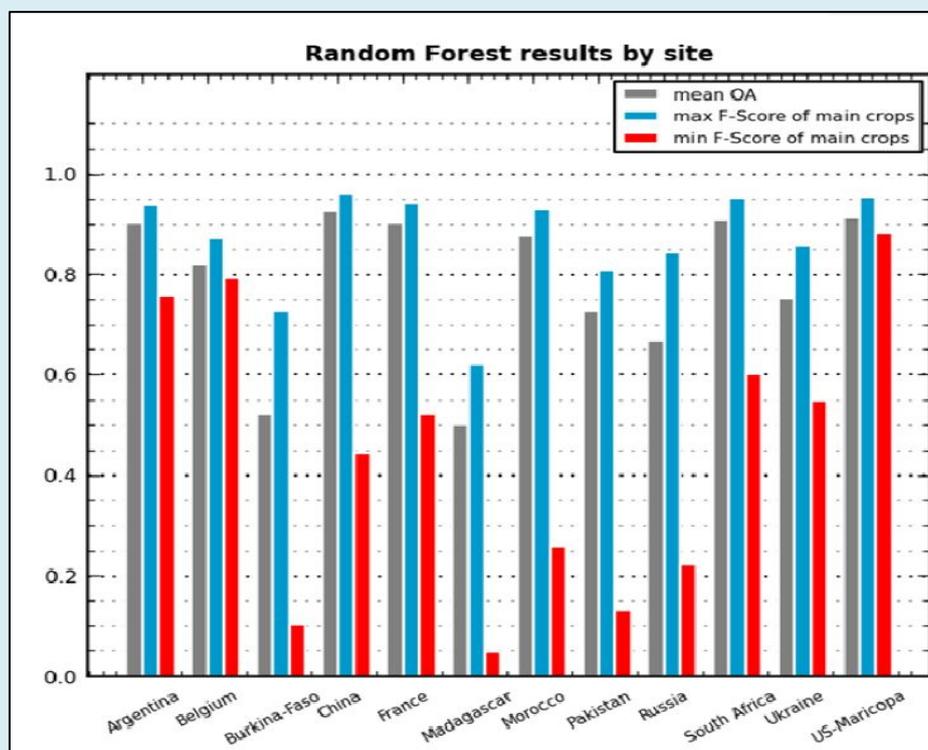
l'essentiel en raison d'un manque de ressources et de coordination institutionnelle (World Bank, 2010).

Les bases de données satellitaires existantes (autres que globales) sont hétérogènes. Les archives Landsat sont incomplètes, les archives SPOT sont très hétérogènes suivant les régions et les périodes étudiées. Les tentatives d'acquisition se font surtout pendant la saison sèche, et il existe peu d'images d'archives acquises en saison des cultures.

Encadré 1 - Les premiers résultats du projet Sentinel2-AGri

Dans le cadre du projet ESA Sentinel2-Agri, le CESBIO et l'UCL ont comparé différents algorithmes de classification d'images pour obtenir des cartes des principales cultures présentes sur une douzaine de sites agricoles à travers le monde. Ces sites avaient fait l'objet de relevés de terrain adéquats et bénéficiaient de séries temporelles d'images à résolution décimétrique (pour l'essentiel des sites JECAM et des sites SPOT4-TAKE5).

Parmi les trois sites du continent africain, le site d'Afrique du Sud (grand parcellaire) obtient un score élevé de pixels bien classés (90%), alors que les deux sites de petite agriculture situés au Burkina Faso et à Madagascar, ont les plus mauvais scores de l'étude avec 50% de pixels bien classés.



Précision de la cartographie des principales cultures obtenue avec l'algorithme Random Forest sur les sites d'étude du projet Sentinel-2 (Arias and Inglada, 2015).

II. Expériences et projets en cours en Afrique dans le domaine de la télédétection et de l'agriculture

1. Le contexte international de l'Observation de la Terre

GEO⁶

Le **Groupe d'Observations de la Terre GEO (Group on Earth Observations)** est une **organisation inter-gouvernementale** créée en février 2005 lors du 3^{ème} sommet d'observation de la Terre à Bruxelles. GEO est un partenariat volontaire composé de 184 membres, des gouvernements et des organisations internationales (dont African Association of Remote Sensing of the Environment, African Centre of Meteorological Application for Development, Environmental Information Systems – AFRICA, Regional Centre for Mapping of Resources for Development, Secretariat of the United Nations Convention to Combat Desertification, United Nations Economic Commission for Africa, mais aussi la FAO, le CEOS ...). Chaque membre de GEO possède et opère ses propres systèmes d'observation au sol, aéroportés et satellitaires. **Le rôle de GEO est de coordonner les efforts de ses membres pour construire un système global de systèmes d'Observation de la Terre nommé GEOSS (Global Earth Observations System of Systems)** qui soit plus efficace que la somme des systèmes individuels, et ainsi assurer aux décideurs un accès total aux données et informations qui leur permettent de traiter les problèmes globaux. GEO permet à ses membres de contribuer à GEOSS en leur fournissant un cadre pour la coordination des stratégies d'observation de la Terre et les investissements, le partage de données, la collaboration autour de projets et la réponse aux besoins des utilisateurs. Par ses efforts, les Etats membres de GEO partagent de plus en plus leurs données, ce qui permet l'aboutissement d'initiatives globales telles que le Global Forest Observation Initiative (GFOI) ou le GEO Global Agriculture Monitoring (GEOGLAM).

CEOS⁷ et GEOSS⁸ et CEOS⁹

GEOSS (Global Earth Observations System of Systems), coordonné par GEO, est basé sur des systèmes d'observation nationaux, régionaux ou

⁶ <http://www.earthobservations.org/index.php>

⁷ <http://www.ceos.org/>

⁸ <http://www.earthobservations.org/geoss.php>

⁹ <http://www.ceos.org/>

internationaux d'instruments au sol, aéroportés ou satellitaires. La composante européenne de GEOSS est Copernicus qui bénéficie du soutien de la Commission Européenne (FP6 et FP7).



Figure 2 - Le système de systèmes d'observation de la Terre GEOSS et les neuf domaines à bénéfice sociétal (<http://www.earthobservations.org/geoss.php>).

Composante spatiale de GEO, le **comité pour l'Observation de la Terre CEOS** (Committee on Earth Observation Satellites) est un groupe intergouvernemental qui fait travailler ensemble un grand nombre d'agences spatiales dans le monde. Le concept de constellation virtuelle de satellites CEOS a été créé pour engager et coordonner les programmes disparates d'observation de la Terre des agences membres et faciliter leur contribution à la fourniture d'observations spatiales nécessaires pour les besoins de GEOSS. Ces constellations sont composées de plusieurs satellites, de systèmes au sol et de systèmes de distribution de données coordonnés pour une plus grande efficacité. A ce jour il existe sept constellations qui traitent de la composition atmosphérique, des surfaces continentales (LSI-VC, Land Surface Imaging Virtual Constellation), de la couleur des océans, de la topographie des océans, du vent, de la surface des océans et des précipitations.

Par la promotion, l'acquisition, la distribution et l'application des données satellitaires de la Terre (Bailey *et al.*, 2007), **CEOS a pour mission d'améliorer la disponibilité, l'accès et l'utilisation des données d'observation de la Terre pour répondre aux besoins de la population**

mondiale. Les besoins correspondent à ceux définis par les 9 domaines à bénéfice sociétal (Societal Benefit Areas ; SBAs) qui sont l'agriculture, la biodiversité, le climat, les catastrophes naturelles, les écosystèmes, l'énergie, la santé, l'eau et le climat (Figure 2). Aujourd'hui, CEOS gère et contribue à la moitié des projets de GEO.

*AfriGEOSS*¹⁰

L'initiative AfriGEOSS, approuvée lors de la 9^{ème} session plénière de GEO au Brésil en 2012, fait suite au développement continu de la communauté africaine en Observation de la Terre. Cette initiative devrait permettre de consolider le lien entre les activités de GEO et les compétences régionales et de créer des synergies en évitant les duplications entre les initiatives bilatérales ou multilatérales sur le continent africain. Cette initiative est essentielle pour développer les capacités de l'Afrique pour produire, gérer et utiliser des données d'Observation de la Terre, et ainsi permettre la contribution de la région au système GEOSS.

Les objectifs d'AfriGEOSS (GEO, 2014) sont de:

- coordonner et rassembler les décideurs, instituts et agences en Afrique qui sont engagés dans GEO et dans des activités d'observation de la Terre ;
- fournir une plateforme pour les pays afin de pouvoir participer à GEO et contribuer à GEOSS ;
- aider les collaborations de partage de connaissances ;
- identifier les défis, manques et opportunités des contributions africaines à GEOSS ;
- développer les capacités existantes, les atouts et les ressources ;
- préconiser la mise en application de l'observation de la Terre pour la prise de décision en Afrique.

¹⁰ <http://www.earthobservations.org/afrigeooss.php>

La participation à GEO/AfriGEOSS est ouverte à tous les Etats africains et aux organisations en lien avec l'Afrique. La Figure 3 illustre les pays membres en 2014, auxquels il faut ajouter les organisations suivantes :

- African Association of Remote Sensing for the Environment (AARSE) ;
- African Centre of Meteorological Applications for Development (ACMAD);
- Environmental Information Systems - Africa (EIS-Africa) ;
- Regional Center for Mapping of Resources for Development (RCMRD) ;
- United Nations Economic Commission for Africa (UNECA).

La coordination d'AfriGEOSS est assurée par un réseau de correspondants nationaux et régionaux qui assurent une bonne couverture géographique du continent. Les représentants régionaux actuels sont signalés en Figure 3.

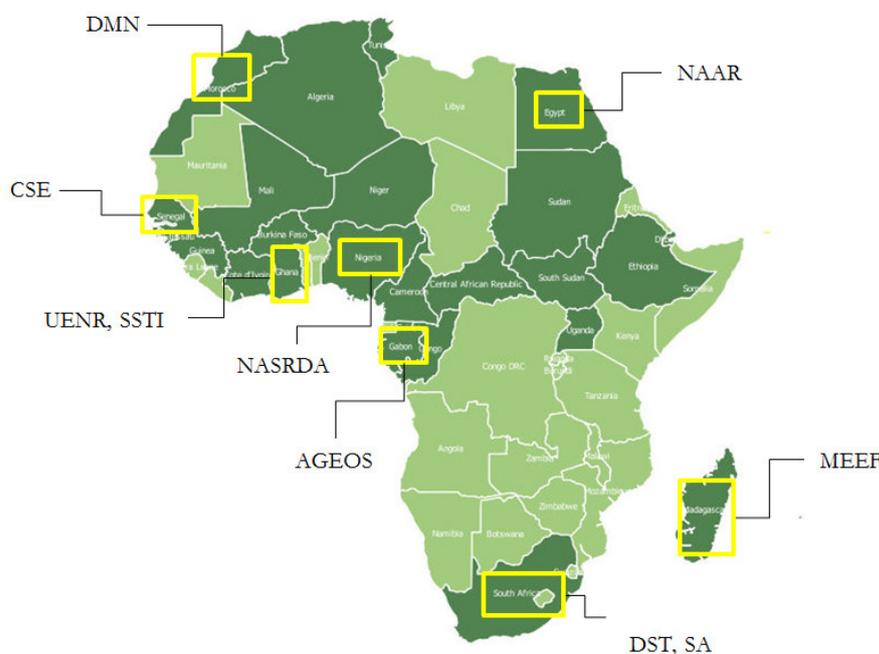


Figure 3 - Membres d’Africa GEO et organisations participantes (adapté de GEO, 2014¹¹). En jaune, les représentations régionales.

Zoom sur Geoglam¹²

GEOGLAM (GEO-Global Agricultural Monitoring) est l’initiative GEO pour l’Agriculture. Elle a été lancée par le groupe G20 des ministres de l’Agriculture

¹¹ http://www.earthobservations.org/documents/publications/20141107_AfriGEOSS_brochure.pdf

¹² <http://www.geoglam-crop-monitor.org/>

en juin 2011 à Paris et a été approuvée par les chefs d'Etat du G20 à Cannes en novembre 2011.

L'objectif de GEOGLAM est de renforcer la capacité internationale pour produire et disséminer des prévisions - pertinentes, précises et en temps voulu - de la production agricole aux échelles nationale, régionale et globale au travers de l'utilisation de l'observation de la Terre (données satellitaires et de terrain). Cette initiative s'appuie sur des programmes et initiatives existants de suivi de l'agriculture. Elle veut développer et renforcer au travers d'un partenariat international la recherche appliquée et le partage de données et méthodes.

GEOGLAM est structuré en trois composantes thématiques et trois composantes transversales menées au travers d'un grand nombre de projets dans le monde (Figure 4).

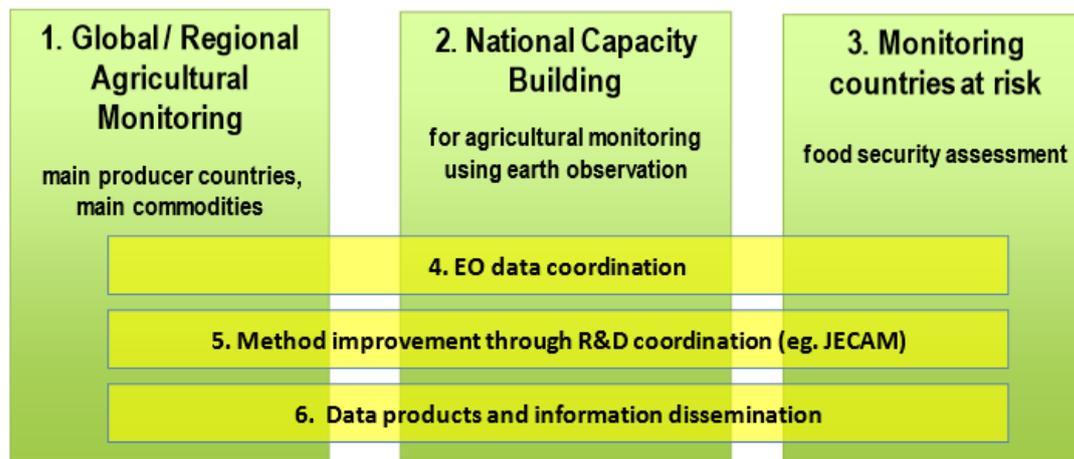


Figure 4 - Structure de GEOGLAM (<http://www.earthobservations.org/geoglam/>)
 Erreur ! Référence de lien hypertexte non valide.

Le suivi agricole aux échelles globale et régionale : La composante "suivi régional et global" est centrée sur les estimations de récolte des principaux pays producteurs et exportateurs agricoles (les pays du G20 + 7 pays couverts par AMIS - *Agricultural Market Information System*). Ces pays sont responsables de plus de 80% de la production agricole mondiale, et leur production agricole a un effet majeur sur les marchés. Seuls trois pays d'Afrique sont concernés par cette composante (Egypte, Nigeria et Afrique du Sud). Cette composante ne traite que quatre cultures principales : blé, maïs, riz et soja.

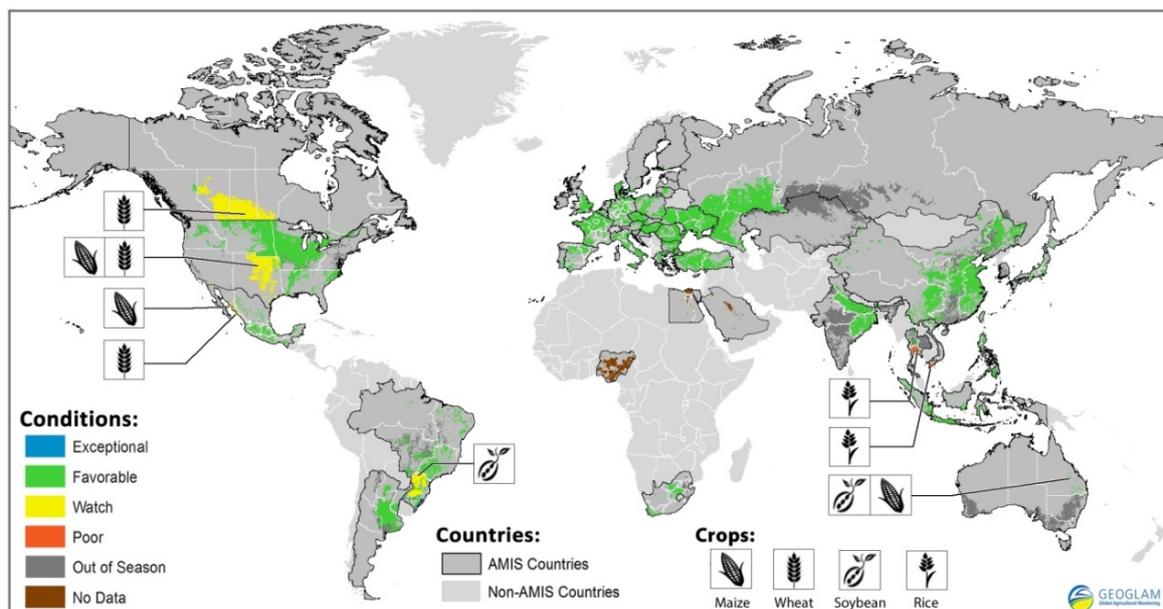


Figure 5 - Exemple de carte des conditions des cultures synthétisant l'information sur les 4 cultures suivies par AMIS (blé, maïs, riz et soja), pour le 28 avril 2014 (<http://www.geoglam-crop-monitor.org/about-geoglam-crop-monitor#Framework>).

Depuis septembre 2013, GEOGLAM édite un bulletin de suivi agricole qui publie des estimations de conditions de culture en appui aux activités de suivi des marchés d'AMIS (exemple donné en Figure 5). Une nouvelle composante de recherche liée à l'observation des zones pastorales (GEOGLAM – *Rangeland and Pasture Monitoring* ou RAPP¹³) se met en place sous la coordination de l'agence scientifique australienne CSIRO.

Le renforcement des capacités nationales : GEOGLAM devrait stimuler la mise en réseau et le partage d'expériences techniques entre, d'une part les pays du G20 et les autres pays identifiés dans AMIS et, d'autre part, les pays à risques où l'Observation de la Terre et la modélisation des cultures pourraient avoir un impact important en termes d'informations. A ce jour, les projets européens AGRICAB (projet terminé, centré sur l'Afrique) et SIGMA (projet en cours à l'échelle globale) sont labellisés GEOGLAM. En 2016, un appel d'offre H2020 sera ouvert sur l'observation de la Terre pour la sécurité alimentaire en Afrique (10 M€ environ).

¹³ <http://www.geo-rapp.org>

Le suivi des pays à risques¹⁴ : Le suivi agricole dans les pays à risque alimentaire nécessite l'évaluation de la situation de sécurité alimentaire en temps opportun et l'alerte précoce sur d'éventuelles pénuries alimentaires importantes. Un certain nombre de membres de GEOGLAM tels que la FAO avec GIEWS (*Global Information and Early Warning System on food and agriculture*), l'USAID avec FEWS-NET (*Famine Early Warning Systems NETWORK*), le RADI avec CropWatch et le JRC avec MARS-FOODSEC (*Monitoring Agricultural ResourceS – Food Security*) produisent non seulement des données sur le suivi de l'agriculture utiles aux agences nationales et régionales des pays à risques, mais aussi aident à renforcer les capacités nationales et régionales pour développer des produits particuliers. Travailler au sein de la structure GEOGLAM favorise la coordination de la fourniture de ces produits, les efforts de renforcement de compétences et le développement harmonisé de méthodes et d'outils.

Le projet GEOGLAM s'appuie pour ses développements méthodologiques en télédétection sur le réseau **JECAM¹⁵** (*Joint Experiment for Crop Assessment and Monitoring*) organisé dans le cadre de GEO *Global Agricultural Monitoring* (GEOSS Task AG0703a) et de *Agricultural Risk Management* (GEOSS Task AG0703b). Ce réseau est constitué autour d'une trentaine de sites agricoles répartis dans le monde. A ce jour, sept sites sont sur le continent africain : Burkina Faso-Koumbia (partenariat IER-CIRDES-CIRAD), Sénégal-Bambey (partenariat CSE-CIRAD), Madagascar-Antsirabé (partenariat FOFIFA-CIRAD), Maroc-Tensif (partenariat UCA-CESBIO), Afrique du Sud-Free state province (partenariat NEOSS-ARC), Kenya-Muranga (partenariat ICRAF-CIRAD) et Tunisie-Merguelil (CESBIO). Le principal mérite de JECAM est la mutualisation des approches. JECAM fonctionne sur le volontariat des équipes, sans support financier pour la collecte des données. Ainsi, en pratique, les données disponibles via JECAM demeurent disjointes.

¹⁴ http://www.earthobservations.org/geoglam_car.php

¹⁵ <http://www.jecam.org/>

2. Le contexte européen de l'Observation de la Terre

Le programme européen de suivi des surfaces terrestres : COPERNICUS ¹⁶(ex-GMES)

Lancé en 1998, le programme européen COPERNICUS, anciennement nommé GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*), est un programme européen d'observation et de suivi des surfaces terrestres. C'est un ensemble complexe de systèmes qui collectent des données de différentes sources (*in-situ* et capteurs aérospatiaux), les traite et offre aux utilisateurs des informations fiables et à jour au travers d'un ensemble de services gratuits. Le développement de l'infrastructure d'observation est fait sous l'égide de l'agence spatiale européenne (ESA) pour la partie spatiale, et de l'agence Européenne de l'environnement et des Etats membres pour la partie *in-situ*.

Les services développés couvrent six domaines thématiques : surface continentale, océan, atmosphère, changement climatique, gestion de crise et sécurité. Ces services sont développés dans le cadre de projets financés par les programmes FP6/FP7 (*Framework Program*) de la commission européenne (ex : projets Geoland-1 and -2) et par le programme GMES *Service Element* de l'ESA (ex : projets GSE Land, GMFS).

Les services « Surface Continentale » de COPERNICUS¹⁷

Les services COPERNICUS « Surface Continentale » (*Global Land Surface Services*) couvrent à la fois des produits spécifiques européens de cartographie à différentes échelles et des produits globaux à échelles moyenne et petite. Ces services doivent être pérennisés en 2017 et ont été progressivement implantés via des projets de recherche et de développement (GEOLAND1 et GEOLAND2¹⁸, projets FP6 et FP7), puis via les programmes GIO (*GMES initial operations*). Les services COPERNICUS se déclinent à différentes échelles :

- une composante de cartographie globale de paramètres biophysiques de surface (BioPar) décrivant l'état de la végétation, le bilan énergétique des surfaces et le cycle de l'eau (cf. produits en Section 3.1.) ;

¹⁶ <http://www.copernicus.eu/>

¹⁷ <http://land.copernicus.eu/>

¹⁸ <http://www.geoland2.eu/>

- une composante de suivi saisonnier et annuel des changements (SatChMo), coordonnée par le CCR d'ISPRA ; pour le continent africain, il existe une application web pour 445 sites en Afrique de l'Est¹⁹ ;
- une composante européenne de cartographie de l'occupation et de l'utilisation des sols.

Les services COPERNICUS Surface Continentale viennent en support à un grand nombre d'applications telles que l'aménagement des territoires, la gestion des forêts, la gestion de l'eau, l'agriculture ou la sécurité alimentaire, en proposant un service de suivi systématique des surfaces à partir d'images à basse résolution spatiale, un service de suivi de zones prioritaires accessible sur demande avec des images à haute résolution spatiale, et un ensemble de services thématiques qui devraient être développés pour traiter les politiques publiques européennes dans des domaines spécifiques. Aujourd'hui, seules les variables à l'échelle globale sont accessibles depuis le portail Copernicus²⁰.

Les projets de recherche européens en appui à Land COPERNICUS²¹

Les produits développés dans le cadre de GEOLAND-2 et de GIO-GLOBAL LAND sont utilisés dans différents projets à visée applicative telle que la gestion agro-environnementale ou le suivi global de l'agriculture. Depuis 2004, des dizaines de projets ont été menés. Concernant les projets traitant de l'agriculture dans des pays du continent africain, les projets suivants ont été identifiés (liste non exhaustive) :

- E-AGRI²² (*Crop monitoring as an E-agriculture tool in developing countries* ; 2011-2014), financé par le FP7-ICT. Ce projet porte sur la modélisation et l'utilisation de données de télédétection pour élaborer des modèles statistiques de prévision de récolte en Chine et pour les cultures céréalières au Maroc ;
- ISAC²³ (*Information Service on Agricultural Change* ; 2011-2014), financé par la FP7-DG ENTERPRISE sur les changements de l'agriculture, le suivi des cultures, le suivi des sécheresses et la sécurité alimentaire ;

¹⁹ <http://satchmo-africa.gisat.cz/>

²⁰ <http://land.copernicus.vgt.vito.be/PDF/portal/Application.html#Home>

²¹ <http://www.copernicus.eu/pages-principales/projects/project-database/database-of-projects/>

²² <http://www.e-agri.info/documents.html>

²³ <http://www.gmes-isac.info/>

- VGT4AFRICA²⁴ (*Distribution of VEGETATION data in Africa through EUMETCAST*; 2005-2008), financé par le FP7 sur la dissémination par télécommunication de produits SPOT-VEGETATION pour le développement durable ;
- DEVcoCAT²⁵ (*Distribution of VEGETATION data in Africa through EUMETCAST*; 2008-2011), financé par le FP7 sur la dissémination opérationnelle par télécommunication d'une cinquantaine de produits, dont des indicateurs sur la végétation, pour le développement durable en Afrique;
- AGRICAB²⁶ (*Developing increased EO capacity for better agriculture and forestry management in Africa* ; 2011-2015) financé par le FP7-ENV. Dans la suite des projets VGT4AFRICA et DEVcoCAST ;
- GMFS²⁷ (*Global Monitoring for Food Security*; 2003-2013), financé par l'ESA-GSE, sur les services d'information pour la sécurité alimentaire ;
- SIGMA²⁸ (*Stimulating Innovation for Global Monitoring of Agriculture* ; 2013-2017), programme de recherche actuellement en cours, financé par le FP7 en appui à GEOGLAM.

L'ensemble de ces projets ont contribué à l'émergence de consortiums européens de recherche appliquée, sans toutefois vraiment dépasser le stade d'études pilotes (tests ou démonstrations de méthodologie dans différents contextes africains).

Les projets Copernicus/GMES Africa initiative

Copernicus/GMES Africa initiative a été créé en 2007 pour créer un cadre global pour des applications d'observation de la Terre en Afrique, à travers le développement d'une feuille de route spécifique qui applique et étend l'approche du programme Copernicus au continent africain.

Cette initiative a pour but de fournir aux parties prenantes africaines les données et les outils nécessaires pour une utilisation opérationnelle des technologies de l'UE. Elle est soutenue par un certain nombre de projets financés par l'UE tels que :

²⁴ <http://www.vgt4africa.org>

²⁵ <http://www.devcoast.eu/>

²⁶ <http://www.agricab.info/>

²⁷ <http://www.gmfs.info/>

²⁸ <http://www.geoglam-sigma.info/>

- PUMA (*Preparation for the Use of Meteosat Second Generation in Africa* ; 2001-2006) : Premier projet technologique panafricain consacré à l'observation de la Terre, financé par l'Union européenne, PUMA visait à améliorer les capacités de prévision météorologique à travers le continent africain. Au total, 53 stations EUMETCast ont été déployées dans tous les services météorologiques nationaux et centres régionaux africains pour assurer l'accès opérationnel et en temps réel aux données et produits qui permettent d'affiner les prévisions météorologiques, et de surveiller les phénomènes météorologiques dangereux.
- AMESD (*Africa Monitoring of the Environment for Sustainable Development*, 2007-2011). Le projet AMESD de Surveillance de l'environnement en Afrique pour le développement durable visait à fournir à toutes les nations africaines les ressources nécessaires pour surveiller leur environnement par le déploiement de nouvelles stations EUMETcast sur le continent, la maintenance des stations PUMA existantes et l'implémentation de projets de gestion environnementale. AMESD a profité des acquis du programme PUMA et ouvert la voie à l'extension à l'Afrique du programme européen de Surveillance mondiale pour l'environnement et la sécurité (GMES).
- MESA²⁹ (*Monitoring of Environment and Security in Africa* ; 2013-2018). Ce programme de surveillance pour l'environnement et la sécurité en Afrique est la première contribution aux initiatives GMES-Africa et CLIMDEV-Afrique de la Stratégie commune UE-Afrique. Il est financé par le 10^{ème} Fonds Européens de Développement de l'UE avec un budget de 37 M€ sur 5 ans. L'axe principal du projet est de renforcer les capacités d'utilisation des données d'observation de la Terre en Afrique, en mettant l'accent sur les applications climatiques et environnementales dans la continuité du projet AMESD. MESA prévoit d'assurer la maintenance et la mise à niveau des stations de réception EUMETCast et de soutenir le développement de services opérationnels fondés sur les données d'observation de la Terre. Le programme est mis en œuvre par la Commission de l'Union Africaine et par sept centres régionaux qui opèreront des services dans différents domaines. Deux centres régionaux travaillent principalement sur des thématiques agricoles : AGRHYMET pour l'Afrique de l'Ouest et BDMS (Botswana Department of Meteorological Services) pour l'Afrique australe.

²⁹ <http://mesa.au.int/mesa/>, <http://www.hd-mesa.org/>

3. Le contexte français de l'Observation de la Terre

Les acteurs institutionnels



Le Pôle Thématique Surfaces Continentales

THEIA³⁰ est une structure nationale inter-organismes ayant pour vocation de faciliter l'usage des images issues de l'observation des surfaces continentales depuis l'espace. THEIA met à disposition de la communauté scientifique nationale et internationale, et des politiques publiques de suivi et de gestion des ressources environnementales, une vaste panoplie d'images à différentes échelles, en même temps que des méthodes et des services liés à l'observation depuis l'espace des surfaces continentales.

THEIA rassemble à ce jour 9 partenaires : CNES, IGN, IRSTEA, CNRS, CIRAD, IRD, Météo-France, INRA et CEA. Sa structure comprend un centre de gestion et de traitement des données fournissant des produits et services aux utilisateurs, un réseau de Centres d'Expertises Scientifiques (CES) composé d'un ensemble de laboratoires nationaux, et un réseau d'Animation Régionale Theia (ART) dans les différentes régions métropolitaines et les territoires français d'outre-mer. Les CES et les ART ont pour objectif de produire des services autour de l'occupation du sol, l'agriculture, la forêt, l'urbain, le littoral, la montagne ou des approches globales, tout en assurant leur adéquation avec les besoins des utilisateurs. **Un réseau ART-Pays du Sud est actuellement en cours de constitution, animé par l'IRD et le CIRAD.**

Le catalogue des produits de THEIA, tels que prévus pour la période 2013-2016, est donné en Figure 6. Il comporte des couvertures satellitaires annuelles du territoire national, des séries temporelles de réflectance de surface à haute ou très haute résolution spatiale, des séries temporelles de produits biogéophysiques globaux, des outils d'aide à la visualisation et au traitement des données, et des méthodes et algorithmes de traitement de données.

³⁰ <http://www.theia-land.fr/fr>

CLASSE	PRODUITS	TRAITEMENT	ACCÈS LIBRE
IMAGES TRÈS HAUTE RESOLUTION SPATIALE	Images Pléiades sur ~100 villes France 2012-2015 (GEOSUD – IGN - CNES)	Orthorectification	Acteurs publics nationaux
	Réception directe images type Spot 6/7 après 2015 (antenne GEOSUD)	Capacité de programmation + temps réel	Acteurs publics nationaux
IMAGES HAUTE RESOLUTION SPATIALE	Couverture annuelle France à 5m résol. 2009-2015 (GEOSUD)	Orthorectification + mosaïquage (+ réception directe pour Landsat 8)	Acteurs publics nationaux
	Séries 2000-2012 d'images Spot et autres sur 4 sites (Kalideos / CNES)	Orthorectification + Corrections atmosphériques	Acteurs publics nationaux
	Images Take 5 : Séries d'images Spot 4 tous les 5j, février – juin 2013, 45 sites	Orthorectification + Corrections atmosphériques	Tous utilisateurs
	Spot World Heritage Program : 400 000 images sur le monde 1986-2008(CNES)	Orthorectification	Tous utilisateurs pour usage non-commercial
	Sentinelle-2 France + autres zones (10 fois la France) + Landsat France (CNES)	Corrections atmosphériques + Synthèses mensuelles	Tous utilisateurs
PRODUITS BIOGÉOPHYSIQUES GLOBAUX	LAI, fAPAR, albédo globaux : AVHRR & VGT (INRA - Météo-France - CNES)	Traitement biogéophysique	Tous utilisateurs
	Hauteur d'eau de lacs et rivières : Jason et autres (Hydroweb CNES – CNRS – IRD)	Traitement biogéophysique	Tous utilisateurs

Figure 6 - Liste des produits de THEIA prévus dans la période 2013-2016.

Ce catalogue des produits est conçu pour être complémentaire des produits offerts par les Services de Base de Copernicus, tout en valorisant les compétences nationales dans le domaine.

En termes d'animation et de communication, un bulletin THEIA est publié chaque semestre. L'Equipex Geosud et le Pôle Thématique Surfaces Continentales Theia ont organisé en 2014 un séminaire conjoint sur le thème "Les données spatiales au service de la communauté scientifique et des acteurs publics". Le prochain séminaire est prévu en juin 2015.



Le projet Equipex-GEOSUD³¹, sélectionné dans le cadre de l'appel à projets « Equipements d'Excellence » du Programme Investissements d'Avenir en 2011, vise à développer une infrastructure nationale de données satellitaires accessibles gratuitement par la communauté scientifique et les acteurs publics.

³¹ <http://www.geosud.teledetection.fr/>

Il permet pendant 5 ans l'acquisition et la mise à disposition de couvertures satellitaires annuelles de la France en haute résolution spatiale, et d'**images dans les pays du Sud**. Il organise la mise en réseau de la communauté scientifique et de la communauté des utilisateurs.

Le projet d'EQUIPEX regroupe 13 partenaires institutionnels, issus de la recherche et l'enseignement supérieur (AgroParisTech, CIRAD, CNRS, IRD, IRSTEA³², Université de Montpellier, Université Antilles Guyane et Université de la Réunion), du secteur de la gestion publique de l'environnement et des territoires (CETE sud-ouest, CINES, IGN) et des acteurs publics, privés et associatifs des Technologie de l'Information et de la Communication (CNES, Ministère de l'Agriculture, Ministère du Développement Durable, AFIGEO et Geomatys). La communauté scientifique œuvrant sur des terrains d'études dans « **les pays du Sud** » bénéficie également au sein de GEOSUD d'un programme d'acquisitions de données satellites sur des zones d'intérêt dans les régions méditerranéennes et dans les pays en développement, en support de projets de collaboration scientifique. Ce volet prévoit l'acquisition de données à la demande, en multi-licences pour « tout acteur public » de façon à rendre ces images disponibles gratuitement à l'ensemble de la communauté scientifique française. Les données « au Sud » actuellement disponibles sont consultables sur le site internet de l'EQUIPEX.

Les principales associations



AFIGEO³³, l'association française pour l'information géographique, a été créée en 1986. Son objet est de concourir au développement du secteur de l'information géographique, en France et à l'international. Pour mieux servir ses adhérents, l'association est structurée autour de 4 pôles : le Pôle Entreprises-Industries, le Pôle Formation-Recherche, le Pôle Usages-Utilisateurs et le Club international.



Georezo³⁴, le portail francophone de la géomatique, propose des forums sur des domaines techniques, organisationnels, juridiques et humains autour des Systèmes d'Information Géographique. Animé par une équipe de passionnés, ce site est une mine d'informations

³² Coordinateur du projet

³³ <http://www.afigeo.asso.fr/>

³⁴ <http://georezo.net/>

sur la communauté française, l'emploi, les données, outils et méthodes. Il travaille en partenariat avec Afigeo et Decryptageo.



Decryptageo³⁵, l'information géographique, est un site français d'information et d'actualités sur l'information géographique. Il propose en ligne une revue indépendante (« Decryptageo Le Mag », anciennement « SIG la lettre ») très complète, entièrement consacrée à l'information géographique (ses techniques, ses méthodes, ses usages, son marché, ses métiers, etc). La partie consacrée à l'observation de la Terre est bien développée.

4. Le contexte africain de l'Observation de la Terre

Les agences spatiales africaines

L'Afrique a quatre nations dotées d'agences spatiales (Ouedraogo, 2015).

- l'Afrique du Sud, qui est le pays africain le plus avancé dans le domaine spatial africain. Il est doté de deux satellites dont le premier Sunsat (1999) a été conçu par des ingénieurs sud-africains. Son agence spatiale, la SANSA (*South Africa National Space Agency*) a été créée en 2010 ;
- l'Algérie possède deux satellites ainsi qu'une agence spatiale nationale (ASAL) créée en 2002 et qui travaille sur le lancement d'un satellite de construction nationale ;
- le Nigeria possède cinq satellites depuis 2003, tous mis en orbite par des nations étrangères, le pays a de l'ambition mais peu d'autonomie, à ce jour. Son agence spatiale nationale est le NSARA (*National Space Research and Development Strategy*) ;
- enfin, l'Egypte a lancé son premier satellite national en 2007, Egypsat1, né d'une collaboration entre des ingénieurs égyptiens et ukrainiens. L'institution chargée des questions spatiales est le NARSS (*National Authority for Remote Sensing and Space Sciences*).

Ces quatre pays sont les membres de l'ARMC (*African Resource Management Constellation*). Ce programme créé en 2009 a pour objectif de développer une constellation de satellites pour fournir en temps réel et de façon non restreinte

³⁵ <http://decryptageo.fr/>

l'accès à des données satellitaires en support à la gestion des ressources sur le continent africain. A ce jour, l'AMRC communique très peu sur ses actions.

L'association africaine de Télédétection (AARSE)



L'AARSE³⁶ (African Association of Remote Sensing of the Environment) est une organisation scientifique non gouvernementale fondée en 1992. Sa mission est de promouvoir auprès des gouvernements africains et de leurs institutions, les universités, l'industrie, le secteur privé et le public, les bénéfices sociétaux des produits et services issus de l'observation de la Terre et des techniques géospatiales. L'affiliation à l'AARSE inclut des professionnels, des institutions et des associations nationales de toute l'Afrique et du monde travaillant dans des domaines liés à la télédétection, la photogrammétrie et aux sciences de l'information géospatiale. Pour atteindre ses objectifs de renforcement des compétences, l'AARSE organise tous les deux ans une conférence internationale dans un pays africain autour de l'observation de la Terre et des sciences géographiques. L'AARSE est membre d'AfriGEOSS.

Les institutions nationales et régionales

Au niveau des Etats africains, on observe une réelle volonté de mettre en place des centres spécialisés dans le traitement de données satellitaires, et ce depuis plus d'une vingtaine d'années. La mise en place de ces centres s'est faite avec l'appui des partenaires du nord et dans une dynamique de vulgarisation des technologies satellitaires et de commercialisation des données. En fonction des besoins des pays, des applications pour l'agriculture, l'hydraulique, la gestion des espaces forestiers ou pastoraux ont été développées avec l'objectif d'appuyer les politiques de développement.

Ces initiatives ont pris en compte la nécessité de spécialisation et de renforcement des compétences nationales et des actions de formation ont accompagné le développement des applications. Tous les projets développés en Afrique ont systématiquement intégré un volet « compétences nationales » et permis la mise en place de partenariats avec les institutions du nord.

³⁶ <http://africanremotesensing.org/>

Des centres de formation en télédétection ont vu le jour et des programmes de formation diplômante et qualifiante ont permis à des cadres déjà présents dans les structures de développement de se spécialiser dans ces nouvelles technologies. Les universités de plusieurs pays d'Afrique ont aussi accompagné cette dynamique et initié la formation universitaire à l'intention des étudiants voulant s'orienter dans ces disciplines, avec pour certaines un volet recherche.

Les états africains se sont engagés dans des processus de programmation régionale et sont impliqués dans la mise place et le fonctionnement **d'institutions d'intégration régionale dans les différents zones d'Afrique** (voir liste non exhaustive en Tableau 2). Ces institutions régionales ont aussi bénéficié de soutiens financiers importants pour créer des centres et développer un appui aux politiques, notamment en matière d'agriculture et de sécurité alimentaire. Dans ces dispositifs régionaux, des centres de formation et de spécialisation ont contribué à l'effort de formation, difficile à réaliser à l'échelle nationale pour certains pays.

Tableau 2 - Institutions régionales et autorités de bassins fluviaux.

Région	Nom du centre
Afrique continentale	ACMAD Niamey Prévisions météorologiques
Afrique continentale	Département ICT ISTD de la CEA AOCRS organisation Africaine de la Cartographie et la télédétection CEA African Geodetic reference Frame
Afrique du Nord	Centre Régional de Télédétection des Etats de l'Afrique du Nord (CRTEAN)
Afrique de l'Ouest (CEDEAO, UEMOA, CILSS)	CILSS/AGRHYMET, Niamey Bulletins périodiques, dispositif régional de suivi de la sécurité alimentaire
Sahara et Sahel	OSS Observatoire du Sahara et du Sahel
Afrique de l'Est	RCMRD Regional Centre for Mapping of Resources for Development (20 pays), Nairobi
Afrique de l'Est (Corne)	IGAD Drought Disaster Resilience and Sustainability Initiative (IDDRISI) Climate and Prediction Center (ICAPC)
Afrique Centrale	PRIASAN projet CEMAC OFAC (Observatoire des forêts d'Afrique Centrale COMIFAC)
Afrique Australe	SADC Climate Service Center
Fleuve Sénégal	Organisme de Mise en Valeur du Fleuve Senegal
Fleuves Volta	Autorité du Bassin de la Volta
Fleuve Niger	Autorité du Bassin du Niger
Fleuve Congo	Commission Internationale Congo Oubangui Sangha
Lac Tchad	Commission du Bassin du Lac Tchad
Fleuve Zambèze	ZAMCOM
Fleuve Nil	Nile Basin Initiative

Un secteur privé émergent

Dans certains pays, l'émergence d'un **secteur privé** a entraîné un développement des services d'appui (payants) à partir de données satellitaires. Les entreprises de ce secteur bénéficient souvent d'accords ou de partenariats avec des sociétés ou des organismes extérieurs et peuvent concourir aux appels d'offre ouverts sur le marché. Dans ce secteur privé au potentiel fragile il existe 2 catégories :

- un tissu de cabinets orientés sur les services de télédétection appliqués à la gestion des ressources naturelles (cas de l'OSFAC en RDC). Il comporte aussi des ONG locales spécialisées ;
- un autre tissu de cabinets rattachés aux producteurs d'images et de logiciels, où ces derniers s'organisent en réseau de distribution de produits et services. En Afrique, nous avons identifié un réseau de géo-entreprises locales dans le réseau de DigitalGlobe et de l'ESRI.

Constats et analyse

Dans le cadre des politiques publiques nationales, soutenues par les instances de financement internationales, les projets de télédétection, le plus souvent initiés au nord, ont eu un impact sur le développement de la télédétection, plus particulièrement dans les institutions publiques étatiques et régionales impliquées dans le développement agricole.

Ils ont permis l'équipement des centres, la formation des cadres et des techniciens des services et l'apprentissage et le démarrage des applications en appui au développement agricole. Ces initiatives reposent sur des aides financières extérieures (avec une faible contribution des états, hormis le salaire des cadres) et sur un appui en expertise étrangère.

Tout en ayant la volonté politique d'assurer la pérennité des activités, les services étatiques sont confrontés en fin de projet à des difficultés financières qui ne permettent pas une réelle appropriation (au sens de poursuite des activités) ; en conséquence, l'élaboration et la diffusion périodique des produits s'en trouvent perturbées et même parfois suspendues. Le renouvellement des financements ou le montage de nouveaux projets avec d'autres partenaires sont le plus souvent la solution adoptée pour résoudre les difficultés.

Le fonctionnement irrégulier des centres a pour conséquence une déperdition de l'expertise formée qui ne met plus en pratique ses compétences dans le domaine de la télédétection et s'oriente vers d'autres activités professionnelles.

Encadré 2

Lors d'un évènement sur la télédétection tenu à Kinshasa en janvier 2015, le rapport officiel citait « *la volonté des dirigeants à exploiter cette technologie et cette science pour le développement du pays* », tout en soulignant que certaines difficultés devaient être résolues. Il s'agissait notamment de garantir : i) l'accès aux données satellitaires récentes, ii) la maîtrise des outils de traitement et d'interprétation de ces données par les professionnels, iii) l'acquisition des équipements appropriés.

A ce jour, malgré la volonté politique et les investissements passés dans le domaine, il est difficile d'accéder à des informations obtenues par télédétection qui permettraient d'appuyer le développement agricole dans ces pays.

Toutefois ce constat à connotation pessimiste n'est pas généralisable à l'ensemble du continent africain. Nous avons observé dans certains états une appropriation réelle et un développement des applications de la télédétection au service de l'agriculture. Par exemple les institutions du Maroc et de la République d'Afrique du Sud ont su garantir la pérennité de leur action, tant dans la maîtrise des technologies que dans l'élaboration des produits d'aide à la décision.

Dans les centres régionaux comme AGRHYMET en Afrique de l'Ouest ou RCMRD pour l'Afrique de l'est, les données de télédétection sont réceptionnées et analysées. Des informations sur le développement des cultures et des pâturages, et sur la présence de feux de brousse sont diffusées régulièrement dans des bulletins ou par des sites web pour informer les dirigeants des pays concernés. Il en est de même pour le suivi de l'insécurité alimentaire en appui aux organismes humanitaires qui construisent leurs programmes d'intervention et d'urgence sur la base de ces informations.

L'évolution de certains centres vers un statut parapublic (CSE au Sénégal, IGB au Burkina, etc.) avec une obligation de générer des ressources propres (expertise, vente de produits ou de services, formation payante) leur a permis de se stabiliser, de garantir la qualité de leur personnel et d'assurer des services de qualité en adéquation aux attentes des utilisateurs.

Images, outils et produits satellitaires

I. Imageries satellitaires

L'observation de la Terre a plus de 40 ans. Cette technologie a évolué régulièrement depuis le lancement du premier satellite Landsat en 1972, avec des moments clés tels que, dans les années 2000, l'arrivée de capteurs à résolution métrique, puis vers 2010 le développement de satellites nationaux à visée essentiellement cartographique et militaire, et aujourd'hui les constellations Sentinel, qui combinées à Landsat8 vont ouvrir une nouvelle ère pour le suivi de la végétation.

Aujourd'hui, on estime qu'il y a en orbite une centaine de systèmes civils d'observation de la Terre en activité. Cette multiplication des systèmes s'expliquent par l'augmentation du nombre de lancements de satellites nationaux ou privés (33 pays, dont 4 en Afrique) et par l'augmentation de la longévité de ces systèmes (Belward and Skolen, 2015). L'offre satellitaire actuelle est devenue extrêmement riche avec une grande variété de capteurs qui fournissent des données à différentes résolutions spatiales (de 30 cm à plusieurs km), dans des bandes spectrales complémentaires (optique réflectif, thermique et micro-ondes), avec différentes répétitivités (de l'heure à l'année). Même si on assiste depuis quelques années à la « démocratisation » de l'accès aux images satellite à travers les nombreux globes virtuels proposés sur internet, l'offre satellitaire n'est pas facilement appréhendable par les non-spécialistes. Le choix d'un capteur satellite est étroitement lié aux besoins et aux moyens techniques et budgétaires dont on dispose pour acquérir et traiter les données, et chaque famille de capteurs a ses propres méthodes de traitement.

1. Généralités

Quelques grands principes

La première expérience de télédétection (ou « détection à distance ») est attribuée à Gaspard-Félix Tournachon, plus connu sous le pseudonyme de Nadar, qui, en 1858, a pris la première photographie aérienne à partir d'une montgolfière au-dessus de Paris. Le principe est toujours le même : il implique un capteur (l'appareil de photographie), un vecteur (aérostat) et un support de

la transmission à distance de l'information issue de la surface observée (la lumière). La télédétection aujourd'hui affiche une grande diversité dans chacune de ces trois composantes. C'est une technologie éprouvée qui fournit continuellement de la donnée sur toute la surface terrestre. Mais c'est aussi une science en évolution avec l'objectif de mieux comprendre la donnée spatiale et d'en extraire l'information utile pour de larges champs d'applications possibles. Trois grands domaines spectraux sont utilisés en télédétection : le domaine **optique réflectif** (visible : 400 nm – 750 nm ; proche infrarouge : 750 nm – 1400 nm ; moyen infrarouge : 1.4 µm – 8 µm), le domaine de **l'infrarouge thermique** (8 µm – 15 µm) et le domaine des **micro-ondes** (1 mm – 1 m), plus connu sous le nom d'hyperfréquences. Le rayonnement optique est mesuré avec des systèmes dits « passifs », alors que les micro-ondes sont généralement mesurées avec un système « actif » (Figure 7).

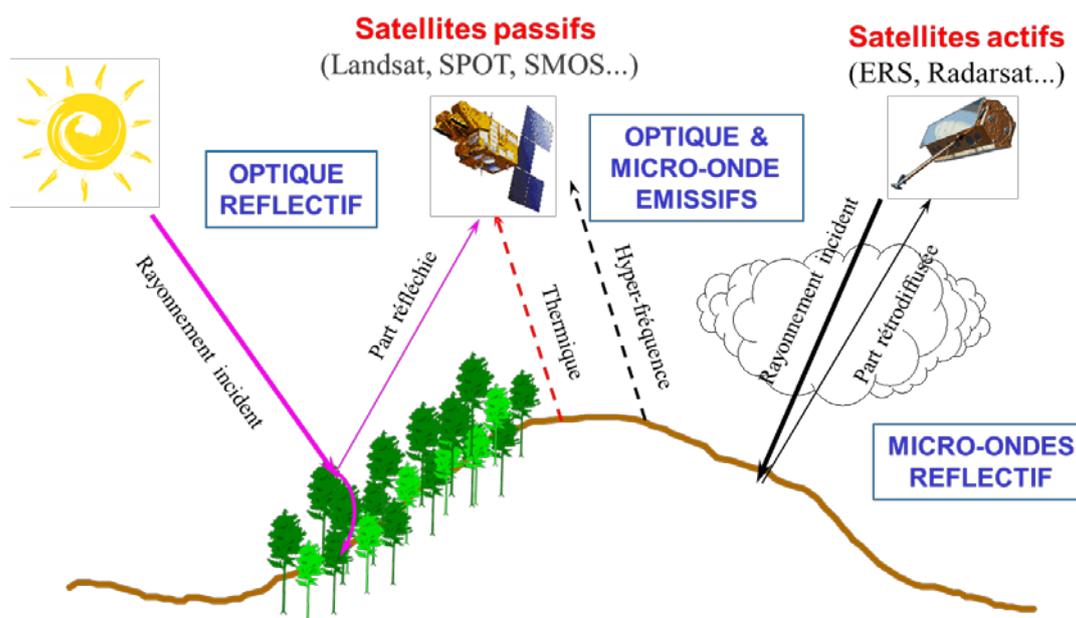


Figure 7 - Les trois grands types de systèmes satellitaires : système optique réflectif, système optique émissif et système micro-ondes.

Dans le **domaine optique réflectif** (400 - 8 000 nm), ce sont les *propriétés de réflexion des surfaces* qui sont détectées, avec le soleil comme source de rayonnement électromagnétique. Le capteur satellitaire fonctionne essentiellement selon le même principe qu'un appareil photo numérique, si ce

n'est qu'il mesure le rayonnement dans des bandes spectrales autres que dans le visible (e.g. proche infrarouge, moyen infrarouge) dans lesquelles la végétation a une réponse particulière (voir Figure 8). Souvent ce type de capteurs a aussi une bande panchromatique, c'est-à-dire une bande assez large pour couvrir tout le spectre du visible. On parle de satellite multi-spectral lorsque le nombre de bandes est inférieur à 10, super-spectral pour plusieurs dizaines de bandes, et hyper-spectral pour 100 bandes spectrales ou plus.

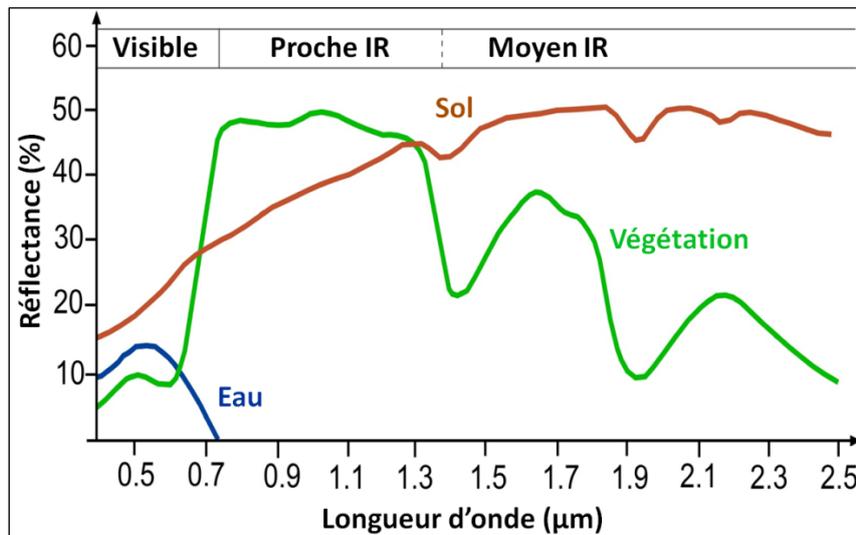


Figure 8 - Signatures spectrales caractéristiques des principaux types de surfaces.

Le **domaine de l'infrarouge thermique** ou optique émissif (8 μm – 15 μm) traite des propriétés d'émission des surfaces observées. Le rayonnement thermique émis par les nuages ou la surface terrestre, et capté par l'instrument de mesure (radiomètre), est un indicateur de leur température de surface. Le principe d'acquisition d'images dans l'infrarouge thermique est néanmoins proche de celui du domaine optique réflectif. Les capteurs des satellites optiques ont souvent des bandes supplémentaires dans l'infrarouge thermique, avec toutefois une résolution spatiale moins bonne.

Dans le domaine des micro-ondes l'énergie émise par la surface de la Terre est très faible, tout comme celle qu'elle peut réfléchir. Afin d'arriver à des niveaux d'énergie mesurables, les capteurs dans ce domaine intègrent l'énergie émise sur une plus grande surface, généralement plusieurs dizaines, voire centaines de km², fournissant ainsi des données ayant une résolution spatiale

assez faible. On parle alors de données « micro-onde passives ». Le qualificatif « passive » est utilisé en opposition à la télédétection « active » dans laquelle s'inscrivent les systèmes radar imageurs. L'instrument radar a son propre émetteur qui envoie des ondes électromagnétiques vers la surface observée. Les ondes interagissent avec la surface et sont diffusées dans toutes les directions. Une partie est renvoyée (rétrodiffusée) vers le radar et captée par son récepteur. Le radar à synthèse d'ouverture (SAR : *Synthetic Aperture Radar* en anglais) offre des résolutions spatiales comparables à celles des capteurs optiques (métrique et décimétrique), mais avec la capacité de fonctionner de nuit, ainsi qu'en présence d'une couverture nuageuse. Comme le radar a sa propre source d'illumination, il est aussi possible d'utiliser plus finement les caractéristiques (fréquence, polarisation, phase) des ondes électromagnétiques pour des applications pointues, comme l'interférométrie radar utilisée pour la génération de modèles numériques de terrain.

Les principales caractéristiques des images

Lorsqu'on évalue la possibilité d'utiliser la télédétection pour répondre à un besoin, on doit avoir à l'esprit toute l'offre mobilisable en imageries et technologies satellitaires. Pour différencier les différentes images ou produits, on utilise certaines de leurs caractéristiques principales que l'on se propose d'expliquer ici, même si ces termes ont inévitablement été utilisés dans les parties précédentes.

Les bandes spectrales : les bandes spectrales correspondent aux gammes de longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique utilisées pour véhiculer l'information de la surface observée vers le capteur. Cette information concerne les propriétés de réflexion et/ou d'émission des surfaces observées. En pratique, on connaît ces propriétés pour les grandes classes d'occupation du sol : la végétation, les sols nus, l'eau, etc. On parle alors de « signature spectrale » comme l'ensemble des propriétés dans les différentes gammes de longueurs d'onde (voir Figure 8 pour la végétation). Bien choisir les images satellite pour un problème donné implique avant tout de bien choisir les bandes spectrales capables de discriminer les types de surfaces de la zone d'étude en fonction de leurs signatures spectrales. Dans le domaine optique, les bandes utilisées sont le bleu, vert, rouge, proche infrarouge, moyen infrarouge et désignées par les lettres B, V, R, PIR, MIR. A noter que les bandes des différents capteurs n'ont pas exactement les mêmes gammes de longueurs d'onde. Dans le domaine des micro-ondes, les bandes de fréquence utilisées

sont désignées habituellement par les lettres suivantes P, L, C, X, Ku, K,... en ordre décroissant de gamme de longueurs d'onde.

Les résolutions spatiales : Le détail que peut contenir une image dépend de sa résolution spatiale. Pour exprimer la résolution spatiale d'un appareil photo numérique on utilise le nombre de pixels des images qu'il fournit (e.g. 8 Mega pixels). En télédétection, on utilise la taille d'un pixel au sol, ce qui détermine la taille des objets que l'on peut espérer différencier dans les images. La meilleure résolution spatiale atteinte par les satellites civils actuels est de l'ordre de 30 cm pour le satellite WorldView3. On peut donc y distinguer facilement les arbres dans les parcelles de culture, et les haies autour. Les satellites météorologiques géostationnaires fournissent typiquement des images à quelques kilomètres de résolution, alors que les satellites micro-ondes passives fournissent des données à des résolutions de plusieurs dizaines de kilomètres. Les utilisateurs emploient sans définition stricte les plages de résolutions suivantes :

- THRS : La Très Haute Résolution Spatiale (métrique : pixels < 5 m)
- HRS : La Haute Résolution Spatiale (décamétrique : pixels entre 5 m et 100 m)
- La moyenne résolution spatiale (hectométrique : pixels entre 100 m et 5 km)
- La basse résolution spatiale (kilométrique : pixels > 5 km)

Les fréquences d'acquisition des images : Lorsque le phénomène que l'on souhaite étudier par télédétection est variable dans le temps, on se pose la question de la fréquence à laquelle on peut obtenir les images. On utilise aussi le terme « résolution temporelle ». Par exemple, on peut avoir besoin de plusieurs images sur quelques mois si l'on cherche à suivre une saison de culture, alors qu'une ou deux images seraient suffisantes pour la cartographie de l'occupation du sol. Avec les images des domaines optique ou thermique, et la probabilité élevée d'avoir des nuages dans les images dans certaines parties du monde, une fréquence élevée d'acquisition d'images augmente les chances d'avoir des images dégagées et utilisables. En général, on a une faible résolution temporelle pour les images à haute résolution spatiale. Ce lien direct peut s'expliquer par les orbites des satellites. En orbite quasi-polaire, les satellites font plus de douze fois le tour de la Terre chaque jour. Les orbites se décalent vers l'ouest de jour en jour pour arriver exactement à une configuration précédente au bout d'un certain nombre de jours appelé « répétitivité » (e.g. 16 pour Landsat). Sur un même satellite on peut avoir un capteur haute résolution

qui va acquérir l'image sur la trace du satellite et jusqu'à 80 km de part et d'autre de la trace. On peut aussi y avoir un capteur de moyenne résolution avec un large champ de vision qui va acquérir une image de 2000 km de large sur la trace. Une même zone sera ainsi vue tous les un ou deux jours avec le capteur de moyenne résolution, mais toutes les 2 à 3 semaines avec le capteur à haute résolution. Mentionnons aussi la capacité de dépointage d'un satellite, qui lui permet de regarder à côté de sa trace, ce qui peut faire augmenter temporairement la fréquence d'acquisition sur une zone choisie. La résolution temporelle est de l'ordre de l'heure pour les satellites météorologiques géostationnaires, de quelques jours pour les satellites de moyenne à basse résolution, de quelques semaines à quelques mois pour les satellites HRS, et de quelques mois à l'année pour les satellites THRS. Certains de ces satellites sont néanmoins agiles (capacité de viser à côté de la trace), ce qui permet de programmer plusieurs acquisitions ciblées sur une période de quelques jours.

La surface couverte par chaque image : Si l'échelle spatiale des objets étudiés détermine la résolution spatiale des images, il est nécessaire de vérifier si l'étendue de la zone d'étude est compatible avec la surface couverte par les images. En règle générale, plus la résolution spatiale de l'image est grande (taille du pixel plus petite), plus faible est la surface couverte par l'image. Par exemple, une scène à très haute résolution spatiale va couvrir une surface de quelques centaines de km², alors qu'une autre à haute résolution peut couvrir une surface de plusieurs milliers de km². A noter que les images THRS sont généralement coûteuses. Elles s'achètent au km². Certaines images HRS sont gratuites et s'obtiennent en téléchargement sur internet. Pour des raisons de coût et de capacité de traitement, il est raisonnable d'envisager la THRS à l'échelle d'un village ou d'une commune, alors que pour un département, il faudrait plutôt plusieurs scènes en haute résolution. Couvrir un pays entier ou un continent ne peut s'envisager qu'avec des images en moyenne ou basse résolution. Cependant, la politique de distribution de données Copernicus – Sentinel impliquant la gratuité de ces données en téléchargement va probablement modifier cette logique d'utilisation.

2. L'offre en imagerie satellitaire

Les principaux programmes satellitaires

L'utilisation de l'imagerie satellitaire pour l'observation de la Terre remonte au début des années 70 avec le lancement par les Etats-Unis du premier satellite du programme Landsat, avec notamment le capteur MSS (*MultiSpectral*

Scanner) fournissant des images multi-spectrales à environ 80 m de résolution. Avec Landsat 4, en 1982 et Landsat 5 en 1984, le désormais célèbre capteur TM (*Thematic Mapper*) entre en activité. La résolution atteint 30 m en multi-spectral. Les satellites Spot, dont le premier a été lancé en 1986, viennent concurrencer Landsat avec des images multi-spectrales à 20 m et panchromatique à 10 m de résolution. Le développement de la télédétection s'est appuyé largement sur ces deux programmes satellitaires jusqu'à la fin des années 90 et l'arrivée sur le marché des images THRS de satellites civils opérés par des entreprises privées. Lancé en septembre 1999, Ikonos offre des images multi-spectrales à 4 m et panchromatiques à 1 m de résolution spatiale. Les acteurs importants dans la course vers des résolutions sub-métriques sont les sociétés DigitalGlobe (QuickBird, WorldView, Ikonos, etc.) et Airbus Defence and Space (ex CNES/EADS-Astrium) avec Pléiades (Figure 9). Une autre grande tendance dans la télédétection optique est l'arrivée en nombre de satellites d'observation de la Terre nationaux vers le milieu des années 2000. Avant cela, seules les nations développant leurs propres programmes satellitaires pouvaient les déployer (Etats-Unis, France, Grande Bretagne, Allemagne, Japon, Canada, Russie, Chine, Inde, Brésil,...). A partir de cette période, de nouveaux pays (e.g. République de Corée, Thaïlande, Malaisie, Maroc, Algérie, Turquie, Nigéria, Taïwan, Ukraine, Emirats Arabes Unis, Afrique du Sud) se dotent de programmes spatiaux, notamment avec l'aide d'opérateurs privés. Une analyse plus approfondie de l'évolution des capacités civiles d'observation de la Terre est donnée dans Belward and Skolen (2015).

La Figure 9 montre l'évolution du nombre de satellites lancés chaque année et situe le démarrage des quatre grandes phases ayant marqué le développement de la télédétection dans le domaine optique.

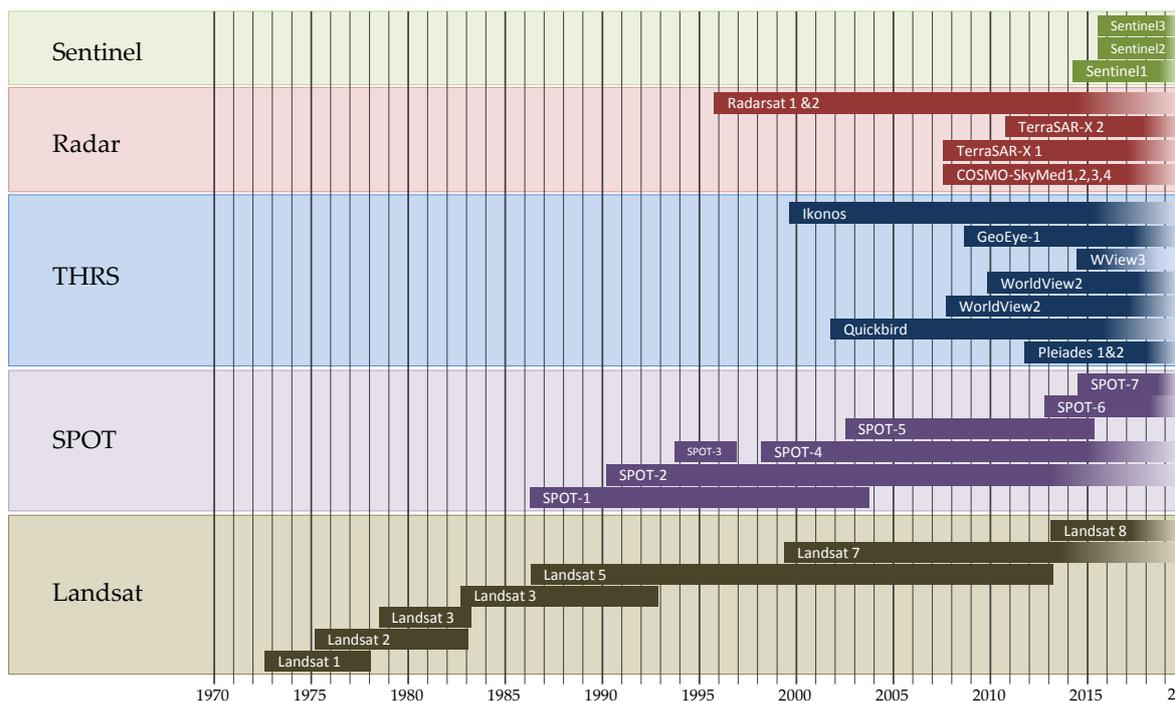


Figure 9 - Chronologie de la mise en opération des satellites montrant la continuité des principaux programmes à haute et très haute résolution spatiale.

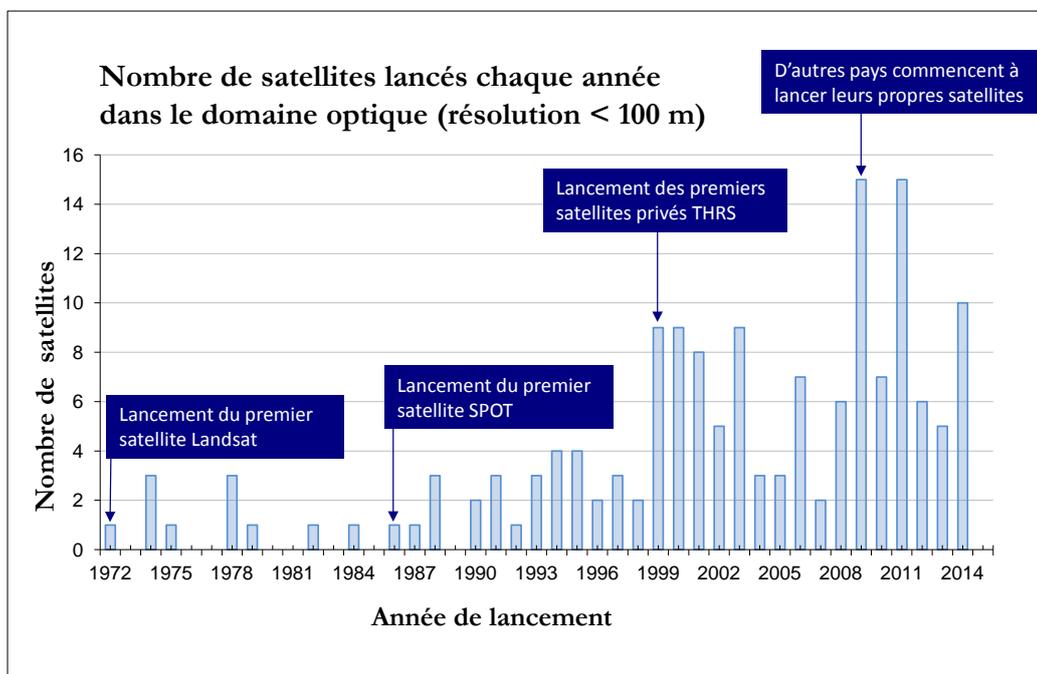


Figure 10 - Graphique montrant l'évolution du nombre de satellites d'observation de la Terre dans le domaine optique.

A l'heure actuelle, le programme qui suscite le plus d'attente dans la communauté scientifique en télédétection est Copernicus, l'ambitieux programme européen de surveillance de la Terre qui a pris la relève du programme GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) en 2013. Sa composante spatiale s'appuie sur la **mission Sentinel** qui se décline en 6 constellations désignés Sentinel-1 à Sentinel-6, pour le suivi des terres, des océans et de l'atmosphère. **La politique d'accès aux données acquises par la mission Sentinel est la gratuité.** Chaque constellation sera composée d'au moins 2 satellites (désignés A et B) pour avoir une meilleure couverture spatiale et répétitivité temporelle.

- Dans le domaine optique réflectif, le satellite **Sentinel-2A** a été mis sur orbite le 23 juin 2015 avec à son bord un capteur optique à haute résolution spatiale (entre 10 m et 20 m) et une répétitivité de 10 jours. Couplé au Sentinel-2B attendu en 2016, la répétitivité passera à 5 jours (voire 3 jours pour les latitudes moyennes comme en France métropolitaine), alliant ainsi haute résolution spatiale et haute résolution temporelle, combinaison jamais atteinte en continu à ce jour, et idéal pour le suivi de l'agriculture.

- Dans le domaine optique thermique, le lancement du satellite **Sentinel-3A** est prévu pour l'automne 2015. A son bord, l'instrument large champ SLSTR (*Sea and Land Surface Temperature Radiometer*) est dédié à la mesure de la réflectance et de la température de surface des océans et des Terres émergées. Ce radiomètre aura une fauchée de 1 400 km, une résolution spatiale de 1 km² et couvrira la Terre en à peu près 2 jours.

- Dans le domaine des micro-ondes, le satellite **Sentinel-1A** est opérationnel depuis 2014 et fonctionne en bande C, avec plusieurs modes de polarisations. Il fournit des données à 5 m de résolution spatiale.

Dans le domaine radar, l'Europe a été précurseur, avec les satellites ERS (*European Remote Sensing*) 1 et 2 en bande C (de 1991 à 2012). Comme en télédétection optique, il y a eu l'arrivée de la très haute résolution spatiale, avec TerraSAR-X (constellation de deux satellites lancés en 2007 et 2010) et COSMO-SkyMed (quatre satellites lancés entre 2007 et 2010) fonctionnant en bande X avec une résolution métrique. Tout comme les images THRS dans le domaine de l'optique, les images THRS radar sont payantes et leur coût est assez élevé.

Les grandes familles de données satellite

Nous avons vu que les images satellite pouvaient être classées selon plusieurs caractéristiques : longueur d'onde/fréquence, résolution spatiale, surface couverte, répétitivité, etc.³⁷. Dans le foisonnement actuel de l'offre satellite, quatre grandes familles de données de télédétection combinant résolution spatiale et domaine de longueur d'onde se dégagent (Encadré 3). Leurs utilisateurs font souvent appel à des méthodes spécifiques, et d'une certaine manière, se spécialisent dans l'analyse de données satellite d'une ou deux familles seulement. Ainsi, la classification orientée-objet et la photo-interprétation sont utilisées pour les images optiques en HRS et THRS, alors que la classification pixel-à-pixel est davantage utilisée pour les images HRS et MRS. L'analyse des images radar nécessite des modules spécifiques dans les logiciels de traitement d'image.

³⁷ Le lien suivant donne accès à une base de données en ligne, maintenue à jour sur les satellites d'observation de la Terre : http://gdsc.nlr.nl/gdsc/en/information/earth_observation/satellite_database

Encadré 3 -Fiche synthétique donnant les principales caractéristiques des données satellite par grande famille.

HRS – Optique (Haute Résolution)			
<i>Landsat 8</i>			
Pan	15 m	170 x 185 km	
B, V, R, PIR, MIR	30 m	170 x 185 km	
<i>Spot 4</i>			
Pan	10 m	60 km	
V, R, PIR, MIR	20 m	60 km	
<i>Sentinel 2</i>			
B, V, R, PIR	10 m	290 km	
RE, PIR, MIR	20 m	290 km	
<i>RapidEye</i>			
B, V, R, RE, PIR	6.5 m	25 km	
<i>Deimos</i>			
V, R, PIR	22 m	600 km	

HRS / THRS – Radar			
<i>TerreSAR-X (bande X)</i>			
Spotlight	1 m	10 x 10 km	
Stripmap	3 m	30 x 1500 km	
ScanSAR	20 m	100 x 1500 km	
<i>COSMO-SkyMed (bande X)</i>			
Spotlight	1 m	10 x 10 km	
Stripmap	3 m	40 x 40 km	
ScanSAR	30 m	100 x 100 km	
<i>Sentinel 1 (bande C)</i>			
Stripmap	5 m	80 km	
Interferometric-Wide Swath	5x20m	250 km	
Extra-Wide Swath	20x40m	400 km	
Wave	5 x 5 m	20 x 20 km	
<i>RadarSat (bande C)</i>			
Fine	10 m	50 km	
Standard	25 m	100 km	
ScanSAR narrow	50 m	300 km	
ScanSAR wide	100 m	500 km	

THRS – Optique (Très Haute Résolution)			
<i>Spot 5</i>			
Pan	2.5/5m	60 km	
V, R, PIR	10 m	60 km	
MIR	20 m	60 km	
<i>Spot 6, 7</i>			
Pan	1.5 m	60 km	
B, V, R, PIR	6 m	60 km	
<i>Ikonos</i>			
Pan	1 m	11 km	
B, V, R, PIR	4 m	11 km	
<i>GeoEye 1</i>			
Pan	0.41 m	15 km	
B, V, R, PIR	1.65 m	15 km	
<i>GeoEye 2* = WorldView 4</i> <small>(suite fusion GeoEye et DigitalGlobe en 2013)</small>			
Pan	0.34 m	14 km	
B, V, R, PIR	1.36 m	14 km	
<i>QuickBird</i>			
Pan	70 cm	16.5 km	
V, R, PIR, MIR	2.8 m	16.5 km	
<i>WorldView 2</i>			
Pan	50 cm	16.5 km	
B, V, R, RE, PIR	2 m	16.5 km	
<i>WorldView 3</i>			
Pan	31 cm	13 km	
B, V, R, RE, PIR	1.24 m	13 km	
<i>Pléiades</i>			
Pan	70 cm	20 km	
V, R, PIR, MIR	2 m	20 km	

MRS – Optique/Thermique (Géostationnaire)			
<i>Meteosat 9 -10 (MSG-2; MSG-3)</i>			
Pan	1 km	disque terrestre	
V, R, PIR	3 km	centré sur le	
MIR, IRT		Golfe de Guinée	

3. Comment choisir et accéder aux images ?

Le choix des images

La grande diversité d'images disponibles pose la question du choix des images à utiliser pour un objectif donné. Plusieurs questions peuvent alors se poser pour préciser cet objectif. Le Tableau 3 synthétise les points à prendre en compte pour répondre à ces questions.

Tableau 3 - Quels points à prendre en considération pour choisir une image ?

Question	Points à considérer
Quelle zone d'étude ?	<p>L'étendue de la zone d'étude est généralement la zone à couvrir par les images, et détermine l'échelle de travail. Le nombre d'images à traiter dépend de la taille des images.</p> <p>La zone d'étude va conditionner le budget et les moyens à mettre en œuvre pour acquérir et traiter les images. Pour des raisons de coût et de volume de données à traiter, à une échelle régionale (millions de km²), on utiliserait plutôt Spot-VEGETATION ou MODIS, alors qu'à une échelle locale, on utiliserait Spot/Landsat (milliers/dizaine de milliers de km²), GeoEye ou Pléiades (centaines de km²), la photographie aérienne ou acquise par drone (dizaines de km²).</p>
Quels objets rechercher ?	<p>La taille des objets (arbre, champ, domaine cultivé,...) que l'on cherche à observer dans les images dépend de la résolution spatiale des images. Avec les meilleures résolutions spatiales des images satellite qui sont de l'ordre de 30 cm, il est possible d'isoler les arbres, alors que pour extraire le domaine cultivé à l'échelle de pays, l'utilisation de données moyenne résolution spatiale entre 100 m – 1 km est préconisée.</p>
Quels paramètres cartographier ?	<p>Même si la cartographie de l'occupation du sol reste l'application la plus fréquente de la télédétection, l'extraction de paramètres biophysiques s'avère souvent nécessaire. Celle-ci nécessite la mise au point de méthodes faisant appel à une compréhension fine des comportements spectraux des surfaces observées. En fonction des bandes spectrales des images il est possible d'accéder à certains paramètres biophysiques.</p> <p>Par exemple, les paramètres liés à la végétation (biomasse, surface foliaire, taux de couverture) sont obtenus par les bandes dans le visible et le proche infrarouge. D'autres paramètres comme l'évapotranspiration ou la température de surface sont estimés en utilisant les bandes dans l'infrarouge thermique. Les satellites radar ou micro-onde passive peuvent renseigner sur l'humidité du sol ou la rugosité de surface.</p>
Quelle dynamique rechercher ?	<p>Lorsque l'étude que l'on mène requiert une analyse dynamique de la zone concernée, la fréquence d'acquisition (répétitivité) des images est à prendre en compte à différentes dates permettant de suivre les évolutions pertinentes. Ainsi, le suivi fin d'une zone de culture nécessiterait par exemple plusieurs images pendant la saison de</p>

	<p>croissance.</p> <p>Si la période étudiée est passée, il importe de consulter les archives d'images satellite ou de photographies aériennes disponibles. Il est souvent nécessaire de procéder à une programmation d'acquisition (e.g. Spot, Pléiades) lorsque l'on a besoin d'une image à une période donnée dans le futur. Attention au prix plus élevé, la possibilité d'avoir des images nuageuses, ou l'existence de conflit de programmation.</p>
Quel budget ?	<p>Même s'il existe des images satellite gratuites comme Landsat 8 ou MODIS, le coût des images dans une étude n'est généralement pas à négliger. Il dépend, comme on l'a vu précédemment, de plusieurs facteurs comme la taille de la zone d'étude, de la résolution spatiale, du niveau de prétraitement ou s'il s'agit d'images d'archives ou de programmation.</p> <p>Dans certains cas, comme pour des études relevant de la recherche, les tarifs préférentiels sont appliqués (e.g. le programme ISIS du CNES qui promeut l'utilisation d'images Spot par la communauté scientifique).</p>

Pour les besoins spécifiques en images de télédétection pour le suivi de l'agriculture, l'équipe Ad Hoc GEOGLAM a établi un tableau (voir Tableau 4) qui met en relation les caractéristiques des images (résolution spatiale, domaine spectral et fréquence d'acquisition) et les produits recherchés (masque des cultures, type de culture, surface et calendrier culturaux, indicateurs des conditions de culture, rendement, variables biophysiques des cultures, variables environnementales, pratiques agricoles / systèmes de culture).

L'accès aux images

Depuis quelques années, nous assistons à la démocratisation de l'accès à l'imagerie satellitaire via internet avec des acteurs comme Google (Google Maps/Google Earth), l'IGN (Géoportail), ou Microsoft (Bing Maps). Même s'ils ne déploient pas leurs propres programmes satellitaires, ils élargissent la communauté d'utilisateurs potentiels d'imagerie satellite en proposant des globes virtuels qui permettent de facilement naviguer à la surface de la Terre et de visualiser les images satellite disponibles. Cependant, pour une utilisation plus scientifique et/ou professionnelle des images, il est nécessaire de les avoir sous leurs formes complètes, avec toutes les bandes spectrales ainsi que les métadonnées associées. Les images payantes s'obtiennent auprès de **fournisseurs d'images et de revendeurs**. Les images gratuites sont disponibles en téléchargement depuis des **bases de données scientifiques**.

Tableau 4 - Tableau des besoins en données satellite d'observation de la Terre, développé par l'équipe Ad Hoc GEOGLAM du CEOS (Tableau traduit et adapté de CEOS 2013, p 11). Les besoins sont exprimés par résolution spatiale et domaine spectral (colonnes B et C), fréquence à laquelle on peut espérer des acquisitions sans nuage (colonne D), étendue géographique et taille des parcelles (colonnes E et F), et type d'application ou produit recherché (colonnes G-M). Les besoins sont ainsi exprimés par gamme de taille de parcelles (grandes : > 15 ha, moyennes : 1.5 - 15 ha, petites : < 1.5 ha, toutes : X) pour chaque application ou produit recherché.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
# besoin	Résolution spatiale	Domaine spectral	Fréquence d'obs. effective (sans nuage)	Etendue	Taille des parcelles	Masque des cultures	Type de culture, surface et calendrier cultural	Indicateurs des conditions de culture	Rendement	Variables biophysiques des cultures	Variables environnementales	Pratiques agricoles / systèmes de cultures
Echantillonnage résolution grossière (> 100 m)												
1	500-2000 m	optique	jour	couverture complète	toutes			X		grandes		
2	100-500 m	optique	2 à 5 par semaine	terres agricoles	toutes	X	X	X	grandes	grandes		grandes
3	5-50 km	micro-onde	jour	terres agricoles	toutes			X	X	X		
Echantillonnage résolution moyenne (10 à 100 m)												
4	10-70 m	optique	mensuel (min 3 en saison et 2 hors saison) ; tous les 3 ans sinon ignorer)	terres agricoles (si #5 échantillon, sinon ignorer)	toutes	X	grandes / moyennes					X
5	10-70 m	optique	8 j ; min 1 chaque 16 j	échantillon (préférence terres agricoles)	toutes	X	X	X	X	X		X
6	10-100 m	SAR	8 j ; min 1 chaque 16 j	terres agricoles sous nuages persistants, rizicultures	toutes	X	X	X	X	X		X

# besoin	Résolution spatiale	Domaine spectral	Fréquence d'observation effective (sans nuage)	Etendue	Taille des parcelles	Produits recherchés						
						Masque des cultures	Type de culture, surface et calendrier cultural	Indicateurs des conditions de culture	Rendement	Variables biophysiques des cultures	Variables environnementales	Pratiques agricoles / systèmes de cultures
Echantillonnage résolution fine (5 à 10 m)												
7	5-10 m	VIS, PIR, MIR	mensuel ; min 3 en saison	terres agricoles	moyennes / petites	moyennes / petites	moyennes / petites					
8	5-10 m	VIS, PIR, MIR	~semaine ; min 5 par saison	échantillon	toutes	moyennes / petites	X	X	X	X		X
9	5-10 m	SAR	mensuel	terres agricoles sous nuages persistants, rizières	moyennes / petites	moyennes / petites						moyennes / petites
Echantillonnage résolution très fine (< 5 m)												
10	< 5 m	VIS, PIR	3 par an (2 en saison + 1 hors saison) ; chaque 3 ans	terres agricoles avec petits champs	petites	petites						
11	< 5 m	VIS, PIR	1 à 2 par mois	échantillon fin (démonstration)	toutes				X			X

II. Les outils logiciels

La gamme d'outils se définit selon deux grandes familles de logiciels. On distingue d'une part (i) **les logiciels de télédétection**, spécialisés dans le traitement d'images satellites et / ou aérienne, et d'autre part (ii) **les logiciels SIG** dédiés à la construction des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) et à l'analyse spatiale. Cette distinction a cependant tendance à s'estomper car les systèmes de traitement d'images intègrent généralement des fonctions SIG et *vice versa*.

1. Les logiciels de télédétection

Un logiciel de télédétection est un outil proposant des techniques de traitement d'images plus ou moins complètes. Ces techniques peuvent être classées comme suit :

- les techniques de prétraitements qui consistent à réaliser des fonctions de changement de formats des données, de corrections géométriques ou radiométriques, de réaliser des opérations mathématiques (addition, soustraction...), d'ajustement de contraste, de masquage, de visualisation ou de calcul de néo-canaux (texture, indices...) ;
- des fonctions de combinaison de données de nature différente. En plus de combiner les bandes spectrales, certaines études combinent des données temporelles (indispensables notamment pour séparer deux cultures), des données altimétriques (altitudes, pentes...) et des données exogènes (cartes digitalisées, relevés de terrain, etc.) ;
- la stéréoscopie qui permet, lorsque le décalage entre deux orbites voisines est suffisamment important, d'observer un même point sous deux angles différents et ainsi d'extraire des images des informations topographiques ;
- les techniques de classifications d'images. On distingue deux grands types de classifications d'images : (i) la classification par pixel qui permet d'extraire les informations d'une image à partir de la valeur des pixels dans chacune des bandes spectrales et (ii) la classification par objets qui consiste à classer des groupes de pixels homogènes créés par un algorithme de segmentation. Pour ces deux types, on distingue quatre méthodes principales de classification : les méthodes supervisées qui consistent à rechercher des objets identiques à des objets de référence acquis sur le terrain ; les méthodes automatiques (ou non assistées) offrent la capacité de rechercher une répartition des données sans se référer à des informations relevées sur le terrain ; la méthode expertisée :

consiste à traduire la connaissance du terrain que possède un opérateur. Pour cela l'opérateur définit lui-même tous les critères permettant d'extraire une classe ; et enfin, la méthode manuelle permet simplement de digitaliser manuellement tous les éléments d'intérêt. Cette étape est aussi appelée PIAO (Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur).

- les fonctions de post-traitements qui consistent à appliquer des filtres pour simplifier les classifications afin de faciliter leur utilisation dans un SIG (lissage pour éliminer les pixels isolés, regroupement de classes...)
- la construction de matrices de confusion qui permettent d'estimer la qualité d'une classification en la comparant à des données de terrain.

Certains logiciels de télédétection comme *Erdas Imagine* ou *ENVI* proposent l'ensemble de ces techniques. D'autres sont spécialisés dans un seul domaine. Ainsi *eCognition*®, *Spring* et *Interimage* ne proposent majoritairement que des techniques de classification orientée objet.

Il existe enfin une autre catégorie, **les logiciels dédiés**, généralement créés dans le cadre de projets. Ils sont souvent gratuits, parfois utilisables en ligne. Ils permettent principalement de faciliter la réalisation de traitements spécifiques (analyse de séries temporelles, export d'images en différents formats...).

2. Les logiciels SIG

Un SIG est un système d'informations qui permet de gérer des données spatialisées (géographiques ou non). Les logiciels SIG sont les outils qui permettent de manipuler ces systèmes d'informations. Leurs principales fonctionnalités sont : (i) la saisie et la modification des informations géographiques sous forme numérique ; (ii) le stockage de ces informations sous forme structurée ; (iii) les fonctions d'analyse spatiale permettant d'effectuer diverses opérations sur une ou plusieurs couches d'informations de la base de données ; (iv) la mise en forme de ces données pour en faciliter la visualisation (création de cartes).

3. Des outils en évolution

Avec l'augmentation du nombre de satellites fournissant des images à très haute résolution spatiale, le traitement d'image est de plus en plus lourd à réaliser. A titre d'exemple, une image Pléiades d'une résolution spatiale de 50 cm et couvrant 400 km² occupe environ 30 Go d'espace disque ; les utilisateurs de données Sentinel-2 (290 km x 276 km) auront à manipuler un fichier de plus de 7 Go (Baillarin *et al.*, 2012) par date d'acquisition.

Les fournisseurs de logiciels adaptent progressivement leurs produits afin qu'ils puissent intégrer ces contraintes. Une des tendances actuelles est la mise à disposition de versions spéciales adaptées pour exécuter des tâches sur **des serveurs de calculs distants** permettant de traiter simultanément plusieurs blocs puis de les regrouper avant d'en exporter les résultats.

Les **boîtes à outils en ligne** sont également une autre solution au traitement d'un gros volume de données. *Google Earth Engine*³⁸ propose des algorithmes de traitement d'image associés à sa base de données d'images satellite. Ces outils sont exécutés en utilisant les performances de calculs parallèles de la plateforme de Google. Le catalogue des applications propose déjà des cartes mondiales telles que Global Forest Change³⁹ qui met en évidence, à partir d'une série temporelle d'images Landsat, l'emprise des forêts ainsi que les changements intervenus au cours de la période 2000-2013. L'accès à *Earth Engine* est pour le moment limité mais il est probable que cet outil sera de plus en plus utilisé notamment par les pays africains qui n'ont souvent pas le moyen d'investir dans des calculateurs performants. Plus accessibles, les outils développés par la NASA permettent quant à eux de traiter en ligne les images et produits images MODIS (voir par exemple MODIS Land subset⁴⁰).

Il y a quelques années, **les produits issus du monde libre** étaient très nombreux dans le domaine des SIG. En effet plusieurs projets concurrents avaient vu le jour, tels que GVSIG, QGIS... Actuellement on constate que QGIS est dominant et les développements de nouvelles fonctionnalités et outils se concentrent sur ce produit. Il propose de nombreux *plug-in* tels que Orfeo Tool Box⁴¹.

Autre évolution majeure, la création de **versions logicielles adaptées aux appareils mobiles** (tels que smartphones et tablettes). Ces outils permettent de saisir des données sur le terrain avec un appareil mobile, avec ou sans connexion 3G. Ces solutions mobiles légères peuvent être couplées à des serveurs distants par des applications dédiées. Les calculs et le stockage sont alors confiés à un ou plusieurs serveurs sur le réseau (*cloud computing*) et les terminaux légers (portables, tablettes, smartphones...) des utilisateurs

³⁸ <https://earthengine.google.org>

³⁹ <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>

⁴⁰ http://daac.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/GLBVIZ_1_Glb/modis_subset_order_global_col5.pl

⁴¹ <https://www.orfeo-toolbox.org/>

permettent de mettre à jour des données, de commander l'exécution de calculs lourds et de visualiser les résultats.

Les réseaux de communications ne cessent de devenir de plus en plus performants et fiables et ce genre de solution devient de plus en plus une alternative aux clients lourds, même en Afrique où l'on voit les réseaux de type 3G, 4G se développer et couvrir de plus en plus de territoire.

III. Les produits “biophysiques”

La télédétection fournit des informations directes ou indirectes sur certaines variables biophysiques de la surface qui permettent notamment de caractériser l'état de la végétation et les conditions environnementales (pluie, humidité du sol...) dans lesquelles se développent les cultures, et ce tout au long de l'année. Pour ce faire, des données à haute répétitivité temporelle continues dans le temps et dans l'espace sont nécessaires pour pouvoir suivre les variations saisonnières et annuelles des couverts végétaux.

Sont référencés ici les produits biophysiques opérationnels actuellement disponibles pour des applications agricoles, en fonction de quatre grands domaines environnementaux :

- **L'état de la végétation** et ses dynamiques saisonnières ou annuelles sont directement liés à la productivité des cultures ou des pâturages et aux situations de stress de la végétation (déterminées par des facteurs abiotiques comme le climat et/ou des facteurs biotiques comme les attaques acridiennes). Les variables biophysiques de surface permettent de caractériser l'état des couverts végétaux, elles sont donc aujourd'hui utilisées couramment dans les systèmes d'alerte précoce ou encore au service de l'assurance agricole.

- **L'eau** est l'un des facteurs déterminants de la production végétale, en particulier en Afrique sèche. Des informations sur les précipitations, l'humidité du sol ou les surfaces en eau permettent donc d'analyser la disponibilité en eau pour les cultures, de détecter les sécheresses (ou les périodes d'excédents pluviométriques), de localiser les surfaces en eau et d'analyser leur variabilité spatio-temporelle pour l'abreuvement des troupeaux ou l'évaluation des risques sanitaires. En permettant ainsi d'optimiser les pratiques agricoles ou pastorales et d'estimer les rendements agricoles, les paramètres caractérisant l'eau et sa répartition spatio-temporelle sont aujourd'hui utilisés pour répondre à des problématiques de sécurité alimentaire, d'assurance agricole, de gestion de la ressource en eau ou de santé.

- **Le bilan d'énergie** décrit comment l'énergie nette provenant du soleil est utilisée par les éléments de la surface terrestre : évaporation, réchauffement du sol par conduction, modification de l'atmosphère par convection et, enfin, assimilation de la chlorophylle par les végétaux (photosynthèse). Les termes du bilan d'énergie sont très variables dans l'espace (dépendent de la localisation géographique) mais également en fonction de contraintes physiques comme le relief, les propriétés du sol ou encore le type de couverture végétale. L'analyse des termes du bilan d'énergie et de leurs variabilités permet entre autre d'étudier le fonctionnement de la végétation, mais également l'impact de la modification des couverts végétaux sur certains paramètres climatiques.

- **Le relief** permet d'extraire le réseau hydrographique ou des paramètres topographiques du terrain et apporte des informations sur les conditions d'exposition et d'éclairement des parcelles et la structuration des paysages agricoles.

Le Tableau 5 présente le bilan des produits⁴² biophysiques existants classés par catégorie. La liste détaillée des produits est fournie dans les Annexes 1 à 4.

⁴² Les produits biophysiques actuellement diffusés et permettant un suivi régulier des quatre familles de variables environnementales sont issus de données à basse résolution spatiale disponibles gratuitement à haute fréquence temporelle. Ils sont donc dédiés à des études à l'échelle globale ou régionale. Il est toutefois possible d'obtenir le même type de produits à haute résolution spatiale, mais de façon ponctuelle et à condition d'adapter la méthodologie.

Tableau 5 - Tableau récapitulatif des produits biophysiques identifiés par grande catégorie.

Catégories	Nombre de produits	Couverture spatiale (min – max)	Résolution spatiale (min – max)	Couverture temporelle (min – max)	Résolution spatiale (min – max)
ETAT DE LA VEGETATION					
Indices de végétation	23	Nationale - Globale	250 m – 8 km	1981 – présent	Hebdomadaire – Annuel
Paramètres biophysiques	24	Afrique de l'Ouest - Globale	500 m – 1 km	1981 – présent	Tri horaire – Annuel
Productivité de la végétation	6	Globale	1 km – 20 km	1981 – présent	Hebdomadaire – Annuel
Les feux	10	Afrique - Globale	500 m – 40 km	1982 – présent	15 minutes – Annuel
CYCLE DE L'EAU					
Les précipitations	14	Afrique de l'Ouest - Globale	3 km – 200 km	1901 – présent	3 heures – Saisonnier
L'humidité du sol	8	Globale	1 km – 50 km	1991 – présent	Journalier – Mensuel
Les surfaces en eau	3	Sahel - Globale	500 m – 1 km	1999 –	Journalier - Décadaire
BILAN D'ENERGIE					
Albédo de surface	6	Afrique de l'Ouest - Globale	500 m – 6 km	1981 – présent	Journalier – 16 jours
Réflectance	3	Globale	250 m – 5.6 km	2000 – présent	Journalier – Décadaire
Rayonnement	5	Globale - Régionale	3 km – 20 km	1989 – présent	30 minutes – Mensuel
Température de surface	7	Globale - Régionale	100 m – 8 km	1995 – présent	15 minutes – Mensuel
Evapotranspiration	3	Globale - Régionale	1 km – 3 km	2000 – présent	30 minutes – Mensuel
RELIEF					
Le modèle du relief	6	Globale	30 m – 1 km		
Les indices du relief	5	Afrique - Globale	1 km		

1. L'état de la végétation

Les principaux produits satellitaires décrivant l'état de la végétation sont détaillés Annexe 1.

Les indices de végétation

Les indices de végétation sont largement utilisés car ils permettent d'identifier et de décrire, de façon assez simple et rapide, l'évolution des couverts végétaux ainsi que d'évaluer et de rendre compte de l'état de certains paramètres

biophysiques comme la biomasse, l'indice de surface foliaire ou le stade de croissance des cultures à un moment donné. La plupart de ces indices sont basés sur les propriétés optiques de la végétation dans le Rouge (pic d'absorption de la chlorophylle ; la réflectance diminue avec la verdure des feuilles) et le Proche Infrarouge (la réflectance augmente avec la densité de végétation) (Figure 8).

- **Le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)** est l'indice de végétation le plus utilisé. Il est construit à partir des réflectance dans les bandes du Rouge (*R*) et du Proche Infrarouge (*PIR*) dont la différence augmente avec la densité de feuilles vertes. Il est donc sensible à la vigueur et à la quantité de végétation (voir Encadré 4).

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

Il existe actuellement une dizaine de produits NDVI disponibles qui couvrent une période allant de 1981 (produits NOAA GIMMS) à aujourd'hui, avec des résolutions spatiales comprises entre 250 m (produits MODIS) et 8 km (produits GIMMS), et permettant des analyses à l'échelle régionale avec une haute répétitivité temporelle entre 1 à 16 jours.

- **L'EVI (*Enhanced Vegetation Index*)** est une alternative au NDVI car il permet en théorie de corriger un certain nombre de ses limitations. Il a été développé en particulier pour réduire l'influence des conditions atmosphériques, corriger l'impact du sol sur les valeurs de l'indice de végétation et améliorer la sensibilité de l'indice de végétation dans les zones à forte densité de végétation. L'EVI est dérivé des bandes Rouge (*R*), Proche Infrarouge (*PIR*) et Bleue (*B*), et s'obtient comme suit pour les données MODIS :

$$EVI = 2.5 \times \frac{PIR - R}{1 + PIR + (6 \times R) - (7.5 \times B)}$$

Le capteur AVHRR ne disposant pas de bande dans le bleu, il n'existe aujourd'hui qu'un seul produit EVI calculé à partir des données MODIS. Ce produit est actuellement très peu utilisé pour des applications spécifiquement agricoles en Afrique, notamment parce que les densités de végétation ne sont pas suffisamment importantes pour atteindre le seuil de saturation du NDVI (LAI > 4 environ).

- **Les indices d'anomalie de végétation** : Ces indices d'anomalie sont généralement basés sur la comparaison entre les valeurs d'un indice de

végétation à un instant t avec les valeurs historiques de ce même indice (sur 10 ans ou plus). Ils permettent de détecter et de délimiter spatialement les écarts entre l'état ou la croissance de la végétation et une situation normale. Les anomalies peuvent être exprimées en différence absolue, différence relative (%) ou en anomalies standardisées (Z-Score). Cependant, ces indices, généralement dérivés des indices de végétation cités précédemment, dépendent étroitement de la qualité des données en entrée. Par ailleurs, pour garantir une cohérence des anomalies de végétation, des données d'archives homogènes dans le temps et dans l'espace, et donc une continuité des programmes d'observation spatiale, sont nécessaires. Parmi ces indices, on peut citer :

- Le VCI (*Vegetation Condition Index*) : Compare les valeurs des indices de végétation (NDVI) observées aux valeurs moyennes observées au cours de la même période pour les années précédentes.
- Le VPI (*Vegetation Productivity Index*) ou *NDVI anomaly* : C'est une généralisation du VCI permettant d'estimer les conditions globales de la végétation en comparant les valeurs observées avec les valeurs statistiques sur le long terme (minimum, maximum, moyenne, médiane et percentiles).
- Le VHI et le Mean VHI (*Vegetation Health Index*). Le VHI est une combinaison entre le VCI et le TCI (*Temperature Condition Index*) permettant de détecter les anomalies de croissance de la végétation. Le Mean VHI est l'intégration du VHI sur toute la saison de croissance et est un indicateur de la persistance des sécheresses sur toute la saison.
- L'indice ASI (*Agricultural Stress Index*) : Contrairement au précédent, cet indice est spécifique à l'agriculture. Cet indice saisonnier est basé sur des indices de végétation et de températures de surface calculés sur le cycle des cultures et sur le masque du domaine cultivé.

Encadré 4 : L'indice de végétation par différence normalisée, le NDVI

Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est un indicateur de l'activité photosynthétique et peut être corrélé à certaines propriétés de la plante comme le FAPAR (*Fraction of Absorbed Photosynthetically Radiation*) et le LAI (*Leaf Area Index*). Le NDVI est un indicateur normalisé, sa valeur varie donc entre -1 et +1. En présence d'eau, les valeurs sont négatives. Pour un sol nu, le NDVI présente des valeurs proches de 0.1. Les formations végétales ont quant à elles généralement des valeurs de NDVI variant de 0.2 à 0.7, les valeurs les plus élevées correspondant aux formations présentant une importante densité de végétation verte. Il est généralement utilisé pour caractériser la densité et la vigueur de la végétation, mais également pour identifier les situations de stress de la végétation.

Les limites du NDVI :

- sature quand la végétation est trop dense, ce qui correspond environ à un LAI de 4 (plantation ou agricultures intensives) ;
- sensible aux propriétés optiques du sol. La variabilité du NDVI est grande quand le couvert végétal est épars, comme pour les cultures annuelles en phase précoce ou les cultures en rang ;
- ne représente pas une propriété intrinsèque de la surface mais la combinaison de plusieurs facteurs ;
- sensible aux conditions atmosphériques. Cela se traduit par des données généralement bruitées pendant la saison des pluies.

Malgré toutes ces limites, le NDVI reste un indicateur robuste car normalisé ; il est entré dans la pratique de nombreux utilisateurs non experts de la télédétection (ONG, économistes, agronomes ...).

D'un point de vue opérationnel, les indices de végétation sont des sources d'information privilégiées pour de nombreuses applications en agriculture : les systèmes d'alerte précoce, les politiques d'appui à la production agricole et pastorale, l'assurance agricole, la lutte préventive acridienne ou la santé animale. De nombreux produits d'occupation du sol sont également réalisés à partir des séries temporelles d'indices de végétation.

Les variables biophysiques de la végétation

- **Le LAI (*Leaf Area Index*)**, ou indice de surface foliaire, est une variable sans unité permettant de caractériser la structure de la canopée. Le LAI se définit comme le rapport entre la surface totale occupée par des feuilles vertes et la surface du sol correspondante. Le LAI a donc une valeur égale à 0 pour un sol nu, et peut atteindre une valeur de 8 pour une agroforêt dense.

- **Le FAPAR ou FPAR (*Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*)** représente la fraction du rayonnement solaire absorbé par les plantes pour son activité photosynthétique. Le FAPAR est ainsi directement relié à la productivité primaire de la végétation et est généralement bien corrélé au LAI. Généralement le FAPAR est dérivé de modèles physiques décrivant le transfert de l'énergie solaire dans les couverts végétaux et utilisant des données de réflectances dans différentes longueurs d'onde en entrée. Il dépend donc étroitement de la structure du couvert et des propriétés des feuilles, et donc de l'occupation du sol. Pour ce faire, des cartes d'occupation du sol sont utilisées pour dériver le FAPAR pour chaque grand domaine d'occupation et l'hypothèse que l'occupation du sol reste stable dans le temps est généralement faite.

- **Le FCOVER (*Fraction of green vegetation COVER*)** représente la part de la surface recouverte par la végétation et traduit donc une propriété structurelle de la canopée. Le FCOVER est généralement utilisé dans les modèles de surface pour séparer les contributions du sol et de la végétation dans les échanges d'eau et d'énergie entre le sol et l'atmosphère. Tout comme le FAPAR, le FCOVER est généralement obtenu à partir de modèles à base physique utilisant des données de réflectance en entrée.

- **La phénologie** permet de caractériser le cycle de développement de la végétation et de le séquencer en plusieurs évènements majeurs comme la floraison, la maturation ou la sénescence. De nos jours, l'étude de la phénologie par télédétection porte essentiellement sur l'identification des dates de début et de fin de la période de croissance, ainsi que les phases de croissance, maturité et sénescence. Les indicateurs phénologiques permettent donc de caractériser la saison de croissance des cultures et d'identifier des anomalies (retard de démarrage). Ils permettent également de fournir des métriques pour l'estimation de la production de biomasse au cours de la saison (ex. intégration des indices de végétation entre les dates de début et de fin de saison de croissance).

La qualité des produits biophysiques est directement reliée à la qualité radiométrique des données. La présence de nuages représente donc une limite à l'utilisation de ces produits pendant la saison des pluies.

La productivité de la végétation

La productivité se définit comme la vitesse de production de biomasse dans un écosystème et s'exprime le plus souvent en unité de masse par unité de surface et par unité de temps. On distingue :

- **GPP (Gross Primary Productivity)** : la production primaire brute correspond à l'énergie totale assimilée par la plante grâce à la photosynthèse.
- **NPP (Net Primary Productivity) / DMP (Dry Matter Productivity)** : c'est la quantité d'énergie accumulée dans la biomasse de la plante. Elle correspond à l'énergie accumulée par la plante par le biais de la photosynthèse (GPP) moins l'énergie utilisée par la plante pour la respiration.

Les indicateurs de productivité de la végétation dérivés des données de télédétection sont utilisés dans le cadre du suivi des dynamiques pastorales, notamment pour l'estimation de la biomasse fourragère disponible. Ces indicateurs de la biomasse aérienne sont peu utilisés pour estimer la production agricole car de nombreux facteurs de stress peuvent impacter la production finale (disponibilité en eau et nutriments, attaques d'insectes, etc.) ne sont pas directement pris en compte.

Les feux

En agriculture, les feux sont à la fois un outil et un risque. Dans certaines régions, les feux peuvent par exemple être utilisés pour défricher des parcelles avant une mise en culture ou bien nettoyer les parcelles après la récolte. Les zones brûlées se caractérisent par un dépôt de cendres et charbon sur le sol, par une quasi-absence de végétation et par une modification de la structure et du fonctionnement de la végétation. Par conséquent, cela conduit à une modification des comportements spectraux des surfaces à la fois dans le temps et dans l'espace qu'il est facilement possible de suivre par télédétection. Plusieurs types d'informations concernant les feux peuvent être extraits des observations satellitaires : les surfaces brûlées, la période d'occurrence du feu, la fréquence des feux et les risques de feux.

La localisation des surfaces brûlées et le suivi des feux actifs peuvent être des paramètres importants à prendre en considération pour des applications agricoles et pour la gestion des écosystèmes en général, notamment pour :

- la cartographie des surfaces brûlées et l'estimation des dégâts engendrés ;
- la compréhension des pratiques agricoles comme l'agriculture sur abattis-brûlis ;
- la prévention des risques.

2. Le cycle de l'eau

Les principaux produits satellitaires en lien avec le cycle de l'eau sont détaillés Annexe 2.

Les précipitations

Dans de nombreuses régions africaines, le réseau de stations de mesures au sol des précipitations est faible, voire inexistant, et la disponibilité et la fiabilité des données posent des problèmes majeurs. Pour des régions où le suivi des précipitations au regard des activités agricoles représentent des enjeux à la fois politiques, sociaux, environnementaux et économiques, l'imagerie satellitaire s'avère un outil particulièrement pertinent. Les satellites météorologiques actuellement en orbite permettent d'avoir une vision globale et permanente de l'ensemble du globe et ce quel que soit le terrain sous-jacent.

Les satellites permettent à la fois de détecter les précipitations et d'en estimer l'intensité. Les **produits d'estimation des précipitations** résultent généralement de deux sources de données : des mesures dans l'infrarouge thermique provenant des satellites géostationnaires et des mesures radar provenant des satellites défilants. Des données issues de mesures au sol peuvent également être incluses dans les algorithmes de création des produits. L'utilisation des produits satellitaires doit cependant se faire avec précaution car ils peuvent être enclins à un certain nombre d'erreurs, notamment une mauvaise estimation des cumuls pluviométriques et/ou de la répartition des pluies au cours de la saison. Par exemple, en modélisation agro-écologique ces erreurs peuvent conduire à une surestimation ou sous-estimation des rendements. Par ailleurs, l'utilisation des précipitations comme indicateur de croissance des plantes est aussi discutable dans le sens où cela ne donne pas d'information sur l'eau réellement utilisable par les plantes.

Une douzaine de produits d'estimation des précipitations sont aujourd'hui disponibles, couvrant une période allant de 1901 à nos jours, et avec résolution spatiale entre 4 km et 200 km, et une résolution temporelle allant de 30 minutes à un mois. Tout comme les anomalies de végétation, **les anomalies de précipitations** sont basées sur la comparaison entre les valeurs à un instant t de la pluviométrie avec les valeurs historiques afin de pouvoir détecter les comportements déviants par rapport à une situation normale.

Les produits d'estimation des précipitations sont certainement ceux qui sont le plus largement utilisés de façon opérationnelle. Dans les systèmes d'alerte précoce, les données d'estimation des précipitations par satellite sont employées pour détecter les zones de sécheresse ou d'inondation et identifier en temps réel l'émergence des problèmes de sécurité alimentaire (ex. FEWS NET ou AGRHYMET). Elles peuvent également être utilisées comme variables d'entrée dans des modèles agro-météorologiques pour la prévision des rendements. Les données d'estimation des précipitations peuvent également être employées dans le domaine de l'assurance agricole. Des recherches sont en cours sur la mise en place d'un indice basé sur les données TAMSAT pour essayer d'estimer les pertes agricoles engendrées par les épisodes de sécheresses. Les premiers tests réalisés dans plusieurs sites pilotes en Afrique sont encourageants. En 2013 en Zambie, les dédommagements débloqués ont permis à près de 3000 agriculteurs de surmonter un important épisode de sécheresse.

L'humidité du sol

L'humidité du sol est un paramètre qui influence fortement la production agricole et l'hydrologie de surface. Elle est contrôlée par plusieurs facteurs comme la topographie, les propriétés du sol, les précipitations, le type de végétation, le rayonnement global ou les modes de gestion. Les produits caractérisant l'humidité du sol permettent d'avoir une information sur l'eau qui est réellement utilisable par la plante.

Le **SSM (Soil Surface Moisture)** ou **humidité de surface** se définit comme l'eau contenue dans la couche supérieure du sol (0-10 cm). C'est un paramètre qui s'exprime généralement comme un ratio de deux masses ou de deux volumes, ou bien comme le ratio d'une masse par unité de volume.

L'humidité de surface du sol est très hétérogène spatialement et peut varier sur des échelles très fines en fonction notamment des propriétés du sol et de ses capacités de drainage, et des propriétés du relief. Les produits d'humidité de

surface actuellement disponibles à l'échelle globale sont des produits à basse résolution spatiale (~25 km). La faible résolution spatiale de ces produits est la principale limite à leur utilisation pour des applications agricoles.

Le **SMI (Soil Water Index)** représente la teneur en eau du sol contenu dans le premier mètre du sol et est principalement déterminé par les précipitations via le processus d'infiltration. Il permet d'estimer l'humidité dans la zone racinaire et varie entre 0% (point de flétrissement) et 100% (la capacité au champ). Cet indice est dérivé de l'indice SSM, et souffre donc des mêmes limites d'utilisation.

Les surfaces en eau

Trois produits ont été identifiés :

- le produit **Global Water Bodies** de l'ESA fournit l'étendue des surfaces en eau moyenne entre 2005 et 2010 ;
- le produit **Water Bodies**, distribué par Copernicus, fournit les étendues minimale et maximale annuelles ainsi que la dynamique saisonnière des surfaces en eau entre mai 1999 et 2014 basé sur SPOT-VGT et, depuis 2014, basé sur PROVA-V. Ce produit permet d'estimer la disponibilité en eau au cours de la saison et de faire la distinction entre les surfaces temporaires et permanentes. Des informations temporelles sur la date de début de remplissage des surfaces et la date à partir de laquelle la surface est à sec sont aussi disponibles ;
- le produit **Water Point** permet une surveillance des surfaces en eau pour les zones pastorales. Les surfaces en eau sont cartographiées à partir de données Landsat et ASTER et la délimitation des zones de captage est faite à partir des données SRTM. Le remplissage de ces surfaces en eau est calculé quotidiennement à partir de données d'estimation des précipitations (CHIRPS) et d'un modèle climatique d'évaporation.

L'analyse des surfaces en eau peut permettre d'apporter des informations pour améliorer la satisfaction des besoins en eau des populations. Ce type de produits peut aussi être intéressant pour la gestion des troupeaux et leur alimentation, tout au long de la saison. Cependant, nous n'avons pas répertorié à l'heure actuelle d'utilisation opérationnelle de ces produits.

3. Le bilan d'énergie

Les principaux produits satellitaires en lien avec le bilan d'énergie sont détaillés Annexe 3.

Albédo de surface

L'albédo est un paramètre essentiel utilisé dans les modèles climatiques globaux pour quantifier la fraction d'énergie solaire incidente réfléchiée par la surface de la terre et donc, en complément, la fraction absorbée. La part d'énergie absorbée par la surface de la Terre sert ensuite de moteur aux processus de croissance de la végétation comme l'évapotranspiration, l'assimilation du carbone ou la photosynthèse. L'albédo est un paramètre qui varie dans le temps et dans l'espace en fonction de processus naturels (ex. croissance de la végétation) ou des activités humaines (ex. déforestation, récolte des cultures). Pour des problématiques agricoles, l'albédo peut être utilisé pour le suivi de la croissance des cultures et la prédiction des rendements, l'analyse de l'impact des pratiques agricoles sur les échanges surface-atmosphère, ou pour l'identification des changements d'utilisation et d'occupation des terres et de leurs impacts sur les échanges surface-atmosphère.

Les produits albédo disponibles ont des résolutions spatiales comprises entre 500 m et 6 km, et une fréquence journalière à bimensuelle. La plupart des produits sont disponibles depuis le début des années 2000.

Réflectance

La réflectance spectrale se définit comme la part d'énergie solaire incidente qui est réfléchiée par la surface, dans une bande spectrale particulière et sans interférence atmosphérique. Chaque objet et chaque surface possède ainsi une réflectance spectrale qui lui est propre. L'ensemble des réflectances pour les différentes longueurs d'onde constitue alors la signature spectrale d'un objet ou d'une surface. C'est une grandeur sans unité, comprise entre 0 et 1, qui s'exprime le plus souvent en pourcentage. Il existe des produits réflectance TOA (*Top Of Atmosphere*, non corrigé des effets atmosphériques) et des produits réflectance TOC (*Top Of Canopy*, corrigé des effets atmosphériques).

Les utilisations des données de réflectance sont diverses puisqu'elles servent de données d'entrée à quasiment toutes les variables biophysiques décrivant

l'état et les conditions de la végétation et des sols, ou la cartographie de l'occupation du sol et de ses changements.

Le rayonnement

Nous considérons ici le rayonnement en tant que rayonnement net, ainsi que ses différentes composantes. Le rayonnement net, exprimé en $W.m^{-2}$, se définit comme la quantité d'énergie radiative disponible à la surface de la Terre et pouvant être transformée en d'autres formes d'énergie par les divers mécanismes physiques et biologiques de surface. Il est fonction de l'albédo de surface, du rayonnement solaire incident global, du rayonnement de grandes longueurs d'onde émis par l'atmosphère et du rayonnement de grandes longueurs d'onde émis par la surface.

Ces données sont utilisées pour dériver des informations sur les précipitations et le climat (donnée d'entrée dans les modèles agro-météorologiques pour estimer la quantité de rayonnement potentiellement utilisable pour la photosynthèse par exemple).

La résolution spatiale de ces produits est comprise entre 3 km (pour les produits du projet LSA SAF) et ~111 km (1° pour le produits CERES). Les données sont délivrées à des résolutions temporelles de 30 minutes à 1 mois.

Température de surface

La température de surface est déterminée par le bilan énergétique de surface et peut varier très rapidement en raison de la faible inertie thermique de la surface de la Terre. La température de surface est calculée à partir de mesures du rayonnement dans l'infrarouge thermique et de l'émissivité des surfaces. La température de surface est utilisée dans de nombreuses applications agro-météorologiques telles que le suivi de la croissance des cultures et des conditions de développement (détection des situations de stress des cultures et des pâturages), l'estimation de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration, la gestion de la ressource en eau, mais aussi le suivi des feux.

Les produits globaux de températures de surface sont disponibles à partir des années 2000, à des résolutions spatiales comprises entre 100 m et 8 km, et pour des résolutions temporelles qui peuvent être très fines (15 minutes).

Evapotranspiration

L'évapotranspiration se définit comme la quantité d'eau transférée vers l'atmosphère par évaporation depuis le sol ou par la transpiration des plantes suite au processus de photosynthèse. L'évapotranspiration est proportionnelle à l'assimilation du CO₂ par les plantes et est donc étroitement liée à la croissance des plantes et aux rendements des cultures. Elle s'exprime généralement en mm par unité de temps.

Pour les cultures, les facteurs influençant l'évapotranspiration sont multiples : facteurs climatiques, facteurs liés aux cultures, aux pratiques de gestion et aux conditions environnementales. L'évapotranspiration peut fournir des renseignements sur les conditions des cultures ou des pâturages et l'avancement de la saison, être utilisée comme variables d'entrée pour les modèles agro-météorologiques, déterminer les besoins, la disponibilité et l'utilisation de l'eau par les cultures.

Les produits globaux d'évapotranspiration sont obtenus par modélisation à partir de différents jeux de données satellites (albédo, température de surface, LAI, FPAR et occupation du sol) et de données météorologiques (température de l'air, rayonnement courtes longueurs d'onde descendant, le rayonnement grandes longueurs d'onde descendant, albédo de surface, etc.). Les données météorologiques utilisées sont généralement issues des prévisions de l'ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecasts*).

L'évapotranspiration est un paramètre pour lequel on peut trouver des applications pour les systèmes d'alerte précoce ou pour les services d'assurance agricole. Pour le premier cas, FEWS-NET distribue chaque mois des cartes d'anomalie de l'évapotranspiration afin de pouvoir identifier assez tôt dans la saison l'anomalie de croissance de la végétation pouvant conduire potentiellement à des situations d'insécurité alimentaire. Pour l'assurance agricole, l'EARS dans le cadre du projet FESA Micro-Insurance (*Food Early Solution for Africa*) a développé un certain nombre d'indicateurs (de sécheresse ou d'excédent pluviométrique), basés sur l'évapotranspiration relative dérivée des données METEOSAT et testés sur différents sites pilotes en Afrique de l'Ouest et de l'Est.

4. Le relief

Les principaux produits satellitaires décrivant le relief sont détaillés Annexe 4.

Les modèles du relief, ou **Modèle Numérique de Terrain (MNT)** décrivent le relief d'un territoire en donnant en tout point de l'espace l'altitude du sol.

Lorsque le modèle donne les élévations du terrain en incluant les plantes ou les bâtiments, on parle alors de **MNE (Modèle Numérique d'Élévation)**. Les données issues du MNT permettent d'extraire un certain nombre de paramètres pouvant être utiles pour le suivi des cultures, tels que les pentes et orientations ; l'éclairement et la durée d'ensoleillement potentielle ; la morphologie du paysage ; les cours d'eau, réseau hydrographique, drain et superficie drainée ; la localisation de terres appropriées pour les cultures (fonction de l'altitude et des pentes) ; la localisation des zones potentiellement inondables ; etc.

Les MNT référencés à l'échelle globale ont des résolutions spatiales allant de 30 m à 1 km, avec une précision altitudinale de l'ordre de 15 m.

5. Bilan

L'ensemble des produits qui ont été identifiés ont des résolutions spatiales comprises entre 30 mètres et une centaine de kilomètres (1°). Cette grande diversité de résolutions spatiales signifie que tous les produits ne peuvent être utilisés à la même échelle spatiale sans risquer de commettre un contre sens ou une mauvaise analyse des résultats. Ainsi les produits pour le suivi de l'état de la végétation vont permettre des analyses à l'échelle régionale (échelle du pays ou d'une région), tandis que les produits pour le suivi du cycle de l'eau sont généralement plus adaptés à des études à l'échelle du continent ou globale. Une grande diversité des résolutions temporelles est également à noter. Elles varient entre des données disponibles toutes les 15 minutes (ex : températures de surface ou les feux) et des données disponibles annuellement. En fonction de l'étude, des phénomènes avec des dynamiques fines pourront être mis en évidence (variabilité intra-annuelle voire même variabilité infra-journalière) ou simplement de grandes tendances.

Les applications de la télédétection

Dans ce sous-chapitre sont présentées les applications de la télédétection pour l'aide à la décision en matière de politique publique agricole. Le lien entre les produits d'aide à la décision répertoriés ci-après et les différents produits biophysiques existants (voir Section III) mobilisés pour leur obtention est résumé dans le Tableau 6.

Tableau 6 - Utilisation des produits biophysiques régionaux dérivés de données de télédétection, par grand domaine d'application agricole.

		DOMAINES D'APPLICATION											
		L'occupation des sols	Les zonages	Les systèmes d'alerte précoce	Le suivi des zones pastorales	Les estimations de rendement	Les statistiques agricoles	Les assurances agricoles	Les crues et inondations	Les changements climatiques	La lutte préventive acridienne	La santé animale	La sécurisation foncière *
PRODUITS BIOPHYSIQUES (Echelle régionale)	Occupation / Utilisation sol		xxx	xx		xxx	xxx	xxx	xxx	xx	xxx	xxx	xxx
	NDVI	xxx	x	xxx	xxx	xxx				xxx	xxx	xxx	
	fAPAR, LAI	xx				xx				xx			
	NPP				x								
	Feux				xx							x	
	Précipitation		xxx	xxx	xxx	xxx		xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	
	Humidité sol			x					xx	xx	xx	x	
	Surfaces en eau				xx				xxx			xxx	
	Albédo	x											
	Réflectance	xx											
	Rayonnement												
	Temp. Surf.	x				xx					xx	xx	
	ETR					xx							
	MNT		xxx					xxx	xxx			xx	

- xxx Forte contribution du produit
- xx Contribution moyenne
- x Contribution faible

* Cette application n'est pas développée à partir des produits satellitaires régionaux.

Il est à noter que le produit « Occupation/Utilisation des sols » est à la fois un produit disponible sur catalogue, et un produit d'aide à la décision élaboré à la demande. Le produit d'aide à la décision « Sécurisation foncière des espaces agricoles » est élaboré directement à partir des images par photo-interprétation.

I. L'occupation du sol

La télédétection, grâce à la vision synoptique qu'elle nous apporte, permet d'obtenir une cartographie exhaustive et globale de l'occupation du sol sur un territoire donné (voir définition en Encadré 5). Les données de réflectance spectrales sont les premières variables utilisées pour la cartographie de l'occupation du sol en se basant sur le fait que chaque type d'occupation du sol a une signature spectrale propre. La cartographie de l'occupation du sol permet donc d'identifier et de délimiter les zones de culture (« Cropland » en anglais). La cartographie des zones de cultures peut ensuite être affinée en distinguant les groupes de cultures (e.g. céréales, légumes...), puis les types de cultures (exemple pour les céréales : mil, maïs, sorgho...), ceci dépendant à la fois de l'échelle d'analyse et de la résolution spatiale des données utilisées).

Encadré 5 - Définition de l'occupation du sol

L'occupation du sol se définit comme la couverture (bio) physique de la surface terrestre et désigne donc des types de couverture comme les forêts, les surfaces artificialisées ou les surfaces herbacées. L'occupation du sol peut ensuite être modifiée par différents processus à la fois d'origine naturelle ou anthropique. Par conséquent, l'étude de l'occupation du sol et de son évolution dans le temps permet d'améliorer nos connaissances sur la dynamique des écosystèmes et des territoires mais également sur les stratégies de gestion des ressources naturelles ou d'aménagement des territoires : développement urbain, extension des terres agricoles sur des terres plus marginales ou déforestation...L'occupation du sol est cependant à différencier de l'utilisation du sol qui correspond à l'usage socio-économique qui est fait des terres. Par exemple, une surface herbacée (occupation) peut être utilisée comme parc ou prairie (utilisation).

La description de l'occupation du sol sur un territoire donné repose généralement sur la mise en place d'une cartographie de l'occupation du sol issue le plus souvent d'une classification ou photo-interprétation d'images satellite ou aérienne. La classification est alors une représentation abstraite d'une situation réelle et repose sur la mise en place de « descripteurs » permettant de mettre en relation une classe d'occupation du sol définie préalablement avec un objet observé sur l'image. La classification repose donc nécessairement sur une définition claire et précise des classes (la nomenclature) basée sur des critères objectifs adaptés à l'échelle d'étude et à la précision des outils (images) utilisés.

Le croisement de cartes d'occupation du sol obtenues à différentes dates permet ensuite d'obtenir des cartes d'évolution de l'occupation du sol nous renseignant sur les dynamiques en cours sur un territoire (ex : extension des surfaces cultivées ou abandon des terres). En particulier pouvoir localiser les terres agricoles est indispensable pour les responsables de l'aménagement du territoire, pour les politiques d'appuis à la production agricole mais également dans les SAP et ce de l'échelle locale à régionale. De plus, ces cartes d'occupation du sol sont particulièrement utiles pour les régions où l'obtention d'information fiables et précises sur la répartition des terres est limitée en raison d'un accès restreint au terrain à cause d'instabilité politique, de conflits ou de

risques sanitaires. Nous présenterons ici un inventaire, non exhaustif, des différents produits d'occupation du sol disponibles par échelle de travail (globale, régionale et nationale).

1. Echelle globale

Le Tableau 7 présente les principaux produits d'occupation du sol à l'échelle globale. Treize produits ont été identifiés avec des résolutions spatiales comprises entre 30 m et 10 km. La plupart de ces produits présentent une cartographie à un instant t de l'occupation du sol et ne permettent pas un suivi de la dynamique de l'occupation du sol, excepté pour le produit **MODIS Land Cover** qui est disponible annuellement et pour le produit **GLC30** qui est visualisable en ligne pour 2000 et 2010 (seul 2010 est téléchargeable). Les produits globaux d'occupation du sol permettent cependant d'améliorer nos connaissances sur l'emprise et la répartition des grands types d'occupation du sol à l'échelle globale. Il est à noter que les classes relatives à l'agriculture sont peu nombreuses (généralement une ou deux) au regard d'autres types d'occupation du sol comme la végétation naturelle. Parmi ces produits, trois sont spécifiques aux surfaces cultivées:

- Le produit IIASA cropland a été développé par le IIASA et l'IFPRI en utilisant une combinaison de plusieurs sources de données (produits d'occupation du sol à l'échelle globale ou cartes nationales. Il présente par pixel d'un kilomètre de résolution le pourcentage de terres cultivées.
- Le produit M3-Cropland a été développé par Navin Ramankutty⁴³. Il est également issue d'une combinaison des produits MODIS et GLC200, et calibré à partir de données statistiques agricoles.
- Le produit GIAM a été développé par l'IWMI en collaboration avec différents partenaires. Il représente les zones irriguées et est basé sur différents types d'images satellites ainsi que sur des données terrain.

Très récemment, une subvention de \$3.5 millions de dollars sur 5 ans a été attribuée par la NASA à un consortium mené par l'USGS pour étudier la sécurité alimentaire mondiale. La proposition est intitulée « Global Cropland Area Database (GCAD3044) » et a pour objectif de produire des estimations

⁴³ <http://www.ramankuttylab.com/>

⁴⁴ <https://earthdata.nasa.gov/our-community/community-data-system-programs/measures-projects/global-cropland-area-database>

cohérentes et impartiales sur la dynamique des terres cultivées, les types de culture, les surfaces irriguées/pluviales et les intensités de culture entre 1990 et 2010, en utilisant des approches multi-capteurs d'observation de la Terre (Landsat, MODIS, AVHRR).

Tableau 7 - Synthèse des produits globaux de l'occupation du sol.

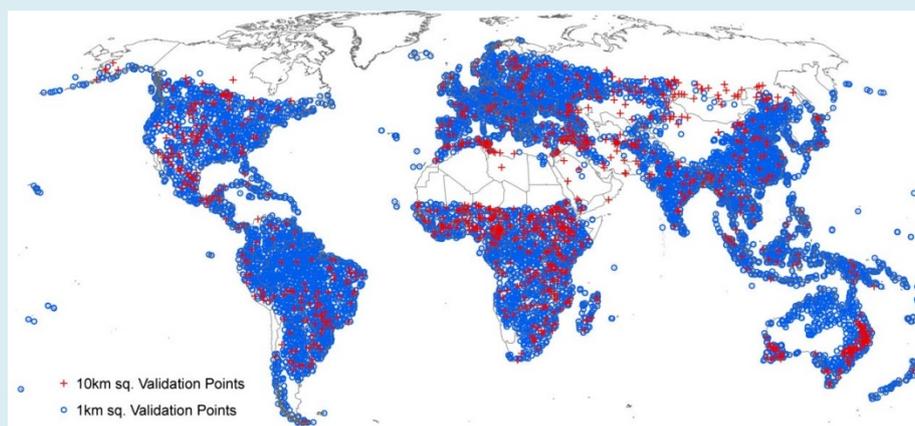
Produit	Producteur	Référence	Couverture spatiale	Résolution spatiale (m)	Couverture temporelle
FROM-GLC		Mouillot <i>et al.</i> , 2014	Global	30	2013
GLC30		Chen <i>et al.</i> , 2014	Global	30	2000 et 2010
Global Cropland extent	UMD	Becker-Reshef <i>et al.</i> , 2010	Global	250	2000-2008
GLCNMO2008	Geographical Survey Institute, Chiba University	Tateishi <i>et al.</i> , 2014	Global	250	2007-2009
GlobCover 2005	ESA	Bicheron <i>et al.</i> , 2008	Global	300	2005
ESA LandCover CCI	ESA	ESA, 2014	Global	300	2000 - 2005 - 2010
MOD12Q1	NASA/MODIS Land Team	Friedl <i>et al.</i> , 2010	Global	500	2001 - 2011
GLC-Share	FAO	Latham <i>et al.</i> , 2014	Global	1000	2014
IIASA cropland	IIASA	Fritz <i>et al.</i> , 2015	Global	1000	2005
GLC2000	JRC	Bartholomé and Belward, 2005	Global	1000	1999-2000
IGBP ou GLCC	USGS	Loveland and Belward, 1997	Global	1000	1992-1993
UMD-1km	UMD	Hansen <i>et al.</i> , 2000	Global	1000 et 8000	1981-1994
M3-Cropland		Monfreda <i>et al.</i> , 2008	Global	10000	2000
GIAM	IWMI	Siebert <i>et al.</i> , 2013 Thenkabail <i>et al.</i> , 2009	Global	10000	2000 - 2005

Encadré 6 - GEO-WIKI ⁴⁵

Partant du constat qu'il existe de grandes disparités spatiales entre les produits globaux d'occupation du sol, le IIASA et les Universités de Wiener Neustadt et de Fribourg ont développé et mis en place en 2009 un outil de *crowd sourcing* appelé Geo-Wiki (Fritz *et al.*, 2009) pour collecter des données in-situ afin :

- d'augmenter la quantité de données d'occupation du sol in situ disponibles pour la formation, l'étalonnage et de validation des produits globaux ;
- de créer une carte d'occupation des sols mondiale hybride qui fournisse des informations plus précises que n'importe quel produit individuel actuel.

Les internautes bénévoles sont invités à renseigner une zone géographique de leur choix, en fonction de ce qu'ils peuvent voir sur Google Earth, avec le pourcentage de surfaces agricole ou urbaine, le type d'occupation du sol ou l'intensité agricole. Les données sont alors enregistrées et des photos peuvent être téléchargées. Afin de favoriser la participation, une série de jeux liés à Geo-Wiki ont été créés. Au-delà du côté ludique, le IIASA développe une méthodologie solide pour améliorer la qualité des validations fournis par des bénévoles.



Localisation des données de validation pour qualifier le produit domaine cultivé du IIASA (Fritz *et al.*, 2015).

⁴⁵ www/geo-wiki.org/

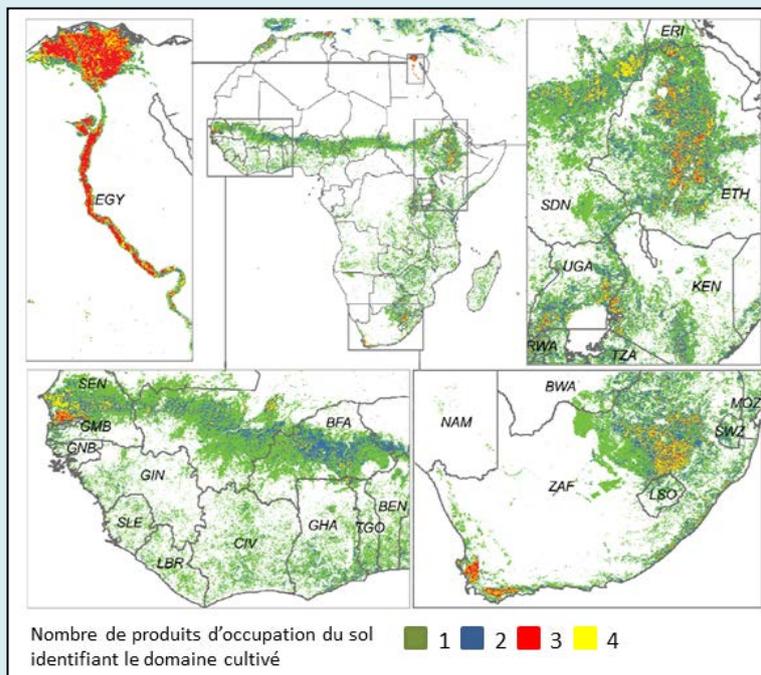
Compte tenu de la multiplication du nombre de produits globaux, un certain nombre d'études ont comparé ces différents produits pour évaluer la précision des classes d'occupation du sol et la cohérence spatiale entre les produits (e.g. Fritz *et al.*, 2010 ; Hannerz and Lotsch, 2006 ; Kaptue Tchuenta *et al.*, 2011 ; voir Encadré 6).

Globalement, ces études montrent qu'il existe des désaccords entre les produits, notamment pour le domaine cultivé en Afrique, car ces produits sont généralement développés pour des applications spécifiques. Le premier désaccord concerne la superficie du domaine cultivé. Hannerz et Lotsch (2006) comparent quatre produits globaux (MODIS Land Cover, GLC 2000, GLCF et GLCC) et montrent qu'à l'échelle du continent africain, la différence la plus importante est observée entre les produit MODIS et GLC 2000. Elle s'élève à 271 millions d'ha soit près de 9% de la superficie totale des terres cultivées. A l'échelle nationale, les produits globaux et les statistiques agricoles nationales sont également en désaccord sur l'extension du domaine cultivé. Leroux *et al.* (2014) montrent par exemple que les surfaces cultivées déterminées à partir du produit MODIS Land Cover sont proches de celles estimées par les statistiques agricoles aux échelles régionales et nationales mais qu'elles diffèrent beaucoup aux échelles infranationales.

Si les superficies diffèrent d'un produit à l'autre, il y a également un désaccord sur la localisation même du domaine cultivé. Pour l'Afrique, Hannerz et Lotsch (2006) montrent que ce désaccord est particulièrement important pour les espaces de faibles densités cultivées comme le Sahel (voir Encadré 7). Ceci s'explique en partie par la forte fragmentation des surfaces cultivées (Leroux *et al.*, 2014) qui rend difficile l'attribution d'une classe particulière à un pixel, aux échelles considérées ; en effet, les résolutions spatiales des données d'entrée des différents produits ne sont pas adaptées à la taille du parcellaire africain.

Encadré 7 - Comparaison de produits globaux d'occupation du sol.

Exemple d'accord spatial (pixel à pixel) pour la localisation des surfaces cultivées pour quatre produits globaux d'occupation du sol (MODIS Land Cover, GLC 2000, GLCF et GLCC). La couleur indique le nombre de produits ayant identifié le domaine cultivé pour chaque pixel (1 km x 1 km). Les désaccords sont particulièrement forts dans les zones caractérisées par une faible densité cultivée. Au contraire, les produits sont en accord pour les zones caractérisées par une organisation homogène de l'espace agricole et avec une proportion élevée de surfaces cultivées, comme dans le delta du Nil et le long du Nil ou en Afrique du Sud.



Source :

Hannerz et Lotsch (2006)

2. Echelle régionale

Les produits de cartographie de l'occupation du sol à l'échelle régionale (continent Africain seulement ou sous-région) sont au nombre de cinq (Tableau 8). Le produit **SADC LC DB** (Southern African Development Community), développé par le CSIR, couvre 7 pays d'Afrique de l'Est. Il s'agit en fait de la compilation et l'homogénéisation des cartes d'occupation du sol faites à l'échelle nationale à partir de données à haute résolution spatiale. A l'échelle du bassin du Congo, l'Université Catholique de Louvain a également développé un produit d'occupation du sol (**Congo Basin Map**) à partir des données MERIS et SPOT VGT. Ce produit, initialement orienté pour l'estimation des stocks de carbone et des espaces forestiers, présente néanmoins quatre classes

spécifiques à l'agriculture. Ramankutty (2004) a quant à lui développé à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest un produit spécifique pour la localisation du domaine cultivé (**Cropland in West Africa**) combinant de l'imagerie satellitaire (Landsat) avec de données statistiques sur les surfaces cultivées et les densités de population. Enfin, le produit du **JRC** et **ECOCLIMAP-II** couvrent l'ensemble du continent africain et sont tous les deux issus de la combinaison et homogénéisation de différents produits.

Tableau 8 - Synthèse des produits de l'occupation du sol disponibles à l'échelle régionale.

Produit	Producteur	Référence	Couverture spatiale	Résolution (m)	Période
JRC Cropland Mask	JRC		Africa	250	2012
Congo Basin Map	UCL	Verhegghen <i>et al.</i> , 2012	République Démocratique du Congo, Burundi, Rwanda, Congo, Gabon, Guinée Equatoriale, Sao Tome et Principe, Cameroun, République Centre Africaine	300	2000-2007
SADC LC DB	CSIR	CSIR	Lesotho, Malawi, Mozambique, South Africa, Swaziland, Tanzania, Zimbabwe	1000	2002
ECOCLIM AP-II			Afrique	1000	
Cropland in West Africa		Ramankutty, 2004	Afrique de l'Ouest	10000	

3. Echelle Nationale

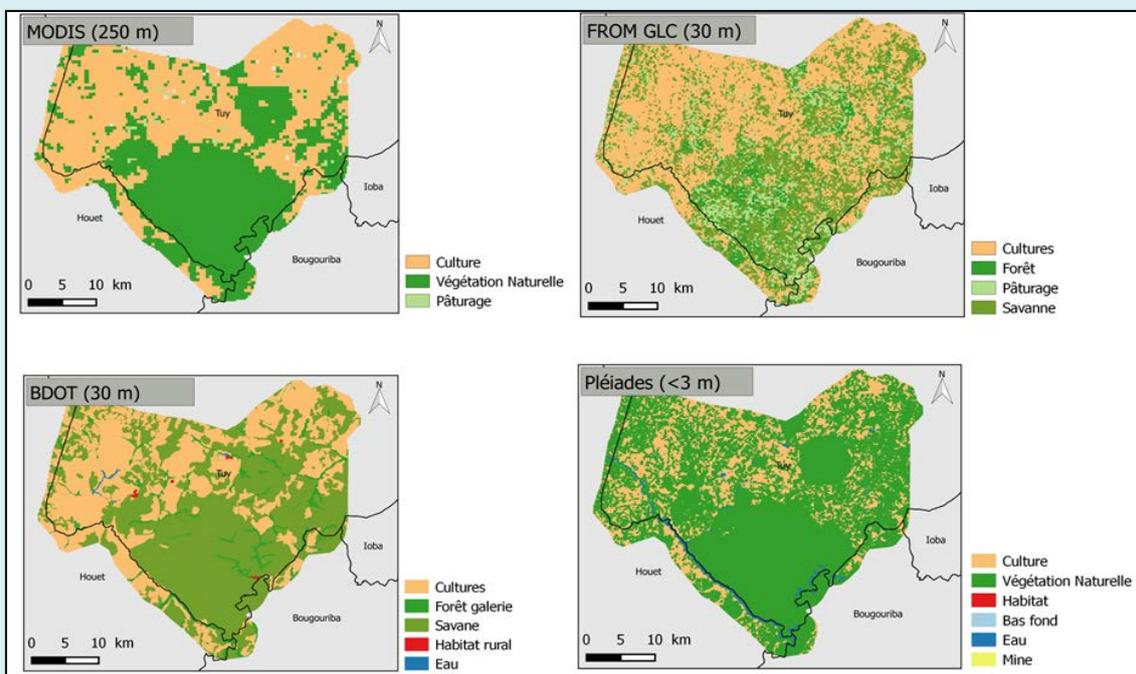
Dans plusieurs pays africains, des cartes de l'occupation du sol ont été mises en place à l'échelle nationale. La plupart de ces produits sont réalisés à partir

de photo-interprétation d'images Landsat à 30 m de résolution spatiale. Par exemple, dans le cadre du projet Africover de la FAO (1995-2002), dont le but est de produire une base de données géographiques pour la gestion des ressources naturelles dans les pays africains, des cartes d'occupation du sol pour 10 pays d'Afrique de l'Est ont été créées à partir d'images Landsat TM. Certaines de ces cartes ont été mises à jour à la suite d'Africover par le Global Land Cover Network de la FAO permettant d'avoir une cartographie de l'occupation du sol disponible à deux dates. Dans le volet Afrique du projet SERVIR, une cartographie de l'occupation du sol à partir de l'interprétation de données Landsat a été mise en place pour 6 pays d'Afrique du Sud (Botswana, Rwanda, Malawi, Tanzanie, Zambie et Namibie). Ces cartes sont disponibles avec deux niveaux de typologie : Scheme I qui comporte 6 classes communes à tous les pays et Scheme II qui comporte entre 10 et 15 classes en fonction des pays. Enfin, l'IGN France International a également produit des cartes d'occupation du sol pour trois pays d'Afrique de l'Ouest (Mali, Sénégal et Burkina). Ces cartes résultent d'une combinaison entre des données à haute résolution (Landsat et SPOT 4-5) et très haute résolution (Rapid-Eye et SPOT 6 en cours d'acquisition).

L'Encadré 8 présente une comparaison de 4 produits d'occupation du sol pour la localisation des surfaces cultivées disponibles à 3 échelles différentes (régionale, nationale et locale).

Les différents produits présentés dans le cadre de cette section sont majoritairement réalisés à partir de données de télédétection à moyenne, voire basse résolution spatiale et avec objectif initial de paramétrer les modèles climatiques globaux. Ils n'ont donc pas été conçus pour répondre à des problématiques spécifiquement agricoles et peuvent donc fournir des informations imprécises sur la localisation des surfaces agricoles en Afrique Sub-Saharienne. Dans ce cadre, il semble préférable de privilégier une approche cartographique à plus grande échelle (c'est-à-dire avec des données à haute résolution spatiale) plus apte à saisir le parcellaire et la complexité des systèmes de culture africains.

Encadré 8 - Comparaison de 4 produits d'occupation du sol sur la commune de Koumbia (Burkina Faso), dans la province du Tuy.



- Le produit global MODIS Land Cover (MCD12Q1) à 250 m de résolution spatiale ; 17 classes d'occupation du sol, définies selon le système IGBP.
- Le produit global FROM GLC à 30 m de résolution spatiale est basé initialement sur des données Landsat, complétées avec des données MODIS et d'autres sources d'information ; 26 classes d'occupation du sol.
- Le produit national BDOT (Base de Données de l'Occupation des Terres) à 30 m de résolution, basé sur la photo-interprétation d'images Landsat en suivant la nomenclature de CORINE Land Cover ; 35 classes d'occupation du sol.
- Le produit local Pléiades (Imbernon, 2013 ; com. personnelle), élaboré à partir de photo-interprétation d'images Pléiades (50 cm de résolution) ; 10 classes d'occupation du sol.

Même si la comparaison des cartes montre une certaine cohérence pour les grandes classes d'occupation du sol, les statistiques montrent que les produits globaux MODIS et FROM GLC obtenus avec des méthodes de classification

	Surfaces cultivées (ha)	Surfaces cultivées (%)
MODIS	74 856	58
FROM GLC	67 425	52
BDOT	48 631	38
Pléiades	41 165	32

automatique surestiment les surfaces cultivées par rapport aux produits BDOT et Pléiades. Dans les produits globaux à basse résolution comme MODIS, un pixel intègre une diversité d'éléments paysagers qu'il est impossible de différencier de façon automatique, et ce d'autant plus que le paysage agricole est très hétérogène comme c'est le cas au Burkina Faso.

II. Les zonages

1. Notion de zonage

Un zonage divise une aire donnée (un espace, un territoire...) en unités plus petites en fonction de critères de différenciation. L'unité de base d'un zonage présente un ensemble de problématiques homogènes dont la variabilité est minimale en fonction de l'échelle.

Le zonage consiste à analyser et à intégrer des informations spatiales pour définir des unités homogènes en potentiel et en contraintes de développement.

La délimitation et la représentation spatiale de ces unités dans des cartes de zonage ont pour ambition de fournir un outil d'aide à la décision, en contribuant à la planification de l'utilisation des terres et à des stratégies de développement adaptées aux besoins, potentiels et contraintes spécifiques de chaque zone. Le zonage s'appuie sur des informations spatialisées qui aident à orienter les actions les mieux adaptées au potentiel agricole de chaque zone (Henricksen, 1986). De plus, les résultats des recherches dans un endroit représentatif d'une zone particulière vont pouvoir être applicables à d'autres régions où les conditions sont similaires, permettant de transférer des connaissances et des savoir-faire entre régions géographiquement éloignées (Henricksen, 1986).

Enfin, le zonage peut être utilisé comme base de dialogue et de représentation des connaissances (Bonin *et al.*, 2001). Il permet aux personnes enquêtées de s'exprimer en faisant référence à des lieux précis, à des objets matériels, à des limites physiques, etc.

2. Différents type de zonages

Nous présentons ici les trois principaux zonages en lien avec l'agriculture qui sont disponibles pour le continent africain et qui utilisent des produits issus de la télédétection : zonage agro-climatique, agro-écologique, zonage des systèmes de production et des moyens d'existence.

1. Les zonages agro-climatiques : En 1900, Wladimir Peter Köppen a proposé un système de zonage climatique basé sur des zones de végétation (biomes)⁴⁶ à l'échelle globale (Köppen, 1900). Ce système a depuis été révisé et actualisé (e.g. Kottek *et al.*, 2006) : les zonages agro-climatiques (ACZ, en

⁴⁶Köppen (1900) prédit que la distribution de la végétation sur terre pouvait s'expliquer avec les variables température et précipitation, et donc basa son système de classification climatique sur les moyennes annuelles et mensuelles de ces deux variables.

anglais) présentent des unités homogènes en termes de variables climatiques, pertinentes d'un point de vue agronomique (ayant une forte influence sur la croissance des cultures et leur rendement (van Wart *et al.*, 2013). Les variables agro-climatiques qui sont souvent représentées dans les produits ACZ sont la durée de la période de croissance (*Length of Growing Period* ou LGP), le régime thermique, la saisonnalité et l'humidité du sol (IFPRI 2014). Les cartes d'ACZ offrent aux décideurs des informations pour choisir les pratiques agricoles qui semblent les plus appropriées pour chaque système de culture en fonction des conditions climatiques.

Les principaux produits cartographiques d'ACZ disponibles et identifiés sont présentés ci-après (voir Encadré 9) :

- la FAO et l'IIASA (Institut International pour l'Analyse des Systèmes Appliqués), ont développé le produit Thermal zones, qui présente les principaux régimes thermiques à l'échelle globale, et le produit LGP Zones. Ce dernier est basé sur un modèle de bilan hydrique qui compare la précipitation à l'évapotranspiration potentielle, et présente, à l'échelle globale, le nombre de jours par an durant lesquels sont réunies des conditions de température et d'humidité favorables à la croissance de cultures (Fischer *et al.*, 2002b) ;
- le groupe GLI (*Global Landscapes Initiative*) de l'Université de Minnesota a publié, lors de son étude sur l'effet du climat sur les rendements agricoles, le produit global Climate bins. Celui-ci présente des zones climatiques pour 16 cultures⁴⁷, basés le Degré jour de croissance (spécifique à chaque culture) et l'Indice d'humidité du sol (Mueller *et al.*, 2012) ;
- le produit GYGA-ED (*Global Yield Gap Atlas Extrapolation Domain*), issu du projet international GYGA, présente des zones climatiques pour les terres cultivées⁴⁸ à l'échelle globale. Cet ACZ est basé sur trois

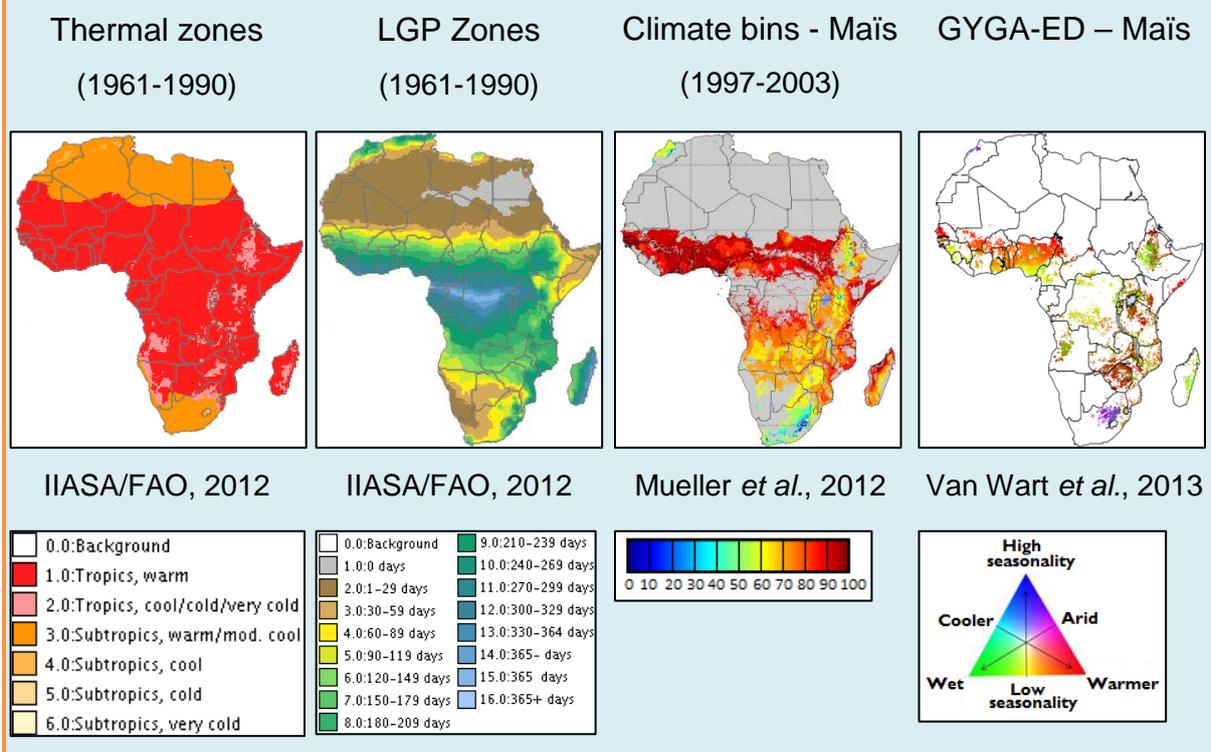
⁴⁷ Les terres cultivées en orge, manioc, arachide, maïs, mil, huile de palme, pomme de terre, colza, riz, seigle, sorgho, soja, betterave sucrière, canne à sucre, tournesol et blé utilisées pour ce produit sont celles spatialement localisées par Monfreda *et al.* (2008) à partir de données statistiques.

⁴⁸ Les terres cultivées considérées dans GYGA-ED correspondent aux masques de cultures issues du modèle SPAM ([Spatial Production Allocation Model](#)) de HarvestChoice (You *et al.*, 2015). A présent, seules les zones climatiques correspondant aux terres cultivées en maïs, riz, blé, sorgho et mil sont disponibles en ligne sur : <http://www.yieldgap.org/gygamaps/app/index.html> [consulté le 18 février 2015].

variables : Degré jour de croissance, Saisonnalité et Indice d'aridité (van Wart *et al.*, 2013).

2. Les zonages agro-écologiques (AEZ, en anglais), définissent des unités homogènes basées sur le potentiel et les contraintes de production agricole. Ainsi, les zones agro-écologiques correspondent à des unités spatiales définies en termes d'interaction entre les ressources en terres, les conditions agro-climatiques, la géomorphologie et parfois l'occupation du sol qui caractérisent leur aptitude pour l'agriculture.

Encadré 9 - Principaux produits de zonages agro-climatiques (ACZ) pour le continent africain.



L'agriculture pluviale caractérisée par de faibles intrants est la pratique dominante dans la plupart des pays d'Afrique et dépend étroitement des conditions agro-écologiques. Ainsi, la configuration des différents paysages agricoles africains est étroitement liée à la distribution spatiale des différentes zones agro-écologiques (IFPRI, 2014).

Les résultats des AEZ permettent la mise en place de plusieurs applications, comme l'analyse de la productivité des systèmes de culture et de leur besoins

environnementaux, ou la planification de l'utilisation des terres (gestion des ressources naturelles et études de faisabilité des pratiques de production et des nouvelles technologies) en fonction de leur contexte agro-écologique (IFPRI, 2014).

Le projet GAEZ mené par la FAO a débuté en 1978. Depuis l'année 2000, les produits cartographiques globaux sont régulièrement publiés en collaboration avec l'IIASA et sont utilisés dans de nombreuses études. Le portail GAEZ v.3.0⁴⁹ offre un accès thématique aux données cartographiques et tabulaires portant sur :

- les ressources en terres, comprenant les sols, la géomorphologie et l'occupation du sol ;
- les ressources agro-climatiques, comprenant les cartes d'ACZ ;
- les rendements potentiels et réels (plus les écarts entre les deux) des principales cultures en tenant compte de différentes pratiques culturales (IIASA/FAO 2012b).

Les produits cartographiques disponibles sont nombreux, agrégeant des données hétérogènes à différentes échelles spatiales (globale, régionale, nationale et même sous-nationale) et temporelles. Cependant, aucune carte d'AEZ n'a encore été produite combinant toutes ces données spatiales pour délimiter des zones agro-écologiques telles que définies précédemment.

Néanmoins, certains produits GAEZ ont contribué à la conception des cartes d'AEZ externes au projet de la FAO/IIASA. C'est le cas du produit régional AEZ of Africa⁵⁰ de HarvestChoice (IFPRI). Celui-ci reprend des concepts du GAEZ (i.e. LGP, zonage thermique latitudinal) en les modifiant, et divise le continent africain en fonction de trois variables : climat (tropical ou subtropical), élévation (hautes terres froides et plaines chaudes) et disponibilité en eau (aride, semi-aride, sub-humide et humide) (Sebastian, 2009).

⁴⁹ Disponible en ligne sur : <http://gaez.fao.org/Main.html#> [consulté le 19 février 2015].

⁵⁰ Ce produit ne mobilise de données autres que des données climatiques et décrit des zones homogènes en conditions climatiques, c'est pourquoi il pourrait rentrer dans la catégorie d'ACZ, mais a été catalogué comme étant un AEZ prenant en compte la définition des zones agro-écologiques de HarvestChoice/IFPRI : « des zones géographiques présentant des conditions climatiques similaires qui déterminent leur capacité à soutenir l'agriculture pluviale » (IFPRI 2014).

3. Les zonages de moyens d'existence : Dans le contexte de la sécurité alimentaire, les zonages de moyens d'existence (*livelihood zones* en anglais) définissent des entités géographiques homogènes en fonction des moyens de subsistance des ménages (source de revenus, accès aux marchés, populations, etc.). Ces zonages fournissent les bases socio-économiques nécessaires pour les évaluations de sécurité alimentaire et les alertes précoces (pauvreté, vulnérabilité, diversité alimentaire), mais aussi pour les différentes analyses d'adaptation aux crises aiguës ou chroniques (stratégie d'adaptation, résilience, ...) et les outils de prévention (filet de sécurité, transferts sociaux). Ils fournissent une passerelle avec les différentes enquêtes ménages et constituent une information de base pour les décideurs en termes d'affectation et de nature de l'aide (USAID, 2009).

Le système d'alerte précoce d'USAID, FEWS-NET, développe et met à jour périodiquement des produits de moyens d'existence (voir Encadré 10) à partir de méthodes d'analyse par approche économie des Ménages. A ce jour, FEWS-NET a publié 28 cartes de moyens d'existence à une échelle nationale sur 3 régions du continent africain : Afrique de l'Est, Afrique de l'Ouest et Afrique du Sud⁵¹.

La FAO a également publié le produit cartographique *Livelihood zones for agricultural water management* à l'échelle nationale, pour trois pays africains : Ghana, Ethiopie, Burkina Faso (voir Encadré 10). Ceux-ci ont été élaborés dans le cadre du projet AgWater Solutions. Par ailleurs, la FAO a collaboré à la conception de plusieurs zonages FEWS NET, notamment le zonage du Kenya en collaboration avec la NDMA (*National Drought Management Authority*) et le PAM.

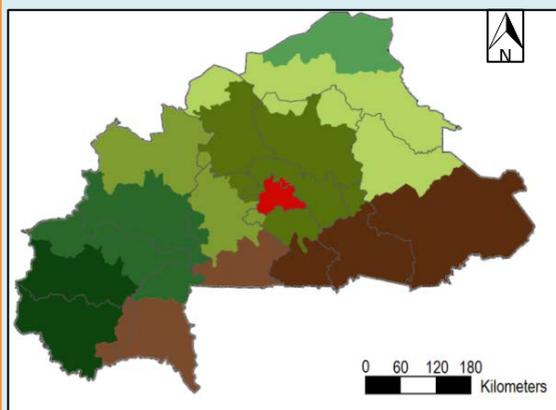
La FAO, comme l'USAID, ont basé l'élaboration de ces cartes sur l'expertise, en mobilisant des données spatiales (distribution de la population, occupation du sol, accès aux marchés, conditions agro-climatiques, accès aux ressources en eau etc.), des informations collectées par enquêtes sur le terrain (auprès des groupes de discussion représentatifs des différents niveaux de richesse) et des statistiques socio-économiques (au niveau communautaire et départemental)

⁵¹ Les produits cartographiques disponibles sont ceux de Burundi, Djibouti, Ethiopie, Kenya, Rwanda, Somalie, Sud-Soudan, Soudan, Tanzanie, Ouganda, Yémen, Angola, Madagascar, Malawi, Mozambique, Zambie, Zimbabwe, Burkina Faso, République Centrafricaine, Tchad, Guinée, Liberia, Mali, Mauritanie, Niger, Nigéria, Sénégal et Sierra Leone. La plupart des cartes sont accompagnées d'un document décrivant la structure des moyens d'existence dans chaque zone. Disponibles sur : <http://www.fews.net/> [consulté le 16 février 2015].

pour aider les experts à délimiter les zones spatialement par cartographie participative (Santini *et al.*, 2012).

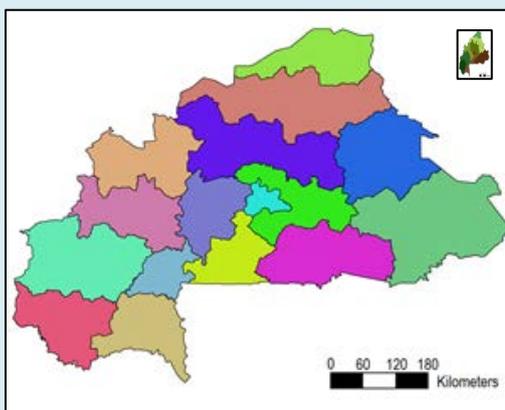
Encadré 10 - Principaux produits de zonage des moyens d'existence pour le Burkina Faso

Livelihood Zone Map
(FEWS-NET/USAID)



(FEWS-NET, 2010)

Livelihood zones for agricultural water management (AgWater Solutions/FAO)



(Dembélé, 2010)

Légende

- South tubers and cereals
- Southwest fruits, cotton, and cereals
- West cotton and cereals
- West cereals and remittances
- Central plateau cereals and market gardening
- Ouagadougou peri-urban
- North and east livestock and cereals
- North transhumant pastoralism and millet
- Southeast cereals, livestock, forestry, and fauna
- Regions

Légende

- 1. South-west sub-humid, cereals-root crops (sorghum-yam)
- 10. South-east, moist-semiarid, cereals (sorghum-millet), forestry and fauna, tourism
- 11. Central periurban, horticulture and livestock
- 12. Central Plateau moist-semiarid, cereals and market gardening zone
- 13. Centre-north dry semiarid, cereals-vegetables- groundnut
- 14. North dry semiarid, agropastoral, sorghum-millet -livestock (pastoralism dominant), vegetables
- 15. North-east arid, transhumant pastoralism and millet
- 16. East dry semiarid, cereals-livestock, transboundary trade
- 2. West sub-humid, cereals (rice, maize), tree crops and cotton
- 3. West moist-semiarid, cotton, cereals (rice-maize), vegetables
- 4. West moist-semiarid, cotton, cereals (sorghum-maize)
- 5. West moist-semiarid, cotton, cereals (sorghum-maize) and sesame
- 6. North-west moist-semiarid, cereals (sorghum-rice), irrigated cash crops and remittances
- 7. Centre-west moist-semiarid, cereals (sorghum-millet), horticulture and remittances
- 8. South moist-semiarid, , cereals-root crops and tourism zone
- 9. Centre-east, moist-semiarid, cereals (sorghum, - rice), groundnut, livestock

4. Le zonage des systèmes de production : un système de production est défini comme l'ensemble formé par l'exploitation avec des modes de production, de consommation et de subsistance similaires, en partageant également leurs contraintes et leurs possibilités de développement du point de vue agro-écologique et d'accès aux marchés.

Le zonage spatial et la caractérisation des systèmes de production a pour objectif d'identifier les besoins et les possibilités de développement agricole et rural et d'orienter les investissements vers les régions les plus vulnérables tout en promouvant l'adoption de pratiques pour une utilisation des terres plus durables (Garrity *et al.*, 2012).

Les premiers produits cartographiques, représentant 72 systèmes de production répartis sur 6 régions en développement⁵², furent publiés par Dixon *et al.*, (2001) dans le cadre des études de systèmes de production de la FAO et la Banque Mondiale. Deux produits concernent le continent africain : *Major farming systems of Sub-Saharan Africa* et *Major farming systems of Middle East & North Africa*⁵³.

La méthodologie utilisée pour la conception de ces produits prend en compte d'une part les ressources naturelles disponibles, notamment la variable LGP, et d'autre part le modèle dominant des activités agricoles et des moyens d'existence des ménages. Les données utilisées proviennent de multiples sources et sont de nature hétérogène : des produits biophysiques tels que les ressources en eau, des données d'analyse spatiale comme par exemple le temps de trajet pour accéder aux marchés, et des données socio-économiques fondamentales pour caractériser les moyens d'existence (Dixon *et al.*, 2001).

Le produit *Major farming systems of Sub-Saharan Africa* a été actualisé par Garrity *et al.* (2012) suivant les mêmes critères de classification décrits par Dixon *et al.* (2001) et en ajoutant d'autres, cette dernière actualisation n'étant disponible qu'en version préliminaire⁵⁴.

Un produit cartographique spécifique pour les systèmes de production pastorale à l'échelle globale a été produit par la FAO en collaboration avec l'Institut International de Recherche sur le Bétail (ILRI) depuis 2002. La dernière version de ce produit (*Global livestock production systems* version 5) date de 2011 et inclut douze systèmes de production classés en trois types de système - systèmes pluviaux mixtes (principalement cultures pluviales associées au

⁵² Les six produits cartographiques correspondent aux régions Afrique subsaharienne, Moyen-Orient et Nord de l'Afrique, Europe de l'Est et Asie centrale, Asie du Sud, Asie orientale et région pacifique et Amérique latine et Caraïbes.

⁵³ Disponibles sur : <http://www.fao.org/farmingsystems/> [Consulté le 10/03/2015]

⁵⁴ Les principales sources de données spatiales pour la version 2010 du produit *Major farming systems of Sub-Saharan Africa* sont les bases de données GAEZ de la FAO/IIASA et HarvestChoice/IFPRI avec la base de données CIESIN pour les données de population et les statistiques de FAOSTAT et de la Banque Mondiale (Garrity, Dixon, and Boffa 2012).

bétail), systèmes irrigués mixtes (avec une proportion significative de cultures irriguées) et systèmes d'élevage extensifs basés sur l'utilisation des parcours - et quatre zones climatiques (hyperaride, aride/semi-aride, humide/sub-humide, hautes terres tempérées/tropicales) (Robinson *et al.*, 2011).

Tableau 9 - Données spatialisées couramment utilisées pour l'élaboration des produits de zonage.

Information recherchée	Données	Echelle/ Résolution
Occupation du sol	Images satellitaires	Multiples
	Photos aériennes	1/25 000
	Corine Land Cover	1/100 000
Végétation	Cartes de végétation	Multiples
	Cartes des zones naturelles (protégées)	
Altitude/Pente	MNT	50m/30m
Géologie	Cartes géologiques	1/50 000
Pédologie	Cartes des sols	1/100 000
Climat	Mesures météorologiques in-situ	Multiples
Démographie/Economie	Statistiques	Multiples

3. Bilan et perspectives

Les produits cartographiques de zonage inventoriés sont soit des zonages matriciels⁵⁵, soit des zonages « participatifs »⁵⁶. Tous deux se basent en grande partie sur des données spatialisées (Tableau 9) correspondant généralement à des données collectées localement (ex. données météo *in situ*) et extrapolées à une échelle régionale, à des données statistiques (généralement socio-économiques) à différentes échelles administratives ou à des cartes

⁵⁵ Dans un zonage matriciel, chaque variable spatiale utilisée pour délimiter les zones est divisée en classes et ensuite, on croise les classes des différentes variables sous forme matricielles. Par exemple, une zone peut être définie par une cellule où se croisent spatialement la classe « température moyenne annuelle 20-25°C » et la classe « durée de la période de croissance 270-199 jours » (Van Wart *et al.*, 2013).

⁵⁶ Par zonage « participatif », on fait référence aux produits qui ont été élaborés dans un contexte de cartographie participative, celle-ci étant basée sur les critères des acteurs responsables qui s'appuient sur l'expertise et les données spatiales disponibles pour délimiter les zones.

biophysiques, souvent numérisées à partir du format papier original. Quant aux zonages participatifs, ils se déploient à l'échelle villageoise à partir d'imagerie à Très Haute Résolution Spatiale (Nackoney *et al.*, 2013).

Ces approches présentent plusieurs limites liées à la grande hétérogénéité des données utilisées. En effet, les produits globaux et régionaux rassemblent des données dont l'échelle d'étude, la qualité, la résolution spatiale, les dates d'acquisition et la disponibilité varient considérablement entre les différentes sources et les différents pays. Ceci remet souvent en question la précision et fiabilité des produits de zonage résultants, ce qui limite leur usage par les décideurs lors de la planification d'utilisation des terres en zones rurales (Fischer *et al.*, 2002a ; van Wart *et al.*, 2013).

De plus, l'accès aux données n'est pas toujours garanti, ce qui limite les mises à jour et la continuité des produits. Pourtant, dans un contexte de changement climatique, les zones qui sont aujourd'hui homogènes en potentiel et en contraintes de développement, subissent une réorganisation spatiale au cours des années. Ainsi les méthodologies ponctuelles de zonage qui existent devraient s'adapter à un environnement qui évolue dans le temps.

Les données satellitaires peuvent compenser ces limites dès lors que l'acquisition des séries temporelles nous permet de suivre des dynamiques spatiales, et que l'information spatiale synoptique que l'on extrait des images est robuste et cohérente lorsqu'on applique les mêmes traitements sur le même type d'image. Cependant, à l'égard du zonage à l'échelle régionale, les données de télédétection présentent un potentiel qui est encore peu exploité.

Une autre limitation est liée à la nature des zonages. Les produits existants restent très spécialisés et n'intègrent pas réellement les données relatives au milieu physique, aux usages et fonctions, au foncier, aux systèmes de production dans leurs relations avec l'environnement économique et politique. Pourtant au niveau des territoires, à grande échelle, de tels produits existent. La définition des unités est alors le produit du croisement entre l'observation des paysages (ce qui est vu ou plus exactement ce qui est perçu) et une analyse spatiale hypothético-déductive qui a pour objectif de comprendre les logiques, les causes et les conséquences de la localisation des peuplements et des activités humaines. Le travail est souvent réalisé à dire d'experts mais il peut mobiliser aussi les populations comme dans les ZADA (Zonage A Dire d'Acteurs ; Caron and Cheylan, 2005).

La télédétection est peu présente dans ces travaux qui, au mieux, utilisent parfois la photo-interprétation à partir de photos ou d'images à haute et très haute résolution. L'utilisation des données de télédétection dans les grands projets de zonage se limite aux données de relief et d'élévation issus des MNT, et aux produits d'occupation du sol souvent dérivés des images satellitaires.

A l'échelle régionale, la donnée satellitaire est généralement à basse résolution spatiale, et donc la délimitation des zones homogènes, ainsi que leur interprétation, s'avère un exercice complexe. Néanmoins, leur apport commence à être étudié :

- Vintrou *et al.* (2012) ont cartographié les trois principaux systèmes agricoles pluviaux du Mali à l'échelle régionale à partir d'indices spectraux, spatiaux et temporels issus d'images MODIS ;
- une étude récente menée à l'échelle régionale a travaillé sur la stratification de l'ensemble du territoire français métropolitain en unités radiométriquement homogènes, qui présentent une cohérence en termes d'occupation du sol et du type de sol (Bisquert *et al.*, 2015).

En conclusion, il existe un fort potentiel d'utilisation des données de télédétection dans les produits de zonage qui reste encore à explorer/exploiter dans les années à venir, tout en profitant des avancées technologiques et de l'arrivée des nouvelles données de la série Sentinel du programme Copernicus.

III. Les Systèmes d'Alerte Précoce (SAP)

Les systèmes d'alerte précoce (SAP ou EWS pour *Early Warning System*) sont des outils au service de la sécurité alimentaire. Leur objectif est de suivre et d'identifier tout écart inhabituel par rapport à la normalité, en alertant à temps sur les problèmes potentiels. Les informations attendues d'un SAP sont la surveillance (généralement saisonnière), l'analyse des indicateurs et tendances, l'identification de tendances inhabituelles, la localisation géographique du problème et sa propagation (Maxwell and Watkins, 2003).

En Afrique, il existe de nombreux SAP qui ont montré par le passé leur capacité à alerter les pays et les donateurs en situation de crise alimentaire (Tefft *et al.*, 2006). Nous avons identifié pour cette étude cinq SAP opérationnels sur le continent africain : FEWS-NET (USAID), GIEWS (FAO), MARS-FoodSec (JRC), Crop Watch (RADI) et le système d'AGRHYMET. A ces systèmes, il faut rajouter le Programme Alimentaire Mondial qui mobilise des données de

télédétection en temps de crise (WFP, 2012) et la SADC (*South African Development Community*) qui, comme la plupart des Communautés Economiques régionales, dispose d'une unité effectuant des alertes ou des analyses régionales de sécurité alimentaire, mais sans pour autant disposer d'un système de surveillance agro-climatique spécifique.

Les SAP sont basés sur la surveillance agro-climatique et vivrière, et mobilisent à cette fin des données météorologiques et d'observation de la Terre pour le suivi de la campagne agricole. Hormis GIEWS, ces systèmes n'assurent pas une couverture exhaustive du continent (Figure 11).

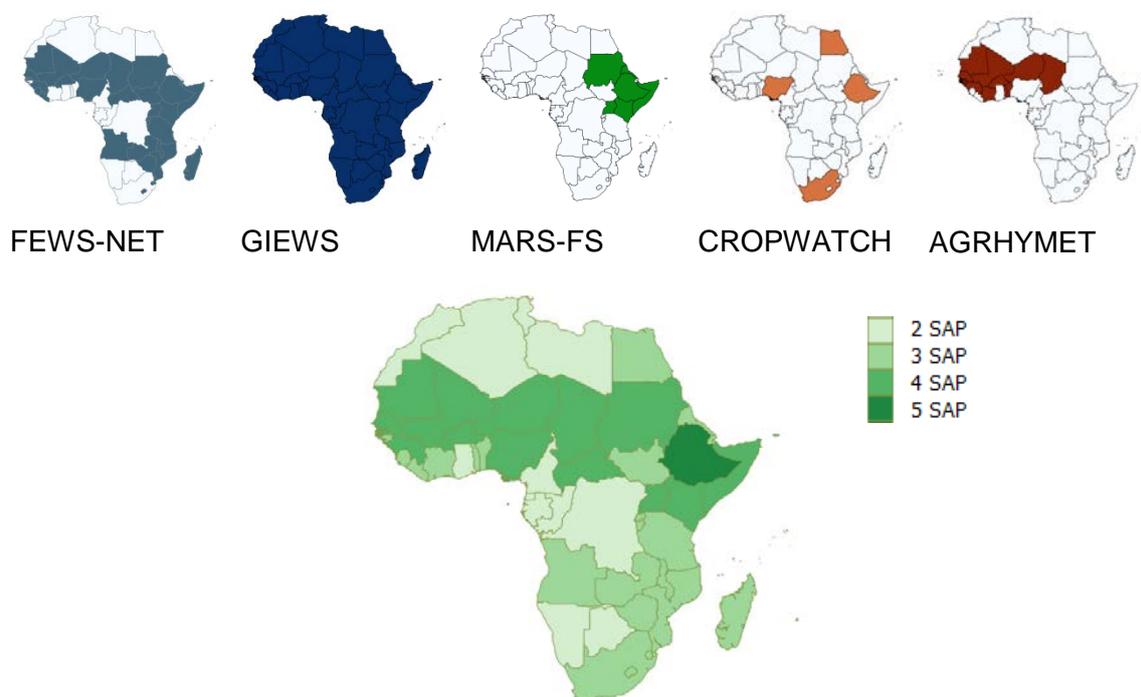


Figure 11 - Nombre de Systèmes d'Alerte Précoce (SAP) identifiés par pays.

Enfin, il existe des initiatives multilatérales, telles que le Cadre Harmonisé (pays du CILSS et pays du Golfe de Guinée) ou le Cadre Intégré de Classification de la Sécurité Alimentaire (IPC⁵⁷ pour *Integrated Food Security Phase Classification*) impliquant les principales agences internationales, nationales et des ONGs, qui produisent des diagnostics et des projections de sécurité

⁵⁷ <http://www.ipcinfo.org>

alimentaire sur une base consensuelle et documentée, y compris par des données de télédétection. Ces initiatives proposent une classification des situations d'insécurité en cinq niveaux de sévérité et en deux types d'insécurité (chronique ou aiguë).

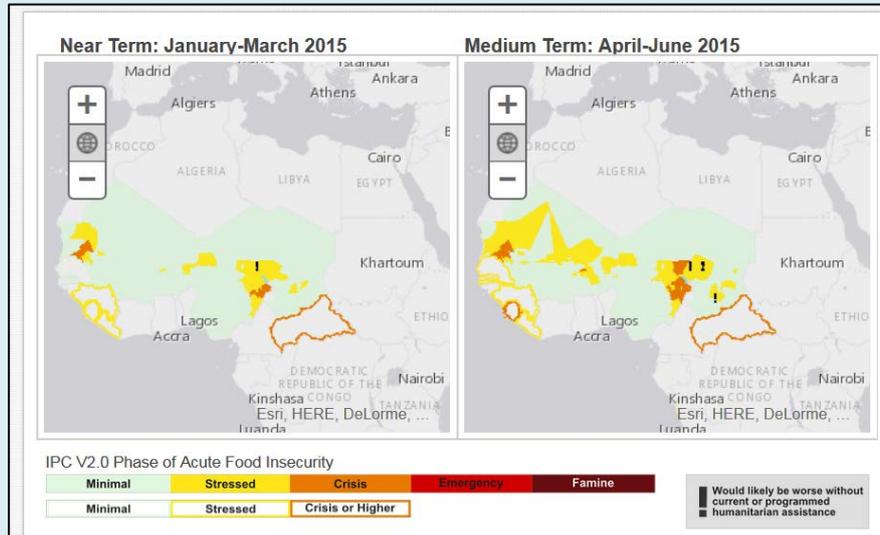
1. Les systèmes internationaux

Actuellement un des systèmes d'alerte le plus abouti en termes sécurité alimentaire est **FEWS-NET** (*Famine Early Warning System Network*) créé en 1985 par l'agence américaine pour le développement international (USAID - *United States Agency for International Development*). Des données de télédétection sont utilisées pour calculer des anomalies de NDVI décadaire et de pluie. Ensuite, des analystes, souvent basés sur le terrain, intègrent les données sur la météorologie, le climat et les évaluations de culture, des informations sur les marchés, les échanges commerciaux, la nutrition et les modes de subsistance, afin d'évaluer les conditions actuelles et futures de la sécurité alimentaire dans quelques 35 pays (Encadré 11), dont 29 pays africains.

Le service agricole pour l'étranger (*Foreign Agricultural Service* ; FAS) du ministère de l'agriculture des États-Unis (USDA – *United States Department of Agriculture*) fournit des informations sur la production agricole mondiale à partir de données de télédétection (projet **GLAM** avec la NASA ; *Global Agriculture Monitoring*) à des fins essentiellement économiques (développement des marchés, accords commerciaux, etc.). Le FAS produit des informations sur les pays en voie de développement qui sont utilisés pour produire des rapports réguliers sur les risques d'insécurité alimentaire.

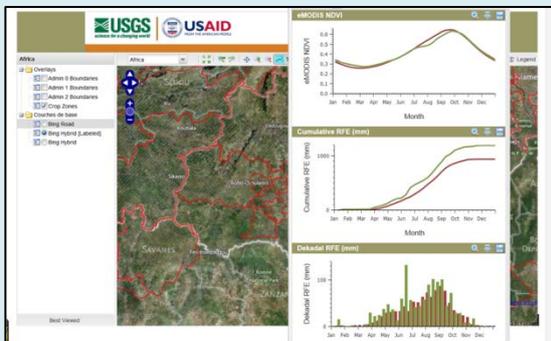
Autre système global de suivi des productions agricoles, le Système Mondial d'Information et d'Alerte Rapide **SMIAR** (ou **GIEWS** – *Global information and Early Warning System*) de la FAO assure le suivi continu de la situation offre/demande mondiale et fournit une alerte précoce des crises alimentaires susceptibles d'affecter certains pays. Le suivi des conditions de culture est fait à partir d'indices basés sur des données de télédétection relatives à la végétation et à la température de surface, combinées avec des informations sur les cycles des cultures et un masque des cultures à l'échelle mondiale. Les cartes finales mettent en évidence les anomalies dans la croissance de la végétation, et d'éventuelles sécheresses, dans les zones de cultures au cours de la saison de croissance.

Encadré 11 - Conditions de sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest pour le début de l'année 2015 (FEWS-NET⁵⁸).



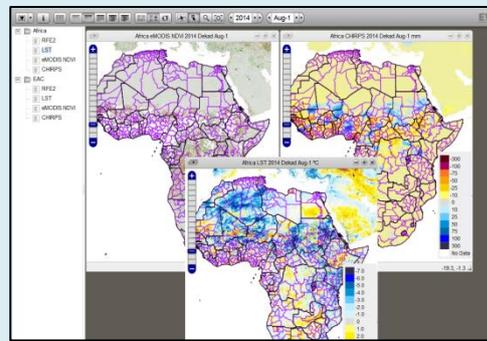
Les cartes de sécurité alimentaire produites par FEWS-NET sont en partie basées sur des informations satellitaires disponibles sur les portails de l'USGS et de la NOAA. Des outils sont proposés sur ce site, tels que :

Interactive Map Viewer⁵⁹



Cette interface permet de visualiser les zones administratives et le domaine agricole, des séries temporelles de NDVI et de pluies décadales, des pluies cumulées, et de télécharger les données.

Early Warning Explorer (EWX)⁶⁰



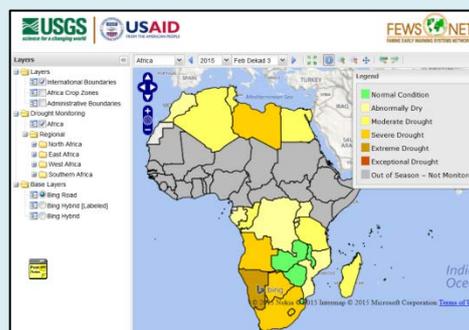
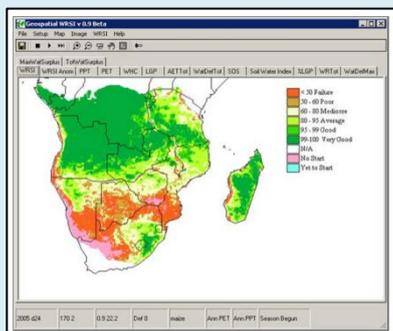
EWX est un outil cartographique interactif qui permet la visualisation des pluies, NDVI, températures de surface, des anomalies et des séries temporelles à différents pas de temps.

⁵⁸ <http://www.fews.net/west-africa>

⁵⁹ <http://earlywarning.usgs.gov/fews/mapviewer/>

⁶⁰ <http://earlywarning.usgs.gov:8080/EWX/>

Water Requirements Satisfaction Index Decision Support Interface (DSI)⁶² (GeoWRSI)⁶¹



Outil de simulation pour calculer les DSI est un outil expérimental d'aide à besoins de satisfaction en eau à partir la décision basé sur les conditions d'un programme de bilan hydrique. météorologiques et de culture.

Lancé en 2001, le programme **MARS-FoodSec** (*Monitoring Agriculture using Remote Sensing for Food Security*) du JRC (*Joint Research Center*) a une approche proche de celle de FEWS-NET, mais sur cinq pays d'Afrique de l'Est uniquement (Somalie, Ethiopie, Erythrée, Kenya et Ouganda). Ce programme publie des bulletins sur les anomalies de pluie, de NDVI et des cartes d'indice de satisfaction des besoins en eau WSI (*Water Satisfaction Index*) calculées à partir du modèle GWSI (*Global Water Satisfaction Index*).

En termes d'informations quantitatives sur les productions agricoles, le système le plus avancé est actuellement **CropWatch** développé par le RAD (Institut de télédétection de l'académie des sciences chinoise). Ce système fait une évaluation quantitative des productions à partir de l'estimation des surfaces cultivées et des rendements de quatre grandes cultures (blé, maïs, soja et riz), dans quatre pays africains. La méthode utilisée pour les estimations de rendement et de surface est relativement simple, et est calibrée à partir des statistiques agricoles (données FAO ou statistiques nationales). Il est encore trop tôt pour faire un bilan de ce système mis en place en 2013, mais l'on peut s'attendre à ce que la précision des estimations soit du même ordre que la précision des statistiques agricoles utilisées.

⁶¹ <http://chg.geog.ucsb.edu/tools/geowrsi/>

⁶² <http://earlywarning.usgs.gov/fews/dsi/>

2. Les systèmes régionaux et nationaux

A l'échelle régionale, le centre **AGRHYMET** basé au Niger a développé, en collaboration avec des organismes de recherche internationaux, un système de suivi de la campagne agricole (pluie, besoin en eau des cultures et prévision de rendements) pour l'ensemble des pays ouest africains. Ce système est construit à partir de modèles et méthodes spécifiques qui utilisent des données de terrain et des données satellitaires. AGRHYMET publie mensuellement un bulletin « Suivi de la campagne agropastorale en Afrique de l'Ouest », accessible sur internet. Il ne semble pas exister d'équivalent à ce que fait AGRHYMET dans les autres grands centres régionaux du continent africain.

Aux échelles nationales, il n'existe que peu d'exemples de systèmes d'alerte développés et opérés par des institutions locales. En Afrique du Nord, où la production annuelle est très sensible aux conditions climatiques, le **Maroc** s'est doté d'un système de surveillance des cultures céréalière CGMS-Maroc qui mobilise des séries temporelles d'images de télédétection et un modèle agro-météorologique. En **Tunisie**, les estimations de surfaces emblavées et les prévisions de rendement céréalier réalisées à partir de séries temporelles d'images du capteur SPOT-VEGETATION sont éditées chaque année.

3. Bilan et perspectives

Dédiés à la détection des anomalies de croissance, les systèmes d'alerte précoce évoluent progressivement vers des systèmes plus quantitatifs de suivi de la production agricole. Le système **CropWatch** en est le premier exemple, même si l'approche adoptée n'est pas optimale pour le continent africain où la grande variété des systèmes agricoles complique la démarche, et où les statistiques agricoles utilisées dans le modèle n'ont pas toujours le niveau de qualité requis. Plus prometteur, car davantage ancré dans le terrain africain, la partie agro-climatologique du système **FEWS-NET** est actuellement en train d'évoluer vers un système de suivi des cultures (*EWCS, Early Warning and Crop Monitoring*) avec l'aide de l'Université du Maryland, notamment par l'introduction de modélisation agro-météorologique et de culture. De même, l'équipe de **MARS-FoodSec** travaille actuellement sur le développement d'un modèle simplifié de plante pouvant assimiler des données de télédétection.

Face à la multiplicité des systèmes opérationnels de suivi de la végétation, qui pour la plupart sont basés sur les mêmes sources de données satellitaires, l'initiative **GEOGLAM** devrait permettre la mise en réseau des systèmes d'alerte précoce, et ce malgré des difficultés géopolitiques. Au cours de la

conférence IMAAFS (*Information for Meeting Africa's Agricultural transformation and Food Security goals*) qui s'est tenue à Addis-Abeba en octobre 2014⁶³, la plupart des participants ont manifesté leur intérêt à participer au système test de *Early Warning Crop Monitoring* développé par FEWS-NET et l'Université du Maryland (O. Léo, 2014 ; communication personnelle). Ce système serait davantage une plateforme d'échanges d'information qu'un nouveau système d'alerte. Les contours de ce système ne sont pas encore clairement définis, notamment : quel rôle pour les SAP nationaux et régionaux ? Comment collecter les données de terrain (contacts dans les pays ou *crowd sourcing*) ? Comment gérer la convergence/cohérence des différentes sources et des estimations ?

Au-delà de l'aspect institutionnel et logistique, ces systèmes d'alerte sont amenés à s'améliorer grâce à l'intégration de nouvelles données telles que l'humidité de surface du sol mesurée par SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*) ou les séries temporelles d'images Sentinel-2 à résolution décimétrique qui permettront notamment d'améliorer la carte des cultures et des calendriers culturaux. Ces nouvelles sources de données accompagneront la mutation actuelle des systèmes d'alerte vers des systèmes de suivi des cultures qui devront s'affranchir de l'utilisation de statistiques agricoles nationales de qualité inégale selon les pays.

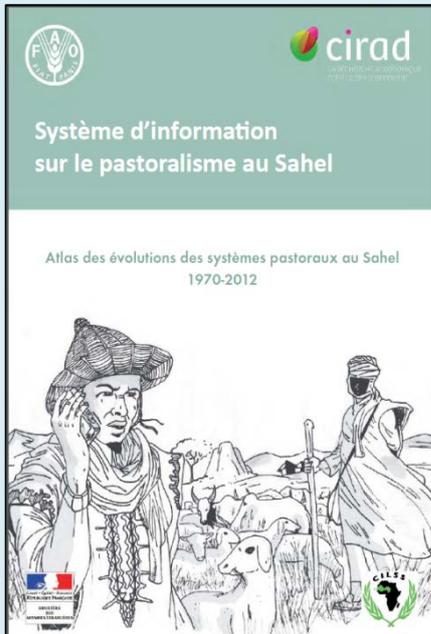
IV. Le suivi des dynamiques pastorales

Depuis le début de la télédétection, les données satellitaires sont utilisées pour suivre les zones pastorales qui, aux échelles nationales et régionales, se présentent comme des zones « homogènes » sur de grandes surfaces. Les deux principaux domaines qui aujourd'hui bénéficient directement de l'imagerie satellitaire sont le suivi de la production de biomasse et le suivi des feux. Pour une vision plus large de l'utilisation de la télédétection pour les questions pastorales, on recommande la lecture des papiers de revue de Hunt *et al.* (2003) et de Palmer and Fortescue (2004), ou la consultation des communications des séminaires *Crop and Rangeland Monitoring* (CRAM) (le dernier séminaire s'est tenu à Nairobi en septembre 2011⁶⁴).

⁶³ http://mars.jrc.ec.europa.eu/public/felix/imaafs/IMAAFS_Key_Findings_and_Conclusions.pdf

⁶⁴ <http://mars.jrc.ec.europa.eu/mars/News-Events/3rd-CRAM-Workshop>

Encadré 12 - Le projet SIPSA (Système d'Information sur le Pastoralisme au Sahel).



Financé par la FAO et coordonné par le CIRAD (Pole Pastoral Zone Sèche au Sénégal), le projet international SIPSA (2002-2011) avait pour objectif le développement d'un outil d'aide à la décision pour anticiper, gérer et suivre les évolutions du pastoralisme et ses interactions avec l'environnement.

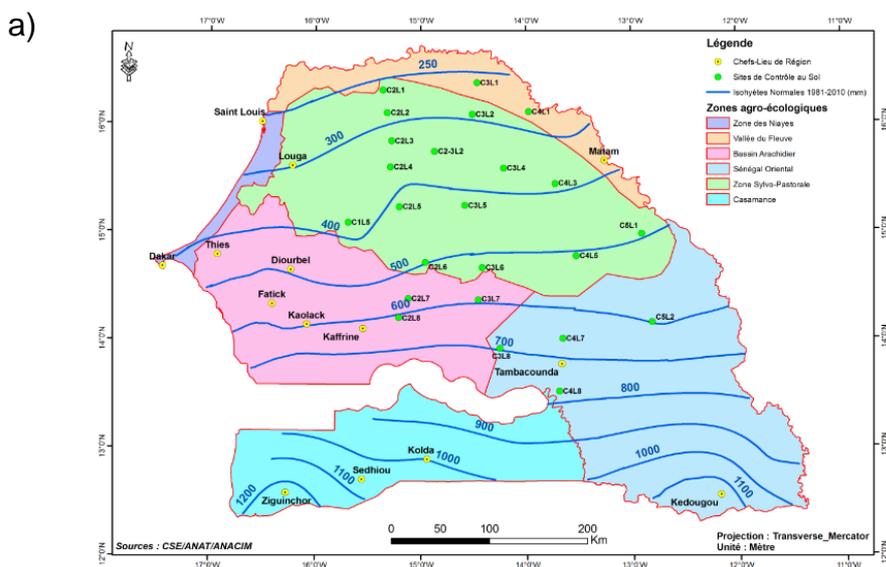
SIPSA devait fournir des informations pertinentes et actualisées sur l'état et les tendances évolutives des systèmes pastoraux sahéliens, et élaborer des produits d'information répondant aux besoins des acteurs et partenaires situés à différents niveaux de décision, avant, durant et après les crises.

Les informations traitées par SIPSA reposent en partie sur des produits satellitaires tels que le NDVI, et le suivi des feux. Le projet est actuellement terminé, mais AGRHYMET et le CSE continuent d'assurer un suivi régulier des zones pastorales et de publier des bulletins.

1. La production de biomasse

Au Sahel, la disponibilité fourragère en quantité et en qualité est un élément important pour la pratique du pastoralisme. L'intensité de la saison des pluies et sa répartition spatiale déterminent le stock potentiel de fourrage disponible au cours de la longue saison sèche qui suit. Dès les années 80, Tucker *et al.* (1983) montraient qu'il était possible à partir d'images NOAA AVHRR NDVI d'estimer la biomasse de zones pastorales au Sénégal. Jusqu'à récemment, les produits dérivés de SPOT VEGETATION étaient utilisés pour estimer la production car permettant une estimation plus précise de la production de biomasse potentielle et une comparaison à une moyenne de référence (FAO and CIRAD, 2012).

A partir des images à basse résolution, la quantité de matière sèche annuelle est calculée à partir du cumul des décades de la saison des pluies (mai à octobre), et représente la production de biomasse fourragère. Le CSE produit chaque année depuis 2010 une carte de biomasse des zones pastorales du Sénégal (Figure 12b), obtenues par modélisation statistique entre des mesures de biomasse au sol effectuées selon un zonage agro-écologique (Figure 12a), et des valeurs de NDVI d'un capteur large champ intégrées sur la saison de croissance.



b)

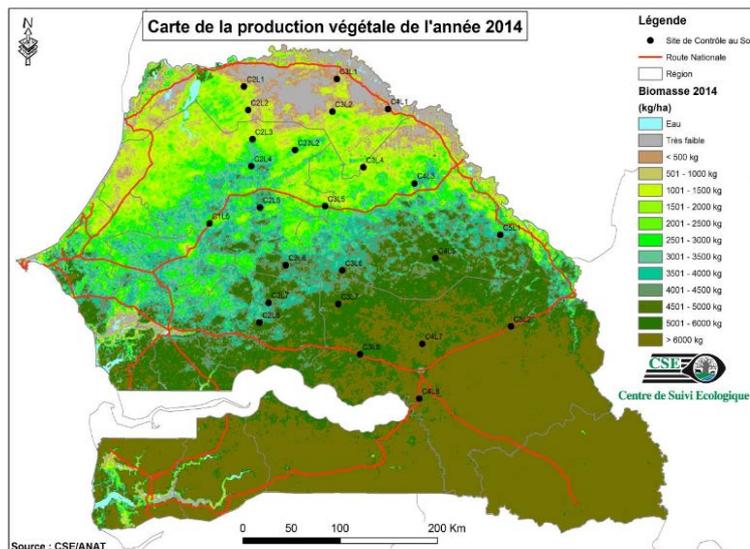


Figure 12 - a) Carte des sites de mesure de biomasse sur fond de zones agro-écologiques ; les isohyètes correspondent à la moyenne 1981-2010 (CSE, 2014) ; b) Carte de la production végétale de 2014, calculée à partir des mesures sol de a) et des NDVI SPOT-VEGETATION intégrés sur la période de croissance (CSE, 2014).

2. Les feux de brousse

L'intensité et la fréquence des feux de brousse influencent fortement la dynamique des agro-écosystèmes sahéliens. Selon les zones agro-écologiques et les saisons, ils sont considérés soit comme un fléau, soit comme un outil de gestion agricole (défrichage agricole, écobuage, élimination des ennemis des cultures par brûlis des résidus de récoltes), soit un moyen de gestion des ressources naturelles (stimulation de la régénération de l'herbe, protection des habitations, voire même une pratique culturelle). Le feu peut aussi survenir par négligence, en raison de conditions climatiques favorables, ou de manière criminelle.

Les données fournies par les satellites et validées par les services techniques permettent d'élaborer des indicateurs à partir d'analyses spatio-temporelles, pour des informations d'alerte précoce et de tendances à long terme (Figure 13). Les données fournies par MODIS au travers du projet FIRMS (*Fire Information for Resource Management System*) ont fait l'objet d'actions de validation scientifique par AGRHYMET en collaboration avec le CSE de Dakar. Elles doivent cependant être confrontées aux statistiques enregistrées sur le terrain par les services des Eaux et Forêts pour mieux comprendre les variabilités interannuelles.

Par rapport au calendrier agro-sylvo-pastoral, les feux détectés dans les deux premières décades d'octobre au Sahel peuvent être considérés comme précoces donc moins nocifs que les autres. En revanche, les foyers de feux détectés en saison sèche (mars-avril) dans la zone pastorale sont localisés autour des zones humides (delta intérieur du Niger, lac Tchad) souvent liés aux pratiques agricoles. Cette étude des fréquences des feux liés à la biomasse sur pied, de leur localisation et l'identification de deux périodes propices permettent de mieux prévenir les zones à risque.

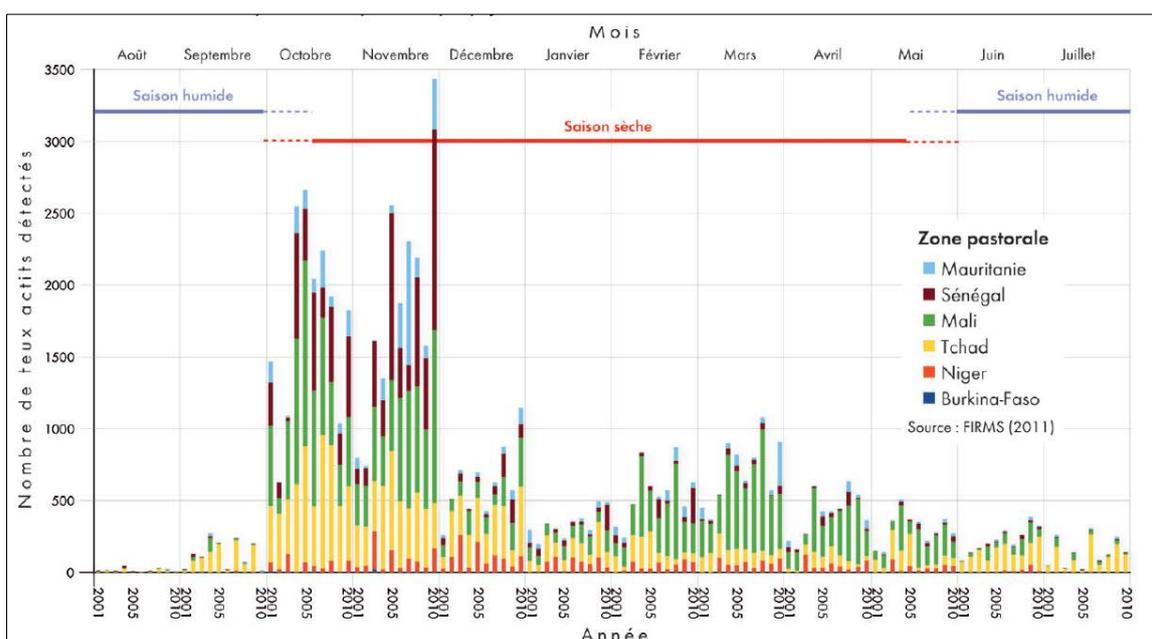


Figure 13 - Cumul mensuel du nombre de feux en zone pastorale par pays entre 2001 et 2010 établi à partir des données de FIRMS (Fire Information for Resource Management System). Source : Atlas des évolutions des systèmes pastoraux au Sahel 1970-2012 (FAO and CIRAD, 2012).

3. Le suivi des plans d'eau

L'analyse de certaines données satellitaires permet une caractérisation des plans d'eau, de leur remplissage et de leur niveau (cf. produit biophysique « surface en eau »). Dans les régions où le pastoralisme est dominant, la cartographie des plans d'eau (lac, mares en chapelet, petites retenues d'eau,...) destinés à l'abreuvement du bétail aux différentes époques de l'année est un outil d'aide à la décision qui n'est pas encore diffusé aux

éleveurs ; ces derniers disposent d'un système d'information traditionnel par voie orale, récemment complété par la téléphonie cellulaire.

En conclusion, il existe des systèmes de suivi opérationnels des zones pastorales aux échelles nationales et régionales. Ces systèmes sont basés sur la cartographie des anomalies de croissance, l'estimation de la production de biomasse à partir de NDVI et la cartographie des feux. Il est important de signaler également l'existence de produits de localisation et de suivi des points d'eau qui est une information importante pour cartographier la disponibilité en eau pour les troupeaux. D'autres produits sont actuellement du domaine de la recherche, tels que (i) l'inventaire floristique des zones pastorales (Ferner *et al.*, 2013) qui nécessite des données hyperspectrales non accessibles actuellement par télédétection satellitaire ; (ii) la cartographie de la dégradation/restauration des pâturages qui nécessite le calcul des tendances des NDVI à moyen et long terme, mais aussi l'analyse délicate de ces tendances en termes de pluviométrie et/ou d'exploitation de ces zones herbacées (e.g. Dardel *et al.*, 2014 ; Mitchard and Flintrop, 2013) ; ces analyses font encore débat dans la communauté scientifique.

V. L'estimation des rendements des cultures

La détection des anomalies de croissance est un produit opérationnel de la télédétection. Convertir ces anomalies de croissance en perte de rendement est une opération complexe qui se heurte à de nombreuses difficultés d'ordre scientifique et technique.

L'estimation des rendements implique deux types d'approches qui sont de plus en plus complémentaires : la modélisation agro-climatique qui privilégie les facteurs climatiques et la dimension temporelle (le développement de la culture), et la télédétection qui apporte une dimension géographique et des informations sur le développement réel des plantes.

La palette de méthodes utilisant des données de télédétection pour estimer le rendement des cultures est très large et va de simples approches statistiques basées essentiellement sur le NDVI (Encadré 13) à l'utilisation de modèle de développement de plante plus complexes (voir les revues de Ferencz *et al.* (2004) et de Rembold *et al.* (2013) par exemple).

Encadré 13 - Pourquoi le NDVI est-il autant utilisé pour les estimations de production végétale ?

Depuis les années 80, il est clairement établi que le NDVI est un bon indicateur du fAPAR (fraction absorbée du rayonnement photosynthétiquement actif incident) auquel il est linéairement relié (Holben *et al.*, 1980; Tucker *et al.*, 1985). Cette dépendance est expliquée par leur sensibilité respective à la structure du couvert végétal (LAI, recouvrement du sol par la végétation, etc.) et aux propriétés optiques des feuilles. Depuis les travaux de Monteith (1972) on sait que la production de biomasse dans des conditions non limitantes est quant à elle linéairement reliée au fAPAR, faisant du NDVI un bon proxy de la production primaire.

1. Approches statistiques

La méthode la plus simple est sans doute la méthode de similarité, basée sur les analogies entre les conditions de l'année en cours et celles des années passées ; l'année en cours aura une forte probabilité d'avoir des rendements proches des années « ressemblantes ». La ressemblance est mesurée à partir de critères choisis (pluie totale, nombre de jours de sécheresse, NDVI moyen, etc.).

La plupart du temps les approches empiriques relient rendement et NDVI (monodate ou valeur intégrée sur une période variable). Cette approche permet de faire de la prévision de rendement si les relations empiriques sont établies avant la fin de la saison (du démarrage de la saison au maximum à la fin de la montaison par exemple ; voir CGMS). D'autres approches mixent données de NDVI et données agronomiques ou météorologiques (MARS-FoodSec par exemple) par des régressions multiples, ou d'autres outils statistiques. Enfin, le service de suivi des cultures, CropWatch, développé par la Chine, repose sur le calcul de proportions entre la différence d'indice de végétation entre deux années et la différence de rendement donné par les statistiques agricoles sub-nationales ou nationales (voir Section III. sur les systèmes d'alerte).

L'approche empirique souffre de deux problèmes majeurs : (i) tout d'abord, les modèles empiriques assument que la vigueur des plantes est directement reliée au rendement d'une culture donnée. Cette hypothèse forte ne tient que dans les cas où l'indice de récolte (le rapport grain/biomasse totale) est constant, ce qui est rarement le cas en milieu réel car il varie en fonction des stress de la plante

ou des variétés ; (ii) les modèles empiriques nécessitent un étalonnage qui se fait généralement à partir de données de terrain, de données statistiques agrégées à des échelles sub-nationales ou nationales, ou des sorties de modèle. On connaît la difficulté de se baser sur certaines données statistiques (qualité des données et agrégation sur des surfaces qui ne sont pas optimales pour la télédétection) ; les données de terrain sont difficiles à acquérir et le sont souvent sur des surfaces ou des périodes de temps restreintes qui limitent le domaine de validité du modèle, et enfin les sorties du modèle sont elles-mêmes dépendantes d'un grand nombre de facteurs.

2. L'utilisation de modèles de développement de plante

A l'autre extrémité de la palette de méthodes, la combinaison de données de télédétection et de modèles de développement de plante est intellectuellement plus satisfaisante car ces modèles basés sur la physiologie des plantes et le transfert radiatif dans les couverts végétaux, intègrent l'effet du climat, des sols et de la gestion des cultures dans l'estimation du rendement. Cette combinaison passe par l'utilisation de variables biophysiques (issues de l'imagerie) dans les modèles par forçage ou réétalonnage des modèles (voir Rembold *et al.* (2013) pour plus de détails). Cependant il n'existe pas d'exemple opérationnel de ce type d'approche car il faut un signal de culture pur (or la plupart des pixels des séries temporelles acquises à basse résolution sont mixtes), des données spatialisées sur l'environnement et sur la gestion agricole, et une bonne précision des algorithmes d'inversion du transfert radiatif permettant d'estimer correctement le LAI ou le fAPAR des cultures à partir de la radiométrie.

3. Des solutions mixtes

Les deux approches, statistiques ou modélisation, n'étant pas satisfaisantes à ce jour, de nombreux systèmes les combinent. C'est le cas de CGMS-CST (*Crop Growth Monitoring System - Statistical Toolbox*; Figure 14) qui est une boîte à outil interactive qui permet d'explorer les relations entre prédictors de rendement et les statistiques régionales. Les prédictors de rendement sont issus de la télédétection (essentiellement basés sur du NDVI : maximum, intégré, démarrage saison, longueur de la saison, etc.) et/ou des indicateurs dérivés de la modélisation (modèle WOFOST pour les céréales par exemple).

En Afrique, le système CGMS⁶⁵ (Encadré 14) a été adapté au contexte marocain par l'Institut National de la Recherche Agronomique du Maroc (Balaghi *et al.*, 2012) et par le JRC, et constitue un système national de suivi de la campagne agricole et de prédiction agrométéorologique des récoltes céréalières à l'échelle du pays.

Encadré 14 - Le système d'information agro-météorologique CGMS (*Crop Growth Monitoring System*)

Le système d'information agro-météorologique CGMS (e.g., Genovese and Bettio, 2004) a été développé au sein du projet MARS du Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne. Le but principal de CGMS est d'estimer l'influence des conditions météorologiques sur la croissance des cultures et le rendement à l'échelle régionale (provinces, pays, continents).

1. Les données météorologiques quotidiennes sont interpolées sur une grille régulière. En l'absence de réseau dense de stations, l'estimation des pluies par satellite (complétées par des données de terrain si possible) fournit une bonne estimation décadaire des précipitations en temps quasi réel. Ces données météorologiques sont utilisées comme données d'entrée dans le modèle de croissance des cultures, mais fournissent également des indicateurs météorologiques qui ont une valeur pour l'interprétation des conditions de croissance des cultures (ex. des événements météorologiques extrêmes).

2. Les données météorologiques interpolées sont combinées avec des données de cultures (modes de gestion, variétés) et des données sur les sols pour simuler la croissance et le développement des cultures, en utilisant les modèles WOFOST pour les cultures arables (Boogaard *et al.*, 2014) et LINGRA pour les cultures herbagères (Schapendonk *et al.*, 1998). Ces modèles fournissent des estimations de biomasse et de rendement à un pas quotidien.

CGMS est en définitive une plateforme puissante d'aide fournissant les différents indicateurs et les outils (tendances, année similaire) permettant à l'analyste de retenir chaque mois et en fonction des cultures et pays, les hypothèses les plus réalistes, tout en traçant les choix qui font l'objet d'une évaluation en fin de campagne avec les résultats.

⁶⁵ <http://www.cgms-maroc.ma/>

Encadré 14 - Le système d'information agro-météorologique CGMS (*Crop Growth Monitoring System*)

Le système d'information agro-météorologique CGMS (e.g., Genovese and Bettio, 2004) a été développé au sein du projet MARS du Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne. Le but principal de CGMS est d'estimer l'influence des conditions météorologiques sur la croissance des cultures et le rendement à l'échelle régionale (provinces, pays, continents).

1. Les données météorologiques quotidiennes sont interpolées sur une grille régulière. En l'absence de réseau dense de stations, l'estimation des pluies par satellite (complétées par des données de terrain si possible) fournit une bonne estimation décadaire des précipitations en temps quasi réel. Ces données météorologiques sont utilisées comme données d'entrée dans le modèle de croissance des cultures, mais fournissent également des indicateurs météorologiques qui ont une valeur pour l'interprétation des conditions de croissance des cultures (ex. des événements météorologiques extrêmes).

2. Les données météorologiques interpolées sont combinées avec des données de cultures (modes de gestion, variétés) et des données sur les sols pour simuler la croissance et le développement des cultures, en utilisant les modèles WOFOST pour les cultures arables (Boogaard *et al.*, 2014) et LINGRA pour les cultures herbagères (Schapendonk *et al.*, 1998). Ces modèles fournissent des estimations de biomasse et de rendement à un pas quotidien.

CGMS est en définitive une plateforme puissante d'aide fournissant les différents indicateurs et les outils (tendances, année similaire) permettant à l'analyste de retenir chaque mois et en fonction des cultures et pays, les hypothèses les plus réalistes, tout en traçant les choix qui font l'objet d'une évaluation en fin de campagne avec les résultats.

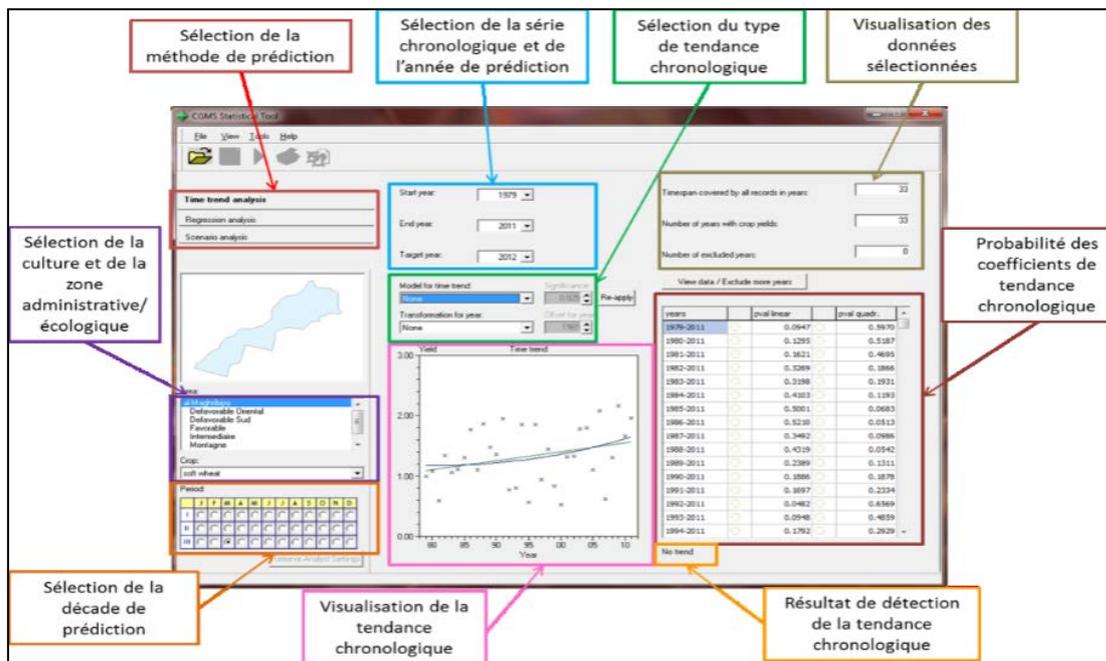


Figure 14 - Exemple de CGMS Statistical Toolbox sur le Maroc (CGMS-MA ; Balaghi et al., 2012).

En marge de ces approches, il est intéressant de citer le modèle SPAM (*Spatial Production Allocation Model*) développé par l'IFPRI pour générer des cartes de surfaces cultivées et de rendement par espèce cultivée. Ce modèle utilise une approche d'entropie croisée pour désagréger les statistiques agricoles (surface, puis rendement). Il utilise en entrée des cartes du domaine agricole obtenu par télédétection, des cartes d'aptitude, et de multiples données socio-économiques. Les résultats sont utilisés par le programme Harvest Choice (HarvestChoice, 2013) et pour les actions de l'IFPRI en Afrique de l'Ouest et de l'Est. Les cartes peuvent être visualisées sur le site MapSpam⁶⁶ (You et al., 2015).

⁶⁶ <http://mapspam.info/data/>

4. Bilan et perspectives

Bilan

Globalement, il n'existe pas de système opérationnel de prévision/estimation des rendements satisfaisant à ce jour, et ce malgré de très nombreuses recherches et cas d'études au travers des projets européens.

Les raisons de ce manque sont multiples. Au-delà des difficultés précédemment évoquées (lien indirect entre des indices de végétation et le rendement des cultures, difficulté de paramétrisation des modèles de plante sur de grands espaces), les caractéristiques des images de télédétection actuelles sont inadéquates pour mettre en œuvre un système efficace de prévision/estimation des récoltes en Afrique.

En effet, tout le monde s'accorde pour dire que quel que soit la méthode, il faut des **séries temporelles de bonne qualité radiométrique**, et ceci aussi n'est pas encore acquis. D'importants progrès ont été faits en corrections atmosphériques (corrections empiriques par synthèse, ou correction physique par transfert radiatif), mais il reste toujours des perturbations atmosphériques et directionnelles résiduelles. De plus, les efforts doivent être poursuivis sur la mise en cohérence des différents systèmes d'observations de la Terre afin d'assurer des archives cohérentes.

Ensuite, il faut appliquer la méthode à des pixels agricoles et donc avoir à disposition un **masque du domaine cultivé**. Ce masque reste difficile à produire pour le continent africain où les systèmes agricoles sont très diversifiés et les surfaces agricoles fragmentées, même si d'importants progrès ont été faits dans ce domaine (voir Section I. sur l'occupation du sol). Toutefois, dans certaines régions, le masque des surfaces cultivées n'est pas un passage obligé car la végétation dans une région intègre les conditions de croissance de la même façon (Kastens *et al.*, 2005). L'idéal serait d'avoir **des masques de culture spécifiques** aux différentes espèces, ce qui soulève une difficulté supplémentaire car nécessitant une mise à jour annuelle pour tenir compte des rotations (alors que le masque du domaine cultivé varie peu d'une année à l'autre). Mais cette mise à jour ne serait obtenue qu'en fin d'année ce qui préviendrait toute prévision de récolte. Une solution à étudier serait la combinaison d'images à haute résolution et à basse résolution.

L'utilisation de modèle agro-météorologique pour la prévision de rendement nécessite des **données pluviométriques journalières**, voire décadaires. La densité du réseau africain de stations pluviométriques, et le fonctionnement des Météorologies Nationales, ne facilitent pas l'accès à ces données sur l'ensemble du territoire africain. Les estimations satellitaires sont donc la source principale de données pluie utilisée (Voir Section 3.2.1.). Ramarohetra *et al.* (2013) ont montré que ces estimations pouvaient introduire de larges biais dans la simulation du rendement suivant la culture et la région étudiée. Les produits satellitaires calibrés à partir des données de terrain sont les produits qui ont les biais les plus faibles.

Enfin, il est important de remarquer que la majorité des méthodes sont basées sur des données issues des **statistiques nationales ou sub-nationales**, utilisées comme données de référence pour établir les modèles empiriques (CROPWATCH), comme données d'entrée dans les modèles de désagrégation (SPAM) ou comme données de validation des approches de modélisation. Or la qualité des données statistiques n'est pas toujours optimale dans les pays d'Afrique (voir la Section VI. sur les statistiques agricoles), les prévisions/estimations basées sur ces données ne peuvent être satisfaisantes. De plus les statistiques sont données par unité administrative dont les limites ne sont pas toujours cohérentes par rapport aux limites agro-climatiques qui devraient servir d'unité de base pour l'établissement de modèle. Il est ainsi important de rappeler l'importance de maintenir et renforcer les statistiques agricoles nationales et l'intérêt de disposer (en dehors des résultats agrégés) des données géo-localisées d'enquête sur les rendements pour des développements futurs.

Des perspectives importantes à court/moyen terme

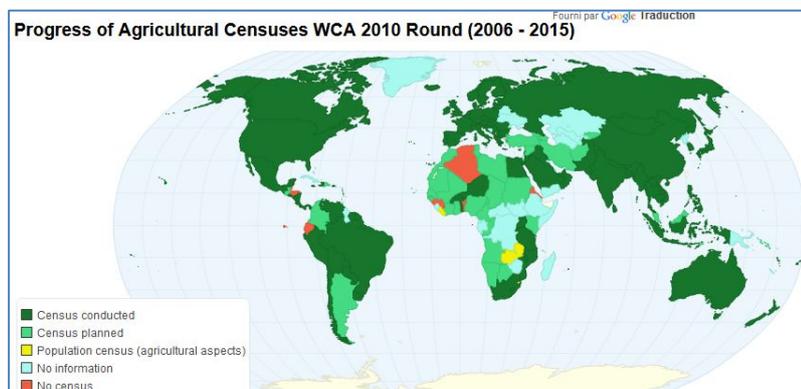
L'estimation des rendements des cultures est, depuis de nombreuses années, l'objet de nombreuses recherches et d'études de cas en Afrique, qui n'ont pas encore abouti sur un système opérationnel. Les systèmes actuels de prévision/estimation du rendement mettant en œuvre des données de télédétection tiennent davantage du tâtonnement que d'un processus méthodologique reproductible ; ils peuvent être lourds à mettre en œuvre, et ne donnent pas obligatoirement des résultats significativement plus intéressants que les produits d'anomalies de croissance. On peut espérer que les progrès en matière d'offre d'images (aujourd'hui Sentinel-2, à moyen/long termes THIRSTY dans l'infrarouge thermique), de techniques d'utilisation de données

multi-capteurs (optique/radar, haute résolution/moyenne résolution, optique réflectif/thermique, etc.), de techniques de traitement de données (ontologies, systèmes experts, couplage de données multi-sources, etc.) et d'amélioration des prétraitements (corrections radiométriques en particulier) permettra dans l'avenir des progrès importants.

VI. Les statistiques agricoles

1. Les systèmes de statistiques existants

En 2006, une évaluation commanditée par la FAO⁶⁷ a fait un constat sévère de la situation des systèmes nationaux de statistiques agricoles africains. La plupart d'entre eux, créés dans les années 60, sont devenus inopérants et leur contribution aux systèmes nationaux de statistiques ainsi qu'au système global piloté par la FAO (WCA, FAOSTAT) est actuellement marginale. Ce constat intervient alors que l'agriculture fait face à de nouveaux enjeux (changement climatique, sécurité alimentaire, contribution aux questions environnementales, etc.) et qu'elle est récemment redevenue une priorité dans l'agenda des politiques de développement et de réduction de la pauvreté⁶⁸. Le besoin de produire des statistiques agricoles fiables et actualisées est ainsi une nécessité.



⁶⁷ Independent External Evaluation of the Food and Agriculture Organization (Tefft, McGuire, and Maunder 2006)

⁶⁸ Rapport sur le développement dans le monde. L'agriculture au service du développement (Banque mondiale, 2008)

Figure 15 - Contribution nationale au Programme du recensement mondial de l'agriculture de la FAO (FAO 2015).

En 2010, la FAO, conjointement avec la Banque Mondiale, a élaboré une stratégie globale pour relancer et améliorer la production de statistiques agricoles et rurales⁶⁹. Parmi les priorités, il s'agit de mettre en place des systèmes beaucoup plus efficaces et mieux intégrés aux systèmes nationaux de statistiques. En effet, pour mieux éclairer les nouveaux enjeux de développement, il est nécessaire de croiser les données agricoles avec des données démographiques et socio-économiques.

Différentes expertises et méta analyses ont été réalisées (FAO, 2014 ; FAO, 2015), en s'appuyant sur les expériences et résultats de projets et de systèmes existant, notamment en Europe (projet MARS) pour proposer de nouvelles méthodes de production de statistiques agricoles (estimation des surfaces cultivées et des rendements). La mobilisation des données de télédétection associées à l'utilisation de nouveaux outils de géolocalisation et d'analyse spatiale (GPS, SIG, etc.) est considérée comme une source d'amélioration des techniques actuelles.

2. Les apports de la télédétection

Les données de télédétection sont mobilisées pour produire des statistiques agricoles depuis la fin des années 1980, notamment grâce au programme *Monitoring Agricultural ResourceS* (MARS) financé par la Commission Européenne pour expérimenter et mettre au point des outils et méthodes pour améliorer le suivi de l'agriculture et l'évaluation de la politique agricole commune (PAC). Depuis devenue une unité au sein du Joint Research Center (JRC), de nombreux travaux ont été publiés sur les apports potentiels de la télédétection sur les statistiques agricoles (Gallego, 2004 ; Carfagna and Gallego, 2005 ; Keita and Carfagna, 2010 ; JRC, 2009). Ils ont d'ailleurs nourri les nombreuses synthèses méthodologiques publiées pour alimenter la stratégie globale promue par la banque mondiale et la FAO.

Trois options principales se dessinent et se distinguent par leur niveau d'opérationnalité : l'aide à la conception des plans échantillonnage,

⁶⁹ FAO, World Bank and United Nations Statistical Commission (2010) Global Strategy to Improve Agricultural and Rural Statistics, FAO, Rome.

l'amélioration des résultats d'un sondage classique sur la base d'échantillonnage et la cartographie des cultures.

L'aide à la conception des plans échantillonnage : Traditionnellement les dispositifs de statistiques agricoles, en particulier pour estimer les surfaces cultivées, s'appuient sur un réseau de points de mesures in situ qui est organisé selon un plan d'échantillonnage, hiérarchisé selon différentes échelles. Ces dispositifs qui sont lourds et coûteux à maintenir, sont souvent soumis à des difficultés de mise en œuvre liées à l'enclavement de certaines zones ou à la mise à jour de certains points pour prendre en compte les évolutions de l'occupation du sol (parcelles bâties, en particulier).

Dans le cas de dispositif d'échantillonnage à base aréolaire, l'utilisation d'images satellites ou de produits dérivés (carte d'occupation du sol issues de classification d'image) peut contribuer à la conception d'un plan d'échantillonnage au niveau national. Les données satellitaires peuvent être mobilisées dans tout le processus de construction, de la stratification (par exemple isoler l'emprise agricole ou délimiter des grandes régions agricoles) à la localisation et cartographie des parcelles d'échantillonnage (Figure 16).

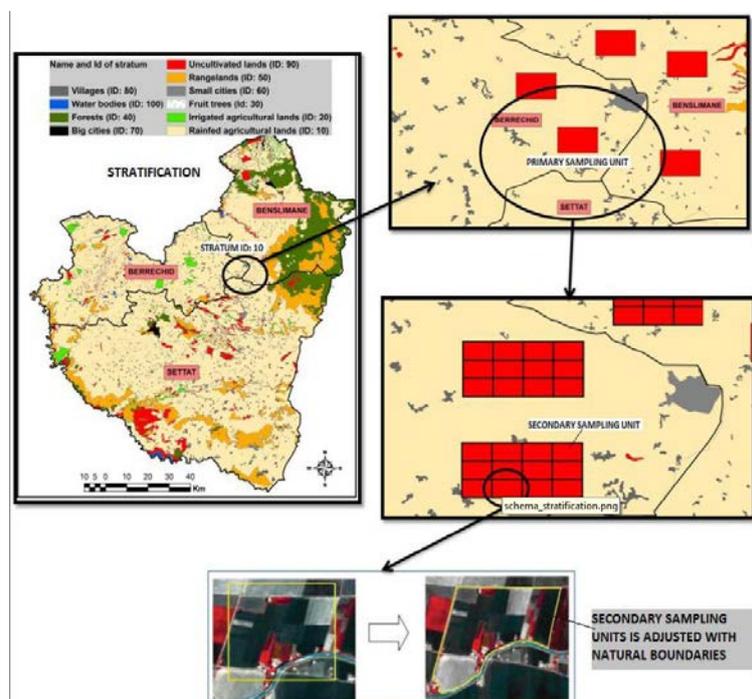


Figure 16 - Exemple d'un plan d'échantillonnage au Maroc (extrait du projet E-agri).

Outre les avantages en termes de mise en œuvre (une automatisation de certaines procédures est possible), de coût et de mise à jour (Figure 17), les résultats sont plus fiables. Au Maroc en 2009, la comparaison des deux méthodes (traditionnelle et à base d'imagerie satellitaire) montre un coefficient de variation pour l'estimation des surfaces agricoles de 11 provinces qui passe de 12% à 6%. Enfin l'intégration nécessaire dans un système d'information géographique va faciliter le couplage avec d'autres bases statistiques. C'est le cas par exemple du ministère de l'Agriculture marocain qui est en train de bâtir un vaste système d'information agricole (suivi des prix, prévision agro-climatique, tableau de bord économique, etc.).

Comparison at different steps		
	Current method	New method
Stratification	Topographic maps (old, high scale, manual)	Images (update on request, various scale, digital, use of remote sensing, photo-interpretation, coordinates database)
Zoning	Manual on the topographic maps (Difficult to update), sizes predefined	Vector (large possibilities to change) sizes configurable
Zones Sampling Frame (PSU)	Extracted manually and entered into computer	Extracted automatically
Segments (SSU)	Manual, use of Areal photos	Vector (Large possibilities to change) sizes configurable, geo-referenced
Identification	difficult	Easy to identify (recent images, integrate coordinates)

Figure 17 - Les avantages d'une méthode d'échantillonnage mobilisant de la télédétection au Maroc (FAO 2009).

Cette configuration est assez proche des orientations proposées par les experts de la Banque Mondiale (Vogel and Carletto, 2012). L'imagerie satellitaire représente ainsi le point de départ de l'intégration et la mise en cohérence de multiples données statistiques (Figure 18).

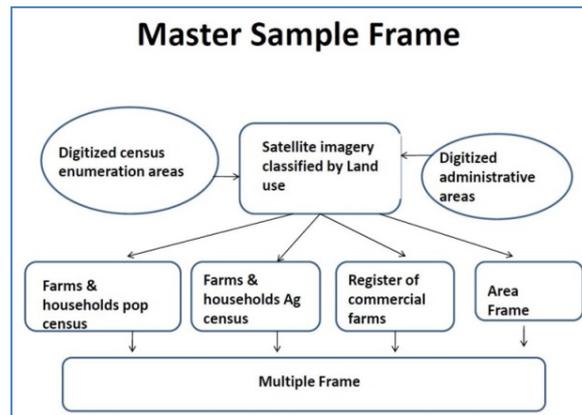


Figure 18 - La place de l'information satellitaire dans l'élaboration d'un schéma directeur statistique (Vogel and Carletto 2012).

L'amélioration des résultats d'un sondage classique sur la base d'échantillonnage : Des cartes d'occupation du sol, issues de classification d'images satellitaires peuvent être utilisées comme variables auxiliaires pour calculer un estimateur de régression ou de calibration qui améliorera les résultats d'estimation de surfaces réalisée par sondage.

En disposant d'une carte des cultures sur toute la zone d'étude, il est possible de mobiliser ces résultats pour corriger le biais d'échantillonnage de terrain. Pour une classe d'occupation donnée on compare les résultats (surfaces) obtenus dans les segments échantillonnés avec les chiffres obtenus avec l'image satellitaire (Figure 19).

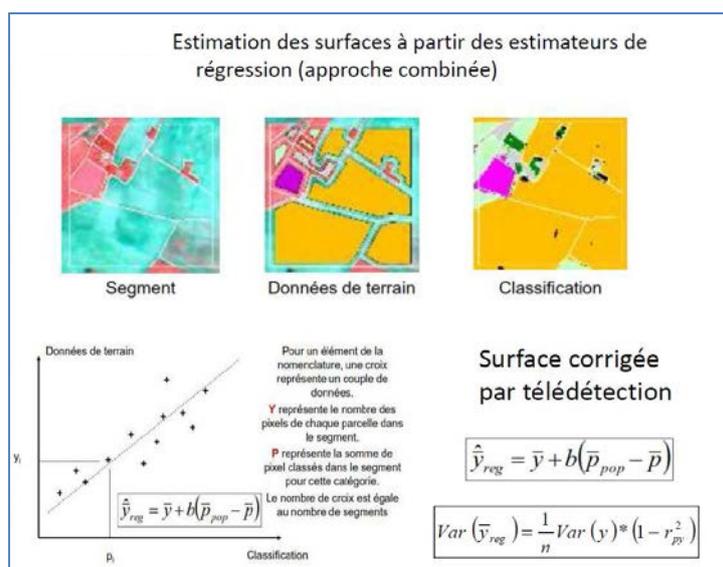


Figure 19 - Apport de la télédétection pour améliorer l'estimation par

sondage, Tunisie (Talhaoui 2014).

La qualité de la correction n'est pas directement dépendante de la qualité cartographique de la classification de l'image (Gallego, 2006). Néanmoins elle est plus efficace dans des régions avec du grand parcellaire et une faible diversité de cultures. Le principal intérêt de cette approche est qu'il permet potentiellement de réduire la taille de l'échantillon de points ou de segments de sondage. En calculant l'efficacité relative qui est le ratio entre les deux types de variances calculées (échantillonnage /image), il est possible de déterminer, d'une part, la réduction possible de l'échantillonnage de terrain, et d'autre part, d'évaluer l'intérêt économique de la télédétection, connaissant les coûts de sondage et ceux liés à la classification d'image. La mise en œuvre de la télédétection ayant un coût relativement fixe, son intérêt économique sera d'autant plus fort – et cela est contre intuitif- que les enquêtes aréolaires.

3. La cartographie des cultures

Par classification d'images : La classification d'image ne permet pas d'obtenir de résultats très précis. Ainsi en Europe, dans le cadre du projet MARS, avec des images Landsat ou SPOT, la précision ne dépasse pas 70 à 80%, dans des régions à grand parcellaire et peu diversifiées (Gallego, 2006). Néanmoins cette approche doit être envisagée dans des contextes où il n'est pas possible d'avoir un échantillonnage de points de sondage (situations d'insécurité, etc.). Dans ce cas de figure, la classification d'images de résolutions moyenne peut s'appuyer sur un échantillonnage d'image de très haute résolution (JRC, 2009).

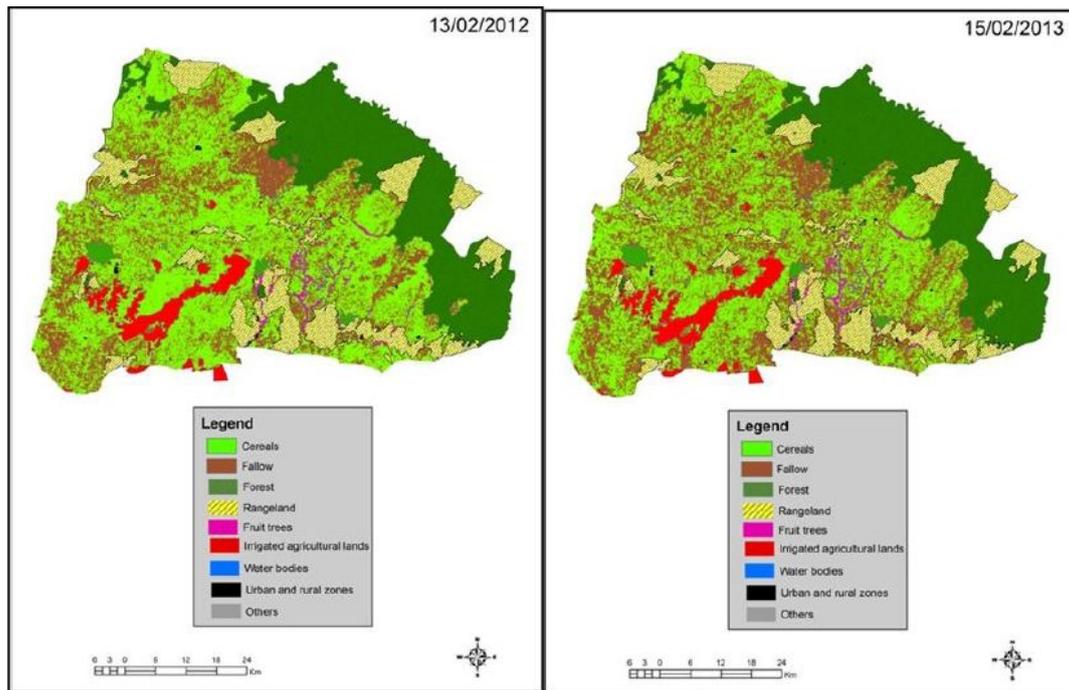


Figure 20 - Exemple de carte d'occupation du sol annuelle d'une province marocaine (Mahyout *et al.* 2013).

Dans le cadre du projet **Crop monitoring as an E-agriculture tool in developing countries**, des applications pilotes ont été développées, adaptant les méthodes et outils du projet MARS, dans les pays du Maghreb. Ainsi au Maroc, la classification d'images Landsat pour produire des statistiques d'occupation agricole, à l'échelle de province, a été testée et comparée avec la méthode classique d'estimation par sondage. Les résultats obtenus sur trois provinces sont très proches des statistiques agricoles. Néanmoins il n'est pas possible de distinguer par télédétection les trois principales espèces de céréales cultivées (Figure 20). Enfin la conclusion de l'étude relève que le prochain défi sera de passer du niveau provincial au niveau national.

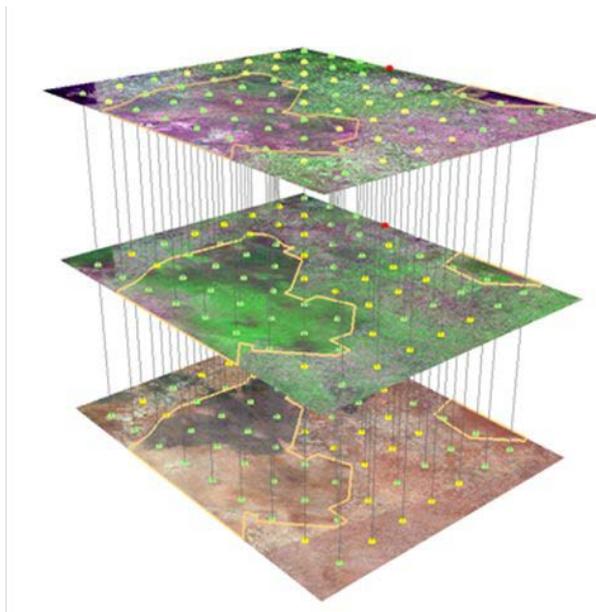


Figure 21 - Représentation de la trame de points d'échantillonnage se superposant aux différentes images LANDSAT (source USGS).

Par photo interprétation : Pour cartographier l'occupation du sol et son évolution temporelle sur de vastes superficies (échelle nationale), les méthodes de classification d'images doivent notamment résoudre des problèmes liés à la diversité des images disponibles (période d'acquisition et capteurs différents). La photo interprétation, si elle requiert un investissement important en temps et en personnel, a l'avantage de pouvoir s'affranchir de ces difficultés.

A l'échelle nationale, des résultats intéressants ont été obtenus par USGS-FEWS NET dans le cadre du projet *West Africa Land Use and Land Cover Trends Project*⁷⁰ qui a produit une cartographie de l'occupation du sol dans 12 pays d'Afrique sub-saharienne en concevant une méthode mobilisant la photo-interprétation et produisant des résultats rapidement (Tappan *et al.* 2004). Le principe est de créer une grille de points d'échantillonnage (Figure 21) qui seront classés par l'opérateur en la superposant à des images LANDSAT selon une nomenclature définie. Une carte est ensuite générée à partir des résultats de cette trame. Un outil⁷¹ a été développé pour faciliter l'ensemble du processus

⁷⁰ <http://lca.usgs.gov/lca/africalulc/approach.php>

⁷¹ « Rapid Land Cover Mapper » (RLCM)

de cartographie. Des cartes d'une résolution de 2 km ont été ainsi produites à deux périodes différentes (1975 et 2000), permettant de mesurer et de cartographier les changements d'occupation du sol.

Plus récemment, la mise en production d'images à très haute résolution (satellite Pléiades) dont la résolution est équivalente à celle d'une photo aérienne, a fait l'objet de projets pilotes de cartographie par photo-interprétation (les méthodes de classification et de segmentation ne sont pas pour l'instant opérationnelles à cette résolution). En Algérie, une méthode de cartographie des céréales a été testée et évaluée (Tria *et al.*, 2014) à l'échelle communale. La précision obtenue est supérieure à 95%. Néanmoins ce type de méthode est contraint par le coût élevé des images (7 €/km²). Elle pourrait être envisagée soit en appui à des projets de développement localisé, soit dans une stratégie d'échantillonnage en combinaison avec des images de résolution inférieure.

4. Bilan et perspectives

Il n'existe pas encore de dispositifs de production de statistiques agricoles mobilisant de la donnée satellitaire qui soit opérationnel à un échelon national en Afrique. Néanmoins les différentes expérimentations, généralement à l'échelle régionale, montrent des résultats encourageants. Si des résultats probants ont été obtenus (cf. projet e-agri) dans les pays du Maghreb, ils concernent une zone agroclimatique spécifique et une sole agricole majoritairement constituée de céréales sèches qui représentent des conditions très favorables pour la télédétection. Plus au sud, de nouvelles contraintes sont à résoudre. En zone sahélienne et surtout soudanienne, la stratégie d'échantillonnage couplée avec de la télédétection doit s'adapter à des systèmes de production qui se caractérisent par une plus grande variété de cultures, de petites parcelles et des états du couvert qui peuvent être très hétérogènes pour une même culture. En zone subhumide, la forte nébulosité et l'existence de systèmes agroforestiers, complexifient l'utilisation de données satellitaires. Si l'utilisation de données satellitaires conserve toujours son intérêt, à minima pour réaliser une stratification, des travaux de recherche doivent être menés pour adapter des méthodes existantes. En outre, en complément d'une offre en imagerie déjà conséquente et diversifiée, la mise en place des programmes *Landsat Data Continuity Mission* et *Sentinel* qui assurent une couverture globale à haute résolution et actualisée, devraient favoriser l'émergence de nouvelles applications pour la statistique agricole.

La mobilisation de l'imagerie satellitaire pour la statistique agricole requiert également des investissements conséquents en termes de compétences et d'infrastructures (SIG, système d'information, plateforme web, etc.) pour gérer, d'une part, la production de données et leur mise à jour et, d'autre part, pour intégrer ces statistiques avec d'autres dispositifs (Figure 18). Enfin la question de la gouvernance de tels dispositifs et de leur déclinaison à différents niveaux d'organisation représente un vrai enjeu.

VII. Les assurances agricoles

L'assurance agricole a pour objectif de réduire les risques associés aux productions agricoles et pastorales. On distingue deux grands types d'assurance : (i) les assurances basées sur des déclarations (**assurance déclarative** classique au cas par cas) ; (ii) les assurances basées sur un indice d'estimation du degré des dégâts (**assurance indicielle**). L'assurance indicielle n'est appropriée que pour des événements d'une portée géographique importante et dont les risques sont covariants, c'est-à-dire affectant plusieurs individus en même temps, tels que les aléas climatiques (sécheresse, gel/grêle, inondations...) ou les cours des marchés. La détermination du risque covariant peut se faire au travers d'indices sur la base desquels un seuil de remboursement est défini (ex : seuil de cumul de pluies).

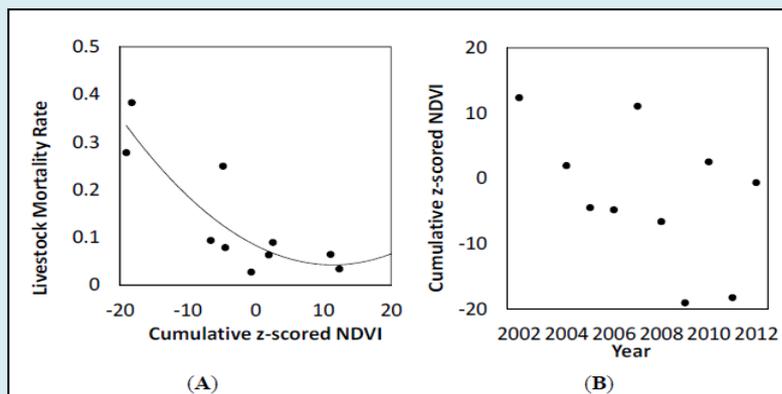
L'usage de la télédétection peut ainsi s'envisager dans la construction des indices, mais également en apportant une information spatiale complémentaire utiles pour les deux modes d'assurances : (i) par la localisation des zones touchées à des niveaux d'échelles variables en fonction des accidents potentiels ; (ii) par la caractérisation des zones concernées par l'assurance (actualisation ou amélioration des cartes d'utilisation des sols, plus particulièrement pour les pays en développement). Ces informations, en précisant l'ampleur et la situation probable des zones touchées, permettent de réduire fortement les coûts d'investigation (vérifications terrain...) ou encore de circonvier à d'éventuelles fraudes (de Leeuw *et al.*, 2014).

1. Les assurances indicielles pour le pastoralisme

Plusieurs initiatives portant sur l'utilisation de la télédétection pour l'assurance indicielle ont été développées, essentiellement dans le domaine des assurances pour le pastoralisme. Il a notamment été mis en évidence la capacité des indicateurs d'état de la végétation comme le NDVI ou le FAPAR

pour évaluer la biomasse végétale. La RMA (*Risk Management Agency*) de l'USDA a par exemple développé un indicateur basé sur le NDVI combiné avec des estimation des précipitations afin de pouvoir mettre en place des paiements d'indemnisation en cas de diminution du fourrage disponible pour les troupeaux. Le cas du Kenya peut également être cité où l'indice IBLI (*Index Based Livestock Insurance*) développé par l'ILRI (*International Livestock Research Institute*) a été appliqué depuis 2011 avec succès (Encadré 15). L'IBLI est basé sur le NDVI cumulé sur la saison des pluies et est corrélé à la mortalité animale observée à l'échelle des exploitations. Lorsque l'indice basé sur le NDVI est inférieur au seuil des 15% de mortalité prédite, les dédommagements sont alors alloués aux agro-pastoralistes avec une participation de l'état à hauteur de 30 à 40%.

Encadré 15 - L'exemple de l'IBLI (*Index Based Livestock Insurance*) développé par l'IRI au Kenya



Sources:
De Leeuw et al.
(2014).

L'IBLI est un indice basé sur le NDVI intégré sur la saison des pluies qui permet d'estimer la mortalité des troupeaux. Un modèle statistique non linéaire entre le NDVI et la mortalité des troupeaux observée à l'échelle des villages est mis en place (Figure A). La Figure B montre la variabilité inter-annuelle du NDVI et donc potentiellement celle de la production de fourrage sur onze années. Les années 2009 et 2011 apparaissent comme deux années déficitaires en termes de production de biomasse végétale.

2. Les assurances indicielles pour les cultures

La télédétection n'est pas, à notre connaissance, utilisée dans les assurances indicielles pour des dommages sur les cultures, mais plusieurs projets et études ont cherché à mettre en évidence ses performances et intérêts.

Concernant l'usage de la télédétection, on peut citer les projets suivants qui proposent des indices susceptibles d'être utilisés pour de l'assurance indicielle :

- AGRHYMET utilise un modèle de culture et des données Météosat pour établir des cartes de différents indices en cours de la saison des cultures (stock d'eau, état de stress hydrique) et d'estimation des rendements en fin de saison ;
- EARS utilise des données Météosat Seconde Génération pour estimer l'évapotranspiration et définir un indice de stress hydrique des cultures ;
- FEWS-Net utilise une estimation de l'évapotranspiration à partir d'images MODIS calibrées sur des rendements observés de communautés rurales ;
- GeoVille a développé un indice de démarrage de la saison des pluies à partir de données radars à faible résolution (projet GMFS) ;
- ITC s'appuie sur les séries historiques de NDVI sur les 15 dernières années calibrées sur les données de rendements à l'échelle départementale (cas d'étude au Sénégal) ;
- IRI a testé l'utilisation des données de la NOAA (RFE 2.0 ARC) pour l'estimation des pluies ;
- Sarmap a utilisé des données radar à haute résolution pour la création de cartes d'occupation des sols cultivés et la détection du démarrage de la saison des pluies.

3. Perspectives et contraintes de la télédétection et des systèmes indiciels

La télédétection offre l'opportunité d'une information spatialement exhaustive, objective et répétitive avec un délai d'accès semi instantané permettant la mise en place de système indiciel en temps quasi-réel (délai d'acquisition de la journée de quinze jours selon les indices utilisés). La télédétection permet aussi une description et un suivi des zones touchées qui est un complément très utile permettant d'optimiser fortement les coûts d'investigation pour les deux types d'assurance (déclarative ou indicielle).

Finalement, malgré un grand nombre d'études et projets faisant état des potentiels de la télédétection (voir la revue de de Leeuw *et al.*, 2014), il n'existe qu'un faible nombre d'exemples d'utilisation de la télédétection dans le cadre des assurances, avec participation ou non de l'Etat. Parmi ceux-ci on peut citer l'USDA (*United State Department of Agriculture*) qui utilise la télédétection pour le suivi des fraudes et l'estimation des risques de dégâts par inondations dans

le cadre des assurances par déclaration. Dans le cadre des assurances indiciaires, l'USDA aux Etats-Unis pour les pâturages ou l'ILRI en Afrique de l'Est (Ethiopie, Kenya) ont mis en place des indices basés sur la combinaison de données de pluies mesurées au sol avec des indices de végétation, avec dans les deux cas une participation des Etats. Plusieurs problèmes, liés soit à la donnée, soit à la mise en place d'un système indiciaire, peuvent expliquer cette utilisation « opérationnelle » encore limitée de la télédétection pour les assurances agricoles :

La continuité des capteurs et l'accès aux données: Les programmes d'évolution, de lancement de nouveaux capteurs et satellites sont très difficiles à prévoir et dépendent des stratégies de développement des Etats. D'autre part il n'y a aucune garantie quant à la continuité d'accès aux données. On peut par exemple citer le cas de l'IBLI de ILRI qui était initialement basé sur les données AVHRR et qui, suite à l'interruption des données AVHRR en janvier 2010, a dû basculer sur les données MODIS. La problématique de la continuité des données a néanmoins été prise en considération par les membres de la communauté scientifique et par les agences spatiales, et plusieurs missions en cours ou à venir (ex : Sentinel 2 ou PROBA-V) vont d'ores et déjà dans ce sens (de Leeuw *et al.*, 2014). Par ailleurs, l'acquisition, le traitement, la gestion et la diffusion de gros volumes de données impliquent des moyens de stockage, des puissances de calculs importants, ainsi que des connexions internet performantes. Dans le cadre d'une opérationnalisation des méthodes et d'un transfert de compétences auprès des acteurs locaux, il semble fondamental que les méthodes de prétraitements des données et d'accès aux données archivées soient prises en compte par les agences de télédétection et/ou de diffusion.

La perception des assurés et la contractualisation : les méthodes indiciaires impliquent, par défaut, une surestimation ou sous-estimation des dégâts pour un certain nombre de clients. Ceci joue beaucoup sur la confiance que ces derniers peuvent porter à l'égard de ce type d'assurance où le mode de remboursement par seuils et la qualité des indices et de leur répartition spatiale sont la cause des erreurs d'estimation. Le mode de contractualisation est aussi un problème fondamental, particulièrement dans les pays en voie de développement où le niveau de richesse est si faible qu'il pose en premier lieu la question de la possibilité d'achats de semences ou d'intrants. Des exemples de micro-emprunts et d'emprunts sécurisés ont montré des résultats qui semblent plus attractifs et favorables au développement d'activités plus

intensives. Dans ce contexte on peut citer le projet ProAgroMais mis en place avec succès au Brésil par le ministère du Développement Agricole dans le cadre du Programme pour le renforcement de l'agriculture familiale. Cette assurance indicielle, où les emprunts sont sécurisés à 100%, est basée sur des sorties d'un modèle de culture utilisant les données de réseaux de pluviomètres au sol⁷².

Les performances et qualité des indices : la qualité des données optiques sur lesquelles sont basées la plupart des assurances indicielles dépend fortement des conditions atmosphériques et de l'enneuagement au moment de l'acquisition. Le bruit engendré par ces perturbations en conjonction avec la faible résolution spatiale de la plupart de ces données se traduit par des discontinuités dans le temps et l'espace, qui peuvent être difficilement exploitables, et qui ont pour conséquence l'instabilité des indices dérivés. Cependant, il existe plusieurs méthodes de prétraitement et de remplacement des données manquantes qui peuvent améliorer la qualité des données.

D'autre part les indices montrent aussi des biais dans l'estimation de l'objet étudié : par exemple différentes études montrent des biais assez forts selon les régimes pluviométriques (Ramarohetra *et al.*, 2013 ; Casse *et al.*, 2015). Dans ce contexte c'est l'optimisation du réseau de mesures au sol (pluviomètres...) permettant de calibrer ces indices qui doit être abordé pour améliorer les performances des indices. Principalement dans les pays en voie de développement on a une forte dégradation de ces réseaux ; des recherches sur l'utilisation des réseaux d'antennes de téléphonie mobile pour estimer les pluies (Doumounia *et al.*, 2014) pourraient déboucher à moyen/long terme sur un nouveau type de réseau sol de mesures de la pluie, qui optimiserait en retour la qualité prédictive des modèles utilisant des données satellites.

La résolution des capteurs et la pertinence des indices doit surtout s'analyser en fonction de la résolution des déterminants de la variabilité de ces indices : (i) dans le cas typique des systèmes d'alerte précoce tournés vers les grands décideurs, les résolutions actuelles spatiale et temporelles semblent suffisantes ; (ii) dans les cas d'études axées sur des communautés rurales, les nouvelles missions satellitaires de type Sentinel-2 sont plus adaptées.

La problématique majeure émergente est la pertinence de l'indice utilisé au regard de l'objet étudié.

⁷² <http://sarra-h.teledetection.fr/Historique.html>

VIII. Les crues et inondations

Une crue est le débordement d'un fleuve de son lit mineur vers sa plaine d'inondation. La crue est une conséquence de fortes pluies dans le bassin versant en amont. Le changement climatique a une conséquence sur l'accroissement de la fréquence des événements extrêmes, aussi bien crues que sécheresses. Les crues fréquentes et catastrophiques qui affectent certaines régions du monde ont souvent des origines complexes: montée du niveau des mers, augmentation de la population dans les zones inondables, urbanisation du bassin versant augmentant la quantité d'eau ruisselée très rapidement après une forte pluie (imperméabilisation des surfaces), augmentation de la part d'eau ruisselée par rapport à la part de l'eau qui s'infiltré dans les sols (modification de la couverture végétale, déforestation).

On distingue traditionnellement divers types de crues en fonction de la rapidité de la montée des eaux: crues éclair, crues rapides ou crues lentes. La crue lente correspond en général aux grands fleuves en zone tropicale ou il existe une alternance des saisons des pluies et des saisons sèches. Elle est souvent attendue par les populations et ne présente pas d'aspect catastrophique, sauf en cas de crue extrême. Dans certains cas elle peut même être considérée comme un bienfait pour la fertilisation des terres (crue du Nil dans les temps anciens). Les crues éclair sont souvent catastrophiques (crues cévenoles). Il n'existe aucun système opérationnel de suivi ou de prévision des crues éclairs basées sur des données de télédétection. Dans les pays à forte densité de stations de mesures limnimétriques in situ, tous les systèmes de prévision du risque crue sont basés sur la surveillance des réseaux de mesures traditionnelles.

1. Systèmes pré-opérationnels de suivi des inondations

Le pilote inondation du CEOS sera mis en œuvre de 2014 à 2016. Les contributions au pilote viennent de la NASA (MODIS, LANDSAT, EO-1, GRACE, SMAP, TRMM/GPM), NOAA (inondations-éclair), CSA (Agence Spatiale Canadienne ; RSAT-2), ESA (TIGER and TIGERNET en Afrique australe, SMOS, Sentinel-1), HRC (Hydrological Research Center ; système de surveillance mondiale des crues éclairs), Deltares (modélisation FP7-RASOR utilisant le Modèle de Terrain TanDEM-X), CNES (Données Kal Haiti), ASI/Telespazio (Cosmo-SkyMed), CIMA (plateforme RASOR - voir ci-après -

dans les Caraïbes), Université du Colorado (RiverWatch), Université du Maryland (modélisation).

Projet **RASOR** (*Rapid Analysis and Spatialisation Of Risk*, 2013 – 2016), financé par l'UE : plateforme d'analyse multirisque basée sur le nouveau modèle de terrain TANDEM-X à 12 m de résolution, et sur des données multi-sources THRS produites en temps quasi-réel optique et radar.

EarthH2Observe: Observation de la Terre pour une évaluation intégrée des ressources en eau à l'échelle mondiale, Ce projet collaboratif du 7^{ème} PCRD, démarré en janvier 2014 pour 48 mois, propose une amélioration des produits d'observation de la Terre et la combinaison multi-capteurs (GRACE, Cryosat-2, SMOS, ASCAT, EUMETSAT, Envisat ASAR et MERIS, ERS-1/2, COSMO-SkyMed X-SAR, TerraSar-X et Tandem-X, Meteosat, MODIS, Landsat TM, GPM, TRMM, Megha-Tropiques, AMSU-A/B, AMSR-E, AMSR-2, ATMS, MeTOp-B, AVHRR, Topex/Poseidon, Jason-1 et 2, VIIRS, AATSR, Sentinel-1, 2,-3) couplée à de la modélisation.

Copernicus GIO EMS (*GMES Initial Opération - Emergency Management Service*) dont les inondations.

Les projets **PUMA**, **AMESD** et **MESA** (voir p. 39).

Encadré 16 - Les catastrophes de l'été 2013 ; Consultation nationale sur le Cadre d'Action post-2015 pour la réduction des risques de catastrophe des Nations Unies.

- les inondations du Burkina Faso (août 2013), où quatre régions ont été affectées avec au moins 751 habitations et 6712 personnes touchées ;
- les inondations du Cameroun (septembre 2013), où des pluies intenses ont causé la rupture à deux reprises du barrage le long de la rivière Logone entraînant l'évacuation en urgence de plus de 9000 personnes ;
- les inondations de la Mauritanie (août 2013), qui ont affecté les régions de Tagant, Trarza, Inchiri et Nouakchott affectant 4225 personnes, dont 2305 personnes déplacées, 8 morts, 800 habitations endommagées ;
- les inondations du Bénin où les crues du fleuve Niger dans les communes de Karimama et Malanville au nord ont affecté plus de 33000 personnes avec des pertes massives d'habitats, de récoltes et de biens ;
- les inondations en République centrafricaine (septembre 2013), où de fortes pluies qui ont duré plus de quatre heures ont affecté plusieurs quartiers du 3^{ème} district de Bangui, où 30000 personnes ont été touchées.
- les inondations du Nigeria débutées en mi-juillet et qui ont affecté plus de 81500 personnes à travers le pays, avec 8000 personnes déplacées et plus de 6500 habitations endommagées. Au 11 septembre 2013, 19 décès ont été enregistrés et au moins 2217 fermes agricoles ont été détruites par les inondations, notamment dans les Etats de Zamfara, Kogi et Bauchi.
- Les inondations du Soudan du Sud (août 2013) qui ont causé des dommages importants aux habitations, aux cultures et aux infrastructures de base dans plusieurs provinces du nord. Au 1^{er} septembre, les agences humanitaires ont évalué que 27000 personnes dans cinq Etats avaient besoin d'assistance ;
- Les inondations du Mali causées par des pluies exceptionnelles du 9 au 12 août dans les régions de Kidal et Ségou, détruisant les maisons et champs et touchant environ 11300 personnes. Le 28 août, des pluies torrentielles à Bamako ont tué au moins 34 personnes, et une centaine de maisons ont été emportées par les crues du fleuve Niger sorti de son lit, cassant des ponts et inondant des rues entières ;
- Les inondations du Niger qui ont fait au mois d'août 12 morts, plus de 3000 maisons touchées avec presque 25000 personnes recensées, et 2120 maisons détruites. Les régions de Maradi et Agadez sont les plus affectées.

2. Télédétection et crues

Les services pré-opérationnels de suivi de l'extension spatiale des crues et des hauteurs d'eau peuvent être obtenus par différentes techniques de télédétection.

Extension spatiale de l'inondation : Dès 1997, Smith fait une revue des capteurs passifs et actifs qui peuvent être utilisés pour suivre l'extension spatiale de l'inondation:

- capteurs passifs dans le visible, proche et moyen infrarouge avec la principale limitation de la couverture nuageuse qui limite les temps de revisite. Il faut attendre MODIS (depuis 2002) avec un temps de revisite bi-journalier pour espérer un suivi décadaire de l'extension de l'inondation dans les zones à forte couverture nuageuse. Avec ce capteur, la limitation vient de la résolution spatiale entre 300 m et 500 m selon les produits. De nouvelles perspectives sont offertes par les constellations, et les satellites Sentinel de l'ESA pour allier un temps de revisite de 5 jours à l'équateur avec une résolution spatiale variant de 10 m à 60 m selon les bandes spectrales. La combinaison de plusieurs capteurs reste nécessaire si on veut avoir un temps de revisite suffisant pour suivre un épisode de crue catastrophique ;

- micro-ondes passives: SSM/R à bord du satellite Nimbus 7, puis SMM/I ont été utilisés dès 1989 pour suivre les inondations au pas de temps mensuel, en estimant à 37 Ghz la différence entre les températures de brillance polarisées verticalement et horizontalement (ΔT). Les valeurs élevées de ΔT caractérisent les surfaces d'eau libre. Prigent *et al.* (2007) ont montré la capacité d'utiliser des données multi-satellite (micro-ondes passives, scatteromètre ERS et AVHRR dans le visible et proche infrarouge) pour faire un suivi mensuel des inondations à l'échelle globale, à la résolution de un quart de degré. Récemment, Fluet-Chouinard *et al.* (2015) ont montré qu'il était possible d'augmenter la résolution spatiale de ces cartes d'inondation globales multisatellite à 15 arc seconde en utilisant le modèle numérique de terrain SRTM ;

- les micro-ondes actives (SAR) ont été utilisées dans toutes les longueurs d'onde (X, C, L) avec une mention spéciale pour la bande L qui permet de cartographier les surfaces inondées sous couvert forestier (Hess *et al.*, 2003).

Suivi des hauteurs d'eau par altimétrie radar : De nombreuses études ont montré la capacité des altimètres radar des séries T/P et Jason2 (10 jours de revisite), et ERS-ENVISAT-AltiKa (35 jours de revisite) à suivre les hauteurs

des plans d'eau, en particulier des zones d'inondation (Seyler *et al.*, 2008 ; Da Silva *et al.*, 2012 ; Becker *et al.*, 2014) depuis l'espace avec une précision qui s'est améliorée avec les nouveaux capteurs (Jason2, Envisat et AltiKa).

Combinaison extension spatiale, hauteur d'eau par altimétrie et gravimétrie : La combinaison des données de hauteur d'eau dans les plaines d'inondation, combinées avec les données d'extension spatiale de la crue obtenues par de l'imagerie visible et proche infrarouge, par des données radar (Frappart *et al.*, 2005) ou par la combinaison multi-satellite décrite plus haut (Frappart *et al.*, 2008) combinées également avec des données gravimétriques du satellite GRACE (Frappart *et al.*, 2011b) a fait l'objet d'étude des variations temporelle des stocks d'eau au cours des inondations

Combinaison données altimétriques, gravimétriques et modélisation des crues : Voir les travaux de Bonnet *et al.* (2011) et Frappart *et al.* (2011a).

IX. Les changements climatiques

D'après le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), les changements climatiques « désignent une variation de l'état du climat qui peut être identifiée (par exemple à l'aide de tests statistiques) par des changements affectant la moyenne et/ou la variabilité de ses propriétés, persistant pendant de longues périodes, généralement des décennies ou plus ». Le terme « changement climatique » fait référence ici à tout changement dans le temps, qu'il soit dû à la variabilité naturelle ou aux activités humaines.

Le réchauffement climatique est univoque depuis les années 50. L'atmosphère et les océans se sont réchauffés, les quantités de neige et de glace ont diminué et le niveau de la mer a monté. D'après le GIEC 2013, le lien entre les activités humaines et l'accroissement des températures sur cette période est **extrêmement probable**. A la fin des années 1970-début des années 1980, on observe une « rupture » statistique dans les séries chronologiques de nombreuses variables climatiques et hydrologiques. Cette période marque le début d'une tendance à la hausse des températures dans le monde. C'est également la période de la baisse brutale des précipitations dans la zone sahélienne (Figure 22) qui a provoqué la grande sécheresse des années 80 à fortes conséquences humaines.

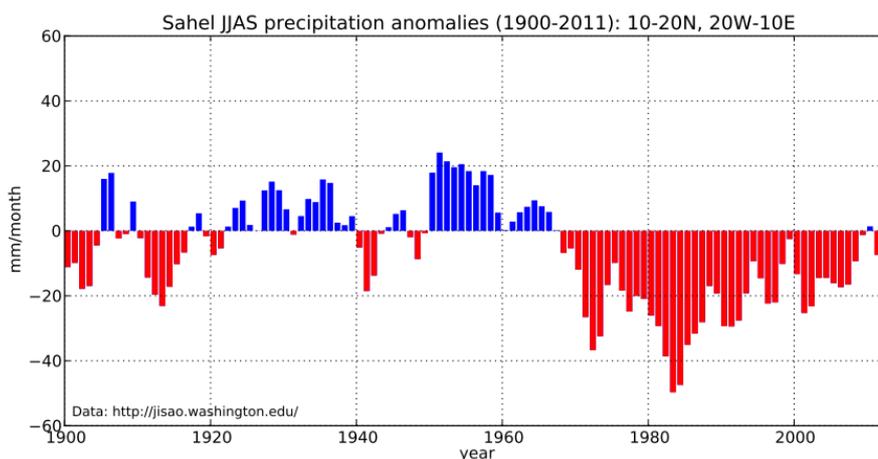


Figure 22 - Anomalies des précipitations moyennes calculées sur la période juin-octobre, sur la zone 10°N-20°N, 20°W-10°E pour la période 1900-2011 (données de NOAA NCDC Global History Climatology Network).

1. Les variables climatiques essentielles

Pour observer les effets du changement climatique sur les surfaces continentales, il faut donc des données sur plusieurs décennies ; le Tableau 10 présente les principales variables climatiques observables par télédétection et leur profondeur temporelle (Yang *et al.*, 2013).

Tableau 10 – Liste et profondeur des archives des variables climatiques essentielles (*Essential Climate Variables ; ECV*) observables par télédétection satellitaire (Yang *et al.*, 2013).

Time span (yr)	Atmospheric ECV	Oceanic ECV	Terrestrial ECV
0-9		Ocean salinity	Biomass, glacier and ice caps
10-19	Wind speed and direction (upper air), CO ₂ and ozone	Ocean color, sea state (including wave height, direction, wavelength and time period)	Land cover, fire disturbance
20-29	Radiation budget, wind speed and direction (surface), water vapour, cloud properties and aerosol properties	Sea level	Albedo, lakes (water levels and areas)
30-39	Precipitation, upper air temperature	SST, sea-ice extent	Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (fAPAR) LAI, soil moisture
40-49			Snow cover

*Data sets, providers and access links for these ECVs are listed in the Supplementary Table 2.

Sur le long terme (30-39 ans), les principales bases de données pour les surfaces continentales sont :

- Les bases de données d'observation de la Terre GIMMS NDVI et GIMMS NDVI3g (*Global Inventory Modeling and Mapping Studies ; Pinzon and Tucker,*

2014), disponibles à l'échelle globale depuis juillet 1981 (Figure 23), à une résolution spatiale de 8 km. Ces bases de données ont été constituées à partir des images acquises par le capteur AVHRR embarqué sur les satellites NOAA (séries 7, 9, 11, 14, 16 et 17). Pour GIMMS3g, le NDVI est étalonné, corrigé des effets directionnels d'acquisition, des aérosols volcaniques et d'autres facteurs non imputables au changement de végétation et sert à étudier les tendances à l'échelle globale. Il existe également des produits LAI et fPAR dérivés de GIMMS NDVI3g. Plus récentes, les séries temporelles MODIS permettent également d'étudier les tendances du NDVI, avec une meilleure résolution spatiale (250 m). Mais la profondeur historique de la base de données MODIS (depuis février 2000) n'est pas suffisante pour voir d'éventuels effets du changement climatique.

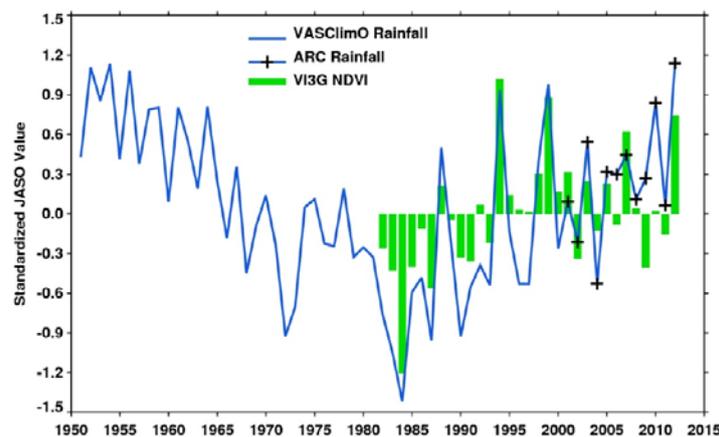


Figure 23 - Séries temporelles de données pluviométriques VASCLimO pour la période 1951 à 2000, z-scores pour la pluviométrie de African Rainfall Climatology (ARC) pour 2001–2012, et z-scores pour le NDVI3g pour 1981–2012 (Assaf Anyamba *et al.*, 2014).

- La base de données ECVSM (1978-2013 ; *Essential Climate Variable-Soil Moisture*) de l'ESA, un produit d'humidité du sol fourni à pas de temps journalier, avec une résolution de 0.25° (~20 km). Ce produit est issu du retraitement de données acquises par différents systèmes passifs et actifs d'observation de la Terre (Liu *et al.*, 2012; voir Section I). Loew *et al.* (2013) montrent que ECVSM capture bien les variations d'humidité du sol intra- et inter-annuelles dans la région sahélienne, mais ils alertent sur le fait qu'en raison des discontinuités temporelles de la série (liées à l'utilisation de différents systèmes), les conclusions sur les analyses de tendance doivent être considérées avec prudence.

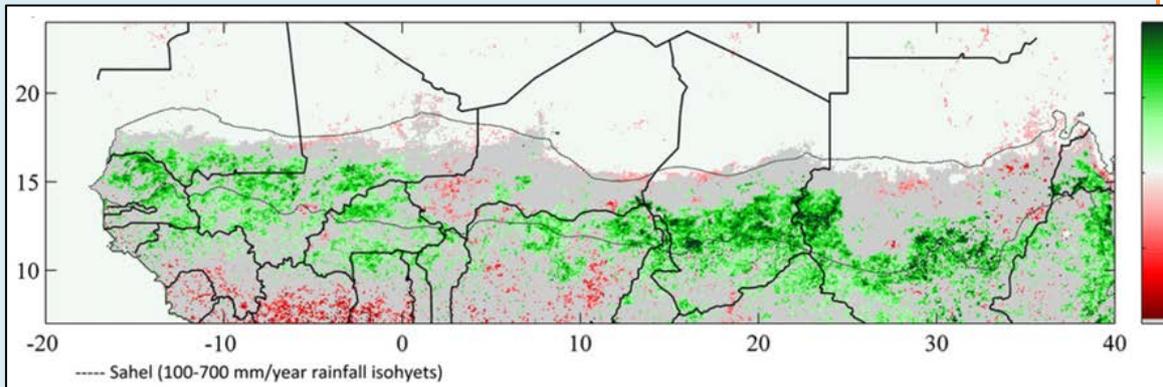
2. Les analyses de tendance de NDVI

Le traitement des bases de données GIMMS nous informe sur les changements d'état de surface des 30 dernières années. La détection de ces changements est alors essentiellement basée sur l'analyse statistique de la variabilité inter et intra annuelle du NDVI et sans présumer de l'origine de ces changements. Deux approches peuvent être utilisées : (i) l'analyse des tendances de la série temporelle généralement basée sur de méthode de régression linéaire. Lorsque les tendances de NDVI sont significativement positives, on parle de verdissement (*greening*) des surfaces, et de brunissement (*browning*) lorsqu'elles sont négatives ; (ii) la décomposition temporelles permettant de décomposer une série temporelle de NDVI en tendance, saisonnalité et bruits (ex : méthode BFAST développée par Verbesselt *et al.* (2010)). Il serait cependant inapproprié de relier directement ces tendances observées à un changement climatique car le NDVI est influencé par d'autres facteurs que le climat, comme les changements d'occupation des sols (reprise du couvert arboré par exemple suite à la grande sécheresse) ou d'utilisation des terres (mise en culture, création de zones protégées, dégradation des pâturages), et les tendances observées sont des changements subtils qui dépendent de l'outil statistique utilisé et de la période de référence.

3. Les tendances de NDVI en Afrique de l'Ouest

Les données NOAA-AVHRR ont été largement utilisées pour l'analyse des tendances de la végétation aux échelles globale et régionale. Il a notamment été montré que le Sahel aurait tendance à reverdir depuis les années 80 (Encadré 17) allant ainsi à l'encontre de la théorie sur le processus de désertification « irréversible » du Sahel. A l'échelle régionale, le reverdissement serait dû à l'augmentation des précipitations (e.g. Eklundh and Olsson, 2003; Fensholt *et al.*, 2013), mais à l'échelle locale d'autres facteurs explicatifs peuvent s'ajouter aux tendances globales du climat. Pour déterminer ces facteurs explicatifs, les données AVHRR GIMMS qui sont à 8 km de résolution spatiale ne suffisent pas car elles ne permettent pas de détecter les changements locaux d'occupation et d'utilisation des sols et ainsi de séparer les effets du climat des autres effets. Seules des données satellitaires à haute résolution ou des données de terrain permettraient de séparer ces effets de façon claire. Cependant les archives d'images à résolution décimétrique sont souvent incomplètes ou difficilement interprétables en raison des différences saisonnières d'acquisition, et il n'existe que très peu de données de terrain acquises sur plusieurs décennies.

Encadré 17 - Le verdissement du Sahel : changement climatique ou humain ?



Tendances du NDVI GIMMS-3g entre 1981 et 2011 sur la région sahélienne. Les zones grisées sont des zones sans tendance significative (seuil à 95%). Les zones présentant un écart-type de NDVI inférieur à 0.015 sont masquées en blanc (Dardel *et al.*, 2014).

En Afrique sub-saharienne, les études faites à partir du jeu de données GIMMS NDVI3g montrent clairement un verdissement du Sahel, ce qui est contraire aux idées répandues de l'avancée des déserts. Seule, la base de données GIMMS ne permet pas de faire un diagnostic de ce verdissement, qui nécessite de pouvoir séparer les effets du climat des autres effets. Seules des données aérospatiales à haute résolution spatiale et/ou des données de terrain permettraient de séparer ces effets. La base de données existantes sur la strate herbacée de deux régions - le Gourma au Mali (1984-2011) et le Fakara au Niger (1994-2011) – a permis de montrer que les tendances observées à partir des données de terrain étaient cohérentes avec celles des observations satellitaires (Dardel *et al.*, 2014). Ainsi, on n'observe pas de désertification du Sahel sur les 30 dernières années, mais bien une reprise généralisée de la végétation qui suit globalement le rétablissement des précipitations (Figure 22). D'après Dardel *et al.* (2014), ce résultat n'exclut pas que dans certaines régions, ou à l'échelle locale, une dégradation du couvert puisse aussi être observée, comme par exemple sur les sols soumis à une forte érosion ou sur quelques terroirs agricoles, ce qui tend à réconcilier les deux théories (désertification versus verdissement).

4. Conclusion

En conclusion, si la télédétection a montré dans les domaines atmosphérique et océanique qu'elle permettait de découvrir des choses autour du système climat non détectés par des modèles climatiques ou des observations conventionnelles (Yang *et al.*, 2013), les conclusions sont moins nettes dans le domaine des surfaces continentales. En effet, la longueur de la période d'observations satellitaires disponibles et l'incertitude liée aux données sont encore des limites dans l'identification de tendances robustes de variables climatiques sur le long terme. Cependant, l'utilisation conjointe de données aux échelles globale et locale devrait permettre de progresser dans notre compréhension du système Environnement-Homme-Climat, et donc de mieux appréhender l'impact du changement climatique par l'observation des changements d'utilisation des sols (voir travaux au Mali de Bégué *et al.*, 2011), de la dégradation des sols (voir travaux en Afrique australe de Wessels *et al.*, 2012, de zones d'embroussaillement (voir travaux Afrique centrale et australe de Mitchard and Flintrop, 2013) et/ou d'évènements météorologiques extrêmes (mesures et occurrence des crues par exemple).

X. La lutte préventive acridienne

Les criquets représentent une menace permanente pour l'agriculture dans de nombreuses régions du monde, et la lutte contre cet insecte ravageur constitue un enjeu de taille pour le maintien des ressources dans les régions touchées de plus par un contexte d'insécurité alimentaire (Latchininsky, 2013). Parmi les espèces les plus menaçantes, le criquet pèlerin fait l'objet d'une attention particulière, du fait de sa capacité à passer d'une forme solitaire inoffensive à une phase grégaire nuisible au cours de laquelle se forment des essaims ravageurs pouvant migrer sur de longues distances et toucher une aire d'invasion de près de 30 millions de km².

La gestion préventive antiacridienne vise à prévenir les dommages causés sur les cultures par le contrôle des populations avant qu'elles ne puissent atteindre des densités élevées et former des essaims. Les zones potentielles de grégarisation des criquets pèlerins sont immenses et ont besoin d'être physiquement évaluées par des équipes de prospection pour une gestion préventive efficace.

L'objectif de l'utilisation de la télédétection pour la lutte préventive antiacridienne est donc de mettre au point des outils d'alerte précoce issus du

traitement d'images satellite de façon à guider les équipes de prospection vers les habitats potentiels réunissant les conditions favorables pour la nutrition ou la reproduction des acridiens. Les conditions propices à l'accroissement de la population acridienne sont essentiellement liées aux précipitations et au développement de la végétation à l'intérieur d'habitats appropriés pour la reproduction.

1. La cartographie des habitats potentiels

De façon à restreindre les surfaces de prospection, la télédétection peut être utilisée pour l'établissement de cartes d'habitats potentiels des populations acridiennes. Ainsi, McCulloch and Hunter, 1983; Sivanpillai *et al.*, 2006 et Voss and Dreiser, 1997 ont utilisé les images multispectrales à haute résolution spatiale (30 m) Landsat pour cartographier les biotopes potentiels des criquets migrateur, pèlerin et australien respectivement. Cependant, la cartographie des habitats à l'échelle des aires touchées par ces ravageurs est compliquée à mettre en œuvre à partir d'images décamétriques telles Landsat, ayant une fauchée de 185 km. De plus, ce type de carte a un succès limité en milieu désertique du fait de changements dans la répartition de la végétation suivant la distribution spatiotemporelle hétérogène des précipitations (Sivanpillai *et al.*, 2006).

2. Le suivi dynamique de l'état des habitats

La mise en œuvre réussie d'une stratégie préventive de contrôle des populations acridiennes nécessite la connaissance précoce et fiable des zones où la végétation émerge après la pluie, fournissant des conditions appropriées pour la ponte, l'éclosion des œufs et le développement des acridiens. Pour effectuer un suivi régulier des biotopes sur des aires de reproduction/invasion aussi vastes, les études s'appuient donc sur l'utilisation de l'imagerie à moyenne résolution spatiale offerte par les missions satellitaires telles que NOAA-AVHRR (Tratalos and Cheke, 2006), SPOT VEGETATION (Cherlet *et al.*, 2000) ou MODIS (Sivanpillai and Latchininsky, 2007). Ces satellites, dédiés aux suivis temporels des surfaces terrestres, permettent l'obtention d'une information sur l'état de la végétation (via le calcul d'indices spectraux tels que le NDVI par exemple) à une fréquence journalière, ou synthétisée à 10 jours (NOAA, SPOT VEG) ou 16 jours (MODIS). Via l'utilisation de bases de données de prospections, les études citées précédemment montrent le lien existant entre les occurrences de criquets et la présence de végétation observée sur les images satellite. Piou *et al.* (2013) ont ainsi récemment mis au point un modèle

prédictif de probabilité d'observation (Figure 24) du criquet pèlerin en Mauritanie sur la base de variables de végétation extraites de séries temporelles MODIS.

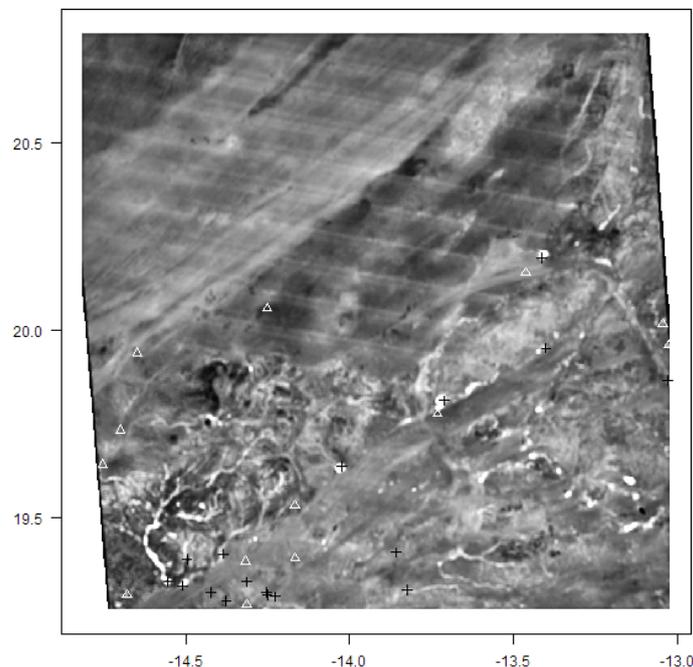


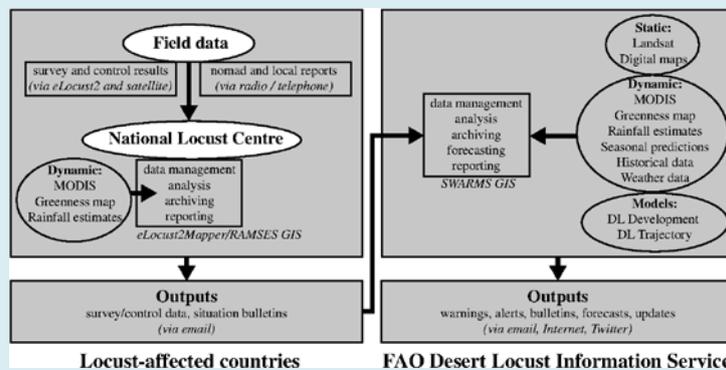
Figure 24 - Carte de probabilité d'observation de criquets dans la zone d'Akjoujt (Mauritanie) prédite par modélisation pour la période du 15-31 octobre 2008 (Piou *et al.*, 2013). Les zones sombres indiquent les plus fortes probabilités de trouver des criquets. Les symboles représentent 30 prospections conduites par le centre de lutte anti-acridienne durant cette période (triangles = pas de criquets ; croix = observation de criquets).

Autre facteur d'intérêt, l'humidité des sols influe sur l'emplacement des sites de ponte, leur survie pendant l'hiver, ou le taux d'éclosion. Elle peut également être approchée à l'aide d'images à moyenne résolution spatiale telles que MODIS pour permettre de détecter les lieux et périodes propices à la reproduction des criquets. Ainsi Liu *et al.* (2008) ont utilisé l'indice *Temperature/Vegetation Dryness Index* (TVDI), qui combine NDVI et températures de surface issues de MODIS, comme indicateur de l'humidité des sols, et démontré le lien entre humidité des sols et invasions du criquet migrateur.

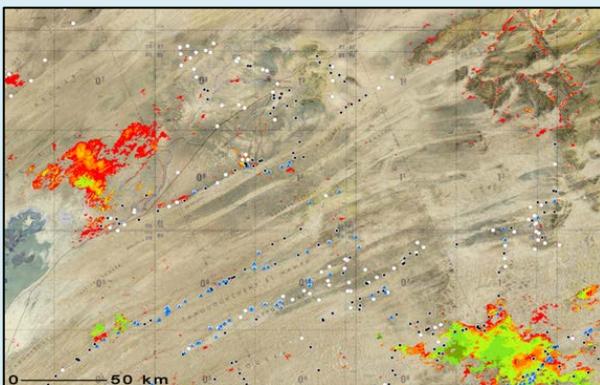
Les données météorologiques (notamment précipitations) issues de l'imagerie satellitaire figurent également parmi les facteurs utilisés dans les systèmes d'alerte précoce (Bryceson and Cannon, 1990).

Encadré 18 - Services opérationnels de lutte antiacridienne

Le DLIS (*Desert Locust Information Service*) mis en place par la FAO a développé un système d'alerte précoce sur la base de suivis journaliers des conditions climatiques (précipitations et températures issues de modèles, d'imagerie satellitaire ou de stations synoptiques), écologiques (MODIS NDVI et EVI, cartes de verdissement du VITO) et de bases de données sur les infestations acridiennes dans les aires susceptibles d'être affectées.



Le réseau d'alerte précoce antiacridien. Les données de prospection recueillies in situ (issues des équipes nationales de prospection et de lutte) sont transmises en temps réel par satellite au centre national de lutte antiacridienne (pour analyse dans le SIG RAMSES : *Reconnaissance and Management System of the Environment of Schistocerca*) et transmis au DLIS de la FAO (où une analyse et une prévision à l'échelle globale sont effectuées).



Ouest de la Mauritanie, Octobre 2010

Observations terrain de criquets (points noirs), adultes (triangles bleus), absence de criquets (points blancs).

Les couleurs chaudes indiquent les zones de végétation nouvellement verte

Des cartes dynamiques décadaires de verdissement produites par le VITO sont utilisées pour déterminer la durée de la végétation verte dans l'aire de rémission du criquet pèlerin.

3. Perspectives

Les données de télédétection sont ainsi utilisées pour la surveillance des habitats de certaines espèces telles que le criquet pèlerin, le criquet migrateur ou le criquet australien. Toutefois, le vaste potentiel de cette technologie reste inexploité pour d'autres espèces de sautériaux (Latchininsky and Sivanpillai, 2010). L'arrivée de nouvelles missions satellitaires telles que la mission Sentinel-2 de l'ESA permettront d'augmenter les capacités de caractérisation des habitats des criquets à grande échelle. La récente mission SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*) de l'ESA pourrait également permettre de détecter et prévoir les conditions d'humidité du sol requises pour la reproduction des criquets. Toutefois, du fait de la résolution des images fournies (25 km), il serait nécessaire de coupler/fusionner la donnée SMOS avec des informations à plus haute résolution spatiale afin d'obtenir des informations sur l'état de certains biotopes localisés de très petite taille.

XI. La santé animale

Les pathologies qui pèsent sur la santé animale constituent une menace pour l'élevage dont le rôle est central dans l'économie agricole en Afrique, en particulier dans les régions sahéliennes. Parmi ces pathologies, les maladies infectieuses (causées par un micro-organisme pathogène - virus, bactérie, parasite) vectorielles (c'est-à-dire transmises par la pique d'un insecte hématophage désigné sous le terme de « vecteur » : moustique, mouche, tique...) sont particulièrement dépendantes des conditions environnementales, qui conditionnent la présence, l'abondance et la capacité à transmettre des insectes vecteurs. De nombreux travaux de recherche ont ainsi étudié les associations entre des facteurs de risque environnementaux dérivés de données de télédétection satellitaire et l'occurrence de maladies à transmission vectorielle comme la fièvre de la Vallée du Rift (FVR) et la trypanosomose animale africaine (TAA). Néanmoins peu d'outils d'appui à la décision sont opérationnels dans ce domaine aujourd'hui.

1. Les principaux indicateurs issus de la télédétection utilisés

Les données de télédétection ne permettent bien évidemment pas de détecter directement les insectes vecteurs ou les animaux, mais indirectement, elles peuvent être utiles pour caractériser leur habitat.

Ainsi, l'occupation du sol est généralement un facteur déterminant de la présence et l'abondance des vecteurs ou réservoirs sauvages. Des images multispectrales Landsat ou SPOT ont été utilisées par exemple pour cartographier les zones à risque de présence de glossines vectrices de la TAA (Bouyer *et al.*, 2006), ou de risque de transmission de maladies transmises par des moustiques comme la FVR (Soti *et al.*, 2013) ou la fièvre du Nil Occidental. Parmi les différents types d'occupation du sol, les surfaces en eau (lacs, mares temporaires ou permanentes, cours d'eau) ont une importance particulière, car elles constituent un habitat critique pour de nombreuses espèces. A différentes échelles, des données optiques ou radars ont été exploitées pour cartographier ces zones inondées dans le cadre d'études sur la FVR (e.g. Tourre *et al.*, 2008 ; Vignolles *et al.*, 2010).

D'autre part, les conditions de température, de pluviométrie, d'humidité sont autant de facteurs influençant la distribution et la dynamique de nombreuses espèces, notamment d'insectes. Les données de température de surface issues des satellites NOAA-AVHRR ou MODIS ont ainsi été largement utilisées en épidémiologie (par exemple pour des études sur les trypanosomoses animales africaines (Rogers *et al.*, 1996) et la Fièvre de la Vallée du Rift (Anyamba *et al.*, 2009; Linthicum *et al.*, 1999; voir Encadré 19). Parmi les indicateurs de pluviométrie, on peut citer les estimations de pluviométrie TRMM (Guilloteau *et al.*, 2014), mais aussi le NDVI qui est un bon marqueur des événements pluvieux dans les zones sèches.

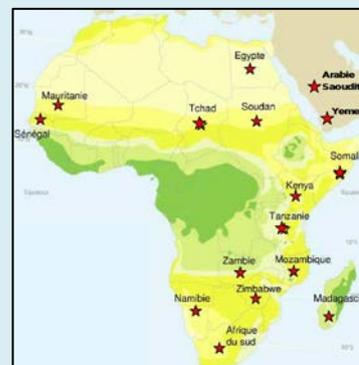
2. Les méthodes

Les approches statistiques permettent de mettre en évidence des corrélations entre des variables environnementales et des événements de santé animale et, si de telles relations existent et sont significatives, de prédire l'occurrence de tels événements dans le temps (systèmes d'alerte précoce) et dans l'espace (cartes de risque).

Dans le cas où les données épidémiologiques ou entomologiques sont absentes ou rares (par définition, c'est le cas lorsque l'objectif est de cartographier les zones à risque d'émergence d'une maladie dans un territoire où elle est absente), des modèles basés sur les connaissances peuvent être utilisés, comme par exemple les méthodes d'analyse multicritère. Ces méthodes ont été récemment adaptées à la cartographie des zones à risque d'occurrence de la peste porcine africaine (de Glanville *et al.*, 2014).

Encadré 19 - Exemples de la fièvre de la Vallée du Rift (FVR)

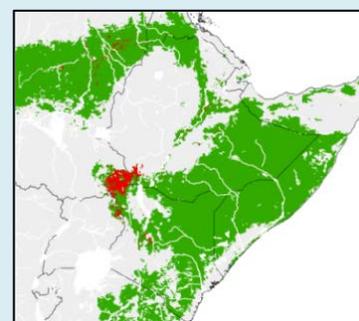
La FVR est causée par un *Phlebovirus* et affecte les hommes et les ruminants domestiques et sauvages. La transmission se fait par voie directe ou par la piqûre d'un moustique infecté. De nombreuses espèces de moustiques appartenant aux genres *Aedes*, *Culex*, *Anopheles*, *Eretmapodites* et *Mansonia* peuvent jouer le rôle de vecteurs - leur bio-écologie et distribution géographique peuvent être très différentes. La FVR affecte essentiellement les zones arides et semi-arides du continent africain, avec un impact sanitaire et économique sévère.



Pays touchés par la FVR

Vers un système opérationnel

En Afrique de l'Est, où la FVR est endémique, des corrélations ont été établies entre la survenue d'épisodes épizootiques au Kenya (cycles de 5 à 15 ans) et des indicateurs tels que le NDVI (données SPOT-Vegetation) et la surface de température de la mer (SST – données NOAA AVHRR) dans les Océans Indien et Pacifique (Anyamba *et al.*, 2009; Linthicum *et al.*, 1999).



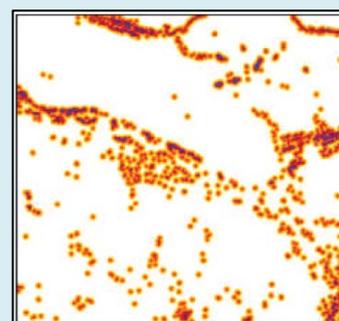
*Zones favorables aux vecteurs de la FVR (en vert) et 'points chauds' à risque d'épizootie en Octobre 2012 (Trevenec *et al.*, 2012).*

De ces résultats, un système d'alerte précoce a été développé par la NASA et maintenu jusqu'en 2009. Ce système est en cours d'amélioration pour une utilisation par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO-EMPRES WATCH) (Trevenec *et al.*, 2012).

Une généralisation difficile à l'échelle continentale

En Afrique de l'Ouest, aucune corrélation entre excédents pluviométriques et survenues d'épizooties n'a été observée au Sénégal, un des pays africains les plus touchés par la maladie.

En revanche, la cartographie à partir d'imagerie SPOT-5 des mares temporaires, qui constituent les gîtes de ponte de ces moustiques, est opérationnelle et peut être mise en place à une échelle régionale (Tourre *et al.*, 2008).



*Distribution des mares temporaires et zones occupées par les moustiques (Tourre *et al.*, 2008).*

3. Bilan et perspectives

Les limites

Les limites à l'utilisation de la télédétection pour la gestion de la santé animale de manière opérationnelle sont de différents ordres. D'un point de vue technique, elles sont principalement liées à la résolution spatiale des capteurs, et surtout au compromis inévitable entre résolution spatiale, couverture géographique et répétitivité temporelle des observations. D'un point de vue scientifique, les connaissances biologiques et les données sur les maladies animales manquent bien souvent pour définir des indicateurs adaptés. D'autre part, des résultats obtenus dans un site donné pose la question de la généralisation car (i) les espèces vectrices ou réservoirs peuvent varier d'une région à l'autre et de ce fait les facteurs environnementaux associés à leur présence également ; (ii) des facteurs autres qu'environnementaux (facteurs sociaux, culturels, économiques, politiques ou biologiques) peuvent être déterminants dans la transmission des pathogènes.

Les perspectives

Les perspectives en termes de recherche sont nombreuses : la disponibilité de séries temporelles d'images à moyenne et haute résolutions spatiales ouvre des perspectives d'applications en épidémiologie, notamment pour l'utilisation de nouveaux indicateurs (indices d'inondations, de feux, de détection de changements). D'autre part, l'assimilation des données de télédétection dans des modèles spatialisés décrivant les dynamiques de population de vecteurs et de transmission est prometteuse. Enfin, le développement des technologies de télémétrie pour la géolocalisation de la faune sauvage et domestique soulève de nombreuses questions méthodologiques quant à leur couplage avec la télédétection, alors que l'association télédétection-télémétrie paraît particulièrement intéressante pour l'étude des contacts entre faune domestique et faune sauvage.

Par ailleurs, l'établissement de liens successifs cohérents entre le système épidémiologique étudié, l'environnement et l'information issue des capteurs de télédétection nécessite une collaboration interdisciplinaire forte entre épidémiologistes et télédéTECTEURS, et donc des formations adaptées, en particulier auprès des acteurs de la santé animale. L'offre de formation dans ce

domaine se développe, comme par exemple dans le cadre du projet GeosAF⁷³ *Geomatic technology transferred to animal health services in southern Africa*, qui vise à renforcer les capacités des services vétérinaires dans les domaines de la géomatique pour la surveillance et le contrôle des maladies vectorielles (tiques et glossines) en Afrique Australe.

XII. La sécurisation foncière des espaces agricoles

La situation foncière en Afrique est complexe.

La croissance démographique (2,5 % par an dans la dernière décennie) induit une pression importante sur les ressources, entraîne des compétitions entre usages multiples et oblige à une intensification des systèmes de production. La "question foncière" traduit les tensions entre, d'une part, l'agriculture, la croissance urbaine et les aires de conservations et, d'autre part, entre population autochtone et immigrants, entre producteurs ruraux et élites urbaines, entre agriculture familiale et agro-industrie.

La reconnaissance des droits est difficile. Le droit coutumier, pour les zones rurales, est resté le droit de référence. Or ce ou plutôt ces droits coutumiers, diversifiés selon les ethnies, se sont profondément modifiés depuis 30 ans. La gestion foncière traditionnelle semble reculer face à l'individualisation et à la marchandisation de la terre. La terre devient de plus en plus un bien marchand, qui s'exploite et s'échange avec ou sans le consentement des autorités traditionnelles. Les droits peuvent être détenus par des ayants-droit individuels, lignagers ou collectifs, ou encore par des personnes morales publiques ou privées. La nature de la relation au sol peut résulter de normes juridiques écrites, de normes coutumières, reconnues ou non reconnues par la loi, voire de normes religieuses. Les systèmes fonciers en Afrique sont caractérisés par la juxtaposition de droits d'accès à la terre issus de différentes légitimités (domaine de l'état, autorité traditionnelle des chefs de terres, autorités déléguées aux migrants...). De nouveaux acteurs privés apparaissent et revendiquent des droits fonciers garantis pour réaliser leurs investissements. Les conflits se multiplient. Détecter les droits et plus les attribuer n'est guère facile en sachant que toutes les terres, ont de fait déjà changé une fois au

⁷³ <http://ur-agirs.cirad.fr/projets/geosaf>

moins de "propriétaires" même si le terme est bien inadapté pour rendre compte de la diversité des arrangements existants.

La délimitation et l'immatriculation des terres rurales, la mise en œuvre de système d'information foncière demande un travail conséquent par des structures administratives efficaces et dotées de gros moyens, structures qui n'ont pu être mises en œuvre jusqu'à présent. Il exige aussi une compréhension des évolutions qu'a connues la coutume et des ambiguïtés qui ont régi les attributions de droits délégués.

Les services de cadastre ont beaucoup de difficultés à assumer leurs fonctions. Ils sont hérités du système Torrens où l'Etat est le détenteur des droits sur les terres et les attribue. Ces services ne considèrent que les droits de propriété. Les droits sont appropriés définitivement sauf procédure d'expropriation. Ils sont transmissibles. Les services fonciers présentent une très faible capacité à délivrer des titres fonciers. Les mutations sont peu prises en compte (coûts, désintérêts des usagers...). Au fur et à mesure des ventes et des divisions, les énonciations des titres tombent de facto en désuétude dans la mesure où elles ne reflètent plus la réalité des droits sur le sol. L'information foncière gérée par les services fonciers, concerne non seulement une faible proportion des biens mais s'avère en complet décalage avec la réalité.

Des lois proposent une démarche de passage à la propriété privée légale et individuelle, fondée sur une reconnaissance transitoire préalable des droits coutumiers. La reconnaissance des droits coutumiers par des certificats fonciers collectifs ou individuels permet d'ouvrir la procédure d'immatriculation et la reconnaissance légale définitive des droits individualisés. Le gouvernement garde la possibilité d'attribuer des baux à des entreprises privées sur le domaine public, mais on sait que toute opération pouvant être considérée comme relevant de l'accaparement des terres (*land grabbing*) suscite de fortes résistances.

Au-delà des questions d'orientations des réformes, des questions techniques se posent. Elles sont souvent abordées par la modernisation des outils du cadastre. Des projets ont essayé d'accompagner la transformation de ces services de cadastre autour de trois volets : sauvegarde et passage au numérique de l'information foncière ; élaboration d'une base de données foncière unique et informatisée référencée à une cartographie de référence (plan cadastral) ; actualisation des situations foncières.

L'information spatiale contribue, d'une part, à la connaissance de la complexité des phénomènes du foncier par l'observation (problématique d'observatoire foncier) et, d'autre part, à l'instrumentalisation des opérations de délimitation et de reconnaissance des droits.

L'observation foncière comporte quatre volets :

- l'observation physique du terrain qui consiste à caractériser son utilisation physique (couvert forestier, constructions, terre arable, etc.) et la fonction remplie par cette utilisation (pour une construction, habitat ou activités ; pour une terre arable, culture alimentaire ou industrielle ; etc.) ;
- l'observation des droits exercés sur les terrains, en détaillant les types de droits, les bénéficiaires et les normes juridiques, coutumières, sociales ou religieuses qui encadrent ces droits ;
- l'observation des valeurs économiques (prix de vente, loyers, taxes). Les terrains sont des objets économiques. Ils possèdent des valeurs latentes dont le montant se révèle lorsqu'ils sont mis en vente (valeurs vénales) ou en location (valeur locative) au plus offrant ;
- l'observation de l'administration et de la gestion publique du foncier, en particulier la fiscalité.

La télédétection contribue à renseigner l'observation physique du terrain, en fonction de typologie d'occupation des sols. Mais cette contribution n'est pas encore généralisée. Les SIG contribuent au renseignement et à la localisation des informations concernant la fonctionnalité, les droits, les valeurs économiques et la fiscalité.

Les projets de délimitation des droits au niveau local ou de constitution d'un cadastre⁷⁴ utilisent des images à très haute résolution ou de photo-aériennes. Des plans locaux sont établis (voir exemple à Madagascar ; Encadré 20). Ils sont parfois intégrés dans des cartographies de référence. Mais les pays d'Afrique sont souvent à la recherche de moyens pour disposer de couverture nationale d'orthophotos et/ou d'images satellitaires.

⁷⁴ Le cadastre est un fonds documentaire comportant par commune, à la fois la représentation graphique et l'inventaire foncier du territoire communal dans tous les détails son morcellement. Le plan cadastral national est constitué de l'ensemble des feuilles de plans normées de l'ensemble des communes ou localités d'un pays. Leurs échelles de réalisation varient de 1/500 à 1/5000^{ème} en fonction de la densité d'occupation ou d'aménagement des zones à représenter.

Encadré 20 - Plan local d'occupation foncière à Madagascar.

<http://www.observatoire-foncier.mg/carteqf.php>

Engagée depuis 2005, la réforme foncière malgache est basée sur la décentralisation de la gestion foncière. Désormais, les communes équipées d'un « guichet foncier » gèrent les terrains relevant de la propriété privée non titrée pour lesquels elles délivrent des certificats fonciers.

Pour chaque demande de certificat, une Commission de Reconnaissance Locale (CRL) composée de représentants élus de la commune et des communautés, établit sur le terrain un procès-verbal enregistrant les droits revendiqués et les éventuelles oppositions. Suite à cette procédure et en l'absence d'opposition, l'agent du guichet prépare un certificat qui sera signé par le maire. Les limites des parcelles certifiées sont reportées sur un Plan Local d'Occupation Foncière (PLOF), carte des statuts juridiques de la terre localisant les terrains privés, les terrains domaniaux et, par défaut, l'espace de compétence du guichet communal. Des images de télédétection à très haute résolution sont utilisées comme patron cartographique pour la réalisation au niveau communal d'un PLOF figurant les différents statuts des terrains : propriété privée titrée, propriété privée non titrée, aires à statut spécifique, etc. Lors des CRL, les demandeurs de certificats et leurs voisins tracent les limites des parcelles à certifier en se basant sur des marqueurs fonciers visibles sur l'image (canal d'irrigation, diguette, chemin, arbre remarquable, bâti, etc.). L'image sert ainsi de support à une cartographie foncière locale, participative et contradictoire. L'édition papier de chaque certificat foncier comporte un extrait du PLOF dessiné sur l'image, permettant aux propriétaires de visualiser les contours de leur propre parcelle et des parcelles de leurs voisins.

Les images utilisées par les collectivités et les services fonciers malgaches proviennent de télédétection satellitaire THRS ou aérienne, avec une résolution entre 0.5 et 1 m. Elles sont projetées dans le système Laborde Madagascar et utilisées à une échelle comprise entre 1/2500 et 1/10000^{èmes}. La disponibilité de telles images sur de vastes étendues régionales pose inévitablement des questions de coûts d'acquisition et de délais d'obtention dès lors que l'on ne se contente pas d'images d'archives.

Fin 2008, 492 communes sur 1550 disposent d'un guichet foncier et d'un PLOF, ce qui suppose un investissement considérable pour l'acquisition des images et pour la formation à leur utilisation à des fins de gestion foncière.

Le Plan Local d'Occupation Foncière (PLOF) constitue l'outil de repérage de mise en cohérence de ces deux documents fonciers. Les PLOF tels qu'ils ont été élaborés et conçus jusqu'en 2012 présentaient des anomalies : incomplétude des données topographiques foncières suite à la non-mise à jour des plans de repérage, décalage des parcelles vectorisées par rapport à la situation réelle, etc. Ces irrégularités ont entraîné des empiétements entre certificat foncier et titre foncier, entraînant des litiges. Outre ces problèmes techniques, l'externalisation de l'élaboration des PLOF a limité l'appropriation des agents des services topographiques au processus.

XIII. Bilan sur les produits d'aide à la décision

Les produits d'aide à la décision en matière de politique publique agricole couvrent de larges champs d'application. Certains produits, tels que l'occupation du sol ou les systèmes d'alerte précoce, sont opérationnels et mis en œuvre à des échelles nationale et/ou régionale ; mais la majorité des produits référencés sont produits « à la carte » et sont mis en œuvre à des échelles plus fines (exemples des dynamiques pastorales ou de la santé animale).

D'autres domaines d'application en lien avec l'agriculture sont en émergence, tels que (i) le suivi des investissements en terre agricole effectués à grande échelle qui pourrait profiter d'un suivi par télédétection des engagements en termes de surface et de mise en culture, d'études d'impact sur les milieux naturels et l'agriculture environnantes, de bilans de carbone et de l'eau globaux, etc. ; (ii) le calcul d'indicateurs d'impact des programmes de développement territorial et de diffusion des innovations ; (iii) la fourniture de données objectives et spatialement exhaustives dans la comptabilité nationale du capital-écosystème (Weber 2015); (iv) la mise à jour des cartes d'aptitude des sols et du potentiel de développement.

Si les produits dits « d'aide à la décision » sont moins opérationnels que les produits biophysiques, c'est parce qu'ils nécessitent généralement la prise en compte de données annexes aux données satellitaires, et une adaptation des méthodes aux conditions locales. Or ces données annexes et cette expertise locale pour adapter les méthodes ne sont pas toujours disponibles. A titre d'exemple, la cartographie de l'occupation des sols ne peut se faire sans un jeu de données d'entraînement et de validation acquis sur le terrain ou par photo-interprétation (ce qui nécessite de bien connaître les systèmes en place). Les

cartes de risque de maladies vectorielles, nécessitent quant à elles une bonne connaissance de l'écologie des vecteurs qui se traduit ensuite en indicateurs pertinents pour une maladie et des conditions environnementales données.

Une autre limite d'utilisation opérationnelle des produits d'aide à la décision est leur niveau de précision insuffisant par rapport aux besoins (précision spatiale, temporelle ou thématique). Cette précision, ou plutôt imprécision, est liée aux caractéristiques des produits biophysiques utilisés. Ainsi, de nombreuses applications mettant en œuvre une carte d'occupation du sol pour identifier les surfaces agricoles, sont limitées par l'imprécision spatiale et thématique de ces cartes à l'échelle locale. Pour répondre aux besoins nationaux, de nombreux acteurs développent leur propre produit d'aide à la décision, mais sur des petites régions faute de moyens pour les mettre en œuvre à des échelles nationales ; il existe heureusement quelques exemples réussis de produits nationaux d'aide à la décision, tels que la Base de Données d'Occupation des Terres (BDOT) du Burkina Faso réalisée par l'IGB et IGN-FI. Un autre exemple de précision insuffisante des produits biophysiques est la pluie estimée par satellite ; utilisée dans des modèles de plante, l'utilisation de la pluie satellitaire peut introduire des biais dans le calcul du rendement.

Conclusions et perspectives

I. Bilan

Nous avons montré que les besoins en information spatiale pour les politiques publiques agricoles étaient d'autant plus cruciaux pour le continent africain que les systèmes d'information traditionnels nationaux rencontrent des difficultés de fonctionnement (coût, logistique, précision) dans de nombreux pays. L'observation de la Terre et la télédétection sont des outils privilégiés pour documenter les surfaces agricoles aux échelles nationale et régionale. Malgré et du fait de la complexité des terrains africains, l'enjeu est essentiel et les produits issus de l'observation de la Terre présentent de grandes potentialités pour renforcer les dispositifs d'information sur l'agriculture du continent africain, Mais le passage de l'image au produit d'aide à la décision exige des développements spécifiques.

Trois grandes familles d'information contribuent aux besoins en information des politiques publiques agricoles. Il s'agit de la cartographie de l'occupation et de l'utilisation des sols, des paramètres biophysiques de surface et des référentiels cartographiques.

Concernant l'**occupation/utilisation des sols**, les produits existent à l'échelle régionale. Mais ils ne font pas consensus notamment du fait de leur résolution spatiale. A l'échelle nationale, des exemples de projets, menés dans le cadre de partenariat Nord-Sud, ont montré qu'il était possible de produire des bases de données d'occupation des terres de bonne qualité. D'une ampleur plus modeste, de multiples projets cartographiques à l'échelle locale sont menés dans le cadre de projets de recherche ou d'expertises thématiques.

Le catalogue des **produits globaux « biophysiques »** est quant à lui fort étoffé, avec des dizaines de produits accessibles en temps quasi-réel. Certains produits sont utilisés en routine dans les systèmes d'alerte précoce pour répondre à des problématiques de sécurité alimentaire. Les séries temporelles d'indices de végétation permettent notamment de détecter et localiser les zones subissant des anomalies et retards de croissance pouvant potentiellement engendrer des déficits de production agricole ou pastorale. Les données de précipitations sont également utilisées pour caractériser la saison des pluies. Enfin, un certain nombre des produits biophysiques sont utilisés comme

données d'entrée dans les modèles agro-météorologiques ou épidémiologiques.

A l'échelle locale, les images satellite sont souvent utilisées en tant que telles pour produire **une base de référence cartographique** permettant de géolocaliser des informations ou de partager une vision du territoire (une « photographie » des territoires).

On note des disparités régionales en termes d'utilisation de données de télédétection. L'Afrique du Nord est performante sur le suivi de la production des céréales à partir d'images satellite. Les pays côtiers du golfe de Guinée et les pays d'Afrique Centrale, aux systèmes agro-forestiers et de production de racines et tubercules, n'utilisent pratiquement pas la télédétection pour le suivi de leur agriculture, mais les applications spatiales pour la forêt y sont développées. Ces disparités géographiques s'expliquent essentiellement par la difficulté d'acquérir des images multi-temporelles dégagées sur les pays côtiers et par le besoin d'images à très haute résolution spatiale permettant d'appréhender les systèmes de culture qui sont en place.

1. Des difficultés

L'analyse de l'impact des nombreuses initiatives utilisant des données satellitaires montre la faible pérennité des activités au sein des services étatiques. L'utilisation de données de télédétection reste freinée par un certain nombre d'obstacles d'ordre technique, méthodologique et institutionnel.

Le manque de données spatiales adaptées en termes de résolution/fréquence ou de précision (les estimations de pluie par satellite sont insuffisantes pour certaines applications) est un problème récurrent. Le manque de données environnementales ou humaines complémentaires pour valider les approches ou calibrer les modèles de télédétection est aussi un frein au développement des applications. Les données image sont de plus en plus volumineuses, et donc de plus en plus difficiles à télécharger et à traiter. L'accès à la donnée n'est pas toujours simple en raison du coût, encore très élevé, des données à très haute résolution spatiale, et de certaines politiques nationales de distribution des images. Enfin, pour les utilisateurs, la grande diversité des produits existants peut être source de confusion. Des efforts doivent être faits pour exposer les potentialités et limites de chaque produit.

La diversité spatio-temporelle tant des conditions environnementales que des pratiques agricoles des pays du Sud, rend **difficile l'utilisation de méthodes développées pour les agricultures du Nord**. La majorité des méthodes

d'estimation des rendements reposent sur les statistiques agricoles (CropWatch, SPAM, etc.). Ces méthodes ne peuvent être des solutions dans de nombreux pays d'Afrique qui voient la qualité de leur système de statistiques agricoles décroître depuis 30 ans. Les méthodes actuelles sont trop « technocentrée ». Elles sont fortement pilotées par l'industrie spatiale et n'intègrent pas suffisamment les données environnementales et sociales existantes.

Bien qu'incomplète, l'analyse de l'impact des nombreuses initiatives utilisant des données satellitaires montre la faible pérennité des activités au sein des services étatiques et par conséquent la faible employabilité des cadres nationaux formés aux techniques spatiales. L'analyse montre aussi des expériences réussies dans certains pays, réussites liées à une volonté politique affirmée développer les technologies d'information spatiale.

2. ... mais un environnement porteur

Mais au-delà des difficultés réelles, que cela soit au niveau technique (données et outils) ou institutionnel (acteurs africains ou institutions internationales), l'avenir est porteur pour le développement des applications de la télédétection. Citons quelques faits.

Au même titre que les années 2000 avec l'arrivée de la THRS, les années 2016-2017 devraient être « révolutionnaires » avec **la mise sur orbite des satellites Sentinel-2**. Les services offerts devraient permettre l'amélioration du suivi agricole par l'amélioration du masque du domaine cultivé et le développement de masques spécifiques de culture qui devraient affiner la corrélation entre indices de végétation et rendement. A plus long terme, les programmes d'observation devraient bénéficier de meilleures résolutions spatiales et temporelles.

En parallèle de la future offre satellitaire, se développent **des solutions technologiques innovantes d'acquisition et de traitement des données** : (i) les tablettes et mobiles facilitent la récolte de données et l'envoi d'information pour l'aide à la gestion agricole ; (ii) les drones rendent possibles des acquisitions ponctuelles à bas coût et complémentaires des données de terrain ; (iii) les techniques de type *cloud-computing* permettent un plus grand accès au traitement des images en ligne et la récupération de l'information sans avoir besoin de télécharger des données de plus en plus volumineuses ; (iv) les logiciels libres sont de plus en plus performants ; (v) les bases de données sont de plus en plus accessibles ; (vi) les outils de *crowd sourcing* (ou production participative) tels *Geo-Wiki* ou *OpenStreet Map* sont de plus en plus productifs

La montée en puissance **des bureaux d'étude privés, des ONG locales et des microsociétés de service** tend à pallier les limites des services étatiques. Enfin, **l'environnement institutionnel** est également très favorable du fait d'une stratégie internationale de coordination des programmes satellitaires et des applications, intégrant l'initiative AfriGEOSS, le programme GEOGLAM, les réseaux Geo-Wiki et JECAM.

II. Des priorités pour le continent africain

Dans ce contexte technologique et international très porteur, un projet de consolidation de l'observation spatiale en Afrique passe par plusieurs axes : (i) garantir l'accès aux données à des coûts faibles ; (ii) susciter une demande ; (iii) développer les applications opérationnelles ; (iv) structurer et accompagner les utilisateurs finaux.

1. Garantir l'accès aux données

L'accès aux données sera facilité par l'arrivée des données Sentinel. Mais l'accès aux données ne suffit pas et la filière africaine ne se développera que s'il y a une demande solvable pour des applications et que si la télédétection devient un outil reconnu dans les différentes expertises et études que le secteur agricole génère. Susciter et recommander l'utilisation de l'observation spatiale en prévoyant des financements ad hoc, en particulier ceux octroyés par les grands bailleurs de fonds, est une nécessité.

2. Susciter la demande

Une action de sensibilisation pour faire connaître les technologies géo-spatiales auprès des universités, gouvernements, agences de développement et auprès du secteur privé par des réseaux de communication et d'information est nécessaire, en insistant sur les potentialités mais aussi sur les contraintes pour éviter des attentes inconsidérées.

C'est à ce prix que la filière s'organisera et répondra à la demande en développant des applications opérationnelles. Certaines sont à "portée de main", et l'effort doit être essentiellement d'appropriation et de diffusion pour qu'elles puissent se déployer sur de larges échelles.

3. Développer des applications opérationnelles

Les priorités en termes d'applications sont du ressort des utilisateurs, mais on constate que deux produits font consensus. Le premier est la cartographie du

domaine cultivé aux échelles nationales. C'est un besoin récurrent qui pourrait être satisfait par une cartographie de l'occupation du sol de type Corine Land Cover (déjà existante dans certains pays d'Afrique de l'Est), à partir d'images acquises par Landsat 8 et Sentinel-2. Rappelons qu'à cette fin, la boîte à outils Sentinel2-Agri de l'ESA devrait être diffusée début 2017 (e.g. Bontemps *et al.*, 2015 ; Inglada *et al.*, 2015). Le second produit est la production de supports cartographiques (*baseline*) pour des projets de développement rural. Facile à mettre en œuvre à partir d'images à haute et très haute résolutions spatiales, cette application ne pose pas de problème technique particulier, mais elle peut s'avérer coûteuse si l'on utilise des images à résolution métrique sur de grands territoires.

4. Structurer et accompagner les utilisateurs finaux

Le développement des applications opérationnelles passe par un effort en **recherche méthodologique**. Cette recherche est indispensable pour adapter les méthodes développées pour les agricultures du Nord à celles du Sud, et pour développer des méthodes spécifiques prenant en compte la complexité des milieux. L'innovation méthodologique passe par l'adoption (i) d'approches intégrées mêlant des connaissances de différentes disciplines (sciences sociales, agronomie, sciences environnementales) ; (ii) d'approches multisources qui permettent de traiter conjointement des données satellitaires multi-résolution et optique/radar, mais également d'autres types de données (données de terrain, environnementales), de l'expertise et de la modélisation.

Cette recherche doit s'articuler avec les **programmes d'accompagnement** des initiatives locales privées d'entreprises et d'ONGs de service. Ces structures, nous l'avons vu, sont fragiles. Elles n'ont pas les moyens d'investir dans la capitalisation des méthodes qu'elles mettent au point. Les données qu'elles traitent et les produits intermédiaires qu'elles produisent sont peu valorisés, rarement réutilisés. Une action d'accompagnement de ces structures au niveau logistique et technique par des centres régionaux de compétences bénéficiant de partenariats internationaux devrait leur donner les moyens d'échanger et ainsi de stabiliser les méthodes et de constituer des bases de données et de produits libres d'accès. Pour garantir un accompagnement opérationnel et de qualité, il est nécessaire de mettre en place un partenariat avec des structures de recherche et d'enseignement.

Les avantages de ce type de partenariat sont à terme la consolidation de réseaux régionaux de compétences en télédétection qui mutualisent les

expériences Sud-Sud et Nord-Sud et permettent une réduction du coût des prestations. Au final on obtient un élargissement des métiers d'utilisateurs des produits de télédétection. Des expériences d'incubateurs sont aussi à envisager afin de donner toutes les chances aux jeunes diplômés d'investir le monde du travail dans le domaine des applications de la télédétection.

Bibliographie

- Anyamba A. et al., 2009. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 955-959.
- Arias M., Inglada, J., 2015. Sentinel-2 for Agriculture Design Justification File. ESA Sentinel-2 for Agriculture project.
- Bailey G.B. et al., 2007. In: Meynart, R., Neeck, S.P., Shimoda, H., Habib, S. (Eds.), *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites Xi*. Spie-Int Soc Optical Engineering, Bellingham.
- Baillarin S.J. et al., 2012. In: ISPRS (Ed.), *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (XXII ISPRS)*, Melbourne (Australia).
- Balaghi R. et al., 2012. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Rabat, Maroc.
- Bartholomé E., Belward, A., 2005. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 1959-1977.
- Becker-Reshef I. et al., 2010. *Remote Sensing*, 2, 1589-1609.
- Becker M. et al., 2014. *Remote Sensing*, 6, 9340-9358.
- Begue A. et al., 2011. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 21, 413-420.
- Belward A.S., Skolen, J.O., 2015. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103, 115-128.
- Bertrand G., 1968. *Revue de Géographie des Pyrénées et du sud-ouest*, 3, 249-272.
- Bicheron P. et al., 2008. *GLOBCOVER : Products Description Manual*; ESA, 25 p.
- Bisquert M. et al., 2015. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 72-82.
- Bonin M. et al., 2001. *Géocarrefour*, 76, 241-252.
- Bonnet M.P. et al., 2011. *Conceptual and Modelling Studies of Integrated Groundwater, surface water and ecological systems*, 200-206.
- Bontemps S. et al., 2015. *Remote Sensing*, 7, 16062-16090.
- Boogaard H.L. et al., 2014. Alterra, Wageningen University & Research Centre, Wageningen (Netherlands).
- Bouyer J. et al., 2006. *Veterinary Research*, 37, 633-645.
- Brunet R., 1980. *Espace Géographique*, 9, 253-265.
- Bryceson K.P., Cannon, R., 1990. *Computers and Electronics in Agriculture*, 5, 47-64.
- Carfagna E., Gallego, F.J., 2005. *International Statistical Review*, 73, 389-404.
- Caron P., Cheylan, J.-p., 2005. *Géocarrefour*, 8, 111-122.
- Casse C. et al., 2015. *Atmospheric Research*.
- Chen J. et al., 2014. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.
- Cherlet M. et al., 2000. VEGETATION 2000 Conference, Lake Maggiore - Italy.
- CSE, 2014. Centre de Suivi Ecologique, Dakar (Sénégal).
- Da Silva J.S. et al., 2012. *International Journal of Remote Sensing*, 33, 3323-3353.
- Dardel C. et al., 2014. *Remote Sensing of Environment*, 140, 350-364.
- de Glanville W.A. et al., 2014. *Bmc Veterinary Research*, 10.
- de Leeuw J. et al., 2014. *Remote Sensing*, 10888-10912.
- Deffontaines J., Caron, P., 2007. *Natures Sciences Sociétés*, 15, 69-76.
- Dixon J.A. et al., 2001. FAO et Banque mondiale, Rome et Washington.
- Doumounia A. et al., 2014. *Geophysical Research Letters*, 41, 6016-6022.
- Eklundh L., Olsson, L., 2003. *Geophysical Research Letters*, 30, 1430.

- ESA, 2014.
- FAO, 2014. In: GO-05-2014, S. (Ed.), Technical Report Series.
- FAO, 2015. Technical Report Series. FAO.
- FAO, CIRAD, 2012. 36 p.
- Fensholt R. et al., 2013. *Remote Sensing*, 5, 664-686.
- Ferencz C. et al., 2004. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 4113-4149.
- Ferner J. et al., 2013. International Association for Vegetation Science (IAVS), Tartu (Estonia).
- Fischer G. et al., 2002a. In: IIASA (Ed.). IIASA, Vienna (Austria).
- Fischer G. et al., 2002b. IIASA / FAO.
- Fluet-Chouinard E. et al., 2015. *Remote Sensing of Environment*, 158, 348-361.
- Frappart F. et al., 2008. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113, 1-12.
- Frappart F. et al., 2011a. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1588-1594.
- Frappart F. et al., 2005. *Remote Sensing of Environment*, 99, 387-399.
- Frappart F. et al., 2011b. *GRACE, Remote Sensing and Ground-based Methods in Multi-scale Hydrology*, 343, 22-27.
- Friedl M. et al., 2010. *Remote Sensing of Environment*, 114, 168-182.
- Fritz S. et al., 2009. *Remote Sensing*, 1, 345-354.
- Fritz S. et al., 2015. *Global Change Biology*, 1980-1992.
- Fritz S. et al., 2010. *International Journal of Remote Sensing*, 31, 2237-2256.
- Gallego F.J., 2004. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 3019-3047.
- Gallego F.J., 2006. Workshop proceedings: Remote sensing support to crop yield forecast and area estimates, Stresa (Italy).
- Garrity D. et al., 2012. Australian International Food Security Centre, Canberra.
- Genovese G., Bettio, M., 2004. Methodology of the MARS Crop Yield Forecasting System. JRC, Ispra (Italy).
- GEO, 2014.
- Guilloteau C. et al., 2014. *Journal of Hydrometeorology*, 15, 1624-1635.
- Hannerz F., Lotsch, A., 2006. Centre for Environmental Economics and Policy in Africa, University of Pretoria.
- Hansen M.C. et al., 2000. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1331-1364.
- HarvestChoice, 2013. International Food Policy Research Institute, Washington, DC., and University of Minnesota, St. Paul, MN.
- Henricksen B.L., 1986. ILCA Bulletin.
- Hess L.L. et al., 2003. *Remote Sensing of Environment*, 87, 404-428.
- Holben B.M. et al., 1980. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46, 651-656.
- Hunt E.R. et al., 2003. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69, 675-693.
- IFPRI, 2014. In: Sebastian, K. (Ed.). International Food Policy Research Institute (IFPRI).
- Inglada J. et al., 2015. *Remote Sensing*, 7, 12356-12379.
- JRC, 2009. In: Gallego, J., Craig, M., Michaelsen, J., Bossyns, B., Fritz, S. (Eds.), JRC Scientific and Technical reports. JRC, Ispra (Italy).
- Kaptue Tchunte A.T. et al., 2011. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 207-219.
- Kastens J.H. et al., 2005. *Remote Sensing of Environment*, 99, 341-356.
- Keita N., Carfagna, E., 2010. Proceedings of ICAS-V, Kampala (Uganda).
- Köppen W., 1900. *Geographische Zeitschrift*, 6, 593-611.
- Kottek M. et al., 2006. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259-263.
- Latchininsky A.V., 2013. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7.

- Latchininsky A.V., Sivanpillai, R., 2010. In: Ciancio, A., Mukerji, K.G. (Eds.), *Integrated Management of Arthropod Pests and Insect Borne Diseases*. Springer Netherlands.
- Latham J. et al., 2014. FAO.
- Léo O. et al., 2014. GEOGLAM Implementation Plan Review meeting, Beijing (CHINA).
- Leroux L. et al., 2014. *Remote Sensing*, 6, 8541-8564.
- Liu Y. et al., 2012. *Journal of Geophysical Research*, 117, 14.
- Liu Z.B. et al., 2008. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10, 84-91.
- Loew a. et al., 2013. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 3523-3542.
- Loveland T.R., Belward, A.S., 1997. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 3291-3295.
- Maurel P., 2012.
- Maxwell D., Watkins, B., 2003. *Disasters*, 7, 72-90.
- McCulloch L., Hunter, D.M., 1983. *Remote Sensing of Environment*, 13, 95-102.
- Mitchard E.T.A., Flintrop, C.M., 2013. *Philosophical Transactions of The Royal Society B*, 368.
- Monfreda C. et al., 2008. *Global Biogeochemical Cycles*, 22, 1-19.
- Monteith J.L., 1972. *Journal of Applied Ecology*, 9, 747-766.
- Mouillot F. et al., 2014. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26, 64-79.
- Mueller M.D. et al., 2012. *Nature, UK*, 490, 254-257.
- Nackoney J. et al., 2013. *Landscape and Urban Planning*, 110, 164-174.
- Ouedraogo S., 2015. *Diplomatie et stratégie*, 186 p.
- Palmer A.R., Fortescue, A., 2004. *Journal of Range & Forage Science*, 21, 123-128.
- Pinzon J.E., Tucker, C.J., 2014. *Remote Sensing*, 6, 6929-6960.
- Piou C. et al., 2013. *Basic and Applied Ecology*, 14, 593-604.
- Prigent C. et al., 2007. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 112.
- Ramankutty N., 2004. *Earth Interactions*, 8, 1-22.
- Ramarohetra J. et al., 2013. *Agricultural and Forest Meteorology*, 118-131.
- Raunet M., 1989. In: ORSTOM (Ed.), SOLTROP 89.
- Rembold F. et al., 2013. *Remote Sensing*, 5, 1704-1733.
- Robinson T. et al., 2011.
- Rogers D.J. et al., 1996. *Annals of Tropical Medicine and Parasitology*, 90, 225-241.
- Santini G. et al., 2012. Rome (IT).
- Schapendonk A.H.C.M. et al., 1998. *European Journal of Agronomy*, 9, 87-100.
- Sebastian K., 2009. International Food Policy Research Institute.
- Seyler F. et al., 2008. *Remote Sensing of Inland, Coastal, and Oceanic Waters*, 7150, 715017-715017-715017.
- Siebert et al., 2013. *Project report*; FAO / INRES: Bonn (Germany), 178 p.
- Sivanpillai R., Latchininsky, A.V., 2007. *Environmental Management*, 39, 876-886.
- Sivanpillai R. et al., 2006. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 117, 128-134.
- Smith L.C., 1997. *Hydrological Processes*, 11, 1427-1439.
- Soti V. et al., 2013. *International Journal of Health Geographics*, 12, 11 p.
- Tateishi R. et al., 2014. *Journal of Geography and Geology* 2014, 6, 99-122.
- Tefft J. et al., 2006. FAO, Rome (IT).
- Thenkabail et al., 2009. *Remote Sensing of Global Croplands for Food Security*, CRC Press, Taylor and Francis group, Boca Raton, London, New York, 556 p.

- Tourre Y.M. et al., 2008. *Geospatial Health*, 3, 69-79.
- Traore S.B. et al., 2014. *Weather and Climate Extremes*, 3, 22-30.
- Tratalos J.A., Cheke, R.A., 2006. *Journal of Arid Environments* 64, 342-356.
- Trevennec A. et al., 2012. EMPRES WATCH.
- Tria M. et al., 2014. Crop Monitoring and Yield Forecasting in North African and Southern Mediterranean countries, Rabat, Morocco.
- Tricart J., 1952. *Revue de Géomorphologie dynamique*, 5, 213-218.
- Tucker C.J. et al., 1983. *Remote Sensing of Environment*, 13, 461-474.
- Tucker C.J. et al., 1985. *Remote Sensing of Environment*, 17, 233-249.
- USAID, 2009. In: Grillo, J., Holt, J. (Eds.).
- van Wart J. et al., 2013. *Field Crops Research*, 143, 44-55.
- Vancutsem C. et al., 2013. *Remote Sensing*, 5, 19-41.
- Verbesselt J. et al., 2010. *Remote Sensing of Environment*, 114, 106-115.
- Verhegghen A. et al., 2012. *Biogeosciences*, 9, 5061-5079.
- Vignolles C. et al., 2010. *Geospatial Health*, 5, 23-31.
- Vintrou E. et al., 2012. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78, 839-848.
- Vogel F., Carletto, G., 2012. Global strategy to improve agricultural and rural statistics. High Level Stakeholders Meeting on the Global Strategy - From Plan to Action. World Bank, Rome.
- Voss F., Dreiser, U., 1997. In: Krall, S., Peveling, R., Diallo, B. (Eds.), *New Strategies in Locust Control*, Basel/Boston/Berlin.
- Wessels K.J. et al., 2012. *Remote Sensing of Environment*, 125, 10-22.
- WFP, 2012. UNOOSA (United Nations Office for Outer Space Affairs) Meeting, Rome (IT).
- Whitcraft A.K. et al., 2015a. *Remote Sensing*, 7, 1461-1481.
- Whitcraft A.K. et al., 2015b. *Remote Sensing of Environment*, 156, 438-447.
- World Bank, 2010. In: Bank, W. (Ed.). World Bank, FAO, United Nations, Washington D.C. (US).
- Yang J. et al., 2013. *Nature Climate Change*, 3, 875-883.
- You L. et al., 2015.
- Zonneveld I., 1989. *Landscape Ecology*, 3, 67-86.

Annexes

Annexe 1 : Tableaux synthétiques des produits « Etat de la végétation »

Produits NDVI et EVI

Produit	Qui?	Satellite/Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Couverture temporelle	Résolution temporelle
EM10	VITO	ENVISAT/MERIS	Globale	1 km	2003-2012	10 jours
GIMMS	NASA / GIMMS Group	NOAA/AVHRR	Globale	8 km	1981-2006	15 jours
GIMMS3g	NASA / GIMMS Group	NOAA/AVHRR	Globale	8 km	1981-2011	15 jours
ENDVI10	VITO	Metop/AVHRR	Globale	1 km	Mars 2007-	10 jours
S10 TOC NDVI	VITO	PROBA/V	Globale	1 km 300 m	Octobre 2013 -	10 jours
MOD13 (Q1-A1-A2) MYD13 (Q1-A1-A2)	NASA/ MODIS Land Team	Terra/MODIS Aqua/MODIS	Globale	250 m 500 m 1 km	Février 2000 -	16 jours
NDVI	Copernicus Global Land Service (VITO)	SPOT/VEGETATION	Globale	1 km	Décembre 1998 – Mai 2014	10 jours
NDVI	Copernicus Global Land Service (VITO)	PROBA/V	Globale	1 km	Juin 2014 -	10 jours
Land Surface Level 3	POSTEL/ projet POLDER-PARASOL	ADEOS/POLDER-3	Globale	6 km	2005 - 2012	10 jours
AMMASAT	Projet AMMA	MSG/SEVIRI	Afrique de l'Ouest	4 km	2005-2012	1 jours
MOD13 (Q1-A1-A2) MYD13 (Q1-A1-A2)	NASA/ MODIS Land Team	Terra/MODIS Aqua/MODIS	Globale	250 m 500 m 1 km	Février 2000 -	16 jours

Produits d'anomalie de végétation

Produit	Qui?	Satellite/Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Couverture temporelle	Résolution temporelle
VCI	Copernicus Global Land Service (VITO)	SPOT/VEGETATION	Globale	1 km	Janvier 2013-Mai 2014	10 jours
VCI	Copernicus Global Land Service (VITO)	PROBA/V	Globale	1 km	Juin 2014 -	10 jours
VPI	Copernicus Global Land Service (VITO)	SPOT/VEGETATION	Globale	1 km	Janvier 2013-Mai 2014	10 jours
VPI	Copernicus Global Land Service (VITO)	PROBA/V	Globale	1 km	Juin 2014 -	10 jours
ASI	FAO-GIEWS/ VITO	METOP/AVHRR NOAA/AVHRR	Globale Nationale	1 km	1984-	10 jours Annuel
Mean VHI	FAO-GIEWS/ VITO	METOP/AVHRR NOAA/AVHRR	Globale Nationale	1 km	1984-	Annuel
NDVI Anomaly	FAO-GIEWS/ VITO	METOP/AVHRR NOAA/AVHRR	Globale Nationale	1 km	1984-	10 jours 30 jours
VCI	FAO-GIEWS/ VITO	METOP/AVHRR NOAA/AVHRR	Globale Nationale	1 km	1984-	10 jours 30 jours
VHI	FAO-GIEWS/ VITO	METOP/AVHRR NOAA/AVHRR	Globale Nationale	1 km	1984-	10 jours 30 jours
VCI	NOAA NESDIS STAR	NOAA/AVHRR	Globale	4 km	?	8 jours
VHI	NOAA NESDIS STAR	NOAA/AVHRR	Globale	4 km	?	8 jours

Produits LAI (Surface foliaire)

Produit	Qui?	Satellite/Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Couverture temporelle	Résolution temporelle
MOD15A2 MYD15A2	NASA/MODIS Land Team	Terra/MODISAqua/MO DIS	Globale	1 km	Mars 2000-	8 jours
GIMMS3g	NASA / GIMMS Group	NOAA/AVHRR et Terra/MODIS	Globale	8 km	1981-2011	15 jours
GLASS LAI	Beijing Normal University	NOAA/AVHRR et Terra/MODIS	Globale	1 km	1982-2012	8 jours
LAI	Copernicus Global Land Service (VITO)	SPOT/VEGETATION	Globale	1 km	Décembre 1998-	10 jours
LAI	Copernicus Global Land Service (VITO)	PROBA/V	Globale	1 km	Juin 2014 -	10 jours
LAI-SEVIRI LSALAI	EUMETSAT/ projet LSA-SAF	MSG/SEVIRI	Afrique	3 km	2008-	1 jours 10 jours
GLOBMAP	Chine	NOAA/AVHRR et Terra/MODIS	Globale	8 km	1981-2011	15 jours, puis 8 jours
CYCLOPES	POSTEL/Projet CYCLOPES	SPOT/VEGETATION	Globale	1 km	1999-2007	10 jours
AMMASAT	Projet AMMA	ADEOS/POLDER-1-2	Afrique Ouest	4 km	1996-1997- 2003	10 jours

Produits FPAR/FAPAR

Produit	Qui?	Satellite/Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Couverture temporelle	Résolution temporelle
MOD15A2 MYD15A2	NASA/MODIS Land Team	Terra/MODIS Aqua/MODIS	Globale	1 km	Mars 2000-	8 jours
GIMMS3g	NASA / GIMMS Group	NOAA/AVHRR et Terra/MODIS	Globale	8 km	1981-2011	15 jours
EM10	VITO	ENVISAT/MERIS	Globale	1 km	2003-2012	10 jours
FAPAR	Copernicus Global Land Service (VITO)	SPOT/ VEGETATION	Globale	1 km	Décembre 1998-	10 jours
FAPAR	Copernicus Global Land Service (VITO)	PROBA/V	Globale	1 km	Juin 2014 -	10 jours
FAPAR- SEVIRI LSAFAPAR	EUMETSAT/ projet LSA-SAF	MSG/SEVIRI	Afrique	3 km	2008-	1 jours 10 jours
CYCLOPES	POSTEL/Projet CYCLOPES	SPOT/ VEGETATION	Globale	1 km	1999-2007	10 jours
AMMASAT	Projet AMMA	ADEOS/ POLDER-1-2	Afrique Ouest	4 km	1996-1997- 2003	10 jours
GLASS PAR	Beijing Normal University	Terra/ MODIS MSG/ SEVIRI MTSat- 1RGOES	Globale	5 km	2008-2010	Tri-horaire

Produits FCOVER

Produit	Qui?	Satellite/Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Couverture temporelle	Résolution temporelle
FCOVER	Copernicus Global Land Service (VITO)	SPOT/VEGETATION	Globale	1km	Décembre 1998-	10 jours
FCOVER	Copernicus Global Land Service (VITO)	PROBA/V	Globale	1 km	Juin 2014 -	10 jours
CYCLOPES	POSTEL/Projet CYCLOPES	SPOT/VEGETATION	Globale	1 km	1999-2007	10 jours
AMMASAT	Projet AMMA	ADEOS/POLDER1-2	Afrique Ouest	4 km	1996-1997- 2003	10 jours
FVC-SEVIRI LSAFVC	EUMETSAT/projet LSA-SAF	MSG/SEVIRI	Globale	3 km	2008-	1 jour 10 jours

Produits sur la productivité de la végétation

Produit	Qui?	Satellite/ Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Couverture temporelle	Résolution temporelle
MOD17A2 MYD17A2 (GPP)	NASA/MODIS Land Team	Terra/MODIS Aqua/MODIS	Globale	1 km	2000-2010	8 jours
MOD17A3 (NPP)	NASA/MODIS Land Team	Terra/MODIS	Globale	1 km	2000-2010	8 jours
DMP	Copernicus Global Land Service (VITO)	SPOT/ VEGETATION	Globale	1 km	Janv 2013- Mai 2014	10 jours
DMP	Copernicus Global Land Service (VITO)	PROBA/V	Globale	1 km	Juin 2014 -	10 jours
HANPP	NASA-Socioeconomic Data and Application Center	NOAA/AHRR - FAOSTAT - GPW	Globale	20 km	1995	Annuel
GloPEM	NASA / GIMMS Group	NOAA/AVHRR	Globale	8 km	1981-2000	10 jours

Produits pour le suivi des feux et la localisation des surfaces brûlées

Produit	Variables	Qui?	Satellite/ Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Couverture temporelle	Résolution temporelle
MOD14A1 MOD14/A2	Occurrence des feux et localisation des feux actifs	NASA/MODIS Land Team	Terra/MODIS	Globale	1 km	2000 -	Journalier 7 jours
MCD45A1	Localisation des surfaces brûlées	NASA/MODIS Land Team	Terra/MODIS Aqua MODIS	Globale	500 m	2000 - 2013	Mensuel
BA	localisation des feux et information temporelle sur la saison des feux	Copernicus Global Land Service (VITO)	SPOT/ VEGETATION	Globale	1 km	Avril 1999 - Mai 2014	10 jours
FDeM	Suivi et détection des feux	EUMETSAT/ projet LSA-SAF	MSG/SEVIRI	Afrique Europe	3 km		15 minutes
Fire	Surfaces brûlées	ESA - Climate Change Initiative	ENVISAT/MERIS Terra/MODIS	Globale	300 m 40 km	2006 - 2008	Annuel
GFED4	Surfaces brûlées et émissivité des feux		Terra/MODIS TRMM/VIRS ENVISAT/ATSR	Globale	20 km	1997 -	Journalier Mensuel
L3JRC	Surfaces brûlées	JRC	SPOT/ VEGETATION	Globale	1 km	2000 - 2007	Journalier
GBS	Surfaces brûlées		NOAA/AVHRR	Globale	8 km	1982 - 1999	7 jours
GLOB-SCAR	Surfaces brûlées	ESA	ERS/ATSR	Globale	1 km	2000	Mensuel
GBA2000	Surfaces brûlées		SPOT/ VEGETATION	Globale	1 km	2000	Mensuel

Annexe 2 : Tableaux synthétiques des produits « Cycle de l'eau »

Produits d'estimation des précipitations

Produit	Qui?	Satellite/Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Période	Résolution temporelle
PERSIANN	University of California, Irvine	Combinaison de l'IR de plusieurs satellites géostationnaires	Globale	20 km	Mars 2000 -	3 heures 6 heures Journalière
TRMM 3B42 et TRMM 3B43	NASA/Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center	TRMM/TMI + autres satellites	Globale	20 km	1998 -	3 heures (3B42) Mensuelle (3B43)
CMORPH	NOAA/Climate Prediction Center	NOAA/SSM/I et NOAA/AMSU-B et EOS Aqua/AMSR-E et TRMM/TMI	Globale	8 km	Décembre 2002 -	30 minutes
GSMaP	JST/CREST	TRMM/TMI et EOS Aqua/AMSR-E et ADEOS-II/AMSR et NOAA/SSM/I et NOAA/AMSU-B	Globale	8 km	2003 - 2008	1 heure
GPCP-1dd	World Climate Research Program	Combinaison de l'IR de plusieurs satellites géostationnaires + Mesures au sol	Globale	1°	1997 -	Journalier
RFE2	NOAA/Climate Prediction Center	NOAA/AMSU et NOAA/SSM/I + GPI index + Mesures au sol	Afrique	8 km	2001 -	Journalier
CRU TS	University of East Anglia / CRI	Mesures au sol	Globale	40 km	1901 -	Mensuel
TAMSAT	University of Reading	MSG/TIR + Mesures au sol	Afrique	3 km	1983 -	Journalier Décadaire Mensuel Saisonnier
CHIRPS	USGS/Climate Hazards Group	CHPClim + CPC IR + NCDC IR + TRMM 3B42 + CFSv2 + Mesures au sol	Globale	4 km	1981 -	Journalier Décadaire Mensuel
SIEREM	IRD/HSM	Données IRD + CRU + autres base de données	Afrique Ouest	40 km	1940 - 1998	Mensuel

CMAP	NOAA/Climate Prediction Center	NOAA/SSM/I et NOAA/MSU et OLR OPI index et GPI index + Mesures au sol	Globale	200 km	1979 - 2014	Mensuel Pentadaire
GPCC	DWD/Global Precipitation Climatology Centre	Mesures au sol	Globale	40 km 1°	1951 - 2000	Mensuel

Produits d'anomalies des précipitations

Produit	Qui?	Satellite/Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Couverture temporelle	Résolution temporelle
TAMSAT	University of Reading	MSG/TIR + Mesures au sol	Afrique	3 km	1983 -	Décadaire, Mensuel Saisonnier
GHCN v2	NOAA/National Climatic Data Center	Mesures au sol	Globale	5°	1900 -	Mensuel

Produits d'humidité de surface du sol

Produit	Qui?	Satellite/Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Couverture temporelle	Résolution temporelle
SSM	NASA/National Snow and Ice Data Center	EOS Aqua/AMSR-E	Globale	25 km	Juin 2002 - Octobre 2011	Journalier
ECV-SM	ESA - Climate Change Initiative	Plusieurs instruments actif et passif	Globale	20 km	1978 - 2013	Journalier
SSM	University of Technology Wien	ENVISAT/ASAR	Globale	1 km	janvier 2005 - Avril 2012	Irrégulier, 3-8 jours
SSM	University of Technology Wien	ERS-1/2/AMI	Globale	50 km	Aout 1991 - Mai 2007	Irrégulier, 2-3 jours
SSM	EUMETSAT	Metop-A/ASCAT	Globale	25 km	Janvier 2007 - Mars 2013	Irrégulier, 1-2 jours
Soil Moisture	ESA	SMOS	Globale	25 km	Janvier 2010 -	1 jour 3 jours 10 jours Mensuel

Produits Soil Water Index

Produit	Qui?	Satellite/Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Couverture temporelle	Résolution temporelle
SWI	Copernicus Global Land Service (VITO)	Metop-A/ASCAT	Globale	8 km	Août 2007 -	Journalier
SWI	University of Technology Wien	ERS-1/2/AMI	Globale	50 km	Août 1991 - Mai 2007	Irrégulier, 2-3 jours

Produits surfaces en eau

Produit	Qui?	Satellite/Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Couverture temporelle	Résolution temporelle
WB	Copernicus Global Land Service (VITO)	SPOT/VEGETATION	Afrique	1 km	Janvier 1999 - Mai 2014	10 jours
Global Water Bodies	ESA - Climate Change Initiative	ENVISAT/ASAR	Globale	500 m	Synthèse de données entre 2005 et 2010	
Water Points	USGS – FEWS NET	Landsat – ASTER – SRTM + produit CHIRPS	Sahel		2000-	Journalier

Annexe 3 : Tableaux synthétiques des produits « Bilan d'énergie »

Produits albédo

Produit	Qui?	Satellite/ Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Couverture temporelle	Résolution temporelle
MCD43A3 et MCD43B3	NASA/MODIS Land Team	Terra/MODIS et Aqua/MODIS	Globale	500 m 1 km	2000 -	16 jours
SA	Copernicus Global Land Service (VITO)	SPOT/ VEGETATION	Globale	1 km	1998 -	10 jours
AL-SEVIRI LSAAL	EUMETSAT/projet LSA-SAF	MSG/SEVIRI	Europe, Afrique Nord, Afrique Sud, Amérique du Sud	3 km	2006 -	1 jour 10 jours
POLDER- PARASOL	POSTEL/ Projet POLDER- PARASOL	ADEOS/ POLDER 1-2-3	Globale	6 km	1996-1997- 2003 et 2005-	10 jours
AMMASAT	Projet AMMA	ADEOS/ POLDER-1-2	Afrique Ouest	4 km	1996-1997- 2003	10 jours
GLASS Albedo	Beijing Normal University	NOAA/AVHRR et Terra/MODIS	Globale	1km	1981-2012	8 jours

Produits réflectance

Produit	Qui?	Satellite/ Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Couverture temporelle	Résolution temporelle
TOC-r	Copernicus Global Land Service (VITO)	SPOT/VEGETATION	Globale	1 km	2013 -	10 jours
MOD09 (A1- GA-GQ-Q1- CMG) MYD09 (A1-GA-GQ- Q1-CMG)	NASA/MODIS Land Team	Terra/MODIS et Aqua/MODIS	Globale	250 m 500 m 1 km 5.6 km	2000 -	1 jour 8 jours
SR	ESA - Climate Change Initiative	ENVISAT/MERIS	Globale	300 m 1 km	2003 - 2012	8 jours

Produits caractérisant le rayonnement (ROL : Rayonnement Onde Longue ; ROC : Rayonnement Onde Courte)

Produit	Variables	Qui?	Satellite/ Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Couverture temporelle	Résolution temporelle
DSLFLSADSLF	ROL desc.	EUMETSAT / projet LSA-SAF	MSG/SEVIRI	Europe, Afrique du Nord, Afrique du Sud, Amérique du Sud	3 km	2006 -	30 minutes Journalier
DSLFLSADSLF	ROC desc.	EUMETSAT / projet LSA-SAF	MSG/SEVIRI	Europe, Afrique du Nord, Afrique du Sud, Amérique du Sud	3 km	2006 -	30 minutes Journalier
CERES EBAF- Surface	ROL desc. ROL asc. ROC desc. ROC asc. ROC net ROL net Rayonnement total net	NASA	TRMM/PFM Terra/FM1-2 Aqua/FM3-4 S-NPP/FM5	Globale	1°	1997 -	Mensuel
ECMWF 10-daily	Global radiation	EC/JRC/ MARS	sorties ECMWF + Réanalyse des données avec le modèle Interim	Globale	20 km	2008 - (1989-2012 pour Interim	Décadaire
GLASS DSSR	ROC desc.	Beijing Normal University	Terra/MODIS et MSG/SEVIRI et MTSAT/1R et GOES	Globale	5 km	2008 - 2010	3 heures

Produits de température de surface

Produit	Qui?	Satellite /Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Couverture temporelle	Résolution temporelle
MOD11A1	NASA/MODIS	Terra/MODIS	Globale	1 km	2000 -	Journalier
MOD11A2	Land Team			6 km		Hebdomadaire
MOD11B1						
LST	Copernicus Global Land Service (VITO)	MSG/SEVIRI + GOES LST + MTSAT LST	Globale	4 km	2009 -	Horaire

TCI	NOAA NESDIS STAR	NOAA/AVHRR	Globale	4 km	?	Hebdomadaire
LST	NASA	NOAA/AVHRR	Afrique	8 km	1995 - 2000	Journalier
LST-SEVIRI LSALST	EUMETSAT/ projet LSA- SAF	MSG/SEVIRI	Europe, Afrique Nord, Afrique Sud, Amérique du Sud	3 km	2009 -	15 minutes
ASTER GED	NASA/Jet Propulsion Laboratory	TERRA/ASTER	Afrique Ouest Afrique Nord	100 m 1 km	2000 - 2008	?
AATSR Level 2 LST	ESA	ENVISAT/AATSR	Globale	1 km	2002 - 2012	Journalier

Produits évapotranspiration

Produit	Variables	Qui?	Satellite /Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Couverture temporelle	Résolution temporelle
MOD16	Evapotranspiration, Flux de chaleur latente, Evapotranspiration potentielle, Flux de chaleur latente potentielle	NASA	Terra/MODIS	Globale	1 km	2000 - 2010	8 jours Mensuel
ET-SEVIRI LSAET	Evapotranspiration	EUMETSAT/ projet LSA- SAF	MSG/SEVIRI	Europe, Afrique Nord, Afrique Sud, Amérique du Sud	3 km	2009 -	30 minutes Journalier
ETA Anomaly	Anomalie d'évapotranspiration	USGS?	Terra/MODIS + Mesures au sol	Globale	?	2003 -	Décadaire Mensuel

Annexe 4 : Tableaux synthétiques des produits « Topographie »

Modèles du relief

Produit	Qui?	Satellite/Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Précision altitudinale (+/-)
SRTM	NASA/USGS	SSE/SRTM	Globale	30 m 90 m 1 km	16 m

ETOPO1	NOAA/National Geophysical Data Center	Plusieurs sources de données	Globale	30 m	10 m
ASTER GDEM	METI and NASA	ASTER	Globale	30 m	15 m
GTOPO30	USGS	Plusieurs sources de données	Globale	1 km	18 m
DEM3R3	ISRIC	SRTM 30+ + ETOPO	Globale	1 km	
GLSDEM	NASA/USGS	Plusieurs sources de données	Globale	90 m	

Indices dérivés des modèles du relief

Produit	Variable	Qui?	Satellite/Instrument	Couverture spatiale	Résolution spatiale
SLPSRT3a	Carte des pentes	ISRIC	DEM3R3	Globale	1 km
SCALA physiographic map	Formes du relief		SRTM 30	Globale	1 km
TWISRE3	Topographic Wetness Index	ISRIC	DEM3R3	Globale	1 km
AfSIS TWI	Topographic Wetness Index	ICRAF	SRTM 30	Afrique	90 m
OPI3RE3	Topographic Openness Index	ISRIC	DEM3R3	Globale	1 km

Précédentes publications de la collection

Notes techniques n°1	Panorama des inégalités hommes – femmes dans le monde (Juin 2015)
Notes techniques n°2	La Commission du Mékong face à un tournant – Quelle place pour l'aide française (Septembre 2015)
Notes techniques n°3	Quelle efficacité environnementale de la certification pêche et aquaculture « durable » ? (Septembre 2015)
Notes techniques n°4	Vérité des prix ou socialisation de la couverture des coûts ? (Octobre 2015)
Notes techniques n°5	Accompagnement technique et renforcement des capacités : leçons de l'expérience (Octobre 2015)
Technical Reports n°6	Actors and networks of agroecology in the Greater Mekong Subregion (October 2015)
Technical Reports n°7	Creating Alliances to Accelerate Commercially Viable Sanitation (November 2015)
Notes techniques n°8	La recherche française sur l'éducation dans les pays en développement : un état des lieux (Novembre 2015)
Technical Reports n°9	Facilitating green skills and jobs in developing countries
Notes techniques n°10	Étude sur le développement de l'entrepreneuriat social à Madagascar
Notes techniques n°11	Ecole et Santé de la reproduction Une recherche-action dans les départements du Littoral et de l'Atlantique au Bénin (novembre 2014 – juillet 2015)

Qu'est-ce que l'AFD ?

L'Agence Française de Développement (AFD), institution financière publique qui met en œuvre la politique définie par le gouvernement français, agit pour combattre la pauvreté et favoriser le développement durable.

Présente sur quatre continents à travers un réseau de 72 bureaux, l'AFD finance et accompagne des projets qui améliorent les conditions de vie des populations, soutiennent la croissance économique et protègent la planète.

En 2014, l'AFD a consacré 8,1 milliards d'euros au financement de projets dans les pays en développement et en faveur des Outre-mer.

Agence Française de Développement
5 rue Roland Barthes – 75598 Paris cedex 12
Tél : +33 1 53 44 48 86 – www.afd.fr

Conception et réalisation : Elsa MURAT, AFD