



Université de Toulouse

## MASTER 2 GEOMATIQUE

« ScIences Géomatiques en environneMent et AménageMent » (SIGMA)

<http://sigma.univ-toulouse.fr>

## MEMOIRE DE RECHERCHE

# Analyse comparative des produits d'anomalies de végétation dans les systèmes de sécurité alimentaires en Afrique de l'Ouest

LEMETTAIS Louise



Maître de stage : Agnès BEGUE et Roberto INTERDONATO (CIRAD, UMR TETIS)  
Enseignant-référent : David SHEEREN

mars / septembre 2021



## Résumé

Les systèmes d'alerte précoces (SAP) jouent un rôle fondamental pour la sécurité alimentaire à l'échelle mondiale, régionale et nationale. Pourtant, après plus de 45 ans d'observation de la Terre (OT), l'utilisation de ces données par les organismes en charge de la sécurité alimentaire mondiale reste inégale dans leurs résultats. C'est pourquoi, il semble plus que nécessaire de renforcer la confiance des décideurs et des politiques. Notre étude s'inscrit dans le projet FRESA (Fouille de texte pour la Recherche de consensus sur la Sécurité Alimentaire), et a pour objectif d'analyser les convergences et divergences des produits d'anomalies de végétation entre plusieurs SAPs (FEWS-NET, PAM et ASAP) sur l'Afrique de l'Ouest. Ce travail exploratoire a révélé une grande diversité de méthodes utilisées par les différents SAPs pour les calculs des anomalies de NDVI (produits, lissage, filtre, résolution spatiale et temporelle), et de fortes divergences spatio-temporelles des cartes d'anomalies saisonnières et mensuelles comme par exemple au Sénégal et Nigéria. L'utilisation de données du domaine cultivé a peu renforcé les ressemblances entre les SAPs, où le taux de ressemblance moyen ne dépasse pas les 4%. Les analyses « deux à deux » et des trois systèmes conjointement se sont avérées très enrichissantes avec des taux de pourcentage annuelle allant de 6.5% de ressemblance entre les trois à 72.5% de divergence entre les trois. Ces analyses conjointes ont permis de faire apparaître des sous-régions de divergence comme la bande guinéenne. En termes de tendance sur la période 2010-2020, les trois systèmes montrent toutefois des tendances similaires. Cette étude exploratoire apporte de nouvelles perspectives dans la comparaison des produits d'anomalies NDVI des SAPs en Afrique de l'Ouest, et ouvre des pistes pour l'évaluation de ces produits.

**Mots clés :** Sécurité alimentaire, Anomalie NDVI, Afrique de l'Ouest, SAP, Télédétection, FEWS-NET, PAM, ASAP.

## Abstract

Early warning systems (EWS) play a fundamental role for food security at global, regional and national scales. However, after more than 45 years of Earth observation (EO), the use of these data by agencies in charge of global food security remains uneven in their results. Therefore, it seems more than necessary to strengthen the confidence of decision makers and politicians. Our study is part of the FRESA project (Text Mining for Consensus Building on Food Security), and aims to analyze the convergence and divergence of vegetation anomaly products between several EWSs (FEWS-NET, WFP and ASAP) in West Africa. This exploratory work revealed a great diversity of methods used by the different EWSs for NDVI anomaly calculations (products, smoothing, filter, spatial and temporal resolution), and strong spatio-temporal divergences of seasonal and monthly anomaly maps as for example in Senegal and Nigeria. The use of crop domain data has only slightly reinforced the similarities between the EWSs where the average similarity rate does not exceed 4%. The "two by two" analyses and the three systems jointly proved to be very rewarding with annual percentage rates ranging from 6.5% similarity between the three to 72.5% divergence between the three. These joint analyses made it possible to highlight sub-regions of divergence such as the Guinean band. In terms of trends over the 2010-2020 period, however, the three systems show similar trends. This exploratory study provides new perspectives in the comparison of NDVI anomaly products of EWS in West Africa, and opens up avenues for the evaluation of these products.

**Keywords:** Food security, NDVI anomaly, West Africa, EWS, remote sensing, FEWS-NET, WFP, ASAP.

## Remerciements

Tout d'abord un grand merci à mes maîtres de stage **Agnès Bégué** et **Roberto Interdonato** !

Un grand merci à toi Agnès pour m'avoir guidé, formé et encouragé au travers cette expérience dans le monde de la recherche. Merci pour ton expérience professionnelle, ton exigence et ta patience qui m'ont beaucoup appris au cours de ces 6 mois.

Un grand merci à toi Roberto pour ta patience et tes conseils professionnelles. Merci de m'avoir guidé et encouragé tout au long de ce stage et dans les moments de doutes.

Un grand merci à toi aussi **Louise Leroux** pour ton écoute, ton temps et tes précieux conseils !

Merci à **Maguelonne Teisseire** et à **Mathieu Roche** d'avoir pris le temps de m'accompagner, de me conseiller et de m'écouter pendant plusieurs semaines durant ce stage.

Merci à **Christian Baron** et à **Mathieu Castets** d'avoir pris le temps et partager leurs savoir malgré les rebondissements que nous avons eus avec les données SARRA-O, ce n'est que partie remise !

Merci à l'ensemble des membres du jury d'avoir pris le temps de lire et d'évaluer ce mémoire de recherche.

Je tenais aussi à remercier toutes les personnes qui étaient là de près ou de loin en commençant par les copains de la MTD et de l'Université, merci pour votre soutiens, conseils et pour cette entraide mutuelle.

Un dernier merci à ma famille et mes amis proches de m'encourager dans cette voix, merci à vous de m'avoir épaulé et soutenu durant cette période.

# SOMMAIRE

RÉSUMÉ .....	2
REMERCIEMENTS .....	3
SOMMAIRE .....	4
LISTE DES ACRONYMES ET DES CIGLES .....	6
LISTE DES FIGURES .....	7
LISTE DES TABLEAUX .....	9
<b>PRÉSENTATION DU CONTEXTE DU STAGE .....</b>	<b>11</b>
<b>1. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL .....</b>	<b>11</b>
a. Le Cirad.....	
b. L'UMR TETIS.....	
<b>2. LE PROJET FRESA .....</b>	<b>12</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>14</b>
<b>1. LA SECURITE ALIMENTAIRE .....</b>	<b>14</b>
a. Définition .....	
b. La sécurité alimentaire dans le Monde.....	15
c. La sécurité alimentaire en Afrique .....	15
d. Les systèmes d'alerte précoce pour la sécurité alimentaire (SAP).....	16
<b>2. LES FACTEURS DE LA SECURITE ALIMENTAIRE EN AFRIQUE DE L'OUEST .....</b>	<b>17</b>
a. Contexte climatique .....	
b. Croissance démographique .....	18
c. Contexte économique du marché alimentaire .....	19
d. Contexte socio-économique .....	20
e. Contexte agronomique .....	21
<b>3. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS .....</b>	<b>17</b>
<b>ÉTAT DE L'ART .....</b>	<b>22</b>
<b>1. L'OBSERVATION DE LA TERRE COMME OUTIL DE SUIVI DE LA REPOSE DE LA VEGETATION .....</b>	<b>23</b>
a. La télédétection comme outil de suivi de la végétation .....	
b. Le suivi des cultures .....	26
c. Le suivi de l'état de santé de la végétation, l'exemple de l'ASI .....	27
<b>2. LES SYSTEMES D'ALERTE PRECOCE MONDIAUX POUR LA SECURITE ALIMENTAIRE .....</b>	<b>28</b>
a. GIEWS .....	28
b. AGRHYMET .....	29
c. FEWS-NET .....	30
d. ASAP .....	31
e. PAM .....	
<b>3. L'INITIATIVE GEOCLAM .....</b>	<b>32</b>
a. Le Crop Monitoring for Early Warning (CM4EW) .....	
<b>DONNÉES ET MÉTHODES.....</b>	<b>34</b>
<b>2. LES PRODUITS D'ANOMALIES .....</b>	<b>36</b>
<b>3. LES PRODUITS D'ALERTE PRECOCE .....</b>	<b>36</b>
<b>4. AUTRES DONNEES SATELLITAIRES ET VECTORIELLES UTILISEES.....</b>	<b>39</b>
a. Limites administratives .....	
b. Carte du domaine cultivé .....	
c. Données de déforestation .....	

5. METHODOLOGIE GENERALE .....	40
a. Téléchargement et pré-traitement des données .....	41
b. Traitement des données .....	42
c. Outils utilisés .....	44
i. QGIS.....	31
ii. R et Rstudio .....	31
iii. Python.....	31
<b>ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DES PRODUITS D'ANOMALIES DE VÉGÉTATION .....</b>	<b>45</b>
1. COMPARAISON DES ANOMALIES BASEES SUR DES INDICATEURS DIFFERENTS .....	46
a. Les produits natifs .....	46
b. L'analyse des seuils .....	47
c. L'analyse de la variabilité annuelles des produits d'anomalies de végétation .....	48
2. ANALYSE DE LA VARIABILITE SAISONNIERES DES PRODUITS D'ANOMALIES DE VEGETATION .....	51
a. Analyse des convergences et divergences .....	51
i. Sans masque des cultures .....	51
ii. Avec masque des cultures .....	55
b. Analyse comparatives dites deux à deux .....	57
i. FEWS-NET & PAM .....	57
ii. FEWS-NET & ASAP .....	58
iii. PAM & ASAP .....	59
c. Analyse comparative à trois.....	62
d. Études de cas .....	62
i. Le Golfe de Guinée .....	63
ii. Le Sénégal .....	63
iii. Le Nigéria.....	63
3. ANALYSE MENSUELLE DE LA VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE .....	65
<b>DISCUSSION .....</b>	<b>67</b>
1. DES INFORMATIONS CONTRADICTOIRES ENTRE PRODUITS .....	68
2. DES PRODUITS DIFFICILEMENT COMPARABLES .....	68
a. Produit image et résolution .....	68
b. Les niveaux de pré-traitement .....	68
c. Indicateurs et période de référence .....	68
d. Des seuils différents.....	69
3. UN MANQUE DE REFERENCES POUR COMPARER LES PRODUITS .....	70
a. Le CM4EW de GEOGLAM .....	70
i. L'année 2016 .....	70
ii. L'année 2017 .....	70
4. LIMITES ET PERSPECTIVES .....	72
5. REPONSES APORTEES SUR LES DIFFERENTES HYPOTHESES DE DEPART .....	73
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>74</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>86</b>

## Liste des acronymes et des sigles

**ACF** : Action Contre la Faim

**ASAP** : Anomaly hot Sports of Agricultural Production

**ASI** : Agricultural Stress Index

**CM4EW** : Crop monitoring for Early Warning

**CEDEAO** : Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest

**eMODIS** : Expedited Moderate-Resolution imaging Spectroradiometer

**EROS** : Earth Resources Observation and Science

**EWX** : Early Warning eXplore

**FAO** : Food and Agriculture Organization of the United Nations

**FEWS-NET** : Famine Early Warning Systems Network

**FPMA** : Food Price Monitoring and Analysis

**FRESA** : Fouille de texte pour la Recherche de consensus pour la Sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest

**GEOGLAM** : Group on Earth Observations Global Agricultural Monitoring

**GIEWS** : Global Information and Early Warning System

**GLC2000** : Global Land Cover 2000

**GNAP** : Groupe National des Associations Pastorales

**IGADICPAC** : Climate Prediction and Application Centre sur l'Afrique de l'Est

**IPC** : Classification de Phase Intégrée

**JRC** : Joint Research Centre

**MODIS** : Moderate-Resolution imaging Spectroradiometer

**NDVI** : Normalized Difference Vegetation Index

**NOAA-AVHRR** : National Oceanic and Atmospheric Administration – Advanced Very High Resolution Radiometer

**ONU** : Organisation des Nations Unis

**OT** : Observation de la Terre

**PAM** : Programme Alimentaire Mondial

**PDDAA** : Programme détaillé de développement de l'agriculture africaine

**PIB** : Produit Intérieur Brut

**RBM** : Réseau Billital Marobé

**SAP** : Système d'Alerte Précoce

**SAN** : Sécurité Alimentaire et Nutritionnelle

**TCI** : Temperature Condition Index

**USAID** : United States Agency for International Development

**USGS** : U.S. Geological Survey

**VCI** : Vegetation Condition Index

**VHI** : Vegetation Health Index

**VPI** : Indice de Productivité de la Végétation

## Liste des figures

Figure 1 : Évolution en pourcentage des personnes sous-alimentées dans le monde avec une projection après 2019. FAO, rapport 2020.....	15
Figure 2 : extrait d'un tableau du nombre de personne en situation d'insécurité alimentaire dans le monde et en Afrique entre 2014 et 2019. Rapport de la FAO, 2019.....	16
Figure 3 : Zone d'étude sur l'Afrique de l'Ouest. 17 pays sont cartographiés. ....	18
Figure 4 : Précipitations annuelles en Afrique de l'Ouest s et région agro- climatiques en Afrique de l'Ouest. Sources : FEWS-NET 2007.....	18
Figure 5 : Évolution de la démographie de 1950 à 2020 et projection démographique totale en Afrique de l'Ouest de 2020 à 2100. Sources : United Nation, 2019.....	19
Figure 6 : Situation alimentaire et nutritionnelle au Nigéria, juin-août 2020, situation projetée. Sources : CLISS, mars 2020.....	20
Figure 7 : Processus d'acquisition de l'information par satellite passif. Sources : Youssef El MERABET.....	23
Figure 8 : Schéma de la signature spectrale d'un couvert végétal et d'un sol Sources : nu. beapi.coop	24
Figure 9 : Schéma des longueurs d'onde et des types de rayonnement dans le domaine du visible et de l'invisible. Sources : reseau-canope.fr.....	24
Figure 10 : schéma des différentes absorptions des différentes molécules contenues dans la plante selon sa maturité. Sources : Robert Simmon.....	25
Figure 11 : Processus utilisé pour calculer le pourcentage de culture affectée par la sécheresse (ASI) au niveau de l'unité administrative. Sources : Oscar Rojas.....	27
Figure 12 : le système de production d'informations AGRHYMET. Sources : Traoré & al., 2014	30
Figure 13 : Plateforme interactive de FEWS-NET EWX sur l'Afrique de l'Ouest. Anomalie de NDVI de la 1 <sup>ère</sup> décade de mai 2017. Sources : EWX.....	31
Figure 14 : l'évolution du NDVI au Sénégal sur l'année 2019. Sources : wfp.org.....	32
Figure 15 : Composantes génériques d'un SAP.....	34
Figure 16 : Extrait de la description des phases d'insécurité alimentaire aigüe de l'IPC. Sources : FEWS-NET.....	38
Figure 17 : Extrait du bulletin d'alerte précoce du système FEWS-NET : carte de l'état de la sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest en mai 2021. Sources : FEWS-NET.....	38
Figure 18 : Carte du domaine cultivé en Afrique de l'Ouest en 2019 (GLC2000 V3).....	39
Figure 19 : Données de déforestation entre 2001 et 2020 sur l'Afrique de l'Ouest. Sources : Google Satellite/Hansen/UMD/Google/USGS/NASA.QGIS.....	39
Figure 20 : Protocoles de comparaison des produits d'anomalies de végétation des 3 SAPs étudiés.....	40
Figure 21 : Script python pour la récupération automatique des données libre d'accès FEWS-NET.....	41
Figure 22 : Distribution des valeurs d'anomalies NDVI brutes codées en 8 bits. En (a) le Système FEWS-NET, (b) le Système PAM et (c) le système ASAP. Exemple choisi, décade 1 de septembre 2020 sur l'ensemble de la zone d'étude.....	41
Figure 23 : Script R pour la conversion des données FEWS-NET en anomalies NDVI.....	42
Figure 24 : Cartographies des variations des classes anomalies (anomalies NDVI reclassées) au seuil initial des trois systèmes sur la période 2010-2020 en Afrique de l'Ouest. ....	46
Figure 25 : Histogrammes des distributions des valeurs avec le jeu de données NDVI ASAP de la décade 3 de septembre 2020 (2010-2020) ; en bleu sont indiqués les seuils préconisés par les SAPs ; en rouge les seuils testés dans cette étude.....	47

Figure 26 : Analyse de sensibilité des seuils des classes d'anomalies à l'échelle saisonnière des trois systèmes. Exemple sur l'année 2020. ....	48
Figure 27 : Variations annuelles moyennes des indicateurs d'anomalies NDVI selon les trois systèmes de l'étude entre 2010 et 2020 sur l'Afrique de l'Ouest. À gauche : graphique des variations positives. À droite : graphique des variations négative.....	49
Figure 28 : Évolution spatio-temporelle des classes d'anomalies NDVI des trois systèmes étudiés à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest.....	50
Figure 29 : Analyse des tendances saisonnières des classes d'anomalies selon les trois systèmes de 2010 à 2020 sans masque des cultures en Afrique de l'Ouest.....	54
Figure 30 : exemple d'anomalies moyenne entre juin et novembre du système PAM avec un masque des cultures sur l'année 2020.....	55
Figure 31 : Analyse des tendances saisonnières des classes d'anomalies selon les trois systèmes de 2010 à 2020 avec un masque des cultures en Afrique de l'Ouest. ....	56
Figure 32 : Zone de convergences et divergences moyennes sur les mois de juin à novembre entre FEWS-NET et PAM en Afrique de l'Ouest avec un masque des cultures en 2015.....	58
Figure 33 : Zone de convergences et divergences moyennes sur les mois de juin à novembre entre FEWS-NET et ASAP en Afrique de l'Ouest avec un masque des cultures en 2015. ....	58
Figure 34 : Zone de convergences et divergences moyennes sur les mois de juin à novembre entre PAM et ASAP en Afrique de l'Ouest avec un masque des cultures en 2015.....	59
Figure 35 : Comparaison à l'échelle saisonnières des trois systèmes ensemble en 2020 sur la zone d'étude sans distinction des classes.....	60
Figure 36 : Cartographies des classes d'anomalies communes dans les trois systèmes de l'étude.....	61
Figure 37 : État des lieux de la déforestation dans la zone guinéenne entre 2001 et 2020 et les moyennes saisonnières des classes d'anomalies détectées en 2020 chez FEWS-NET.....	62
Figure 38 : Variabilité interannuelle des anomalies les trois SAPs au Sénégal sans le domaine cultivé entre 2010 et 2020. ....	63
Figure 39 : Variabilité interannuelle des anomalies selon les trois SAPs au Nigéria sans le domaine cultivé entre 2010 et 2020. ....	64
Figure 40 : Évolutions des classes d'anomalies de végétation durant les mois de novembre entre 2010 et 2020 en Afrique de l'Ouest. L'échelle administrative utilisée est « level 1 » et la règle d'agrégation spatiale utilisée est celle des 10%.....	66
Figure 41 : (a) Extrait du bulletin n° 11 de novembre 2016 de GEOGLAM. (b) Cartographies des classes d'anomalies saisonnières avec une application de deux règles d'agrégation (limite de 10% et 30%) à l'échelle administrative L1 de l'Afrique de l'Ouest selon les trois systèmes. (Le seuil de détection d'anomalies appliqué sont les seuils natifs, pour FEWS-NET +ou-0.05, pour PAM +ou-0.1 et pour ASAP +ou-0.4) .....	70
Figure 42 : (a) Extrait du bulletin n° 22 de novembre 2016 de GEOGLAM. (b) Cartographies des classes d'anomalies saisonnières avec une application de deux règles d'agrégation (limite de 10% et 30%) à l'échelle administrative L1 de l'Afrique de l'Ouest selon les trois systèmes. (Le seuil de détection d'anomalies appliqué sont les seuils natifs, pour FEWS-NET +ou-0.05, pour PAM +ou-0.1 et pour ASAP +ou-0.4).....	71

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des produits d'anomalies de végétation des systèmes ASAP, PAM, FEWS-NET et GIEWS.....	35
Tableau 2 : Synthèse des produits d'alertes précoces des systèmes présent en Afrique de l'Ouest.....	37
Tableau 3 : Différents seuils pour la classe deux, pas d'anomalies dans les trois systèmes. La classe deux du système ASAP ne varie pas du fait de la construction de son anomalie de végétation.....	42
Tableau 4 : Pourcentages de classes d'anomalies saisonnières calculées sans le domaine cultivé (seuil FEWS-NET et PAM +/-0.05 et ASAP +/-0.4 ; référence 2010 – 2020.....	53
Tableau 5 : pourcentages de classes d'anomalies saisonnières calculées sur le domaine cultivé (seuil FEWS-NET et PAM +/-0.05 et ASAP +/-0.4 ; référence 2010 – 2020.....	57
Tableau 6 : Pourcentage de ressemblances et de dissemblances selon 5 labels entre les trois systèmes de l'étude sur le domaine cultivé. Seuil FEWS- NET et PAM +/-0.05 et ASAP +/-0.4 ; référence 2010-2020.....	59
Tableau 7 : Pourcentage de ressemblance et de divergence saisonnière selon 3 labels entre les trois systèmes de l'étude sur la période 2010-200 sans distinction des classes d'anomalies.....	60
Tableau 8 : Pourcentage de ressemblance selon 3 labels entre les trois systèmes et un 4 <sup>ème</sup> label qui regroupe les divergences.....	61



## Partie 1 : Présentation du contexte du stage

---

### 1. Présentation de la structure d'accueil

#### a. Le Cirad

Créé en 1984, Le Cirad (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) est un établissement public à caractère industriel et commercial (ou EPIC) placé sous la double tutelle du Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et du Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères. Sa principale mission est de produire et transmettre de nouvelles connaissances pour accompagner l'innovation et le développement agricole dans les pays tropicaux et méditerranéens. Face aux changements globaux, le Cirad a pour objectif de bâtir une agriculture durable capable de nourrir 10 milliards d'êtres humains en 2050, tout en préservant l'environnement.

Le Cirad en quelques chiffres ([cirad.fr](http://cirad.fr)) :

- 1650 salariés (800 chercheurs, dont 200 à l'étranger) ;
- des activités en partenariat avec plus de 100 pays et 200 institutions ;
- 3 départements scientifiques : Systèmes biologiques (Bios), Performance des systèmes de production et de transformation tropicaux (Persyst), Environnement et sociétés (ES) ;
- 13 directions régionales à travers le monde ;
- 30 unités de recherche ;
- un budget annuel d'environ 200 millions d'euros ;
- plus de 400 doctorants encadrés chaque année.

Le stage de recherche s'est déroulé dans l'Unité Mixte de Recherche (UMR) TETIS (Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale) du Cirad basée à la Maison de la Télédétection de Montpellier. Ce stage s'inscrit dans un projet de recherche financé par le CNES, le projet FRESA (Fouille de Texte pour la Recherche de Consensus sur la Sécurité Alimentaire), qui vise à renforcer les systèmes de suivi de la sécurité alimentaire par l'utilisation de méthodes avancées de Traitement Automatique du Langage (TAL) et science de données.

#### b. L'UMR TETIS

L'UMR TETIS (Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale) est une unité de recherche méthodologique dont la mission principale est la maîtrise de l'information spatialisée à travers la production de méthodes et connaissances sur l'ensemble de la chaîne de l'information spatiale. L'UMR TETIS est rattachée au département scientifique Environnement et Sociétés (ES) du Cirad et est composée de quatre organismes de tutelles, le Cirad, AgroParisTech, l'INRAE et le CNRS, et d'une soixantaine d'ingénieurs/chercheurs. L'UMR structure ses activités autour de l'acquisition et traitement des données spatiales, de la modélisation spatio-temporelle, de l'extraction de connaissances, ainsi que de la transmission et l'utilisation d'information spatialisée capable de répondre aux différents enjeux de développement dans les domaines de l'agriculture, environnement, santé et territoire. La richesse de l'UMR TETIS réside dans sa pluridisciplinarité qui se reflète dans son organisation construite autour de trois axes de recherche méthodologiques et d'un axe dédié à la formation.

Le stage est rattaché à l'équipe ATTOS. Les agents Cirad de cette équipe travaillent essentiellement sur l'utilisation de la télédétection pour la caractérisation et le suivi des surfaces agricoles des Suds, notamment en Afrique de l'Ouest. Leurs travaux portent notamment sur la cartographie du domaine cultivé et des principales cultures, le zonage des systèmes agricoles et sur l'analyse de séries temporelles d'images basse résolution pour caractériser la dégradation des terres.

### 2. Le projet FRESA

Comme indiqué précédemment, ce stage est rattaché au projet FRESA (Fouille de texte pour la REcherche de consensus sur la Sécurité Alimentaire) qui est un projet financé par le CNES au travers de son programme TOSCA et qui est prévu sur 2 ans (2021-2022).

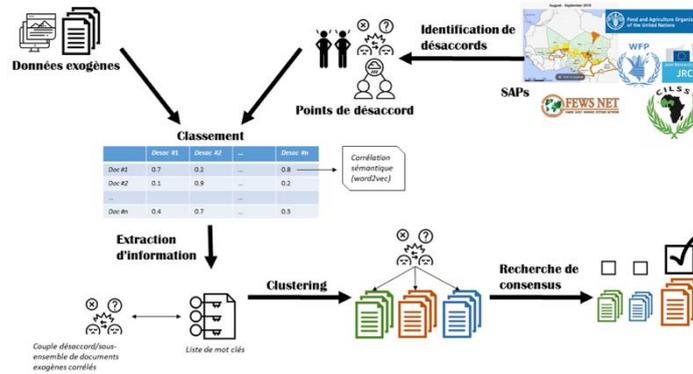
Le projet FRESA traite de la sécurité alimentaire et nutritionnelle (SAN) en Afrique de l'Ouest, et plus particulièrement des systèmes d'alerte précoce (SAP) basés sur des données de télédétection. Depuis les grandes sécheresses du début des années 70, plusieurs SAP ont été développés sur la région pour permettre aux décideurs d'anticiper les crises, et d'aider à la planification des mesures d'urgence en ciblant les populations et/ou les zones à risques. Ces SAP sont développés par des organisations nationale (USAID aux US), régionales (JRC en Europe et AGRHYMET en Afrique de l'Ouest) et internationales (FAO, PAM). Ils reposent pour l'essentiel sur le suivi de la campagne agricole via des images satellite et sur des données socio-économiques qui remontent du terrain. De façon surprenante, ces SAP peuvent fournir des informations divergentes sur l'état de la sécurité alimentaire, notamment sur le suivi de la campagne agricole et sur les facteurs de risque, ce qui peut poser des difficultés en termes de prise de décision sur les mesures à prendre.

Dans ce contexte, le projet FRESA a pour objectif d'utiliser des techniques d'intelligence artificielle, et plus particulièrement de fouille de textes, pour extraire des informations textuelles issues de journaux ou autres médias et ensuite les relier aux produits satellitaires de suivi de la campagne agricole afin 1. de lever les incohérences entre les différents SAP, et 2. apporter des éléments de diagnostic sur l'état de la végétation cultivé, afin de mieux orienter les politiques publiques agricoles en Afrique de l'Ouest.

La méthodologie envisagée pour le projet se découpe en quatre tâches principales :

1. **La collecte des données** : données textuelles multi-sources avec à la fois des données officielles des rapports des SAPs et des données textuelles exogènes obtenues des journaux et médias sociaux.
2. **La comparaison des rapports de SAPs** : identifier les principales sources de désaccords par l'analyse spatiale des différents produits cartographique et identifier une liste de mot clefs spécifique pour chaque point de désaccord, qui sera utilisé pour l'étape suivante.
3. **La mise en relation entre les informations** : les produits cartographiques et les rapports textuels issues de SAPs et des données textuelles exogènes.

4. La recherche de consensus et diagnostic :



Ce stage s’inscrit directement dans la deuxième tâche du projet FRESA, et a pour objectif de fournir une analyse cartographique des divergences et convergences des produits des SAPs sur l’Ouest Afrique.

## Partie 2 : Introduction

---

Dans cette partie introductive, nous apportons des informations de base sur l'état, les enjeux et les principaux facteurs de la sécurité alimentaire dans le monde, avec un focus sur l'Afrique, et sur les principaux systèmes d'alerte précoce opérationnels en Afrique de l'Ouest. À partir de là, nous en dégagerons une problématique et décrivons sommairement les principales activités menées au cours du stage pour répondre à notre objectif.

### 1. La sécurité alimentaire et nutritionnelle

#### a. Définition

La sécurité alimentaire est un concept complexe et constitue une grande préoccupation de la communauté internationale. Nous avons sélectionné la définition du Sommet Mondial de l'Alimentation de 1996 pour la définir : « *La sécurité alimentaire existe lorsque tous les êtres humains ont, à tout moment, un accès physique et économique à une nourriture suffisante, saine et nutritive leur permettant de satisfaire leurs besoins énergétiques et leurs préférences alimentaires pour mener une vie saine et active.* ». Cette définition présente quatre dimensions fondamentales de la sécurité alimentaire et nutritionnelle dont les interactions rendent le concept complexe. Il s'agit de la disponibilité, de l'accessibilité, de la qualité des aliments et de la stabilité des approvisionnements.

- ◆ La disponibilité alimentaire porte sur le « côté de l'offre » de la sécurité alimentaire et est déterminée par le niveau de production alimentaire, les niveaux des stocks, et le commerce net ([FAO, 2008](#)).
- ◆ L'accessibilité est l'accès à la nourriture pour un ménage et correspond à ses capacités en termes de production et d'échanges. On distingue généralement l'accès physique de l'accès économique. L'accès physique aux denrées disponibles se réfère essentiellement aux lieux d'échange et à la régularité des approvisionnements. L'accessibilité économique aux denrées disponibles est liée au pouvoir d'achat des ménages qui résulte des effets conjugués des niveaux du revenu et des prix.
- ◆ La qualité des aliments est importante dans le concept de sécurité alimentaire. De bonnes pratiques de soins et d'alimentation, de préparation des aliments, de diversité du régime alimentaire, et de distribution des aliments à l'intérieur du ménage ont pour résultat un apport adéquat d'énergie et de nutriments. Ceci s'ajoute à une bonne utilisation biologique des aliments consommés, et détermine l'état nutritionnel des individus ([FAO, 2008](#)).
- ◆ La stabilité des approvisionnements implique la régularité des disponibilités alimentaires aussi bien sur le plan spatial que sur le plan temporel. La stabilité des approvisionnements peut être affectée par des facteurs internes et des facteurs externes ([Ouedraogo & al., 2007](#)).

Au cours des dernières décennies, la communauté internationale a réussi à éliminer la faim et les famines dans de nombreux pays du monde. Pourtant, des situations d'insécurité alimentaire sont encore bien présentes suite à des catastrophes naturelles telles que des inondations ou sécheresses, mais aussi en raison de guerres et situations d'instabilités politiques. En plus d'être source de souffrances et de problèmes de santé, une alimentation insuffisante - ou inadéquate - ralentit les progrès dans de nombreux autres domaines du développement comme l'éducation et l'emploi. Malheureusement, encore aujourd'hui, la faim augmente et la malnutrition persiste, compromettant la

réalisation de l'objectif – **Faim Zéro** - d'ici à 2030. En effet, en 2015, la communauté mondiale a adopté les **17 Objectifs mondiaux** de développement durable afin d'améliorer la vie des individus d'ici à 2030. L'Objectif 2 - la Faim Zéro - qui vise à éradiquer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir une agriculture durable, constitue la priorité du Programme alimentaire mondial ([un.org](http://un.org)).

## b. La sécurité alimentaire dans le Monde

Au fil des ans, beaucoup de progrès ont été faits sur le front de la sécurité alimentaire, et la sous-alimentation a baissé de manière significative, passant de 23 % de la population mondiale en 1992 à 9 % en 2017. Mais cette amélioration a été inégale suivant les pays et les régions, et des défis importants demeurent. D'après les estimations de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), l'insécurité alimentaire a touché près de 690 millions de personnes dans le monde en 2019 (Figure 1). Après une forte diminution, le nombre de personnes touchées par la faim dans le monde est reparti à la hausse depuis 2014, avec 60 millions de personnes sous-alimentées supplémentaires entre 2014 et 2019.

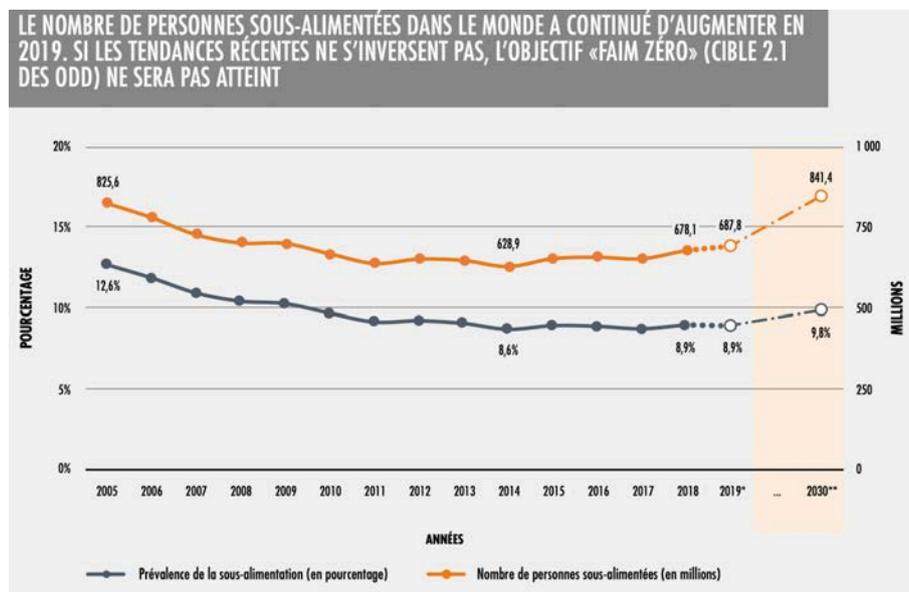


Figure 1 : Évolution en pourcentage des personnes sous-alimentées dans le monde avec une projection à partir de 2019. Sources : FAO, rapport 2020.

C'est en Asie que les personnes qui souffrent de la faim sont les plus nombreuses, mais c'est en Afrique que leur nombre croît le plus rapidement. Selon le rapport sur *L'état de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde* de 2020, la pandémie de covid-19 pourrait faire basculer plus de 130 millions de personnes supplémentaires dans la faim chronique d'ici à la fin de 2020.

## c. La sécurité alimentaire en Afrique

### *Contexte historique*

Dans les années 1970, une série de famines dévastatrices frappent l'Afrique de l'Est et de l'Ouest et les marchés des prix des denrées alimentaire comme le riz, le maïs, le millet et le blé s'envolent, causant un véritable désastre dans les pays des Suds. Plus tard, en 2008, durant la crise des

prix alimentaires, d'autres événements éclatent contre la hausse des prix des aliments de base dans plusieurs pays africains. Les causes sont multiples, complexes et dévastatrices pour les populations les plus pauvres qui consacrent une grande partie de leurs revenus aux denrées de la première nécessité.

### Contexte actuel

En 2019, le Monde comptait 746 millions de personnes en situation d'insécurité alimentaire grave<sup>1</sup> dont 248,5 millions se trouvaient en Afrique (Figure 2). En Afrique subsaharienne, l'Afrique de l'Est et Afrique de l'Ouest sont les régions les plus touchées en termes de nombre de personnes en situation d'insécurité alimentaire grave (175 millions) et ce nombre augmente d'année en année (+67% entre 2014 et 2019). Plusieurs causes, structurelles et conjoncturelles, sont à l'origine de cette dégradation :

### NOMBRE DE PERSONNES EN SITUATION D'INSÉCURITÉ ALIMENTAIRE GRAVE UNIQUEMENT ET D'INSÉCURITÉ ALIMENTAIRE MODÉRÉE OU GRAVE, ÉVALUÉES SELON L'ÉCHELLE DE MESURE DE L'INSÉCURITÉ ALIMENTAIRE VÉCUE, 2014-2019

	Nombre de personnes en situation d'insécurité alimentaire grave (en millions)						Nombre de personnes en situation d'insécurité alimentaire modérée ou grave (en millions)					
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2014	2015	2016	2017	2018	2019
<b>MONDE</b>	<b>602,0</b>	<b>586,0</b>	<b>605,5</b>	<b>646,4</b>	<b>717,5</b>	<b>746,0</b>	<b>1 633,5</b>	<b>1 649,5</b>	<b>1 735,2</b>	<b>1 874,5</b>	<b>1 969,6</b>	<b>2 001,1</b>
<b>AFRIQUE</b>	<b>192,0</b>	<b>198,7</b>	<b>220,5</b>	<b>230,0</b>	<b>233,1</b>	<b>248,5</b>	<b>534,1</b>	<b>549,5</b>	<b>599,6</b>	<b>640,0</b>	<b>646,2</b>	<b>674,5</b>
Afrique du Nord	22,4	20,2	23,7	25,6	22,0	21,0	65,1	59,1	68,6	85,6	73,7	69,1
Afrique subsaharienne	169,5	178,5	196,8	204,3	211,1	227,5	469,0	490,4	531,0	554,4	572,5	605,4
Afrique de l'Est	89,3	92,6	101,1	100,9	101,0	107,2	219,9	225,8	247,0	251,4	254,2	266,4
Afrique centrale	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Afrique australe	12,0	12,3	12,6	12,9	12,9	13,2	27,4	28,0	28,5	29,1	29,4	29,8
Afrique de l'Ouest	39,9	43,9	49,9	55,1	60,2	67,4	144,0	155,7	167,6	180,2	192,6	208,1

Figure 2 : extrait d'un tableau du nombre de personne en situation d'insécurité alimentaire dans le monde et en Afrique entre 2014 et 2019. Sources : rapport de la FAO, 2019.

## d. Les systèmes d'alerte précoce pour la sécurité alimentaire (SAP)

Dès le début des années 1980, plusieurs systèmes d'alerte précoces (SAP) développés par différents organismes sont mis en place sur le continent africain, afin de contribuer à la sécurité alimentaire et à l'augmentation de la production agricole. Ces SAPs ont pour principal objectif de permettre aux décideurs d'anticiper les crises, et d'aider à la planification des mesures d'urgence en ciblant les populations et/ou les zones de risques. En retour, en raison du coût financier de l'invocation d'une telle réponse, les décideurs demandent des preuves convaincantes avant de prendre de tels engagements. Ces systèmes ont été créés dans le but de fournir des alertes précoces des pénuries de production alimentaire, chacune utilisant différentes sources de données et d'informations, notamment des images satellite d'observation de la Terre (OT) pour le suivi de la végétation et des pluies, des données terrain, des modèles et des réseaux de coopérateurs et d'informateurs pour leurs régions d'intérêt respectives (Becker-Reshef & al., 2020).

Depuis 2016, L'initiative GEOGLAM (*Group on Earth Observations, Global Agricultural Monitoring*) publie mensuellement le Crop Monitor for Early Warning (CM4EW ; <https://cropmonitor.org>), un bulletin reflétant un consensus d'experts sur les informations provenant

<sup>1</sup> Selon la FAO, l'insécurité alimentaire grave désignent les personnes qui ont généralement épuisé leurs réserves de nourriture et, dans les pires cas, sont restées un jour (ou plus) sans manger. C'est le niveau de gravité de l'insécurité alimentaire le plus élevé selon l'échelle FIES pour l'indicateur 2.1.2 des ODD. L'indicateur 2.1.2 des ODD est la prévalence de l'insécurité alimentaire. (Figure 6 page 21 du rapport de 2020, FAO).

des SAPs, concernant l'état des cultures dans les pays considérés à risques dans le monde. En effet, les organisations internationales se réunissent mensuellement avec leurs propres données issues de l'OT, des sorties de modèles agro-météo, des données de terrain et leur propre expertise, pour atteindre un consensus sur les conditions de la campagne agricole. En Afrique de l'Ouest, quatre organisations rapportent ses informations (FAO, PAM, JRC et USAID), et si les classifications de l'état des cultures proposées sont souvent cohérentes, il arrive que des informations soient contradictoires (Becker-Reshef et al., 2020). Dans les zones où peu d'information fiable remonte du terrain, la priorité est donnée aux informations qui proviennent de sources convergentes basées sur la télédétection.

## 2. Les facteurs de la sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest

### a. Contexte climatique

Bien que de nombreux facteurs contribuent à l'augmentation de la faim dans le monde, les principaux facteurs sont la variabilité climatique et les extrêmes climatiques conduisant à des crises alimentaires aiguës (Ray & al., 2015). Le changement climatique actuel menace les stratégies établies par nos sociétés, non seulement par une augmentation de la variabilité interannuelle des régimes pluviométriques, mais aussi par une saisonnalité de plus en plus imprévisible et une augmentation des événements climatiques extrêmes comme les sécheresses et les inondations (Field & al., 2002). C'est pourquoi un meilleur suivi de la réponse de la végétation à la variabilité des pluies est déterminante pour mieux anticiper les conséquences des prévisions climatiques sur la sécurité alimentaire, la production agricole et les écosystèmes globaux, notamment sur le continent africain.

Située sur la partie Ouest du continent africain et au Sud du désert du Sahara, l'Afrique de l'Ouest est une région couvrant toute la partie occidentale de l'Afrique subsaharienne avec une superficie de 6 145 680 km<sup>2</sup>, soit environ un cinquième du continent africain. L'Afrique de l'Ouest est composée de 17 pays, allant du Sénégal jusqu'au Tchad, et du Sud du Sahara au golfe de Guinée (Figure 3). La Figure 4 permet de visualiser les différentes régions agro-climatiques présentes dans cette région avec un Sud tropical et un Nord aride, ainsi que les isohyètes<sup>2</sup>. À l'Est, il est possible d'observer les gradients pluviométriques des différentes bandes qui composent cette région d'Afrique avec au Nord des précipitations annuelles autour de 200 mm d'eau et des valeurs supérieures 400 mm dans la bande soudano-sahélienne.

Cette région se compose de cinq bandes de la bande sahélienne à la bande intertropicale, appelé aussi bande guinéenne, plus proche de l'équateur (Figure 4). Ces deux zones sont régies par un système pluviométrique particulier, la mousson. Au Nord, le climat de la bande soudano-sahélienne se caractérise par une saison sèche d'octobre à mai et une saison des pluies de juin à septembre. Au Sud, le climat tropical de la bande guinéenne bénéficie de l'alternance des précipitations en deux saisons humides, la première étant d'avril à juillet et la deuxième plus courte de novembre à décembre.

---

<sup>2</sup> Une isohyète est une courbe imaginaire joignant les points recevant la même quantité de précipitations.

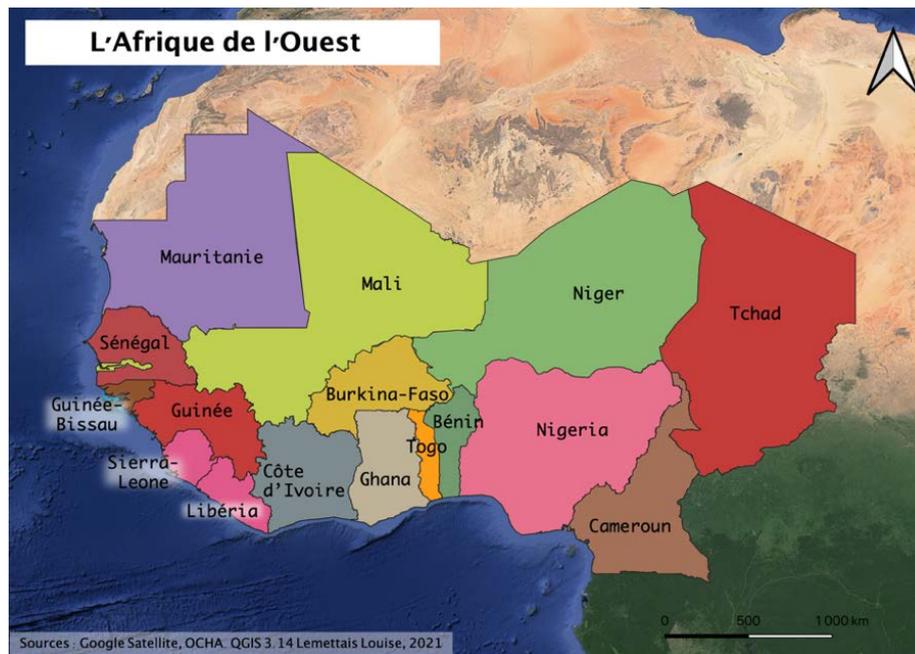


Figure 3 : Zone d'étude sur l'Afrique de l'Ouest. 17 pays sont cartographiés.

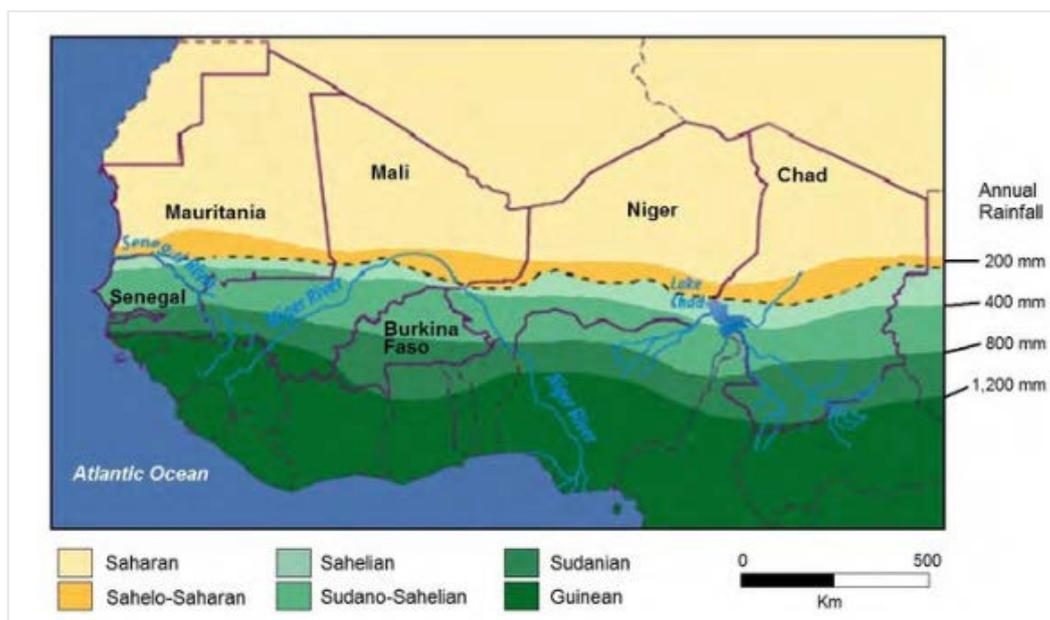


Figure 4 : Précipitations annuelles en Afrique de l'Ouest et région agro-climatiques en Afrique de l'Ouest.  
Sources : FEWS-NET 2007.

## b. Croissance démographique

L'enjeu de la croissance démographique est particulièrement prégnant. Selon le service démographique des [Nations Unies](#), les projections démographiques de l'Afrique de l'Ouest devraient atteindre plus d'un milliard d'habitants à l'horizon 2100 (Figure 5). Cette forte croissance démographique a de lourdes conséquences pour la sécurité alimentaire des populations. En effet, l'accroissement des populations africaines fait augmenter à son tour la demande de produits agricoles, de céréales, de viande et de poisson, ainsi que les produits de rente comme le coton, ce qui constitue une menace pour la sécurité alimentaire. Cette menace ne se résume pas à un problème de disponibilités, mais c'est aussi une question d'accès à la nourriture.

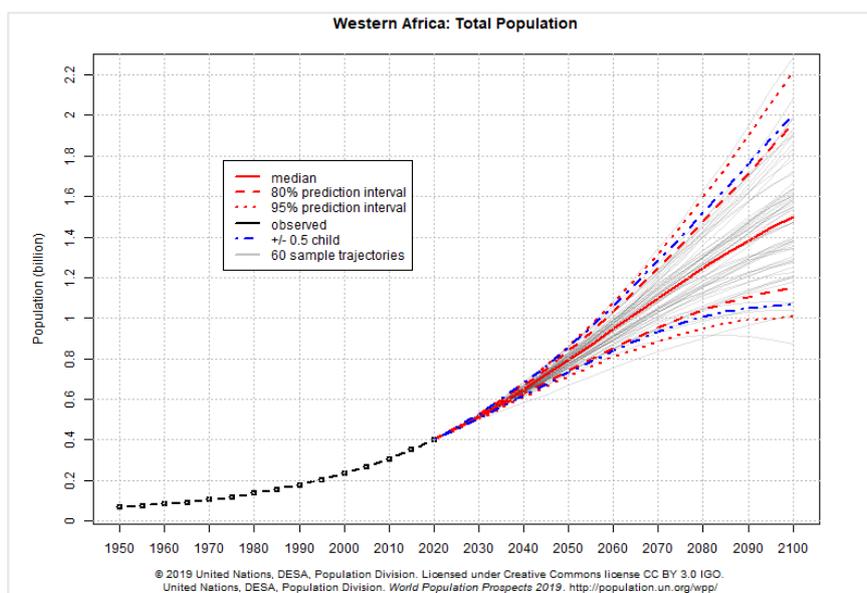


Figure 5 : Évolution de la démographie de 1950 à 2020 et projection démographique totale en Afrique de l'Ouest de 2020 à 2100. Sources : United Nation, 2019.

### c. Contexte économique du marché alimentaire

L'Ouest africain est une région où l'alimentation des populations ainsi que les sources de revenus sont étroitement dépendantes d'une production agricole d'autosubsistance à base de mil, sorgho, maïs et riz. L'Afrique reste le seul continent où l'importation nette de produits alimentaire est majoritaire malgré d'importantes ressources en main-d'œuvre, en terres et en eaux pour en être les leaders. (Bégué & al., 2020). Les causes des crises alimentaires peuvent être aussi induites par l'action humaine comme l'augmentation des prix des aliments ([fao.org](http://fao.org)). A titre d'exemple, selon le bulletin de juillet de la Food Price Monitoring and Analysis (FPMA) ou Suivi et analyse des prix alimentaires en français de la FAO, le prix des céréales, notamment le sorgho, ont atteint des niveaux très élevés dans la région en 2016. Le prix des céréales cultivées localement ont globalement augmenté durant l'année 2016. Localement, les marchés du Burkina-Faso, du Niger et du Mali connaissent de manière forte ces augmentations de prix sur les marchés alimentaires. Ces hausses des prix sont principalement dues à une baisse générale des rendements agricoles due à la faible pluviométrie dans la plupart des pays et à la dépréciation rapide du naira (monnaie locale du Nigéria), provoqué par le recul des recettes pétrolières. Enfin, l'augmentation des coûts des carburants et des transports a accentué la tendance à la hausse des prix des céréales sur les marchés (FPMA, 2016). Les populations africaines semblent être largement sensibles à cette insécurité alimentaire liée à une flambée des prix sur le marché alimentaire à chaque crise apparente.

### d. Contexte socio-politique

Les actions anthropiques liées à l'insécurité alimentaire sont principalement socio-politiques (guerre, ou lié à un conflit) ou des catastrophes résultant de facteurs internes au pays, notamment des politiques économiques et sociales ou des détériorations de l'état de santé publique, notamment avec les maladies chroniques ([wfp.org](http://wfp.org)). Les gouvernements n'ont souvent que peu de moyens pour protéger leurs populations d'un choc de la hausse des prix par exemple. Le Nigéria est un pays qui connaît une détresse importante en termes de sécurité alimentaire. En 2020, plus de 7 millions de personnes sont en insécurité alimentaire dans le pays (OECD.org). La zone Nord du pays, est notamment fortement

impactée par cette insécurité liée aux nombreux conflits qui sévissent dans cette partie du pays (Figure 6).

Les États ouest-africains ont créé la CÉDÉAO<sup>3</sup> avec le but initial de créer une union économique et monétaire. Les 15 États membres de la CÉDÉAO ont ratifié depuis 2005 la Politique agricole régionale de l'Afrique de l'Ouest, puis le développement et l'adoption d'accords ECOWAP/PDDAA<sup>4</sup> par la CÉDÉAO et l'élaboration de plans d'investissement pour exécuter ces accords. Tout ceci en réponse à la crise des prix alimentaires de 2008 et pour remettre l'agriculture au centre des dynamiques socioéconomique des pays. L'agriculture est essentielle pour la croissance économique, la création de l'emploi et la réduction de la pauvreté (Hollinger & al., 2015). Même si aujourd'hui, 45% des habitants des pays de l'Afrique de l'Ouest sont désormais urbains, l'agriculture reste le secteur le plus important en termes d'emplois et contribue fortement au PIB de la plupart des pays. C'est pourquoi, le rôle des organisations interétatiques semble être décisif pour briser cette spirale de l'insécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest.

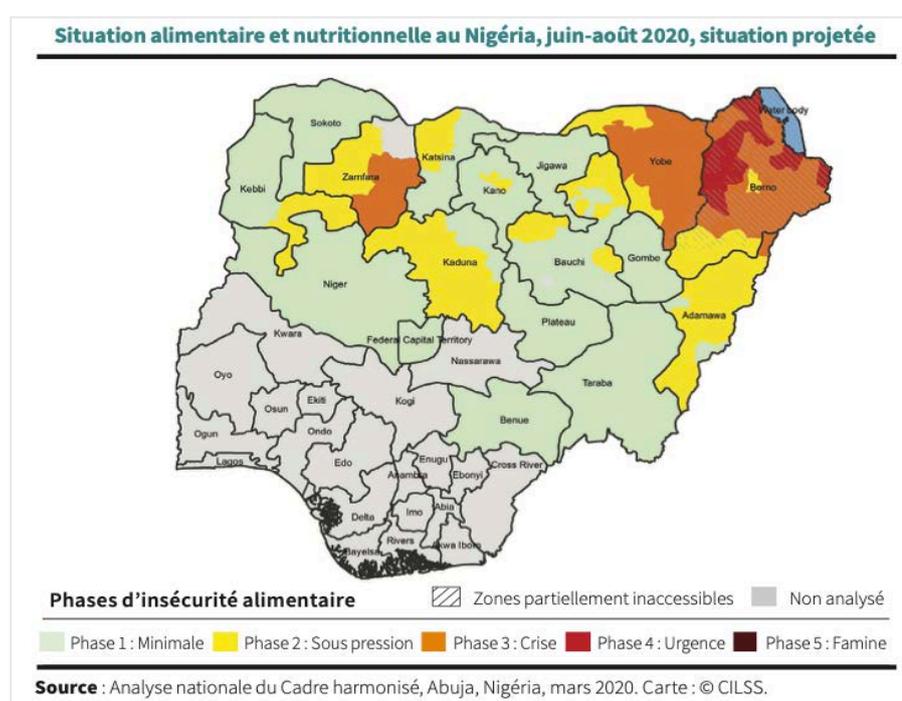


Figure 6 : Situation alimentaire et nutritionnelle au Nigéria, juin-août 2020, situation projetée. Sources : CLISS, mars 2020

### e. Contexte agronomique

L'agriculture africaine est placée au centre des économies mais ses performances dans ce secteur sont traditionnellement à la traîne. La faible productivité agricole en Afrique de l'Ouest est causée par un large éventail de facteurs comme la pauvreté et l'accès aux machines agricoles, les diminutions des périodes de jachère et l'expansion des terres agricoles sur des terres moins fertiles, les ravageurs (insectes), ainsi que l'augmentation d'événements climatiques extrêmes (sécheresse, inondation). Aujourd'hui, la dégradation des terres, qui est parfois utilisée comme synonyme de désertification dans les zones arides, est identifiée comme l'un des problèmes environnementaux urgents en Afrique de l'Ouest (Ibrahim & al., 2015).

<sup>3</sup> La Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest.

<sup>4</sup> Le Programme détaillé de développement de l'agriculture africaine, 2003.

### 3. Problématique et objectifs

Dans ce contexte complexe et très sensible de la situation de la SAN en Afrique de l'Ouest, il est primordial d'avoir à disposition des outils fiables de suivi de la SAN, cohérents entre eux, pour augmenter la confiance des décideurs dans les outils mis en place et ainsi favoriser la prise de décisions rapides et efficaces sur le terrain. Or nous avons vu que les informations produites par les différents SAP sur l'état de la sécurité alimentaire pouvaient être divergentes, ce qui pose problème pour la prise de décision.

Ainsi, l'objectif du stage est **de caractériser les divergences et convergences entre produits de différents SAP**. Pour cela nous avons mis en place un plan de recherche en 4 phases :

- État de l'art des principaux SAPs opérationnels en Afrique de l'Ouest ;
- définition d'un protocole de comparaison des produits des SAPs ;
- récupération des données, pré-traitements et caractérisation dans le temps (annuelle, saisonnier, mensuel) et dans l'espace (Afrique de l'Ouest et sous-région) des divergences et convergences ;
- discussions :
  - o lien avec les cartes d'alerte ;
  - o analyse spatio-temporelle des anomalies ;
  - o analyse des causes des différences entre produits.

Les produits concernés sont **les cartes d'anomalies de végétation et les cartes d'état de la sécurité alimentaire** produites par 3 SAP (FEWS-NET, PAM et ASAP), pour la région d'Afrique de l'Ouest, et pour une période de 11 ans (2010-2020).

Enfin, nous tenterons également de répondre à ces hypothèses de départ :

- *Les produits d'anomalies fournis par les SAPs sont majoritairement cohérents les uns par rapports aux autres car ils proviennent tous d'images MODIS basse résolution.*
- *Les différences détectées proviennent des données et des méthodologie mises en œuvre par les SAPs.*
- *Temporellement, les tendances détectées sont similaires entre les produits.*
- *Spatialement, le système FEWS-NET diverge des deux autres.*
- *L'utilisation du domaine cultivé comme masque des cultures augmente la ressemblance entre les trois SAPs.*

Un diagramme de Gantt est proposé en Annexe 1 afin d'illustrer les différentes étapes du stage au sein de l'UMR TETIS.

## Partie 3 : État de l'art

---

La télédétection est un outil puissant qui permet le suivi de la surface de la Terre. Ce système satellitaire d'observation de la Terre exploite essentiellement la mesure du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par les objets. Ce rayonnement est analysé soit dans les domaines du visible, de l'infrarouge ou soit dans le domaine des micro-ondes. L'information collectée est rendue disponible sous forme d'images qui permettent des analyses à échelle large afin d'apprécier et d'analyser les processus globaux. Les données satellitaires d'observation de la Terre sont définies par trois principales caractéristiques : la résolution spatiale, la résolution temporelle et la résolution spectrale.

- La résolution spatiale : correspond à la taille de l'objet le plus fin pouvant être distingué sur une image et correspond généralement aux dimensions des pixels. Une résolution spatiale fine apportera d'avantage d'informations sur les objets qu'une résolution spatiale plus grossière. Cependant, l'ensemble des résolutions spatiales restent toutes autant utile selon le sujet d'étude. Au préalable, il est donc important de comprendre et d'adapter le choix des images à l'étude engagée. Le choix de la résolution spatiale ne sera pas le même selon si l'étude est conduite à l'échelle d'une parcelle, d'une région, d'un pays ou d'un continent.
  - La basse résolution (>100m) ; ex. capteur MODIS
  - La moyenne résolution (30 à 100) ; ex. capteur LANDSAT TM
  - La haute résolution (5 à 30m) ; ex. capteur SPOT, SENTINEL
  - La très haute résolution (< 5m) ; ex. capteur Pléiades
- La résolution temporelle : correspond à la périodicité entre deux acquisitions de la même scène. Cette caractéristique dépend notamment du temps que le satellite met pour parcourir sa trajectoire orbitaire et de son mode de manœuvre.
- La résolution spectrale : détermine la largeur du spectre capturé par le satellite (qui est souvent lié au nombre de bandes spectrales). Plus la résolution est importante plus le spectre obtenu sera détaillé. Une résolution spectrale grande peut notamment servir à discriminer des essences végétales : les feuillus et les conifères en sont un exemple comme avec le capteur SENTINEL.

La télédétection offre ainsi la capacité de fournir une multitude d'informations à différentes échelles spatiales et temporelles pour caractériser l'état passé et actuel de la biosphère et d'en déterminer en partie des modèles de prédiction comme celui des rendements agricoles.

Le processus d'acquisition de l'information par satellite passif (satellite optique) sur la Figure 7 se déroule en sept phases de A à G. La première phase (A) concerne la source d'énergie, la deuxième (B) l'atmosphère, la phase (C) concerne la cible visée, la phase (D) c'est le capteur, la phase E représente la transmission du capteur vers sa réception et son traitement, la phase (F) est l'interprétation et l'analyse et la dernière (G) est l'application qui peut en être faite (Figure 7).

Parmi les capteurs on distingue les capteurs passifs (typiquement caméra optique) qui analysent le rayonnement émis par l'objet observé et les capteurs actifs (typiquement radar) qui analysent la réflexion du rayonnement qu'ils émettent.

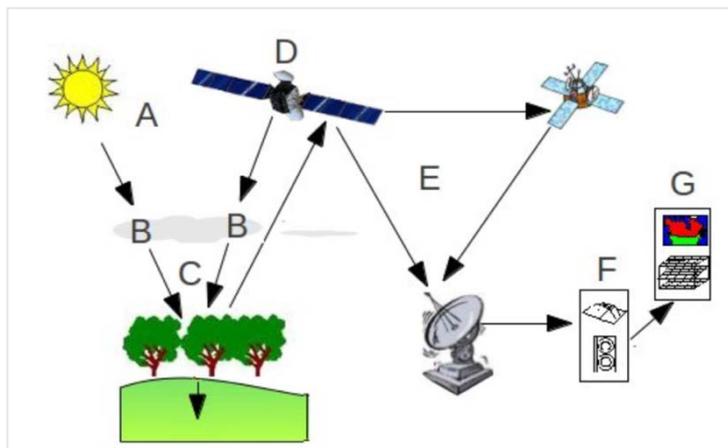


Figure 7 : Processus d'acquisition de l'information par satellite passif.

Sources : Youssef ELMERABET

## 1. L'Observation de la Terre comme outil de suivi de la réponse de la végétation

### a. La télédétection comme outil de suivi de la végétation

La télédétection satellitaire est un outil permettant le développement et l'amélioration des systèmes d'observation et de suivi de la biosphère. Nous pouvons diviser la télédétection en deux groupes. Le premier est relatif à l'évaluation des problématiques en lien avec l'environnement climatique comme avec les produits de précipitation, de rayonnement ou de température. Le deuxième groupe quant à lui est relatif à l'évaluation des problématiques en lien avec l'environnement terrestre. Il permet l'évaluation de la végétation avec les produits comme les indices d'activité chlorophyllienne, l'évapotranspiration et la productivité de biomasse. Il permet aussi la surveillance des catastrophes naturelles comme les inondations et les feux de forêts. Les bandes spectrales les plus couramment utilisées pour l'étude de la végétation sont sur les bandes du visible et de l'infrarouge, permettant le calcul d'indices de végétation fournissant des indications de l'état de la couverture végétale. La Figure 8 ci-dessous illustre les différentes longueurs d'ondes et les différents types de rayonnement acquis. L'indice de Végétation par Différence Normalisée (Normalized Difference Vegetation Index en anglais, NDVI) est l'un des premiers indices de végétation proposé par (Rouse & al., 1973, Tucker, 1979) et est aujourd'hui décliné de plusieurs manières : le calcul des anomalies de NDVI (Rembold & al., 2015, Van Hoolst & al., 2016, Meroni & al., 2019), le calcul de VCI (Vegetation Condition Index) (Kogan., 1988, 1995, Unganai & al., 1998), le calcul du VHI (Vegetation Health Index) ... (Unganai & al., 1998, Seiler & al., 2007) que nous détaillerons dans les paragraphes suivants.

Différents produits de NDVI sont disponibles, avec des résolutions spatiales et temporelles différentes et avec une couverture temporelle différente comme nous venons de le voir. Il est possible de distinguer par exemple les ensembles de données NDVI à long terme et à échelle grossière (8 à 16km) National Oceanic and Atmospheric Administration – Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA-AVHRR), des séries temporelles NDVI de meilleure résolution (250m à 1 000m), mais à plus court terme, MODIS TERRA s'étendant de 2000 à aujourd'hui où encore des Données Satellitaire pour l'Observation de la Terre – végétation (SPOT – VGT) allant jusqu'à une résolution de 300m et disponible de 1998 à 2015.

Le NDVI réagit aux faibles concentrations chlorophylle et au contraire sature dans les zones de biomasse très élevée comme dans les forêts tropicales où ici il serait plus approprié d'utiliser l'indice EVI (Volgelmann & al 1993).

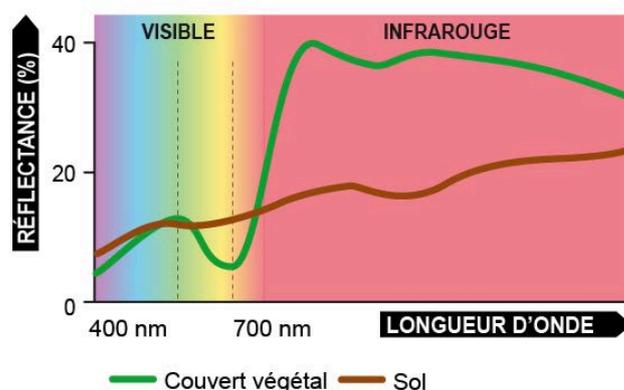


Figure 8 : Schéma de la signature spectrale d'un couvert végétal et d'un sol  
Sources : nu. beapi.coop

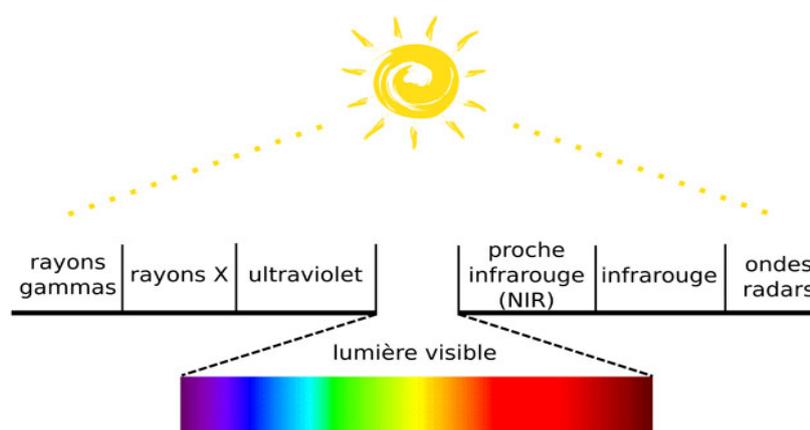


Figure 9 : Schéma des longueurs d'onde et des types de rayonnement dans le domaine du visible et de l'invisible. Sources : reseau-canope.fr

Cet indice fait appel à la bande du rouge (R) dans le visible et la bande du proche infrarouge (PIR). En effet, la chlorophylle absorbe l'énergie dans le visible 400 – 700nm (bande rouge) et réfléchit fortement dans l'infrarouge 800 – 900nm (Figure 8 et Figure 9).

C'est pourquoi ces deux bandes sont particulièrement efficaces pour décrire l'activité végétative à la surface du globe. Ainsi, le NDVI s'est révélé être un indicateur robuste pour l'analyse des changements spatio-temporels de la croissance et de la distribution de la végétation (Tucker & al., 1985, Fensholt & al., 2009), du stress de la végétation (Olsen & al., 2015, Karnieli & al., 2010) et de la productivité de la végétation (Ruimy & al., 1994, Running & al., 2004). Le NDVI est un indice de végétation particulièrement adapté au suivi de l'état de santé de la végétation (Asner & al., 1998). La forte activité chlorophyllienne implique une forte biomasse et donc de forte valeur de NDVI. La formule du NDVI est la suivante :

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

Le NDVI est un indice variant de (-1 à 1). Les valeurs comprises entre (-1 et 0) surviennent dans les régions dépourvues de végétation (sable, roche, neige, eau) ou alors si la végétation est sénescente<sup>1</sup>. Les valeurs comprises entre (0,05 et 0,9) correspondent à l'ensemble des formations végétales où plus les valeurs sont élevées plus le couvert végétal est dense (Rouse & al., 1973). En théorie, le NDVI varie de 0 (pas d'activité photosynthétique) à 1 (activité photosynthétique maximale). En pratique, le seuil minimal indiquant la présence de végétation est 0.05 (Justice et al., 1986). Par conséquent, l'indice de NDVI permet à la fois de mieux connaître les différents états de la végétation (Maimouni & al., 2011), les différentes phases de croissance (Pettorelli & al., 2005, Helman., 2018) et les différents types de végétation (Nicholson & al., 1994).

Les plantes absorbent la lumière, et en particulier, les éléments qui composent les feuilles des plantes absorbent certaines longueurs d'onde comme nous venons de l'expliquer précédemment. Lorsqu'une plante est en bonne santé et en période de développement, elle pratique la photosynthèse par le biais de la chlorophylle, donc la concentration en chlorophylle des feuilles à ce stade de développement est importante. Par ailleurs, lorsque les plantes arrivent à maturité, elles ne font plus la photosynthèse et la concentration en chlorophylle des feuilles diminue au profit d'autres molécules comme les caroténoïdes ou les anthocyanes. Ces différentes molécules n'absorbent pas les mêmes longueurs d'ondes, lorsque la feuille est verte, la chlorophylle est présente en grande quantité, donc elle absorbe toutes les couleurs et réfléchit une partie du rayonnement vert compris entre 510 et 540nm. Lorsque la plante arrive à maturité, la chlorophylle disparaît et la plante réfléchit essentiellement le rayonnement dans le jaune-orangé compris entre 580 et 590nm. La Figure 10 illustre ce propos.

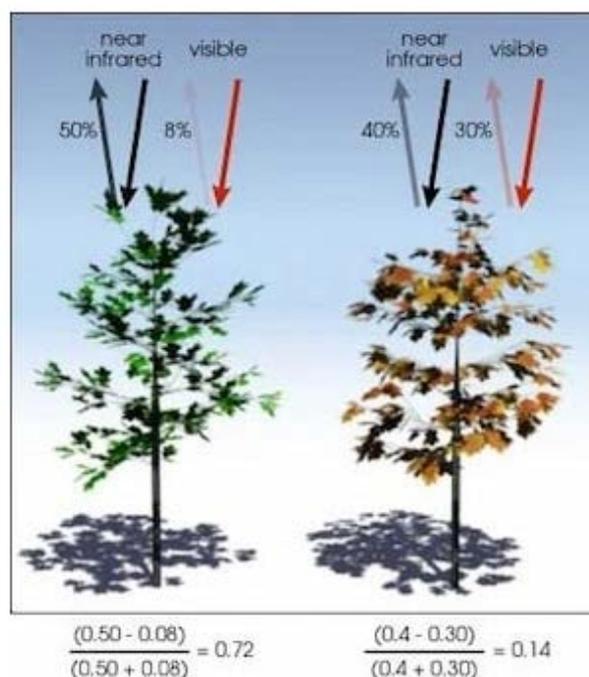


Figure 10 : schéma des différentes absorptions des différentes molécules contenues dans la plante selon sa maturité. Sources : [Robert Simmon](#)

<sup>1</sup> Senescence : période d'endormissement de la végétation.

## b. Le suivi des cultures

*Le suivi des cultures grâce au NDVI, aux anomalies de NDVI et la phénologie des plantes.*

L'utilisation de la télédétection, notamment *via* le NDVI a connu un essor considérable pour la cartographie des surfaces agricoles et la surveillance du développement des cultures. Avec une sensibilité importante à l'activité photosynthétique, le NDVI est un indicateur de la production de biomasse aérienne des cultures et par conséquent peut être utilisé pour estimer les rendements finaux, tout en intégrant l'impact d'éventuel stress hydrique.

La connaissance des principales périodes de croissance durant l'année en cours est décisive pour le suivi des cultures, notamment si des retards de saison sont identifiés. Ainsi, les métriques phénologiques jouent un rôle central pour le suivi des cultures. Plusieurs études ont démontré la pertinence des études phénologiques sur la cartographie des changements récents de la phénologie dans les écosystèmes (Tong & al., 2019)

Les anomalies de végétation sont également d'excellents indicateurs pour le suivi des cultures et de la végétation à large échelle. Elles permettent selon la moyenne de référence allant de 10 à 30 ans en moyenne de connaître par décade calculé si la végétation semble être plus vigoureuse que la moyenne de référence ou non. En effet, la moyenne de référence a pour objectif de déterminer sur une période dite longue la qualité moyenne de la végétation et de devenir une base de référence pour suivre l'évolution des dynamiques végétales futures. Cela permet d'appréhender l'endroit où se situe la valeur observée par rapport à cette moyenne de référence (Rembold & al., 2015, Klisch & al., 2016, Meroni & al., 2019). Parmi la pléthore d'anomalies existantes, l'étude réalisée par Meroni et al (2019) se concentre sur 3 types d'indice d'anomalies couramment utilisés : le z-score, la probabilité de non-dépassement (NEP, également appelée rang centile ou indice de productivité de la végétation, VPI) et l'indice de l'état de la végétation, Vegetation Condition Index en anglais (VCI).

$$Z_i = (\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_{\text{mean},i}) / \text{NDVI}_{\text{sd},i}$$

$$\text{NEP}_i = \text{rank}(\text{NDVI}_i) / (n + 1) * 100$$

$$\text{VCI}_i = (\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_{\text{min},i}) / (\text{NDVI}_{\text{max},i} - \text{NDVI}_{\text{min},i}) * 100$$

## c. Le suivi de l'état de santé de la végétation, l'exemple de l'ASI

Le suivi de l'état de santé de la végétation se caractérise par plusieurs indicateurs : le NDVI, les métriques phénologiques que nous venons de voir, mais aussi les indices caractérisant l'évolution de l'état de santé de la végétation et des conditions climatiques. Il est possible d'évoquer le VCI (Vegetation Condition Index), les anomalies de NDVI avec le zNDVI (Rembold, 2019), le TCI (Temperature Condition Index), le VHI (Vegetation Health Index) et l'ASI (Agricultural Stress Index). Ces différents indices sont utilisés pour tenter d'améliorer la préparation future des potentielles alertes et de réduire l'impact de la sécheresse sur la sécurité alimentaire et la production agricole. Le système de surveillance et d'alerte précoce de la sécheresse agricole (ASIS) en est un parfait exemple (Rojas, 2021). La Figure 11 permet de comprendre le processus utilisé à la FAO au travers du système GIEWS pour calculer les différentes zones agricoles touchées par la sécheresse. Le graphique en haut à droite de la Figure 11 montre les valeurs moyennes temporelles de wVHI tandis que le graphique en bas à droite affiche leurs valeurs moyennes spatiales en wVHI.

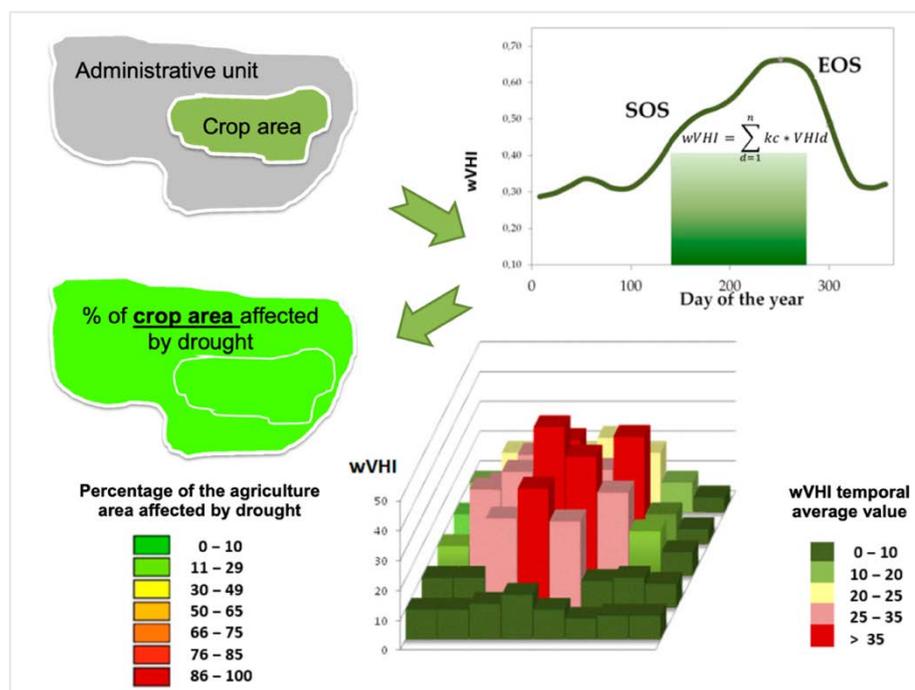


Figure 11 : Processus utilisé pour calculer le pourcentage de culture affectée par la sécheresse (ASI) au niveau de l'unité administrative. Sources : Oscar Rojas

## 2. Les Systèmes d'Alerte Précoce mondiaux pour la sécurité alimentaire

Les systèmes d'alerte précoces (SAPs) se définissent comme un outil de rationalisation de l'attribution de l'aide alimentaire. Établis pour aider les donateurs, les agences des Nations unies et les autres acteurs de l'aide à planifier leurs interventions, les SAP se présentent comme des systèmes de collecte et d'analyse de données relatives à l'accès des populations à la nourriture. Ils doivent permettre de prévenir les crises alimentaires par le biais d'interventions précoces ou à l'extrême, d'en atténuer les effets (Buchanan-Smith & Davies, 1995, UNHCR, 1996). Les SAPs sont exclusivement orientés vers la réponse aux famines par le biais de l'aide alimentaire (Devereux, 2000).

La télédétection pour le suivi des cultures joue un rôle primordial pour les Systèmes d'Alertes Précoce. En effet, cet outil vise à fournir des informations fiables sur la production alimentaire à différents acteurs et décideurs à l'appui de la sécurité alimentaire mondiale et nationale. Les régions arides et semi-arides autour du globe forment également un point chaud important pour les décideurs locaux, notamment dû aux contraintes saisonnières, notamment sur la variabilité de la saison des pluies. De par le climat et le contexte social, un suivi opportun semble être plus que nécessaire. Pour rappel, en 2015, les Nations Unies avaient établi pour objectif « Éliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire et améliorer la nutrition et promouvoir une agriculture durable » (United Nations, 2015). De plus, les différents flux de données satellitaires dans les applications opérationnelles comme les bulletins d'alertes précoces, présentent des avantages clairs et significatifs pour la surveillance, en particulier lorsque les produits de surveillance sont fréquemment mis à jour pendant le cycle de vie des événements (Engle & al., 2002, Atzberger & al., 2013, Brown & al., 2015).

Pour terminer, plusieurs articles (Fritz & al.2019, Becker & al.,2019, Nakalembe & al., 2021) mettent en avant les données et les modèles d'entrée utilisés pour chaque système de suivi, la plupart obtenus à partir de questionnaire comme dans l'article de Fritz *et al* en 2019. Ces tableaux sont

de bons résumés des systèmes de surveillance agricole par satellite. Cependant, il est aussi important de noter que le Centre AGRHYMET, centre Africain spécialisé dans la lutte contre la sécheresse au Sahel depuis 1974, ne figure que trop rarement dans les papiers scientifiques traitant de la sécurité alimentaire.

### a. GIEWS

Créé dans les années 1970 par la FAO, le *Global Information and Early Warning System (GIEWS)* ou SMIAR en français effectue un suivi permanent de la situation de l'offre et de la demande de denrées alimentaires à travers le monde. GIEWS établit également des rapports à ce propos, il alerte les décideurs nationaux et internationaux au sujet des crises alimentaires imminentes. GIEWS offre quatre axes principaux d'analyse :

- L'observation de la terre pour le suivi des cultures ;
- Des rapports Perspectives de récoltes et situation alimentaire ;
- Des Missions d'évaluation des récoltes et de la sécurité alimentaire sur le terrain ;
- Un suivi et une analyse des prix alimentaires sur le marché.

De plus, GIEWS publie, soit chaque trimestre, des rapports d'analyse objectifs sur les conditions dominantes et émet des alertes rapides en cas de crise. À la demande des autorités nationales, le SMIAR aide les pays à réunir des éléments de connaissance concrets sur lesquels fonder leurs décisions politiques, ou encore à planifier leur gestion à l'aide de partenaires du développement, par le biais des missions d'évaluation des récoltes et de la sécurité alimentaire, effectuées conjointement avec le PAM (WFP) sur le terrain. Par ailleurs, en vue de l'application au niveau des pays d'outils d'observation terrestre et de suivi des prix, GIEWS renforce les capacités nationales de gestion des informations en rapport avec la sécurité alimentaire. En 2014, GIEWS développe le Système d'indice de stress hydrique (ASIS) pour l'identification précoce des terres cultivées et des prairies affectées par des déficits hydriques ou, dans les cas extrêmes, par des conditions de sécheresse. L'ASIS a remporté le Geospatial World Excellence Award en 2016. La méthodologie ASIS est basée sur les travaux de Rojas, Vrieling et Rembold (2011), qui ont démontré que la grande sécheresse historique peut-être identifiée sur tout le continent africain en utilisant une combinaison de séries chronologiques historiques d'indice de santé de la végétation (VHI), de cartes phénologiques et de données auxiliaires. Pour correspondre aux exigences de GIEWS, la méthodologie ASIS a été améliorée pour permettre une évaluation de la sécheresse en temps quasi réel et à l'échelle mondiale. (Van Hoolst & al., 2016, Rojas., 2021). Cliquez [ici](#).

### b. AGRHYMET

Créé en 1974, le Centre Régional AGRHYMET est une institution spécialisée du Comité Permanent Inter-États de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS) regroupant treize pays qui sont : Bénin, Burkina Faso, Cap Vert, Côte d'Ivoire, Gambie, Guinée, Guinée-Bissau, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal, Tchad et le Togo. C'est un établissement public interétatique doté de la personnalité juridique et de l'autonomie financière. Il a un statut international avec siège à Niamey au Niger. Le Centre Régional AGRHYMET a pour objectifs principaux :

- De contribuer à la sécurité alimentaire et à l'augmentation de la production agricole dans les pays membres du CILSS et de la CEDEAO.

- D'aider à l'amélioration de la gestion des ressources naturelles de la région du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest en assurant l'information et la formation des acteurs du développement et de leur partenaire dans les domaines de l'agroécologie au sens large (agro-climatologie, hydrologie, protection des végétaux, etc...).

L'objectif global assigné à AGRHYMET lors de sa création est de développer des mécanismes de diagnostic à grande échelle de l'environnement sahélien et de les intégrer dans un plan cohérent d'informations spatiales et statistiques pour détecter, suivre et aider à comprendre la nature et la vitesse des changements dans le Sahel (Traoré & al., 2014). L'environnement d'une part, pour former des experts nationaux dans les domaines de l'agrométéorologie, de l'hydrologie et de la protection des cultures, d'autre part. Le système mis en place fonctionne comme un réseau d'observations des variables climatiques dans différentes zones écologiques pour couvrir la diversité spatiale des phénomènes agro-hydro-météorologiques et leur variabilité temporelle. La collecte de données biophysiques au sol par météorologie nationale, les agences hydrologiques et agricoles sont complétées par l'utilisation de données satellitaires par le biais de stations de réception installées au Centre et de certaines agences nationales. Toutes les données sont ensuite traitées et analysées dans un système d'information qui permet d'émettre des alertes précoces et de gérer les ressources naturelles (Figure 12). Des modèles ont été développés pour suivre les précipitations, la satisfaction des besoins en eau des cultures vivrières et les rendements prospectifs, la progression du front de végétation et ses différentes variations saisonnières et interannuelles. A partir de mai de chaque année, un suivi est mis en œuvre tous les 10 jours aux niveaux régional et national par les groupes de travail multi-disciplinaire qui publient des bulletins décennaires et /ou mensuels pour informer les décideurs sur l'évolution des situations agropastorales et hydrologiques. Outre la production et la diffusion d'informations auprès des décideurs, une composante importante de l'assistance d'AGRHYMET aux États membres est la formation qu'elle dispense pour renforcer les capacités en ressources humaines des services nationaux de météorologie, d'hydrologie et d'agriculture, de la société civile, par le biais de diplômés et de formations sur le tas.

C'est à ce titre que les cadres du Centre AGRHYMET sont de plus en plus sollicités par des organismes bilatéraux et multilatéraux. (USAID, FAO, OMS, IRD, CIRAD, ...) et qu'il prend part, en relation avec le CILSS, aux rencontres internationales liées à la sécurité alimentaire, au développement durable, à la gestion des ressources naturelles et à la lutte contre la désertification. Cliquez [ici](#).

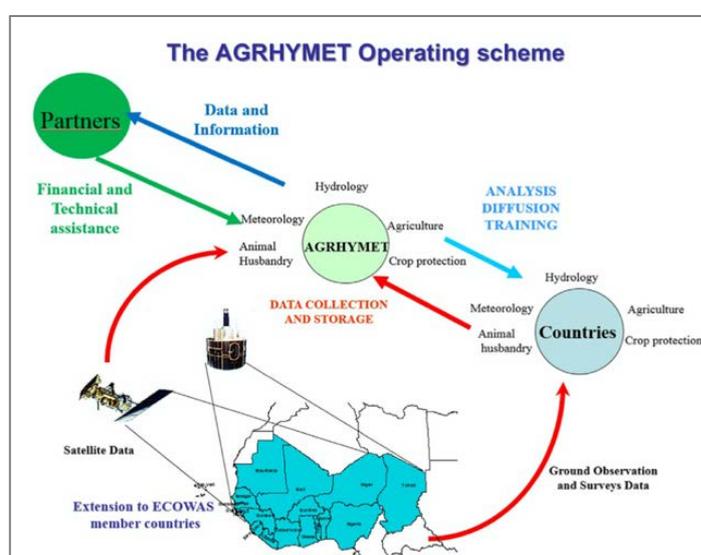


Figure 12 : le système de production d'informations AGRHYMET. Sources : Traoré & al., 2014

### c. FEWS-NET

FEWS NET a été créé en 1985 par l'Agence des États-Unis pour le développement international (USAID) pour fournir une analyse impartiale et fondée sur des preuves aux gouvernements et aux agences de secours qui planifient et répondent aux crises humanitaires. Le réseau surveille la sécurité alimentaire dans plus de 28 pays qui connaissent une variabilité significative des précipitations interannuelles et de la production alimentaire et qui sont exposés à un risque élevé d'insécurité alimentaire. Ces pays sont répartis en Amérique centrale et dans les Caraïbes, en Asie centrale, en Afrique de l'Est, en Afrique australe et en Afrique de l'Ouest (Verdin et al., 2005). Les analystes de FEWS NET travaillent avec des scientifiques, des ministères gouvernementaux et des agences internationales pour suivre les conditions et apporter au monde des informations complètes et opportunes sur l'insécurité alimentaire mondiale. FEWS NET fournit des rapports réguliers sur l'insécurité alimentaire aiguë actuelle et prévue, des alertes sur les crises, des rapports sur les facteurs qui ont un impact sur l'insécurité alimentaire, ainsi que des données et des analyses sur l'insécurité alimentaire. FEWS NET utilise des outils et des prévisions avancés pour prédire l'insécurité alimentaire aiguë afin d'éclairer les réponses humanitaires et de partager l'apprentissage ainsi que les données.

FEWS NET analyse la dynamique de la sécurité alimentaire, nutritionnelle et des moyens d'existence. En utilisant la télédétection, les données agroclimatologiques, la modélisation et l'observation sur le terrain, il cherche à obtenir une bonne compréhension du système climatique pour éclairer son analyse de la sécurité alimentaire. Le Early Warning eXplore (EWX), application web de FEWS-NET, est une source d'information clé pour l'analyse agroclimatologique, la Figure 12 est une représentation du EWX. En effet, il permet des analyses de séries chronologiques pour évaluer la climatologie d'une zone, en évaluant, en surveillant et en faisant rapport sur les progrès saisonniers, ce qui informe le développement de scénarios. Cliquez [ici](#).

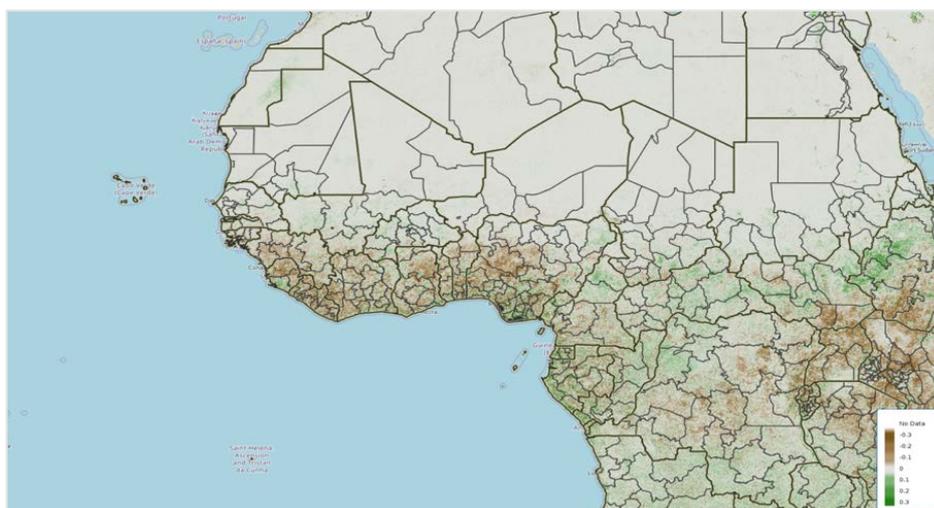


Figure 12 : Plateforme interactive de FEWS-NET EWX sur l'Afrique de l'Ouest. Anomalie de NDVI de la 1<sup>ère</sup> décennie de mai 2017. Sources : EWX

### d. ASAP

ASAP est un système d'aide à la décision basé sur le Web pour l'alerte précoce des points chauds d'anomalies de la production agricole (cultures et parcours) développé par le Centre commun

de recherche (CCR) de la Commission européenne pour la prévention des crises de sécurité alimentaire et l'anticipation de la planification des réponses (Rembold et al., 2019). ASAP se compose de trois plates-formes interactives en ligne basées sur les produits météorologiques et d'Observation de la Terre (OT) qui ciblent un large éventail d'utilisateurs potentiels : l'outil d'évaluation des points chauds, l'explorateur d'avertissement et le « visualiseur » haute résolution. L'évaluation des points chauds fournit une identification mensuelle des pays avec des points chauds de la production agricole en fournissant des récits récapitulatifs qui synthétisent, en termes non techniques, l'analyse des données météorologiques et d'OT au niveau national. L'Avertissement Explorer est un Web-SIG avancé avec une console pour la visualisation des statistiques. Les experts en surveillance de l'agriculture, ayant des connaissances en sciences géospatiales, peuvent utiliser l'Explorateur d'alertes pour explorer directement des cartes et des graphiques basés sur l'OT au niveau infranational pour une analyse plus approfondie. La visionneuse haute résolution est une interface conviviale liée au moteur Google Earth Engine (GEE). Des images satellites à haute résolution spatiale et temporelle (Copernicus Sentinel-1 et Sentinel-2 et Landsat -8) avec une couverture mondiale peuvent être visualisées et traitées pour fournir des informations en temps réel au niveau local (c'est-à-dire sur le terrain). Cliquez [ici](#).

### e. PAM

Le Programme Alimentaire Mondial (PAM) est l'organisme d'aide alimentaire de l'ONU et de la FAO créé en 1961. La plate-forme de visualisation des données du Programme Alimentaire Mondiale (PAM) fournit des profils saisonniers de pluviométrie et de végétation pour le suivi des performances des saisons agricoles. Les utilisateurs peuvent évaluer les profils saisonniers des précipitations et du NDVI (moyennes actuelles et à long terme) et la progression des précipitations avec des anomalies mensuelles et trimestrielles. Les données peuvent être sous-ensembles à diverses limites administratives (Fritz et al., 2019). Les utilisateurs peuvent concentrer leur analyse sur l'ensemble de l'unité administrative ou uniquement sur les superficies cultivées ou pâturées. Le Moniteur saisonnier du Programme alimentaire mondial est un système qui peut surveiller les conditions de croissance saisonnières pour toutes ses zones d'opération. Le Seasonal Monitor utilise des flux de données satellitaires en temps réel et des prévisions saisonnières pour mettre en évidence les changements dans la progression de la saison agricole (Figure 13).

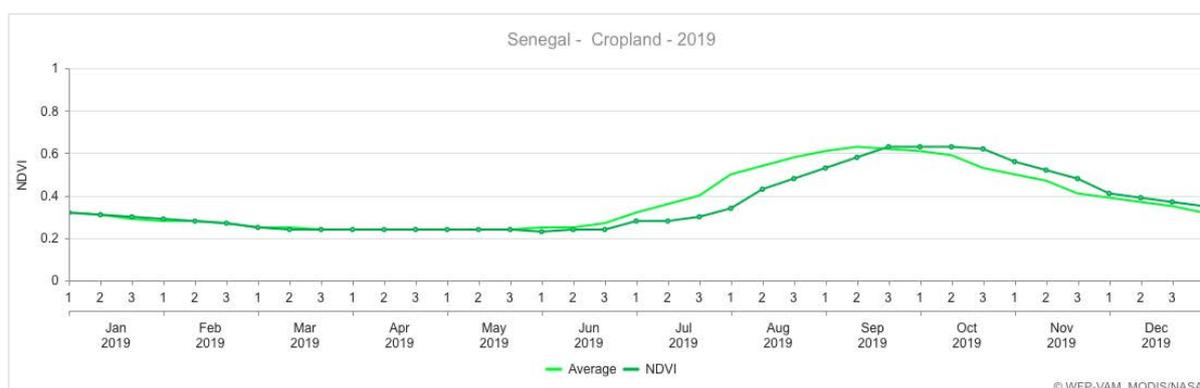


Figure 13 : l'évolution du NDVI au Sénégal sur l'année 2019. Sources : wfp.org

Cela informe les opérations du PAM et les autres parties prenantes dans ce domaine. Le moniteur saisonnier produit régulièrement un certain nombre de produits agro-météorologiques qui sont utilisés par les analystes et les fonctionnaires du PAM sur le terrain pour identifier les conditions

préjudiciables à la sécurité alimentaire des populations pauvres et vulnérables. Le type d'analyse dépend du contexte du pays et des besoins des agents de terrain. L'analyse peut aller de courtes analyses axées sur le plaidoyer à une analyse multidimensionnelle complexe qui s'appuie sur des éléments supplémentaires, tels que les prix du marché et les stocks régionaux de céréales. Une plateforme de visualisation est en cours de développement, qui fournira des visualisations spécifiques aux pays des produits et les reliera à des informations sur la vulnérabilité, fournissant une analyse approfondie des impacts de la sécheresse et des inondations (prévu pour courant 2021). Cliquez [ici](#).

### 3. L'initiative GEOGLAM (Group on Earth Observations, Global Agricultural Monitoring)

Le Group on Earth Observations, Global Agricultural Monitoring (GEOGLAM) Crop Monitor for Early Warning (CM4EW) fait partie d'un partenariat avec les principales agences internationales de surveillance de la sécurité alimentaire. À la suite du développement du Crop Monitor pour le système d'information sur les marchés agricoles (AMIS) du G20 en 2011, qui se concentre sur les principales cultures de produits / d'exportation, le CM4EW a été créé en 2016 pour répondre au besoin urgent d'informations fiables et vérifiées sur les pays (Becker-Reshef et al., 2020, 2019).

#### a. Le Crop Monitoring for Early Warning (CM4EW)

Le CM4EW a été créé en réponse à une alerte précoce renforcée en cas de pénurie de cultures dans les régions à risque d'insécurité alimentaire (Becker-Reshef et al., 2020). Le CM4EW s'appuie sur les systèmes de suivi multi-échelles existants disponibles pour fournir des évaluations mensuelles, transparentes, multi-sources et consensuelles des conditions de croissance des cultures, de leur état et de leurs conditions agroclimatiques. Le CM4EW est un effort multi-agences vivant à évaluer les conditions de croissance des cultures des pays à risques d'insécurité alimentaire. En effet, les conditions susceptibles d'avoir un impact sur la production dans les pays vulnérables à l'insécurité alimentaire sont alors mis en avant. Ces informations mises en évidence sont utilisées pour renforcer l'intervention humanitaire agricole, la prise de décision en matière de sécurité alimentaire et la mise en œuvre des politiques. Grâce à l'utilisation de nomenclature et de classifications partagées pour la surveillance des cultures, des experts de toute la communauté peuvent se réunir pour partager des données, des informations et des expériences dans un processus délibératif d'élaboration de preuves afin de parvenir à un accord sur les conditions de récolte mensuelles (Becker-Reshef et al., 2020). Tous les 15 premiers jour début du mois, les experts des différents systèmes collaboratifs se réunissent pour établir un consensus pour l'écriture du bulletin mensuel (Annexe 2).

Le chevauchement et l'accord entre les systèmes de surveillance, en plus des preuves supplémentaires provenant des observations sur le terrain et des rapports sur le terrain, forment la base du consensus mensuel. Ce processus de recherche de consensus du CM4EW, comparant et opposant les systèmes et leurs résultats, comble les lacunes d'information liées à la sécurité alimentaire à l'échelle mondiale. Les organisations partenaires incluent USAID FEWS NET, FAO GIEWS, WFP VAM, ASAP JRC et IGAD ICPAC<sup>2</sup> qui utilisent les systèmes de suivi opérationnel susmentionnés pour transmettre leur analyse ainsi que les informations et les prévisions agro-météorologiques, les observations sur le terrain et le terrain. En plus des conditions de culture actuelles, les perspectives climatiques régionales et mondiales sont incluses dans le rapport CM4EW pour attirer l'attention sur

<sup>2</sup> IGAD ICPAC : Climate Prediction and Application Centre ([ICPAC](#)) sur l'Afrique de l'Est.

les conditions de pluviométrie et de température anormales observées et prévues qui peuvent avoir un impact sur la production alimentaire ou présenter d'autres risques pour la société. Ces perspectives sont basées sur les prévisions météorologiques et climatiques saisonnières provenant de diverses sources internationales et nationales, dont certaines sont compilées sur le système EWX ([Annexe 3](#)). Cliquez [ici](#)

## Partie 4 : Données et méthodes

Dans cette section, nous présentons les produits des trois SAPs étudiés (FEWS-NET, PAM et ASAP), des données annexes et la méthodologie adoptée.

### 1. Produits d'anomalies

Le schéma de la Figure 15 illustre les composantes génériques des SAPs, avec un focus sur les anomalies de végétation :

- les produits satellitaires mobilisés (généralement le NDVI) ;
- les anomalies de NDVI, calculées selon divers indicateurs, pour un pas de temps et une période de référence donnés ;
- les classes d'anomalies, calculées selon différents seuils d'indicateurs d'anomalies ;
- et enfin, les produits d'alerte précoce qui, à partir des classes anomalies et de nombreuses autres sources de données, fournissent un état de la sécurité alimentaire à des échelles administratives.

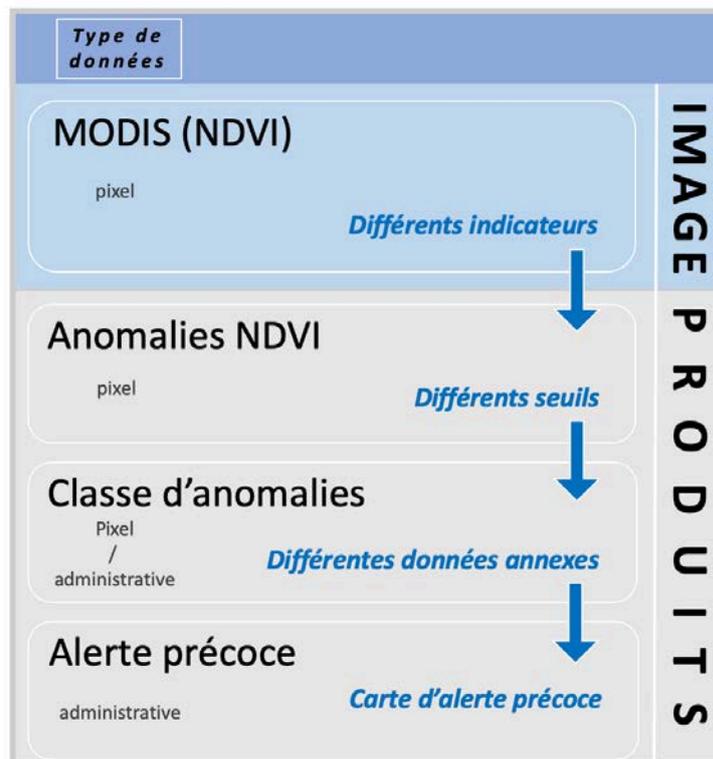


Figure 15 : Composantes génériques d'un SAP.

Les SAPs étudiés dans ce travail utilisent des produits de NDVI issus d'images MODIS. Pour rappel, le capteur MODIS (Moderate-Resolution imaging Spectroradiometer) est une série d'instruments d'observation lancés par la NASA (National Aeronautic and Space administration). Le premier satellite TERRA-MODIS est mis sur orbite en 1999 et le second AQUA-MODIS trois ans après. La résolution spatiale des capteurs MODIS est comprise entre 250 m et 5 km. L'ensemble de ces données sont téléchargeables sur différentes plateformes comme le centre EROS (Earth Resources Observation and Science) de l'U.S. Geological Survey ([USGS](#)) et le système NASA [Land, Atmosphere Near real-time Capability](#) de EOS par exemple.

Le tableau n°1 met en évidence la diversité des données et des méthodes utilisées dans les principaux SAPs. On observe notamment que ces systèmes sont basés sur des indicateurs d'anomalies de NDVI différents : le pourcentage à une médiane de référence pour FEWS-NET (Rojas & al., 2011, Meroni & al., 2014), le pourcentage à une moyenne de référence pour le PAM (Garcia, 2010) et le z-score pour ASAP (Rembold & al., 2019, Meroni & al., 2019), le pourcentage à une moyenne de référence pour le PAM (Garcia, 2010) et GIEWS (Van Hoolst & al., 2016, Roja, 2021). On remarque également que la fréquence des produits et la période de référence sont différentes entre SAPs.

Tableau 1 : Synthèse des produits d'anomalies de végétation des systèmes ASAP, PAM, FEWS-NET et GIEWS.

Paramètres	FEWS-NET	PAM	ASAP	GIEWS
Capteur satellite (pré-traitement)	eMODIS Level-1B Collection 6 (MODIS Terra & Aqua)	MYD13C1 et MOD13C1 (MODIS Terra & Aqua)	MOD13A2 et MYD13A2 V006 (MODIS Terra & Aqua)	METOP & NOAA-AVHRR
Filtrage et lissage des données	Lissage eMODIS (Swets et al, 1999)	Whittaker filtrer (Eilers, 2003)	Whittaker filtrer (Eilers, 2003)	(Swets et al, 1999)
Anomalie de NDVI	% de la médiane	% de la moyenne	zNDVI = (NDVI – moyenne) / écart-type	% de la moyenne VHI (vegetation health index) modèle ASI
Seuil	[-0.05 ; +0.05]	[-0.1 ; +0.1]	[-0.4 ; +0.4]	
Résolution spatiale	250 m	5,6 km	1 km	1 km
Fréquence des produits	10 jours	8 jours	10 jours	10 jours
Période de référence	2003 – 2017	2002 – 2013	2002 – 2016	1984-2014
Application web & Visu cartographique	Oui <a href="#">EWX</a>	Oui <a href="#">Hunger Analytics Hub</a>	Oui <a href="#">Warning Explorer</a>	Oui <a href="#">ASIS</a>
Publication de référence	<a href="#">Rojas &amp; al., 2011</a> <a href="#">Chris Funk &amp; al., 2019</a> <a href="#">Meroni &amp; al., 2014</a> <a href="#">Brown &amp; al., 2015</a>	<a href="#">VAM</a> <a href="#">Eilers &amp; al., 2017</a>	<a href="#">Rembold &amp; al., 2019</a> <a href="#">Meroni &amp; al., 2019</a>	<a href="#">Van Hoolst &amp; al., 2016</a> Rojas, 2021

### *Les produits natifs*

Le produit NDVI eMODIS (« expedited » MODIS) est fourni par l'US Geological Survey Earth Resources Observation and Science Center (USGS EROS). Il est calculé à partir de données de réflectance de surface MOD/MYD09\_L2, les données de géolocalisation MOD/MYD03\_L1A et les masques de nuages MOD/MYD35\_L2 acquises respectivement par les capteurs MODIS des satellites Terra/Aqua (Brown et al. 2015). Ces NDVI quotidiens à 250m de résolution sont fournis dans un délai de 12–24 h après acquisition (il faut compter 6-10 jours pour les produits MODIS), ce qui en font des données précieuses pour les systèmes d'alerte précoce. Les produits NDVI eMODIS, temps réel et historique sont des composites à 7 jours (Brown & al., 2015). Le flux de données eMODIS de FEWS-NET est unique et composé de caractéristiques ajustées aux besoins spécifiques du système.

Le système PAM utilise les composites NDVI 16 jours décalées en 8 jours MOD/MYD13C1 à 5 km de résolution des capteurs TERRA et AQUA MODIS qui est lui aussi largement utilisé dans la surveillance de la biosphère. La résolution temporelle particulière de 8 jours chez PAM s'explique d'un entrelacement des deux capteurs TERRA et AQUA. Les données sont d'abord combinées avec les données brutes puis ensuite filtrées pour obtenir un produit NDVI lisse sur 8 jours. La chaîne de traitement des données satellitaires MODIS utilisée par le PAM est MODAPE (*MODIS Assimilation and Processing Engine* ; <https://github.com/WFP-VAM/modape>; Eilers et al., 2017). Cette chaîne

permet le téléchargement des produits, la composition à 8 jours et le lissage des données temporelles. Ce lissage est effectué avec un algorithme propre au PAM qui est une version optimisée du filtre de Whittaker et qui a l'avantage d'être rapide et de gérer de nombreuses données manquantes.

Dans le système d'alerte ASAP, les données MODIS sont traitées avec la chaîne du BOKU (Klisch and Atzberger, 2016). (ASAP, <https://mars.jrc.ec.europa.eu/asap/>, Rembold et al., 2019). Cette chaîne prend en entrée les produits MODIS v6 **MOD13A2** (acquis avec le satellite TERRA) et **MYD13A2** (acquis avec satellite AQUA) qui sont des produits d'indices de végétation (NDVI et EVI) à 1 km de résolution. L'algorithme sélectionne alors le meilleur pixel sur une période de 16 jours (16-jour composite) selon les critères suivants : peu de nuage, faible angle de visée et la plus forte valeur d'indice. En plus des indices de végétation, ces produits comportent une bande "qualité" (QA) et les réflectances dans 4 bandes spectrales (rouge, proche infrarouge, bleu et le moyen infrarouge).

L'accès aux produits d'anomalies de végétation MODIS sur l'Afrique de l'Ouest varie selon le système d'alerte précoce :

- les produits d'anomalies de NDVI de FEWS-NET (eMODIS C6 « median Anomaly ») sont en libre accès sur [USGS FEWS NET data portal](#) ;
- les produits d'anomalies de végétation des systèmes PAM et ASAP ne sont pas en libre d'accès et ont donc été obtenus après contacts avec les différentes organisations : la Commission européenne ou (Joint Research Center (JRC) en anglais) pour ASAP, et le PAM ;
- enfin, pour le système GIEWS, malgré de nombreux contacts avec la FAO, nous n'avons pas pu accéder aux données raster des produits sollicités. Ce système ne sera donc pas traité dans cette étude, mais il nous a semblé intéressant de le présenter car il pourra être inclus ultérieurement.
- 

## 2. Les produits d'alerte précoce

Les bulletins de « Early Warning », ou bulletins d'alerte précoce, utilisent en plus des cartes d'anomalies d'autres données environnementales (évapotranspiration, précipitation, ...) et socio-économiques (conflits, prix sur les marchés ...) pour faire état des risques encourus en matière de sécurité alimentaire. Ces données supplémentaires sont également des clefs de lecture des produits d'anomalies de végétation.

Le tableau n°2 présente les principales informations contenues dans les bulletins d'alerte des SAPs pour l'Afrique de l'Ouest.

Tableau 2 : Synthèse des produits d'alertes précoces des systèmes présent en Afrique de l'Ouest.

	FEWS-NET	PAM	ASAP	GIEWS	GEOGLAM
<b>Fréquence des bulletins sur les cartes d'alerte précoce</b>	48 bulletins (entre 2010 et 2020) Cliquez <a href="#">ici</a>	1 bulletin (décembre 2020) Cliquez <a href="#">ici</a>	36 bulletins par année (entre 2010 et 2020) Cliquez <a href="#">ici</a>	4 bulletins par année (entre 2006 et 2020) « <a href="#">Crop Prospects and Food Situation</a> », et des rapports par pays « <a href="#">rapport pays</a> »	12 bulletins par année (février 2016 à aujourd'hui, soit 72 bulletins)
<b>Nombre de classes dans la légende</b>	5 classes + ponctuels	5 classes	7 classes		8 classes
<b>Légende</b>	Basé sur l'IPC (Food Security Phase)	Basé sur l'IPC (Food Security Phase)	Produits spécifiques sur la végétation et la biomasse		Classification
<b>Unité spatiale</b>	Admin Level 1	Admin Level 1 et 2	Admin Level 1	Admin Level 0, 1 et 2	Admin Level 1
<b>Masque de culture</b>	MODIS – LC	FAO GLC Share	IIASA – IFPRI	FAO GLC Share	
<b>Calendrier culturaux</b>	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
<b>Autres indicateurs</b>	Pluviométrie : CHIRPS, RFE2 Température : LST Sécheresse : NDVI, zNDVI	Pluviométrie : CHIRPS	Pluviométrie : CHIRPS, ECMWF Sécheresse : WSI, SPI	Pluviométrie : NOAA ECMWF Température : TCI Sécheresse : ASI, VHI	Pluviométrie : CHIRPS Température : MERRA-2 Sécheresse : ESI

L'exemple d'un résultat cartographique sur la sécurité alimentaire réalisé par FEWS-NET en Afrique de l'Ouest pour mai 2021 au format PDF est présenté en Figure 16.

La fréquence des publications varie d'un système à l'autre. ASAP grâce à son Dashboard produit des cartes d'alertes toutes les décades, FEWS-NET produit des bulletins tous les mois avec des réunions en interne tous les quatre mois pour réaliser des scénarii, pour tenter de renforcer la structure et la logique du processus analytique. Les bulletins d'alerte précoce du PAM sont très rares et l'ouverture du Dashboard, permettant une analyse décade par décade de la situation climatique et sanitaire en temps quasi réel, a été faite durant l'été 2021, « [HungerMapLIVE](#) ».

La construction des cartes d'alerte est principalement réalisée avec IPC (FEWS-NET, PAM, ASAP, GIEWS) (Figure 17). L'utilisation de la Classification de Phase Intégrée (IPC) est basée sur des normes et un langage commun. Cette échelle en cinq phases est destinée à aider les gouvernements et autres acteurs humanitaires à comprendre rapidement une crise (ou une crise potentielle) et à prendre des mesures.

<b>PHASE 1</b> Minimale	Les ménages sont en mesure de répondre aux besoins alimentaires et non alimentaires essentiels sans s'engager dans des stratégies atypiques et non durables pour accéder à la nourriture et aux revenus.
<b>PHASE 2</b> Stressé	Les ménages ont une consommation alimentaire minimalement adéquate mais sont incapables de se permettre certaines dépenses non alimentaires essentielles sans s'engager dans des stratégies de gestion du stress.
<b>PHASE 3</b> Crise	Les ménages soit : - présentent des déficits de consommation alimentaire qui se traduisent par une malnutrition aiguë élevée ou supérieure à la normale ; OU - Sont marginalement capables de répondre aux besoins alimentaires minimaux, mais uniquement en épuisant les moyens de subsistance essentiels ou par le biais de stratégies de gestion de crise.
<b>PHASE 4</b> Urgence	Les ménages soit : - ont des écarts importants de consommation alimentaire qui se traduisent par une malnutrition aiguë très élevée et une surmortalité ; OU - Sont capables d'atténuer d'importants écarts de consommation alimentaire, mais uniquement en utilisant des stratégies de subsistance d'urgence et la liquidation des actifs.
<b>PHASE 5</b> Famine	Les ménages ont un manque extrême de nourriture et/ou d'autres besoins de base même après le plein emploi des stratégies d'adaptation. La famine, la mort, le dénuement et des niveaux de malnutrition aiguë extrêmement critiques sont évidents. (Pour la classification de la famine, la zone doit avoir des niveaux critiques extrêmes de malnutrition aiguë et de mortalité.)
	Au moins 25 pour cent des ménages ont satisfait au moins 25 pour cent de leurs besoins caloriques grâce à l'aide alimentaire humanitaire.
	Au moins 25 pour cent des ménages ont satisfait au moins 50 pour cent de leurs besoins caloriques grâce à l'aide alimentaire humanitaire.
!	La classification des phases serait probablement pire d'au moins une phase sans l'aide alimentaire humanitaire actuelle ou programmée.

Figure 16 : Extrait de la description des phases d'insécurité alimentaire aiguë de l'IPC. Sources : FEWS-NET.

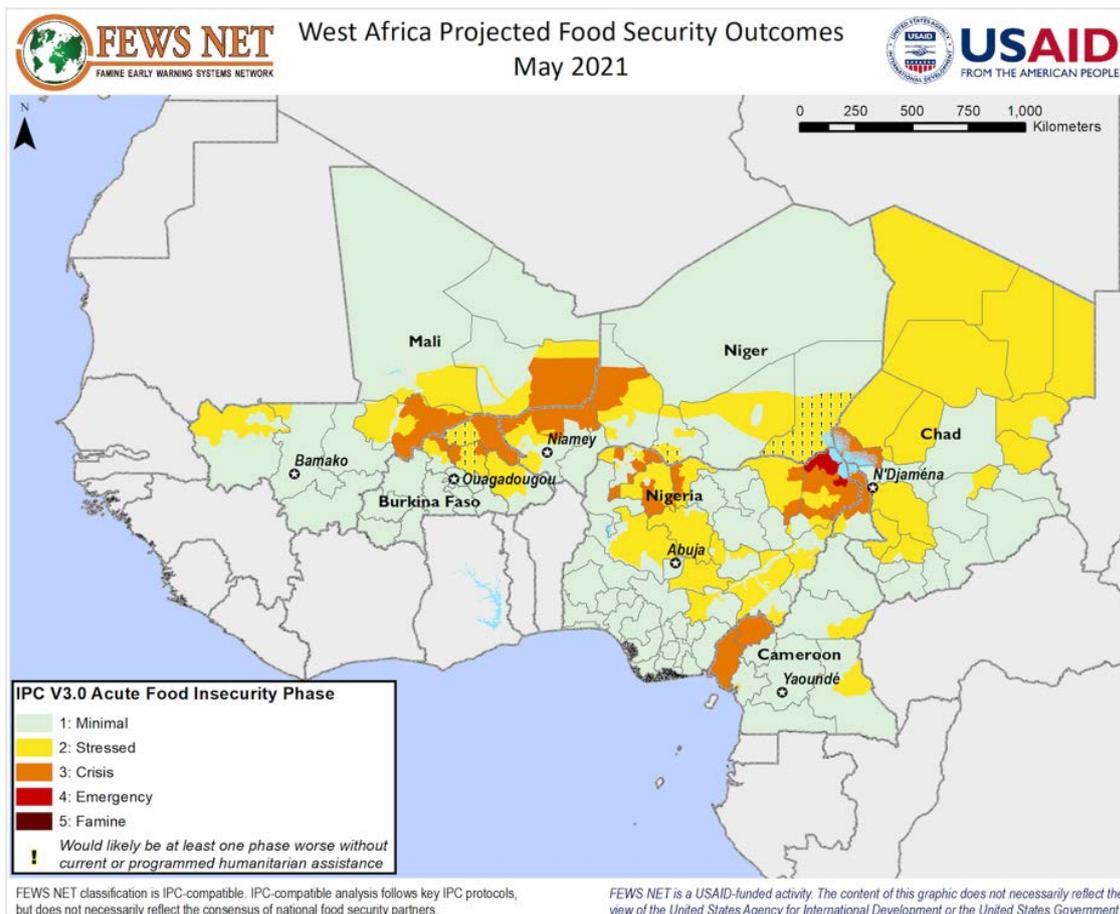


Figure 17 : Extrait du bulletin d'alerte précoce du système FEWS-NET : carte de l'état de la sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest en mai 2021. Sources : FEWS-NET

### 3. Autres données satellitaires et vectorielles utilisées

#### i. Limites administratives

Les données vectorielles utilisées pour l'étude sont les limites administratives le « Level 0 » correspondant aux limites des pays, et le « Level 1 » correspondant aux limites des régions. Les données vectorielles des dix-sept pays d'Afrique de l'Ouest sont récupérées sur [OCHA Services](#).

#### ii. Carte du domaine cultivé

Ensuite, la carte du domaine cultivé utilisée est la même que celle utilisée par ASAP. Elle est extraite du produit mondial d'occupation des sols GLC2000, à 1 km de résolution spatiale, et pour lequel la classe culture correspond aux cultures annuelles (Figure 18). La résolution spatiale du produit semble être un bon compromis avec les autres données de l'étude. Dans l'étude nous sélectionnons l'ensemble des pixels cultivés quelque soit le pourcentage de culture. La carte téléchargée est la version 3 de l'année 2019 (Perez-Hoyos & al., 2017), disponible sur le site du [JRC](#). Un second masque des cultures a été (produit Copernicus), mais il n'a pas été retenu car le domaine cultivé était moins étendu que celui de GLC2000.

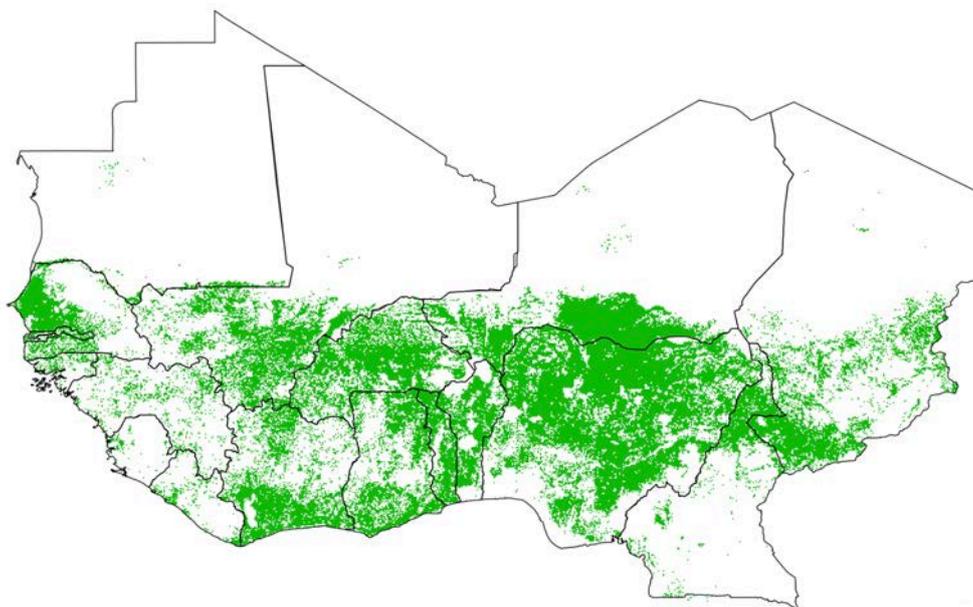


Figure 18 : Carte du domaine cultivé en Afrique de l'Ouest en 2019 (GLC2000 V3) de 0 à 200% de culture.

#### iii. Données de déforestation

La carte des changements du domaine forestier au cours de la période 2000-2020 est téléchargée sur le site [Global Forest Change](#). Les valeurs à zéro indiquent qu'il n'y a pas eu de changement, et les valeurs comprises entre 1 et 20 représentent les changements détectés (principalement des pertes) au cours des années 2001 à 2020, respectivement (figure 19).

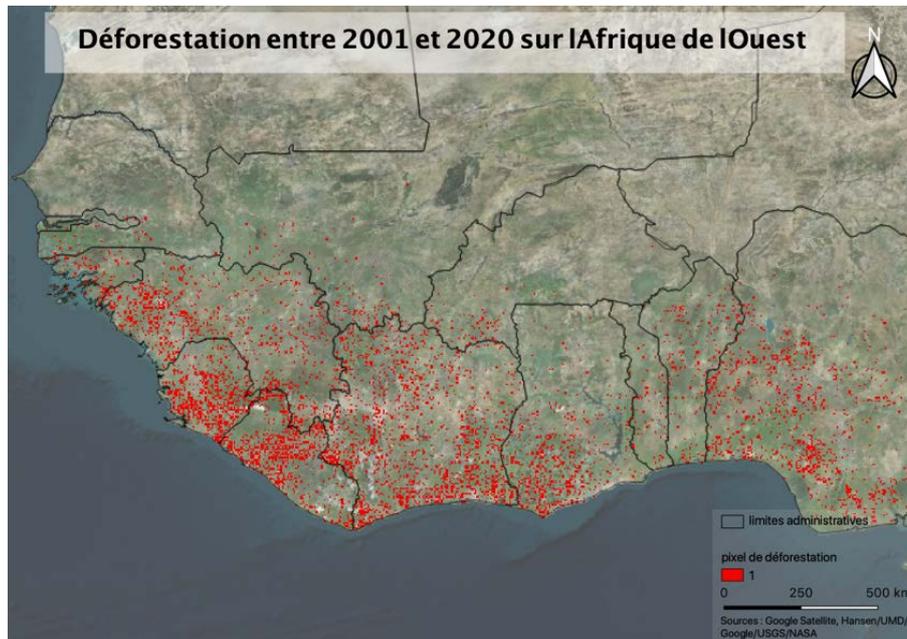


Figure 19 : Données de déforestation entre 2001 et 2020 sur l'Afrique de l'Ouest.  
Sources : Google Satellite/Hansen/UMD/Google/USGS/NASA.QGIS

#### 4. Méthodologie générale

La période d'étude se concentre sur la période 2010 à 2020. Pour atteindre notre objectif, qui pour rappel, est de mettre en avant des zones de convergences et de divergences entre les produits d'anomalies de végétation des 3 SAPs FEWS-NET, PAM et ASAP, nous avons mis en place un protocole de traitement des données (Figure 20).

- le téléchargement et le pré-traitement des données ;
- la comparaison des indicateurs d'anomalies ;
- la sensibilité au seuillage des indicateurs ;
- la comparaison annuelle et saisonnière (juin à novembre) des trois SAPs ;
- la comparaison 2 à 2 en saisonnier (juin à novembre) avec et sans masque des cultures ;
- la comparaison à 3 en saisonnier sans masque des cultures ;
- la comparaison des trois SAPs sur des sous-régions (Golfe de Guinée, Sénégal et Nigéria) ;
- la comparaison mensuelle (novembre) avec une règle d'agrégation de 10% et 30% des trois SAPs à l'échelle administrative.

Une première analyse annuelle et saisonnière est réalisée à l'échelle pixel. Une deuxième analyse saisonnière avec et sans utilisation d'un masque des cultures permettra de réduire notre zone d'étude aux zones agricoles, essentielles pour la sécurité alimentaire. Dans cette deuxième partie nous présenterons une analyse comparative saisonnière des produits des SAPs « deux à deux » et les trois SAPs ensemble. Enfin, en dernière partie, des cartographies mensuelles des divergences des trois systèmes seront réalisées ; nous nous concentrerons sur le mois de novembre, correspondant à la fin de la saison des pluies. Cette partie de l'étude sera menée à l'échelle des unités administratives.

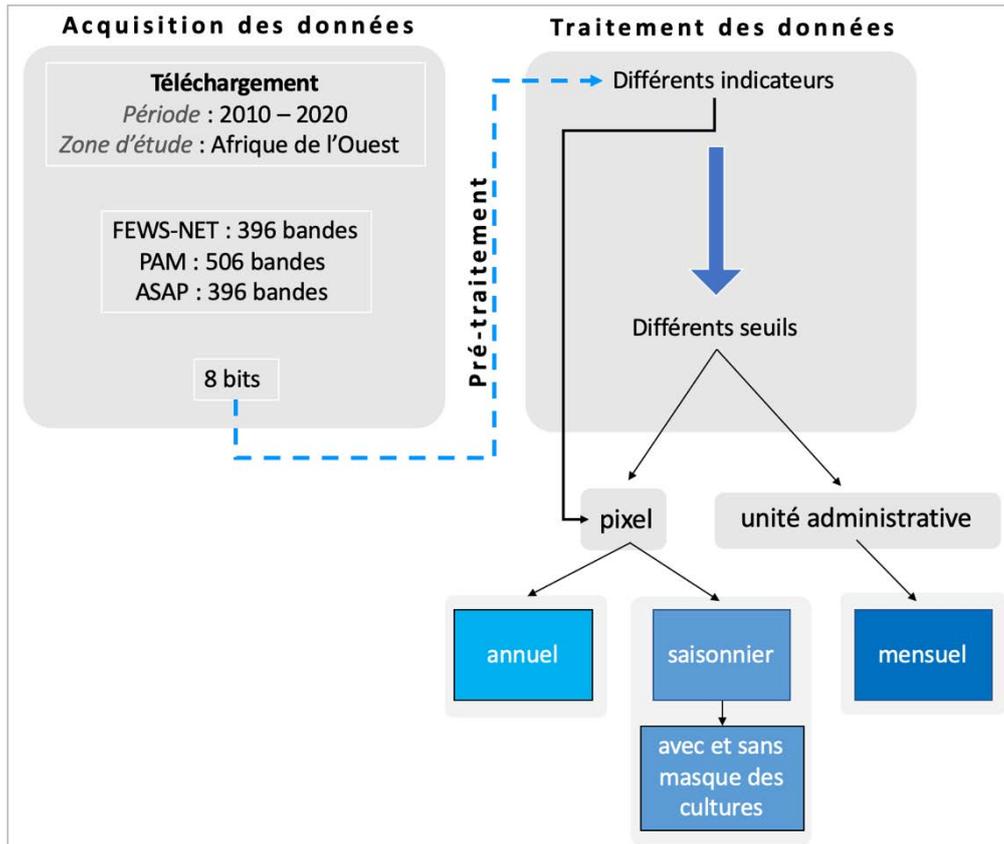


Figure 20 : Protocoles de comparaison des produits d'anomalies de végétation des 3 SAPs étudiés.

Pour terminer, une étude sur les sources des désaccords entre les SAPs sera menée, avec une première partie sur la confrontation des bulletins du CM4EW de GEOGLAM et des résultats cartographiques mensuels des SAPs sur deux années et une deuxième partie sur l'analyse des facteurs explicatifs des divergences entre les SAPs.

### a. Téléchargement et pré-traitement des données

Afin de récupérer les données FEWS-NET, un script python est réalisé pour télécharger automatiquement les données entre 2010 et 2020 sur la zone d'étude (Figure 21). Les données récupérées sont codées en 8bits. Les deux autres jeux de données sont aussi codés en 8bits.

```

import requests
import os

url =
'https://edcintl.cr.usgs.gov/downloads/sciweb1/shared/fews/web/africa/west/dekadal/emodis/ndvi_c6/mediananomaly/downloads/dekadal'
annee = 10
mois = 1

for annee in range(10,21):
    for mois in range(1,37):
        if mois < 10:
            file = "wa" + str(annee) + "0" + str(mois) + "stmdn.zip"
        else:
            file = "wa" + str(annee) + str(mois) + "stmdn.zip"

        access = (os.path.join(url + "/" + file))
        r = requests.get(access, allow_redirects=True)

        out_filename = (os.path.join('/Users/louiselemettai/Desktop/data_fewnet/' + file))
        open(out_filename, 'wb').write(r.content)
  
```

Figure 21 : Script python pour la récupération automatique des données libre d'accès FEWS-NET.

Pour harmoniser les produits, et les rendre comparable, nous avons commencé par convertir les comptes numériques des images en indicateurs d'anomalies. Les données FEWS-NET et PAM sont initialement codées entre 0 et 200, et pour ASA elles sont codées entre 0 et 255 (voir histogrammes des comptes numériques en Figure 22).

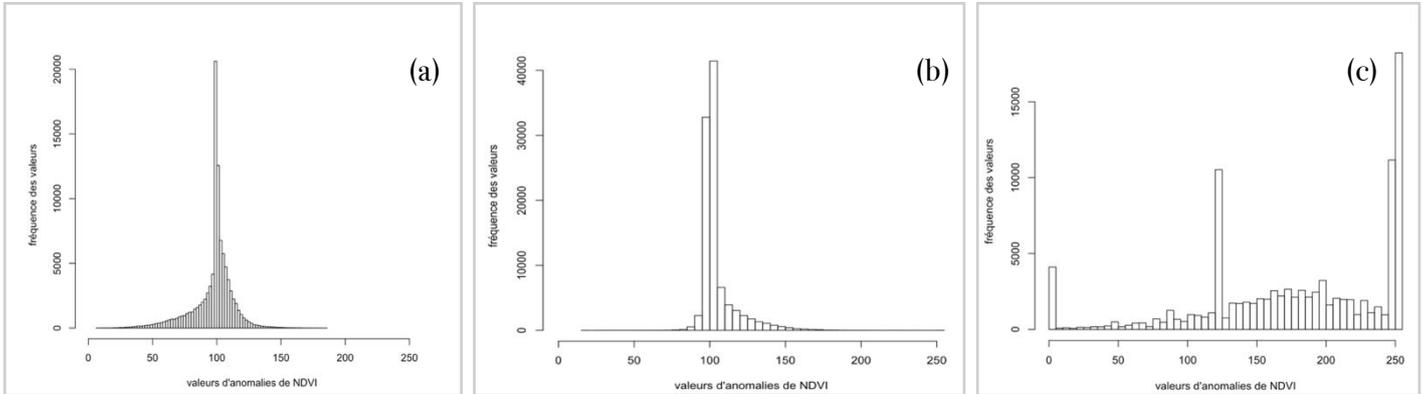


Figure 22 : Distribution des valeurs d'anomalies NDVI brutes codées en 8 bits. En (a) le Système FEWS-NET, (b) le Système PAM et (c) le système ASAP. Exemple choisi, décade 1 de septembre 2020 sur l'ensemble de la zone d'étude.

La script en Figure 23 illustre la conversion des données 8 bits en données indices d'anomalies NDVI pour le système FEWS-NET.

```
#library
library(raster)
library(sp)

# Boucle : conversion des données 8bits FEWS-NET en anomalie NDVI
for(i in seq(1,36)) {
  jour = sprintf(i, fmt= '%02d')

  nm1 <- paste("/Volumes/COURS/___data_fews/data_brute_fews/data_brute_2020/wa20", jour, sep =
  "")
  nm1 <- paste(nm1, "stmdn.tif", sep = "")

  print(nm1)
  r <- raster(nm1)
  r_1 <- (r-100)/100

  nm2 <- paste("/Volumes/COURS/___data_fews/normalisation/2020/normalisation_2020_", jour, sep
  = "")
  nm2 <- paste(nm2, ".tif", sep = "")

  print(nm2)
  #écriture du raster
  writeRaster(r_1, nm2, format="GTiff")
}
```

Figure 23 : Script R pour la conversion des données FEWS-NET en anomalies NDVI.

## b. Traitement des données

### Passage à des valeurs discrètes avec analyse de sensibilité

Les trois systèmes sont reclassés en trois classes d'anomalies distinctes (pour rappel, les périodes reclassées correspondent aux moyennes saisonnières et aux moyennes mensuelles de chaque système): les anomalies négatives avec le label (-1), la deuxième classe représente l'absence

d'anomalies avec le label (0) et la troisième représente les anomalies positives avec le label (+1). Plusieurs seuils<sup>1</sup> d'anomalies pour la classe (0) sont testés :

Tableau 3 : Différents seuils pour la classe deux, pas d'anomalies dans les trois systèmes. La classe deux du système ASAP ne varie pas du fait de la construction de son anomalie de végétation.

Système	FEWS-NET	PAM	ASAP
Seuil initial du SAP	[-0.05 ; +0.05]	[-0.1 ; +0.1]	[-0.4 ; +0.4]
Seuil 1	[-0.05 ; +0.05]	[-0.05 ; +0.05]	non changé
Seuil 2	[-0.1 ; +0.1]	[-0.1 ; +0.1]	non changé
Seuil 3	[-0.2 ; +0.2]	[-0.2 ; +0.2]	non changé
Seuil 4	[-0.3 ; +0.3]	[-0.3 ; +0.3]	non changé

Les systèmes PAM et FEWS-NET sont reclassés avec le même protocole. Le système ASAP, quant à lui, conserve son seuil de base qui est compris entre [-0.4 ; +0.4]. Ensuite, nous avons réalisé une analyse de sensibilité de la classe (0) avec les seuils présentés dans le Tableau n°3.

#### Règle d'agrégation

L'objectif principal de ce traitement est de passer à une échelle opérationnelle pour la sécurité alimentaire. En effet, pour comparer les produits d'alertes qui sont à l'échelle administratives, nous avons procédé à une agrégation des classes anomalies à cette même échelle. Deux règles d'agrégations sont testées : 10% et 30%. Si le pourcentage de pixels d'anomalie positive et le pourcentage de pixels d'anomalie négative sur la zone sont tous deux inférieurs au seuil, la zone est classée sans anomalie. Sinon, on choisit la classe majoritaire entre celle des anomalies positives et celle des anomalies négatives pour l'ensemble de la zone. Un script python est réalisé pour cette réalisation cartographique. La couleur verte est attribuée aux anomalies positives, la couleur rouge aux anomalies négatives et la couleur grise aux absences d'anomalies.

#### Représentation spatio-temporelle

L'objectif est de mettre en avant des tendances à la fois dans le temps et dans l'espace par système et de pouvoir également les comparer entre eux par la suite. La représentation spatio-temporelle des trois systèmes de cette étude est mise en avant grâce à plusieurs représentations, qui sont :

- des diagrammes de Hovmöller, à l'échelle annuelle et saisonnière ;
- des cartographies à l'échelle saisonnière entre les mois de juin et novembre ;
- des cartographies à l'échelle mensuelle sur le mois de novembre ;

Les diagrammes de Hovmöller sont des diagrammes utilisés couramment pour le traçage météorologique de données. Cette première représentation graphique permet à la fois de gérer de manière simple et efficace le spatial grâce aux latitudes sur l'axe des y et le temporel sur l'axe des x, chaque diagramme représente un système donné. L'Afrique de l'Ouest possède un gradient latitudinal marqué avec un Nord très sec et un Sud très humide (Annexe 4), par conséquent les diagrammes Hovmöller sont relativement bien adaptés pour notre zone d'étude.

Le choix suivant se porte sur une analyse saisonnière comprise entre juin et novembre qui correspond globalement à la saison des pluies, et donc à la saison agricole dans la bande sahélienne.

<sup>1</sup> Le seuil représente le l'intervalle où il y a une absence d'anomalie. Ici, le seuil se concentre généralement autour du zéro.

Des moyennes saisonnières par système sont alors calculées. Ce choix n'indique pas les variations intra-saisonnière, la phénologie des plantes est mise de côté dans ce mode de représentation.

Enfin, les cartes mensuelles sont produites pour les années 2010 à 2020. Pour cela, nous choisissons les mois de novembre qui correspondent à la fin de la saison des pluies en Afrique de l'Ouest.

### *Proxys externes*

Afin de réduire la zone d'étude et de tenter de comprendre les changements dans les dynamiques végétales, deux sources d'informations supplémentaire sont utilisées. La première, est celle d'un masque de culture. Une analyse spatio-temporelle entre 2010 et 2020 sera alors réalisée. La deuxième source d'information, quant à elle, est l'apport de données sur la déforestation, qui va potentiellement permettre de comprendre les changements et les divergences entre les données des trois SAPs.

## c. Outils utilisés

Trois outils sont utilisés pour réaliser cette étude. L'outil de SIG QGIS, l'environnement de développement R associé à RStudio et le logiciel de programmation Python.

### i. QGIS

Aujourd'hui, bon nombre de structures publics ou privés se dotent de QGIS dans le cadre de leurs activités. En effet, QGIS est un outil open source, gratuit et multiplateforme (Linux, Windows, Mac OS). C'est un outil puissant, performant et ergonomique. Il permet de réaliser des cartes, de convertir des données et de réaliser des calculs de manière simple et efficace. L'esthétisme final des cartes en font un outil pertinent pour des analyses complexes. Téléchargeable sur ce [lien](#).

### ii. R et RStudio

RStudio est un environnement de développement gratuit, libre, multiplateforme dédié à l'analyse statistique. Il s'écrit en langage C++ et son interface graphique (Rstudio) utilise l'interface de programmation Qt. R s'impose largement depuis une dizaine d'années dans les domaines des sciences humaines. Proposant un panel de packages dédiés à la télédétection et à la cartographie, il possède donc un grand nombre de critères convainquant à son utilisation. Dans notre étude, nous avons largement utilisé les packages Sp, Raster, rasterVis, Ggplot2, RColorBrewer, et bien d'autres. Téléchargeable sur ce [lien](#).

### iii. Python

Python est un langage de programmation interprété, mutli-paradigme et multiplateformes. Le langage Python est placé sous une licence libre proche de la licence BSD (Berkeley Software Distribution License), licence libre utilisée pour la distribution de logiciels. Il s'utilise dans de nombreux contextes et s'adapte à tout type d'utilisation grâce à des bibliothèques spécifiques. Dans l'étude présenté le téléchargement de données web et la télédétection seront les deux utilisations avec notamment des librairies comme requests, gdal, ogr, numpy, pandas, os et bien d'autres. Téléchargeable sur ce [lien](#).

## Partie 5 : Analyse spatio-temporelle des produits d'anomalies de végétation

---

Nous proposons dans cette section, de faire l'analyse des produits d'anomalies de végétation et de discuter des résultats obtenus sur les variabilités spatio-temporelles des trois SAPs.

### 1. Comparaison des anomalies basées sur des indicateurs différents

#### a. Les produits natifs

Dans cette première partie nous présentons les produits natifs, tels que fournis par les SAPs, à l'échelle saisonnière (Figure 24). Pour rappel, les seuils d'anomalies préconisés par les SAPs sont :

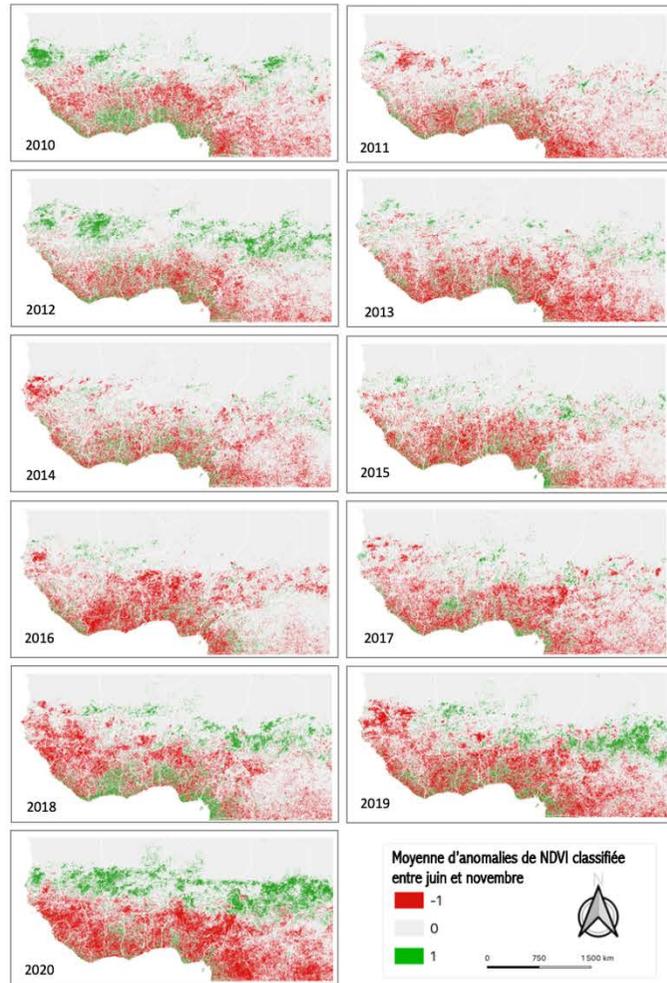
- FEWS-NET  $\rightarrow$  [-0.05 ; +0.05]
- PAM  $\rightarrow$  [-0.1 ; +0.1]
- ASAP  $\rightarrow$  [-0.4 ; +0.4]

Généralement, il semble que les trois SAPs soient très différents les uns des autres, d'une part les indicateurs sont différents et d'autre part les seuils sont différents également. Ensuite, les SAPs montrent une augmentation du nombre d'anomalies sur les trois dernières années (Figure 24).

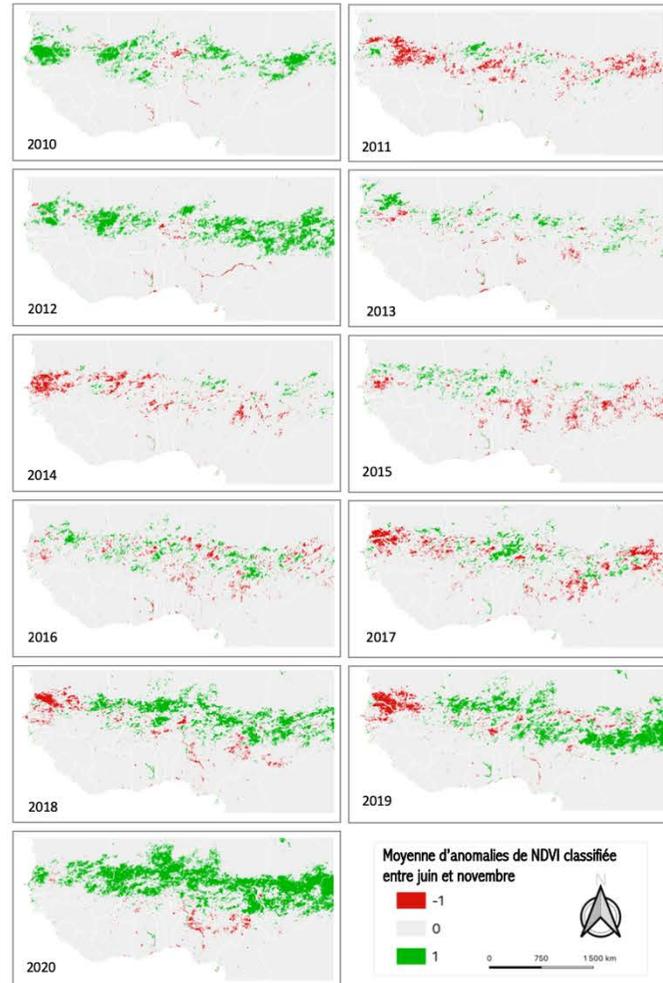
Particulièrement, FEWS-NET est le système le plus alarmant, notamment sur la bande guinéenne. Spatio-temporellement, FEWS-NET détecte un grand nombre d'anomalies négatives et très peu d'anomalies positives, présentes essentiellement sur la bande sahélienne. PAM (ou WFP en anglais) détecte le moins d'anomalies, la bande guinéenne est largement absente dans la détection d'anomalies. ASAP, malgré un indicateur d'anomalies construit différemment des deux autres (z-score), détecte un grand nombre d'anomalies positives et négatives sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest.

# Étude des classes d'anomalies avec les seuils initiaux des trois SAPs en Afrique de l'Ouest sur la période 2010-2020

**FEWS-NET**  
Seuil [-0.05 ; +0.05]



**PAM**  
Seuil [-0.1 ; +0.1]



**ASAP**  
Seuil [-0.4 ; +0.4]

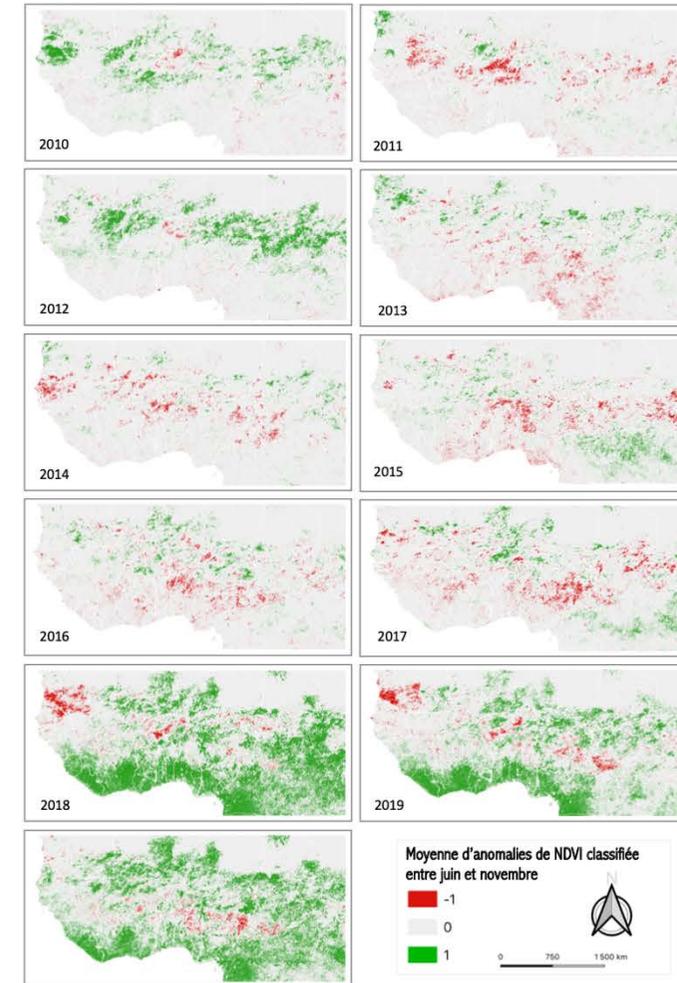


Figure 24 : Cartographies des variations des classes anomalies (anomalies NDVI reclassées) au seuil initial des trois systèmes à l'échelle saisonnière sur la période 2010-2020 en Afrique de l'Ouest, avec les résolutions initiales des trois produits : 250 m pour FEWS-NET, 5 km pour PAM et 1 km pour ASAP.

## b. L'analyse des seuils

Après ce premier état des lieux, il semble que les trois systèmes soient difficilement comparables. C'est pourquoi, nous analysons dans un premier temps les effets des seuils en recréant un jeu de données avec les données NDVI ASAP présenté en Figure 25, pour ensuite, déterminer un seuil commun pour les rapprocher. Enfin, une analyse de sensibilité est réalisée pour rendre les produits comparables entre eux.

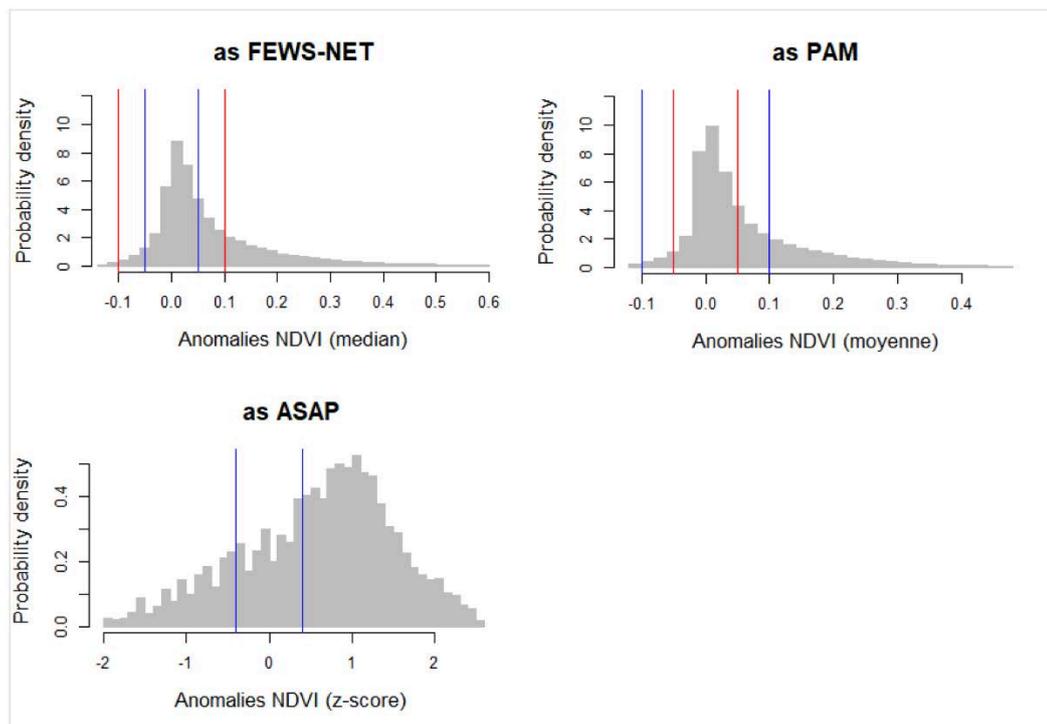


Figure 25 : Histogrammes des distributions des valeurs avec le jeu de données NDVI ASAP de la décade 3 de septembre 2020 (2010-2020) ; en bleu sont indiqués les seuils préconisés par les SAPs ; en rouge les seuils testés dans cette étude.

Sur La Figure 25, les lignes verticales correspondent au seuil des indicateurs pour les anomalies ; en bleu sont représentés les seuils natifs des SAPs, et en rouge les seuils avec  $\pm 0.05$  et  $\pm 0.1$  testés dans cette étude. Les valeurs à zéro ont aussi été supprimées pour la réalisation des histogrammes, ainsi que les 0.05% des valeurs à chaque extrémité.

La Figure 25, met en évidence une ressemblance dans la distribution des anomalies NDVI calculées avec la moyenne et la médiane à l'échelle saisonnière. La distribution du z-score est au contraire très différentes des deux autres. Nous venons ici de comprendre les effets des seuils sur la distribution des valeurs, les systèmes FEWS-NET et PAM semblent pouvoir donc être comparables. Le système ASAP ayant un indicateur trop différent, il semble difficile de pouvoir le comparer au deux autres. C'est pourquoi, dans l'analyse de sensibilité suivante nous ne ferons varier que les seuils de FEWS-NET et PAM (Figure 26).

La Figure 26 permet d'illustrer l'analyse de sensibilité des deux premiers systèmes. En effet, il semble que le seuil  $[-0.05 ; +0.05]$  rapproche le plus les systèmes FEWS-NET et PAM ce qui permettra de les comparer plus facilement, la résolution spatiale choisie ici est de 1 km. Grâce a cette analyse de

sensibilité nous nous concentrerons pour la suite de l'étude sur le seuil  $[-0.05 ; +0.05]$  pour les systèmes FEWS-NET et PAM, à l'exception des diagrammes Hovmöller.

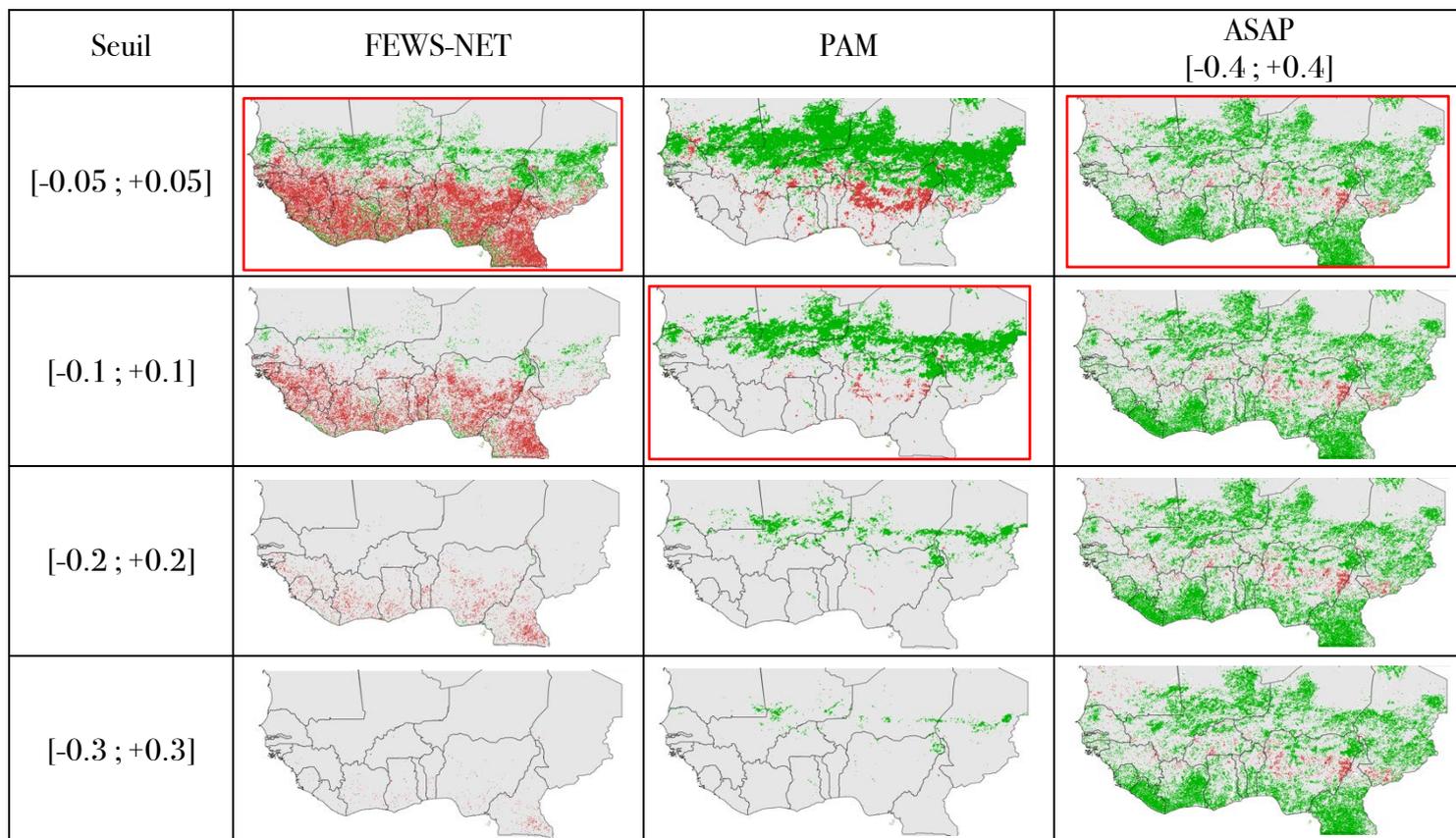


Figure 26 : Analyse de sensibilité des seuils des classes d'anomalies à l'échelle saisonnière des trois systèmes. Exemple sur l'année 2020.

### c. Analyse de la variabilité annuelle des produits d'anomalies de végétation

La représentation via un diagramme de Hovmoller s'est révélée pertinente. Les axes d'un diagramme de Hovmöller sont généralement de longitude ou de latitude (axe des x) et de temps (axe y) avec la valeur d'un champ représenté par la couleur ou l'ombrage. Dans notre cas (Figure 28), les années sont représentées sur l'axe des abscisses, et les latitudes sur l'axe des ordonnées (de  $0^{\circ}$  à  $20^{\circ}$  N, soit du Golfe de Guinée au Sahara ; la latitude  $15^{\circ}$  N correspond à la pointe Ouest de l'Afrique au Sénégal). L'échelle des couleurs en 4 classes est donnée par les valeurs de seuil d'anomalies des SAPs ( $\pm 5\%$  pour FEWS-NET,  $\pm 10\%$  pour PAM et  $\pm 40\%$  pour ASAP).

Dans un premier temps, on remarque une distinction saisonnière entre les premières et secondes moitiés de chaque année sur les trois systèmes (Figure 28). Les anomalies négatives sont plus présentes dans la première moitié des années et les anomalies positives dans la seconde moitié. En effet, cela reflète l'alternance entre saison sèche et saison humide en l'Afrique de l'Ouest. Les trois systèmes de l'étude ont une dynamique proche jusqu'en 2015 avec certaines particularités propres. En 2012, les systèmes FEWS-NET et ASAP identifient des anomalies négatives fortes en première moitié du cycle. Les systèmes PAM et ASAP ont des similitudes communes sur les dernières années de l'étude. FEWS-NET s'écarte largement en proposant des anomalies négatives sur la fin de la période.

Pour FEWS-NET, il est possible d'identifier une tendance générale négative sur les latitudes basses, correspondant à la bande guinéenne. Les années 2012, 2013 et 2020 sont les années aux plus fortes anomalies négatives. Enfin, il semble que la végétation soit moins vigoureuse, notamment dans les latitudes basses que sur la période de référence 2002 - 2017.

L'évolution spatio-temporelle du système PAM met en avant une détection d'anomalies positives ( $> +0.1$ ) notamment dans les latitudes hautes (supérieur à  $12^{\circ}\text{N}$ ) pour les années 2010, 2012 et de 2017 à 2020. En effet, il s'avère que la végétation est plus vigoureuse sur les latitudes hautes par rapport à la période de référence (2002 - 2013). À l'inverse, l'année 2015 est marquée par de fortes variations négatives. Puis, l'année 2017 semble être une année sèche également, la détection des anomalies sur les latitudes hautes durant la saison des pluies sont négatives. Cette même tendance se remarque aussi sur le système ASAP.

Pour ASAP, en 2012, le début de l'année est caractérisé par des anomalies négatives supérieures ( $< -0.4$ ) avec une détection des anomalies positives relativement faible en deuxième moitié. Un grand nombre d'anomalies positives ( $> +0.4$ ) est détectée sur les années 2018, 2019 et 2020. Il semble que la fin de la période étudiée indique une végétation plus vigoureuse et donc une disponibilité de biomasse plus importante que la période de référence (2002 - 2016) chez ASAP.

Dans un deuxième temps, les moyennes annuelles des variations des anomalies NDVI positives et négatives selon les trois systèmes sont réalisées (Figure 27). Ces moyennes permettent d'apprécier la variation temporelle de chaque SAP. Les données sont agrégées à 5km et les moyennes d'anomalies sont calculées sur les douze mois de chaque année entre 2010 et 2020. Les systèmes PAM et FEWS-NET possèdent des tendances remarquablement stables dans un sens comme dans l'autre. En revanche, le système ASAP est beaucoup moins stable d'une année à l'autre, particulièrement pour les anomalies positives, où la tendance est croissante. La construction des indices d'anomalies NDVI semble jouer un rôle dans la distribution des anomalies.

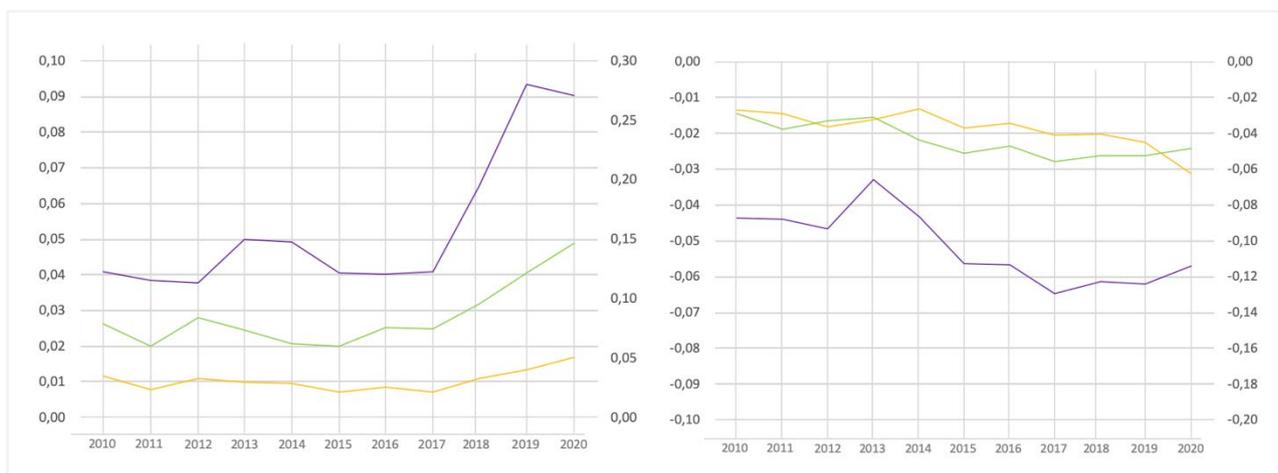
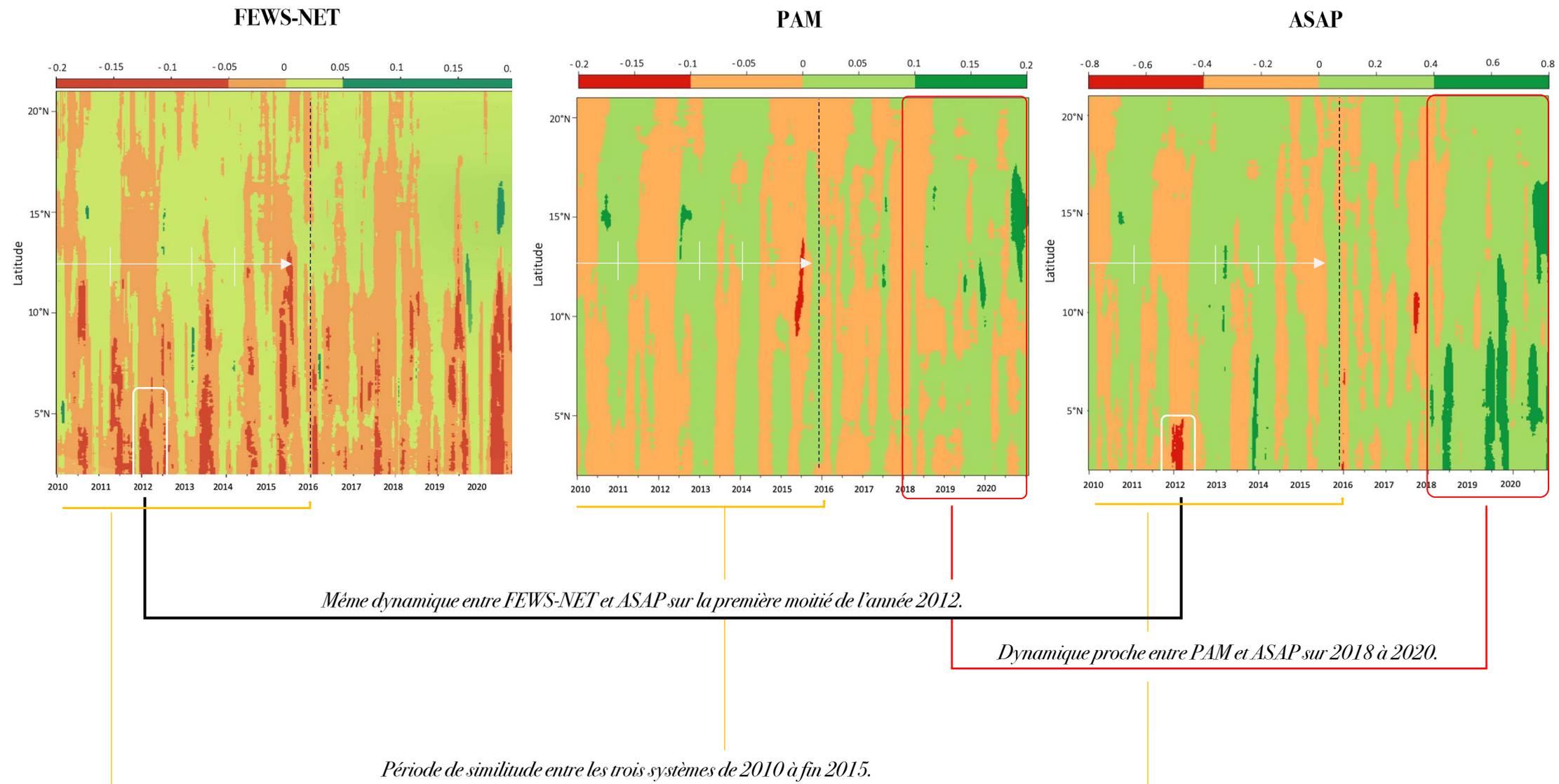


Figure 27 : Variations annuelles moyennes des indicateurs d'anomalies NDVI selon les trois systèmes de l'étude entre 2010 et 2020 sur l'Afrique de l'Ouest ; gauche : graphique des variations positives avec sur l'axe des y à gauche les systèmes FEWS-NET et PAM et sur l'axe des y à droite le système ASAP ; droite : graphique des variations négatives avec la même procédure pour l'axe des y.

# Évolution spatio-temporelle des produits d'anomalies de végétation en Afrique de l'Ouest sur la période 2010-2020



**Annotation :** la flèche blanche commune aux trois diagrammes avec les trois indentations permet de mieux visualiser les alternances communes.

Figure 28 : Évolution spatio-temporelle des classes d'anomalies NDVI des trois systèmes étudiés à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest à une résolution spatiale de 5 km. Les seuils initiaux sont conservés.

## 2. Analyse de la variabilité saisonnière des produits d'anomalies de végétation

Dans cette deuxième partie, nous présentons les principaux résultats obtenus sur l'analyse spatio-temporelle des produits d'anomalies de végétation de FEWS-NET, PAM et ASAP à l'échelle saisonnière sur la période 2010-2020 en Afrique de l'Ouest. Des résultats complémentaires sont fournis en Annexe 5 à l'échelle saisonnière.

### a. Analyse des divergences et convergences saisonnières

Pour ces premières représentations cartographiques nous nous sommes concentrés sur la période de juin à novembre (saisonnière) et avons calculé une moyenne d'anomalies de végétation entre ces mois. La détection des anomalies de végétation est réalisée sur l'ensemble de la végétation herbacée et ligneuse. Le seuil retenu pour la détection des anomalies positives et négatives pour la standardisation des systèmes FEWS-NET et PAM est celui de  $[-0.05 ; +0.05]$  pour faciliter la comparaison (voir section 1.B de la partie 5).

#### i. Sans masque de culture

##### *Analyse des surfaces*

A partir des cartes de classes d'anomalies saisonnières, nous avons calculé le pourcentage de chaque classe par produit (Tableau 4) pour l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest à une résolution de 1 km sans masque des cultures.

Tableau 4 : Pourcentages de classes d'anomalies saisonnières calculées sans le domaine cultivé (seuil FEWS-NET et PAM  $\pm 0.05$  et ASAP  $\pm 0.4$ ; référence 2010 – 2020.

Les systèmes	FEWS-NET			PAM			ASAP		
	Pourcentage d'anomalies négatives	Pourcentage d'anomalies neutres	Pourcentage d'anomalies positives	Pourcentage d'anomalies négatives	Pourcentage d'anomalies neutres	Pourcentage d'anomalies positives	Pourcentage d'anomalies négatives	Pourcentage d'anomalies neutres	Pourcentage d'anomalies positives
2010	12,24	80,16	7,59	2,36	81,57	16,07	0,85	92,87	6,28
2011	11,97	84,85	3,18	13,52	83,03	3,45	3,16	95,12	1,72
2012	10,31	80,39	9,30	2,52	78,94	18,54	0,62	89,89	9,50
2013	14,21	81,76	4,02	6,66	84,80	8,54	2,53	93,98	3,49
2014	11,85	84,09	4,06	11,25	84,72	4,03	2,69	95,48	1,83
2015	14,28	82,69	3,04	11,73	82,09	6,17	3,27	93,11	3,63
2016	12,08	83,35	4,57	9,67	81,26	9,07	2,85	94,11	3,04
2017	14,90	81,41	3,69	13,53	78,84	7,63	3,85	92,23	3,93
2018	14,70	77,67	7,63	8,25	75,81	15,94	2,41	79,41	18,18
2019	18,55	73,37	8,08	7,53	72,17	20,30	2,16	68,65	29,18
2020	21,87	66,47	11,66	4,63	67,44	27,93	1,45	72,32	26,23
moyenne	14,27	79,66	6,07	8,33	79,15	12,52	2,35	87,92	9,73

- Le système FEWS-NET semble être le système le plus alarmant des trois avec des pourcentages d'anomalies négatives dépassant les 20% en 2020 et ayant une moyenne sur les onze années de 14% d'anomalies négatives et de 6% d'anomalies positives (Tableau 4). Les pourcentages d'anomalies négatives détectés sont toujours supérieurs à 10% (2018, 2019 et 2020 sont les années les plus alarmantes) contrairement aux deux autres systèmes. Au total, 20% de la zone étudiée est en anomalies (positive ou négative).

- Le système ASAP possède le pourcentage moyen d'anomalies (positive ou négative) le plus faible (environ 12% de la zone d'étude). Le système du JRC a les pourcentages d'anomalies négatives détectées les plus bas sur les onze années, avec une valeur proche de 0% en 2010. Les années au plus fort pourcentage de détection d'anomalies négatives sont 2011, 2015 et 2017.
- Le système PAM apparaît comme le plus « optimiste ». La moyenne des anomalies positives est de 12.5% sur les onze années. Les quatre années aux détections d'anomalies négatives les plus fortes sont : 2011, 2014, 2015 et 2017. Enfin, le système PAM est le système le plus mixte entre les trois, détectant à la fois des anomalies positives et négatives au cours du temps.

Enfin, les systèmes PAM et ASAP se ressemblent sur les trois dernières années (2018, 2019 et 2020), avec une détection importante des anomalies positives. Pour terminer, les pourcentages moyens des trois SAPs semblent être très différents sans application de masque des cultures.

### Analyse cartographique

De manière générale, les trois systèmes apparaissent très divergents sur l'ensemble de la zone d'étude.

Spatialement, la zone commune aux trois systèmes est le Sud du Sahara, représenté au Nord avec une absence quasi-totale de détection d'anomalies. La bande sahéenne est assez semblable pour les trois SAPs, notamment le Sénégal, représenté par un cercle noir (Figure 29). Les systèmes PAM et ASAP tendent à avoir le plus de traits communs dans l'espace, spécifiquement dans la détection des anomalies positives à partir de 2018. Au contraire, les systèmes FEWS-NET et ASAP semblent très différents l'un de l'autre, l'année 2020 en est un exemple. Pour terminer, FEWS-NET et PAM semblent tout deux être aussi très opposés. Le premier détectant peu d'anomalies sur la bande sahéenne et le second en détectant peu d'anomalies sur la bande guinéenne (au sud de la zone d'étude). Ici aussi, il s'avère que le système FEWS-NET s'écarte spatialement des deux autres systèmes.

Temporellement, les trois systèmes connaissent de légères ressemblances, notamment avec la détection des anomalies positives sur l'année 2012. Le Sénégal semble être encore un bon exemple. La bande sahéenne est particulièrement bien représentée d'un système à l'autre au cours du temps ainsi que dans le Sud du Sahara, où il n'y a pas de végétation, donc immuable.

Cependant, il est certain qu'il faut nuancer ces propos car en effet ces ressemblances paraissent infimes au vu de ces premiers résultats. La comparaison directe d'un système à l'autre est d'autant plus difficile qu'ils ne recouvrent pas les mêmes zones pour une même année et une année à l'autre.

- Pour FEWS-NET, il est possible de remarquer de manière très prononcée la détection d'anomalies négatives sur la zone guinéenne les deux dernières années. Cette zone est spécifiquement une zone à fort couvert ligneux. L'année 2020 semble être très intéressante car il est possible d'observer un gradient latitudinal très marqué avec une bonne productivité végétale dans la bande sahéenne, et une productivité limitée dans la bande guinéenne par rapport à la productivité moyenne de la période de référence (2003-2017). Effectivement, selon un rapport de l'[OECD](#) en 2020, les événements météorologiques se sont révélés assez exceptionnels sur la zone sahéenne engendrant une pluviométrie très abondantes dans plusieurs pays, profitant à la végétation.

- Pour PAM, l'identification d'absence d'anomalies sur la bande guinéenne est cyclique dans le temps et dans l'espace. Les années 2010, 2012, 2018 à 2020 montrent un grand nombre d'anomalies positives. Il semblerait donc que la végétation ait été plus vigoureuse sur ces années-là.
- Pour ASAP, entre 2010 et 2016, les anomalies positives et négatives sont largement inférieures à celles détectées après 2017. Les années 2010 et 2012 montrent peu d'anomalies négatives. Les trois dernières années montrent une productivité végétale satisfaisante dans le Sud de l'Afrique de l'Ouest.

Pour terminer, la situation des anomalies de végétation est particulièrement préoccupante en Mauritanie et au Sénégal en 2018 et 2019 pour les trois systèmes. Selon une analyse réalisée par ACF (Action Contre la Faim), le GNAP (Groupe National des Associations Pastorales) et le RBM (Réseau Billital Maroobé) fin février 2020, 84% des territoires sud-mauritaniens et 49% des territoires nord-sénégalais n'étaient couverts que par du sol nu, sans aucun pâturage. De plus, des feux de brousse ont détruit le peu de pâturage qui existait dans cette zone. La possibilité d'expliquer ces baisses de production végétale communes aux trois SAPs soit envisageable par ces informations fournis par ces différents organismes.

# Étude des classes d'anomalies avec un seuil de $[-0.05 ; +0.05]$ pour FEWS-NET et PAM et avec un seuil initial ASAP sans un masque des cultures en Afrique de l'Ouest sur la période 2010 -2020

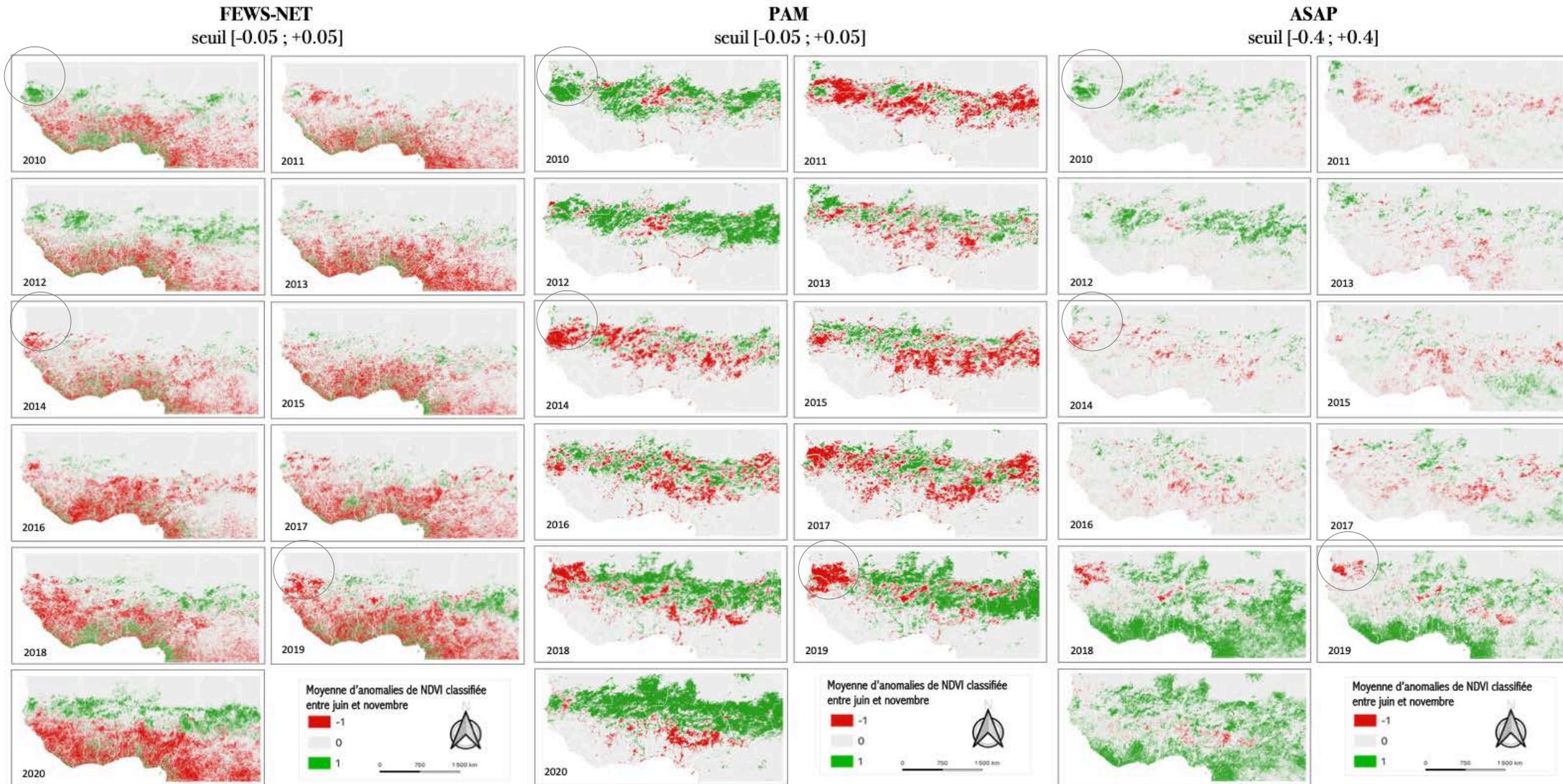


Figure 29 : Analyse des tendances saisonnières des classes d'anomalies selon les trois systèmes de 2010 à 2020 sans masque des cultures en Afrique de l'Ouest, avec une résolution spatiale de 1 km.

ii. Avec masque de culture

Comme nous analysons des produits d’alerte pour la sécurité alimentaire, nous avons comparé les produits des SAPs sur le domaine cultivé uniquement, en utilisant le masque de culture de ASAP. (Figure 30).

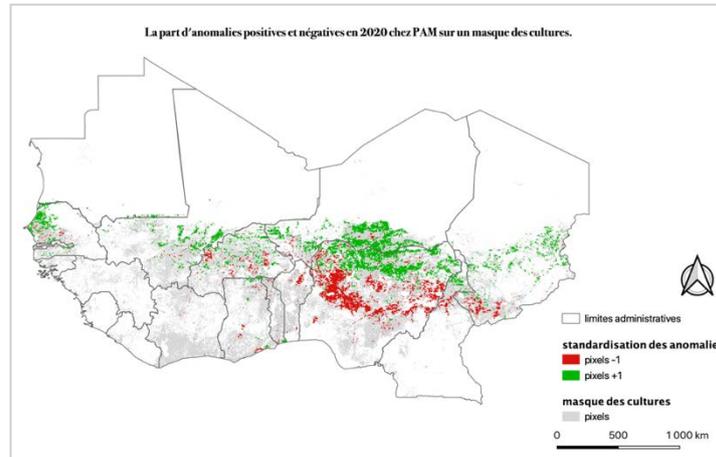


Figure 30 : exemple d’anomalies saisonnières moyennes à 1 km de résolution du système PAM avec un masque des cultures en 2020.

De manière générale, FEWS-NET et PAM sont très proches avec l’application d’un masque des cultures (Tableau 5). Les années 2012, 2019 et 2020 sont les années où la détection des anomalies positives sont les plus fortes. 2015 est l’année où la détection des anomalies négatives est la plus importante selon les trois systèmes. Le système ASAP est en tête dans la part de détection des anomalies saisonnières neutres. Les trois SAPs semblent être plus ressemblants avec l’application d’un masque des cultures.

Tableau 5 : pourcentages de classes d’anomalies saisonnières calculées sur le domaine cultivé (seuil FEWS-NET et PAM +/-0.05 et ASAP +/-0.4 ; référence 2010 – 2020.

Les systèmes	FEWS-NET			PAM			ASAP		
	Pourcentage d'anomalies négatives	Pourcentage d'anomalies neutres	Pourcentage d'anomalies positives	Pourcentage d'anomalies négatives	Pourcentage d'anomalies neutres	Pourcentage d'anomalies positives	Pourcentage d'anomalies négatives	Pourcentage d'anomalies neutres	Pourcentage d'anomalies positives
2010	7,28	88,31	4,40	1,40	91,39	7,21	0,33	95,39	4,28
2011	5,90	92,25	1,85	7,13	91,19	1,68	2,65	96,75	0,59
2012	5,07	88,77	6,17	1,44	89,90	8,66	0,40	93,30	6,30
2013	7,89	89,95	2,15	5,68	91,69	2,63	2,73	96,27	0,99
2014	6,78	90,90	2,32	8,44	90,18	1,39	3,35	96,05	0,60
2015	11,08	87,62	1,30	10,52	87,71	1,77	4,01	95,05	0,94
2016	7,95	89,11	2,94	8,15	87,86	3,99	3,69	94,38	1,94
2017	8,52	88,94	2,54	7,54	88,35	4,11	3,53	94,83	1,64
2018	9,41	85,80	4,79	5,85	87,26	6,88	2,15	89,08	8,77
2019	11,29	83,36	5,35	3,45	86,26	10,29	2,15	89,08	8,77
2020	13,25	81,11	5,64	5,21	85,67	9,12	2,19	89,79	8,03
moyenne	8,58	87,83	3,59	5,89	88,86	5,25	2,47	93,63	3,89

- Le système PAM paraît être le plus « optimiste » en 2018, 2019 et 2020 (Figure 31).
- Le système FEWS-NET détecte en moyenne environ 8% d’anomalies négatives ; c’est le système le plus alarmant (Tableau 5).
- Le système ASAP semble être le système qui détecte le moins d’anomalies avec des moyennes proches de 0% sur les années de 2010 à 2015 respectivement.

# Étude des classes d'anomalies avec un seuil de $[-0.05 ; +0.05]$ pour FEWS-NET et PAM et avec un seuil initial ASAP et avec un masque des cultures en Afrique de l'Ouest sur la période 2010 -2020

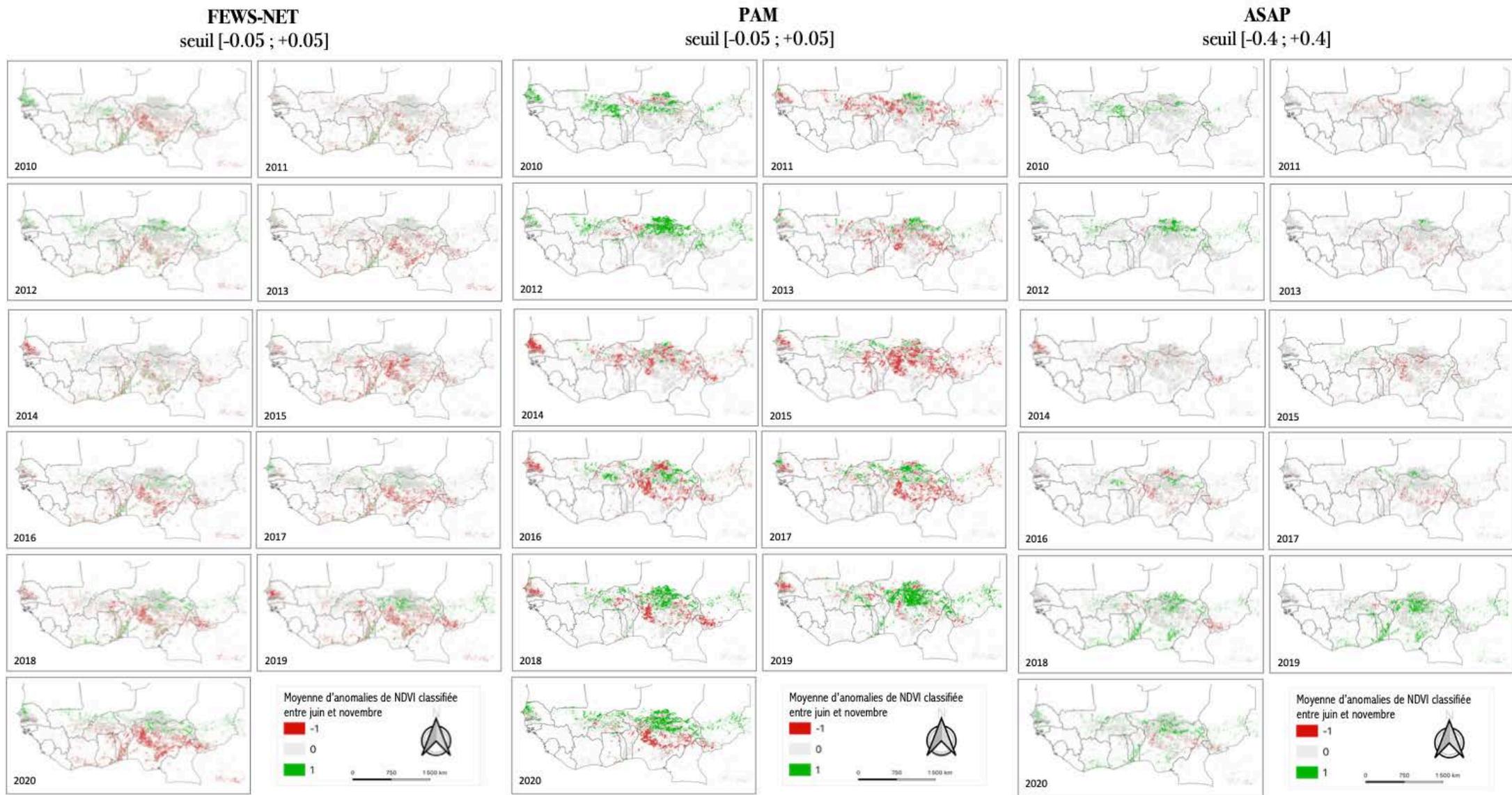


Figure 31 : Analyse des tendances saisonnières des classes d'anomalies selon les trois systèmes de 2010 à 2020 avec un masque des cultures en Afrique de l'Ouest, avec une résolution de 1 km.

**b. Analyse comparative dite « deux à deux »**

Après ce premier état des lieux des convergences et des divergences des trois produits de l'étude, il est important de réaliser une analyse comparative quantitative à l'échelle des pixels. Pour ce faire, les trois produits sont désagrégés à une résolution de 250 m, et on utilise le masque des cultures GLC2000. Les labels sans détection d'anomalies (les anomalies neutres) ne sont pas pris en compte dans le calcul pourcentages ; en effet la part d'anomalies neutres est importante et leur prise en compte tend à lisser les ressemblances et des divergences entre les trois systèmes. De plus, les passages d'une anomalie positive à une anomalie négative d'un système à l'autre (et inversement) sont comptabilisés mais non présentés dans cette partie car ils sont trop peu nombreux (ils sont donnés en Annexe 6). Ces choix sont bien entendus subjectifs et pourront être amenés à discussion.

Le Tableau n° 6 représente les pourcentages de ressemblance/divergence des SAPs pris deux-à-deux, selon 5 catégories :

- *anomalie négative -> absence d'anomalie ;*
- *anomalie positive -> absence d'anomalie ;*
- *pas de changement d'anomalie (positive ou négative) ;*
- *absence d'anomalie -> anomalie positive ;*
- *absence d'anomalie -> anomalie négative.*

Tableau 6 : Pourcentage de ressemblances et de dissemblances selon 5 labels entre les trois systèmes de l'étude sur le domaine cultivé. Seuil FEWS-NET et PAM +/-0.05 et ASAP +/-0.4 ; référence 2010-2020 ; résolution spatiale 250 m.

Les systèmes	FEWS - PAM					PAM - ASAP					FEWS - ASAP				
	label (-1) à label (0)	label (1) à label (0)	labels identiques	label (0) à label (1)	label (0) à label (-1)	label (-1) à label (0)	label (1) à label (0)	labels identiques	label (0) à label (1)	label (0) à label (-1)	label (-1) à label (0)	label (1) à label (0)	labels identiques	label (0) à label (1)	label (0) à label (-1)
2010	30,42	2,85	8,87	38,32	7,63	47,40	3,54	8,66	19,75	1,58	12,74	7,71	20,48	11,47	1,03
2011	23,81	1,64	9,09	12,07	46,24	50,62	1,88	9,84	4,58	17,82	61,50	2,09	14,80	1,42	7,31
2012	21,03	3,46	13,33	42,36	7,77	31,77	4,24	15,85	25,59	1,66	10,93	8,27	26,51	12,46	1,25
2013	31,13	1,63	11,47	16,12	32,77	54,83	2,02	11,88	5,56	12,71	50,80	3,06	14,32	2,39	10,51
2014	21,26	2,03	13,06	8,15	47,46	46,83	2,36	13,90	3,56	16,90	63,64	1,69	17,23	2,08	6,29
2015	25,97	1,04	18,80	8,77	42,17	59,74	1,23	15,12	4,97	12,59	64,00	2,10	15,99	2,81	6,57
2016	21,30	1,84	15,22	18,80	36,93	44,89	2,46	15,74	8,57	15,04	48,54	4,45	19,23	2,99	6,72
2017	23,34	1,54	16,34	20,76	32,87	48,54	2,20	16,45	7,85	12,72	46,89	4,86	17,15	2,50	7,92
2018	22,65	2,80	18,55	28,47	19,56	36,73	2,45	18,03	26,96	4,71	29,29	6,22	21,45	20,69	3,10
2019	28,64	2,24	16,68	36,41	9,42	39,44	2,40	15,59	28,71	1,85	16,78	9,24	24,33	21,75	1,74
2020	27,98	2,53	22,65	29,56	11,13	45,21	3,45	16,13	19,47	2,94	24,78	8,97	20,88	16,24	3,09

**i. FEWS-NET & PAM**

La ressemblance entre les systèmes FEWS-NET et PAM en 2015 est de 18,8% (Tableau 6) sur la surface totale des terres arables en Afrique de l'Ouest avec une résolution 250 m. Ces convergences se concentrent notamment au Burkina Faso, au Bénin et au Nigéria ainsi qu'au Sénégal à l'Ouest (Figure 32). La zone côtière du Golfe de Guinée entre la Côte d'Ivoire et le Nigéria semble être une zone de divergence importante avec une perte de détection d'anomalie négative, représentée en bleu foncé, à hauteur de quasiment 26% de la surface totale (Tableau 6). Enfin, on observe dans les hautes latitudes des divergences dans la détection d'anomalie à hauteur de 50% (Tableau 6). Ces divergences sont le résultat d'un passage de « pas d'anomalie » à un passage à « détection d'anomalie ». Le système FEWS-NET détecte plus d'anomalies dans le Sud de l'Afrique de l'Ouest que le système PAM. Le système PAM possède probablement une détection des anomalies dans le Nord de l'Afrique de l'Ouest plus directe. Il semblerait qu'à travers cet exemple, que les divergences dans la détection des anomalies s'opèrent sur un gradient latitudinal. En conclusion, les zones qui portent intérêt sont le Niger, le Nigéria, le Bénin, le Burkina Faso et le Sénégal.

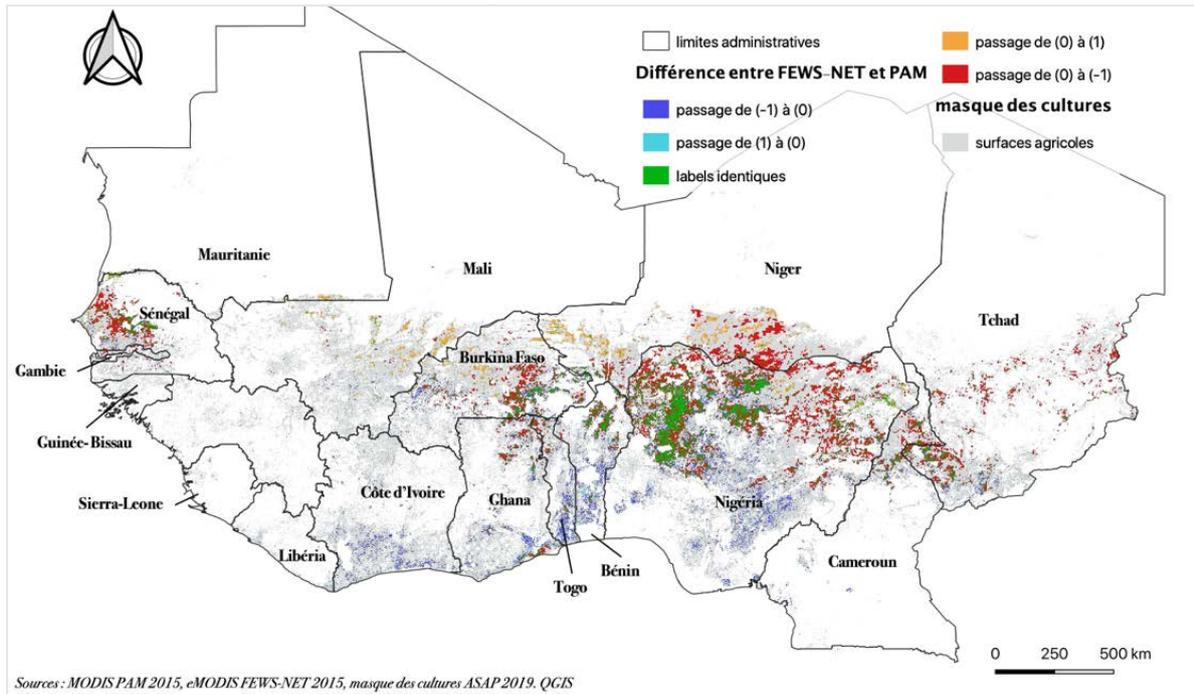


Figure 32 : Zone de convergences et divergences moyennes sur les mois de juin à novembre entre FEWS-NET et PAM en Afrique de l'Ouest avec un masque des cultures en 2015, avec une résolution spatiale de 250 m. (carte format A4 en annexe 7)

ii. FEWS-NET & ASAP

L'analyse comparative entre les systèmes FEWS-NET et ASAP montre un biais important dans la détection des anomalies négatives qui est de 66% entre les deux systèmes (Tableau 6). Les labels identiques aux deux systèmes sont représentés par environ 16% de la surface totale, fortement présents au Nigéria (Figure 33). Les deux systèmes FEWS-NET et ASAP sont très opposés dans la détection des anomalies sur l'année 2015, qui est une année sèche. Sur la frontière entre le Niger et le Nigéria il est possible d'observer des spots de divergences importantes d'un passage d'absence d'anomalies chez FEWS-NET à un passage d'anomalies chez ASAP.

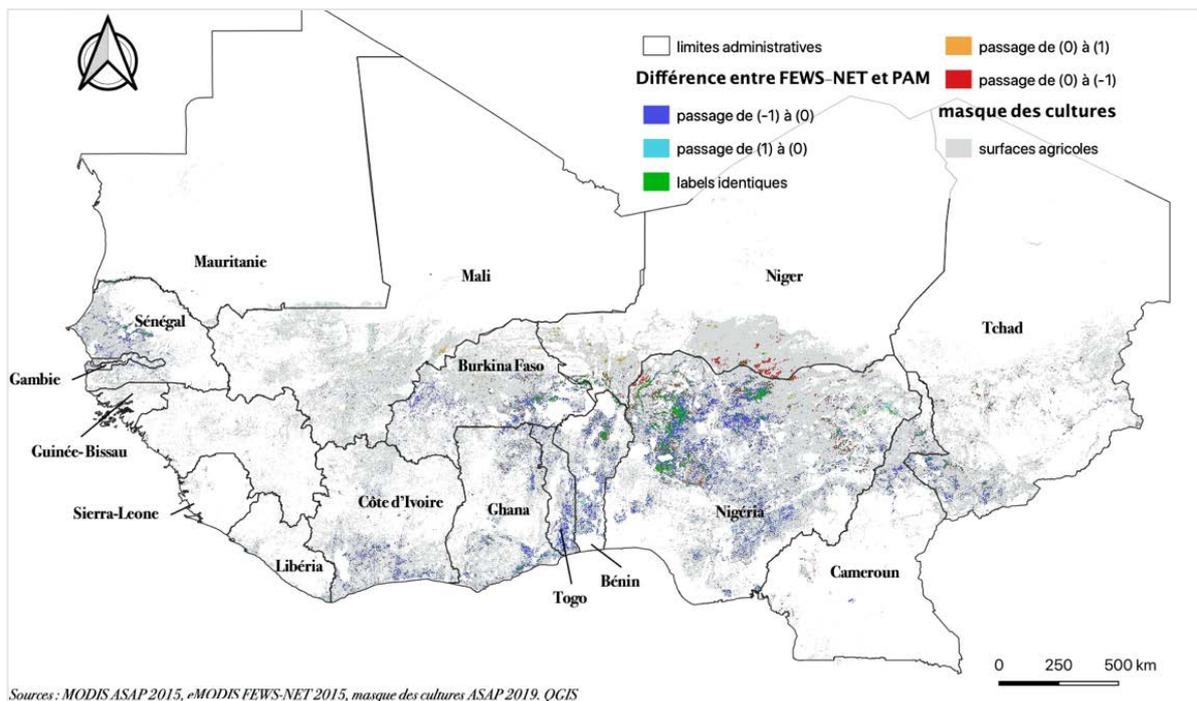


Figure 33 : Zone de convergences et divergences sur les mois de juin à novembre entre FEWS-NET et ASAP en Afrique de l'Ouest avec un masque des cultures en 2015, avec une résolution spatiale de 250 m. (carte format A4 en annexe 8)

## iii. PAM &amp; ASAP

Le gradient latitudinal est fortement contrasté avec une quasi absence de détection d'anomalies sur la bande Guinéenne et avec une zone très mixte sur la bande sahélienne (Figure 34). Sur la Figure 34 et à l'aide du Tableau n° 6, il est possible d'observer 15% de ressemblance entre les deux systèmes et 60% d'anomalies négatives à neutre entre PAM à ASAP. Nous constatons une tendance inverse à la Figure 33 entre FEWS-NET et PAM sur la zone entre le Niger et Nigéria ainsi que sur le Sénégal.

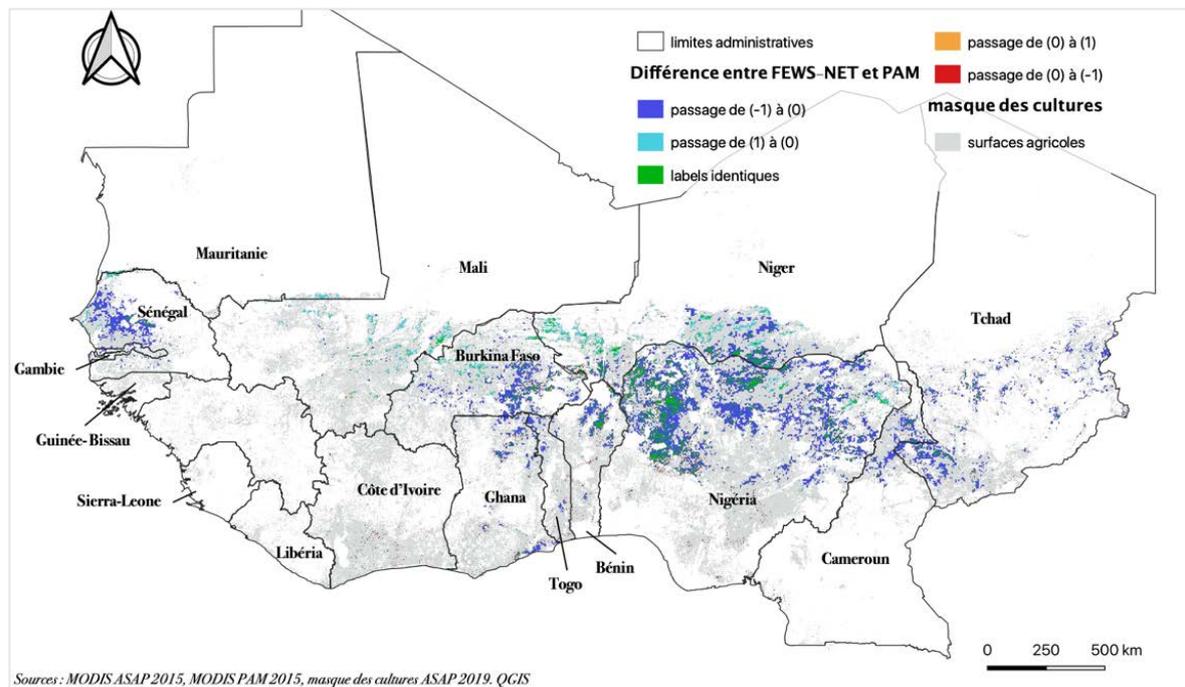


Figure 34 : Zone de convergences et divergences sur les mois de juin à novembre entre PAM et ASAP en Afrique de l'Ouest avec un masque des cultures en 2015, avec une résolution spatiale de 250 m. (carte format A4 en annexe 9)

En conclusion, l'analyse deux à deux a permis une mise en avant de plusieurs zones d'intérêt, qui sont le Sénégal, le Nigeria, le Burkina Faso, le Bénin et le Niger. Suite à ces premières analyses à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, il semble important d'analyser la variabilité interannuelle des anomalies de végétation à l'échelle d'un pays, avec le Sénégal et le Nigeria comme exemples, pour affiner les comparaisons et d'en dégager potentiellement des tendances ; cela sera présenté en section 2. d)

## c. Analyse comparative à trois

Nous avons réalisé une analyse conjointe des trois SAPS. Pour ce faire, nous avons agrégé l'ensemble des données à la résolution ASAP qui est de 1 km. La méthode d'agrégation utilisée est la méthode du plus proche voisin. Les données étudiées ici sont à l'échelle saisonnière (comprise entre juin et novembre) sans application de masque des cultures. Le Tableau n° 7 indique le pourcentage de ressemblance et dissemblance entre les trois systèmes sans distinction de la classe d'anomalie et le Tableau n° 8 indique le pourcentage de ressemblance selon la classe d'anomalie avec une dernière ligne qui indique le pourcentage de divergence entre les trois SAPS.

La Figure 35 représente les niveaux d’agrément entre les trois systèmes, avec en vert foncé les pixels pour lesquels les 3 SAPs donnent les mêmes classes d’anomalie (positive, négative ou absence), en vert clair les pixels pour lesquels les 2 SAPs sur les 3 donnent les mêmes classes d’anomalie, et en rouge les pixels pour lesquels les 3 systèmes ont des classes différentes. On observe que globalement les cartes d’anomalie entre les 3 systèmes ont un pourcentage de ressemblance élevé, avec 6,57% (Tableau 7) d’agrément et 48,58% d’agrément pour 2 systèmes sur 3. Les zones d’agrément se retrouvent essentiellement dans les zones au Nord de la bande sahélienne, ce qui s’explique par l’absence de végétation, et relativise les conclusions de cette comparaison. Les valeurs en sur-gras sont les valeurs les plus élevées selon la combinaison (3 produits identiques, ...)

Tableau 7 : Pourcentage de ressemblance et de divergence saisonnière selon 3 labels entre les trois systèmes de l’étude sur la période 2010-200 sans distinction des classes d’anomalies et sans masque des cultures.

années	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
3 produits identiques	67,19	<b>71,43</b>	67,97	<b>69,15</b>	<b>72,53</b>	68,24	68,75	65,69	55,85	47,93	45,02
2 produits identiques	32,50	28,51	31,87	30,77	27,39	31,63	31,15	34,15	<b>41,24</b>	<b>45,33</b>	<b>48,58</b>
3 produits différents	0,31	0,06	0,15	0,08	0,08	0,13	0,10	0,16	<b>2,87</b>	<b>6,57</b>	<b>6,04</b>

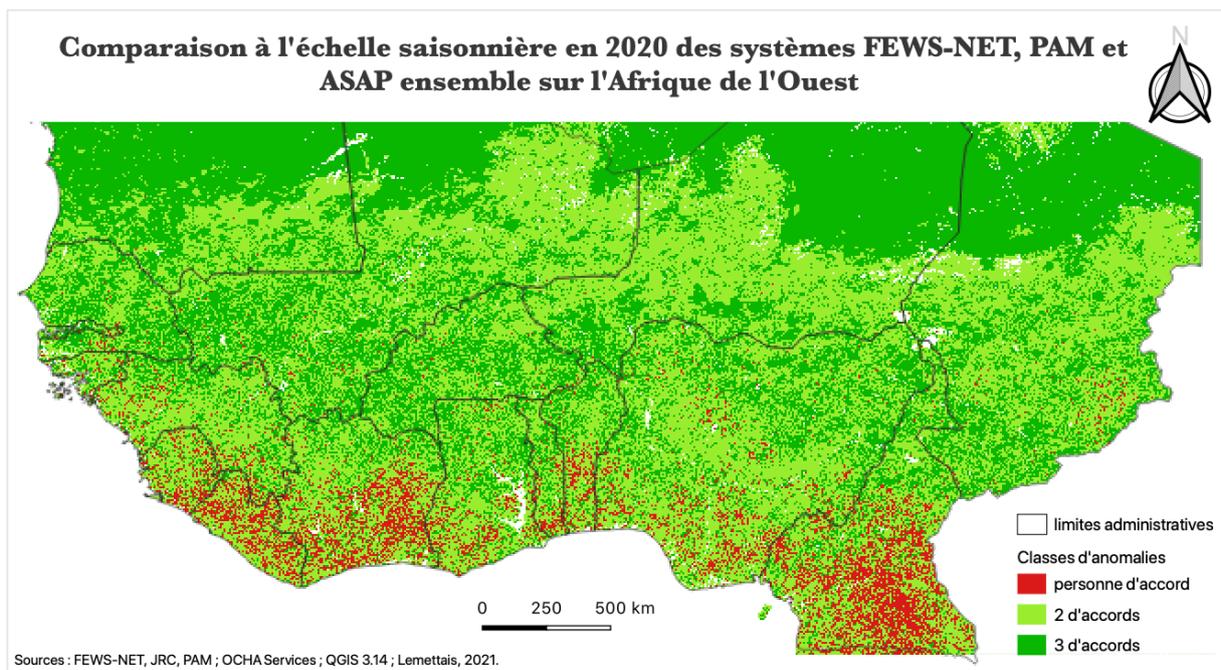


Figure 35 : Comparaison à l'échelle saisonnière des trois systèmes ensemble en 2020 sur la zone d'étude sans distinction des classes, avec une résolution spatiale de 1 km sans masque des cultures.

Pour aller plus loin, nous avons réalisé des cartographies de ressemblances entre systèmes (Figure 36), avec les pixels d’anomalies négatives (positives) communes aux trois SAPs représentés en rouge (vert), et les pixels sans anomalies communes aux trois systèmes sont représentés en gris. L’absence de ressemblance se caractérise ici par une absence de données (représenté en blanc). Nous avons également calculé les pourcentages de ressemblance selon la classe d’anomalies (-1, 0 ou 1).

Les valeurs en sur-gras sont les pourcentages de ressemblance les plus forts selon la classe d’anomalie. La classe (0) s’avère être la classe la plus ressemblante entre les trois SAPs ainsi que les pourcentages de divergences en dernière ligne. Les années 2019 et 2020 sont les années où la

détection des anomalies positives sont les plus communes aux trois systèmes. L'année 2015 semble être l'une des années les plus alarmantes communes aux trois SAPs comme l'année 2017 et 2018. Enfin, il est possible de remarquer que les pourcentages de ressemblances sont plus présents positivement entre les trois SAPs que les pourcentages de ressemblance négatifs.

Tableau 8 : Pourcentage de ressemblance selon 3 labels entre les trois systèmes et un 4<sup>ème</sup> label qui regroupe les divergences.

années	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
(% de -1)	0,08	0,95	0,07	0,50	1,05	<b>1,31</b>	0,83	<b>1,60</b>	<b>0,96</b>	0,91	0,82
(% de 0)	64,22	<b>69,52</b>	63,41	<b>67,27</b>	<b>70,59</b>	65,93	66,66	62,63	52,01	42,15	37,78
(% de 1)	2,09	0,22	<b>3,73</b>	0,58	0,17	0,23	0,68	0,43	2,01	<b>3,34</b>	<b>4,75</b>
différents	33,61	29,30	32,79	31,64	28,19	32,54	31,84	35,34	45,02	53,60	56,65

Spatialement et temporellement, la bande sahélienne se révèle être la zone où l'on observe le plus d'anomalies positives et négatives communes aux trois SAPs (Figure 36), alors qu'à contrario il y a très peu de ressemblance entre les trois SAPs dans la bande guinéenne, notamment sur les dernières années de l'étude.

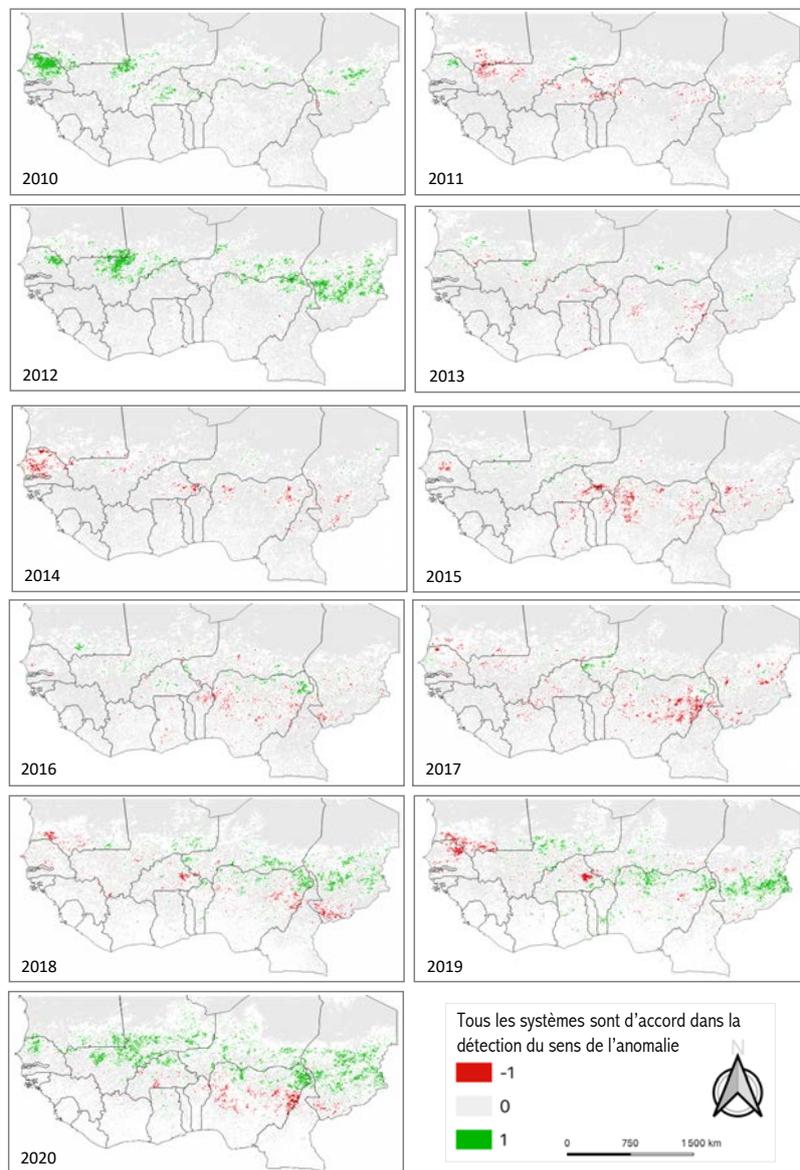


Figure 36 : Cartographies des classes d'anomalies saisonnières communes dans les trois systèmes de l'étude avec une distinction des trois classes, avec une résolution spatiale de 1 km.

## d. Études de cas

L'analyse comparative des produits d'anomalie à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest a montré des disparités spatiales qu'il semble important d'analyser localement. Ainsi, nous avons mené trois études de cas : une étude sur la bande guinéenne où l'on observe d'importantes anomalies négatives FEWS-NET et peu d'anomalie pour les 2 autres SAPs, et deux études de cas sur le Sénégal et le Nigéria. Les données mobilisées pour ces deux dernières études de cas sont les moyennes d'anomalies NDVI interannuelle sans application d'un masque des cultures.

### i. Le golfe de Guinée

Nous avons tenté de comprendre l'opposition générale qu'il y a entre les anomalies de FEWS-NET et des deux autres systèmes, notamment sur la bande guinéenne dans la détection des anomalies. Depuis moins d'une vingtaine d'années, la zone guinéenne connaît une augmentation importante de déforestation pour profiter à l'expansion agricole (culture du cacao, du café ou de l'huile de palme par exemple) et à l'exploitation du bois pour des usages commerciaux et domestiques. En 2014, le Libéria, le Sierra-Leone et la Guinée faisaient partis des pays aux plus fort taux de déforestation selon le [Global Forest Watch](#).

Un changement brutal d'occupation du sol (passage d'une forêt à un sol nu) dans l'étude aurait un impact considérable dans la détection des anomalies. En effet, l'anomalie détectée a comme référentiel la période 2003-2017, ce qui veut dire que les déforestations faites après 2017 ne sont pas prise en compte dans les produits de référence de FEWS-NET et ont un impact sur le calcul des anomalies. Cela pourrait en partie expliquer la forte présence d'anomalies négatives dans cette région après 2017. La Figure 37, permet de visualiser la déforestation en 2020 dans quatre pays de la zone guinéenne. Au total, on compte 15990 pixels d'anomalie négative considérés comme liés à la déforestation entre 2018 et 2020, et 687 pixels d'anomalie positive liés à cet effet. Les pixels d'anomalie positive pourraient correspondre à des zones déforestés avant l'année 2017 (la déforestation comprend les années de 2001 à 2020) où la végétation naturelle a eu le temps de repousser ou devenues des zones agricoles.

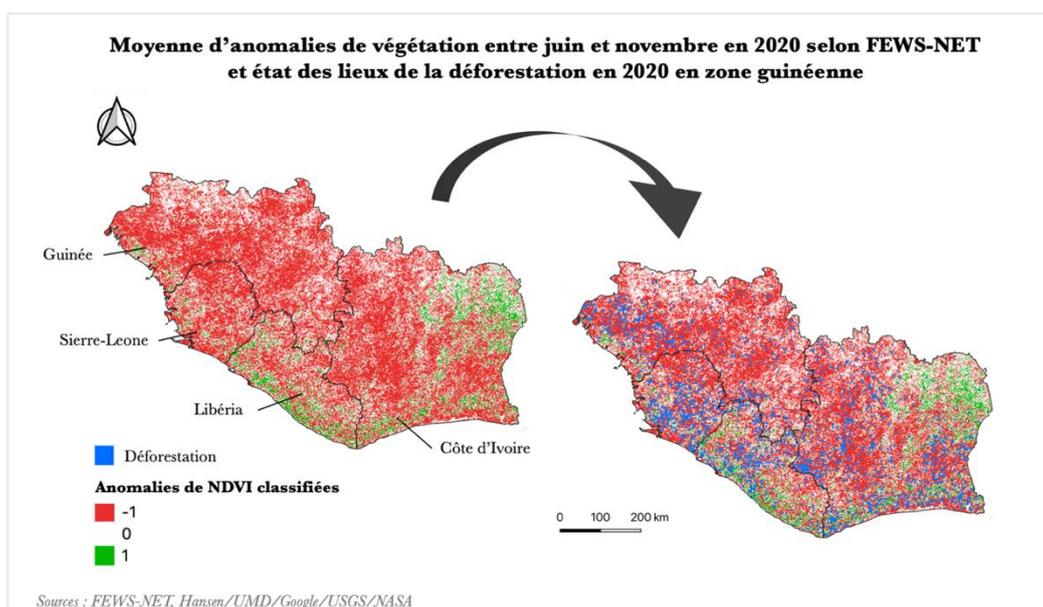


Figure 37 : État des lieux de la déforestation dans la zone guinéenne entre 2001 et 2020 et les moyennes saisonnières des classes d'anomalies détectées en 2020 chez FEWS-NET, avec une résolution de 250m.

Pour compléter cette approche, dans la littérature, Huete & al., (2002) et Zhang & al., (2004) reconnaissent certaines limites au NDVI. En particulier la présence récurrente de contaminations atmosphériques résiduelles comme les nuages ou encore de biais liés à l'angle de prise de vue et au relief. Mais l'inconvénient principal du NDVI est sa tendance à la saturation lorsque la densité foliaire (LAI) est trop forte au niveau du sol (Asrar & al., 1984, Chen & al., 2006, Yingxin Gu & al., 2014).

### ii. Le Sénégal

La Figure 38 illustre l'évolution des anomalies NDVI moyennes annuelles au Sénégal entre 2010 et 2020 sans masque des cultures (Figure 38). Globalement, les données ASAP montrent une forte chute de la productivité végétale sur la période considérée (tendance négative des anomalies avec le temps), alors que les tendances de FEWS-NET et PAM sont plutôt stables, avec une augmentation des anomalies négatives sur les années 2014 et 2019. Pour le système ASAP, les années 2011, 2014 et 2017 sont les années les plus « optimistes » en termes d'anomalies de végétation et au contraire, l'année 2015 semble être particulièrement alarmante avec une forte anomalie négative.

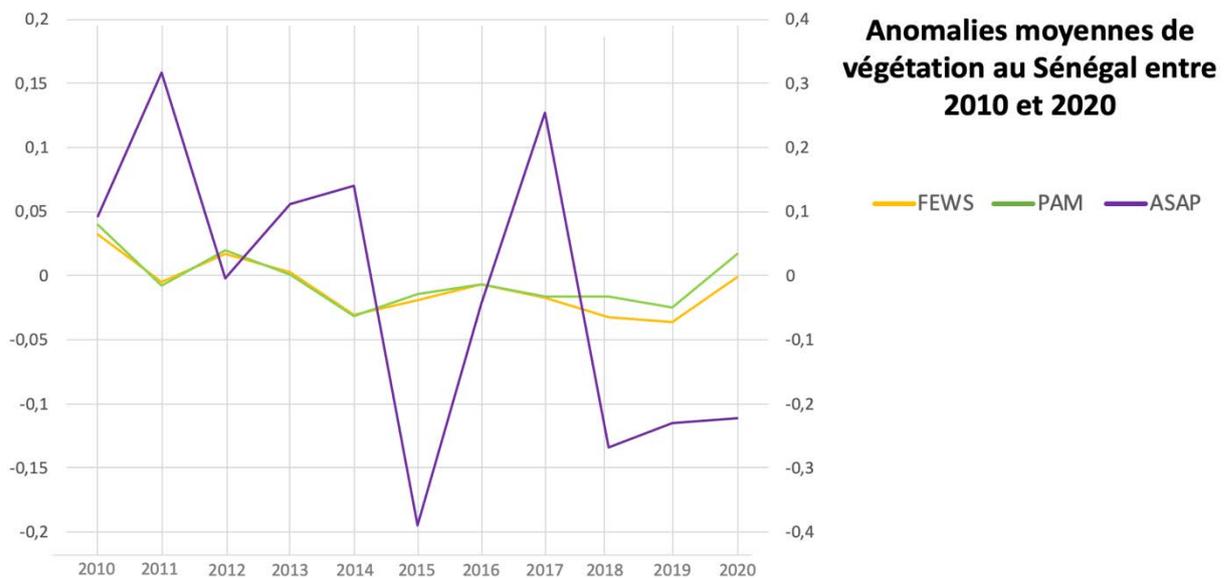


Figure 38 : Variabilité interannuelle des anomalies NDVI des trois SAPs au Sénégal sans le domaine cultivé entre 2010 et 2020 ; l'axe des y à gauche avec FEWS-NET et PAM et l'axe des y à droite avec ASAP.

### iii. Le Nigéria

La Figure suivante illustre l'évolution des anomalies NDVI moyennes annuelles au Nigéria entre 2010 et 2020 sans masque des cultures (Figure 39). Le système ASAP a une tendance positive nette, avec des valeurs d'anomalies maximales en 2017 et 2019 qui ont de fortes valeurs. Les tendances des systèmes FEWS-NET et PAM sont moins marquées, et FEWS-NET possède une tendance légèrement plus alarmante que PAM.



Figure 39 : Variabilité interannuelle des anomalies NDVI des trois SAPs au Nigéria sans le domaine cultivé entre 2010 et 2020 ; l'axe des y à gauche avec FEWS-NET et PAM et l'axe des y à droite avec ASAP.

En conclusion, les deux dernières études de cas ont montré des tendances différentes. Dans le premier cas, au Sénégal la tendance générale des trois SAPs est décroissante, dans le deuxième cas la tendance est croissante. Les systèmes FEWS-NET et PAM, sont homogènes d'un terrain à l'autre ainsi que proche dans leur signature. Ces cohérences spatiales internes à chaque système permettent de mettre en avant des similitudes à l'échelle étatique et permettent d'apporter des pistes de réflexions sur les potentielles convergences et divergences des systèmes. Toutefois, ces analyses portent sur deux exemples précis et ne sont potentiellement pas applicables à toute la zone d'étude qu'est l'Afrique de l'Ouest.

### 3. Analyse mensuelle de la variabilité spatio-temporelle

Pour faire l'analyse mensuelle des classes d'anomalies, nous avons choisi de prendre l'exemple du mois de novembre entre 2010 et 2020, et sans application de masque des cultures. Ce travail porte sur la réalisation de cartes opérationnelles, passant de l'échelle pixel à l'échelle de l'unité administrative, ici, les régions (Level 1). La règle d'agrégation utilisée pour cet exemple est de 10% d'anomalies positives ou négatives (et se référer à la partie 4 section b. p.43).

Les tendances générales indiquent que le système FEWS-NET détecte moins d'anomalies aux échelles administratives que les deux autres systèmes. La Mauritanie, le Mali, le Niger et le Nord de Tchad (sur la bande sahélienne) sur le système FEWS-NET montrent peu d'anomalies. En revanche, les systèmes PAM et ASAP détectent des anomalies sur ces mêmes pays.

Les trois systèmes convergent toutefois vers une ressemblance générale. En effet, le mois de novembre 2017 montrent de nombreuses anomalies négatives (Figure 40). Le Tableau n° 6 indique une détection de 7% de surface chez FEWS-NET, 8% de surface chez PAM et environ 3% de surface chez ASAP d'anomalies négatives.

Les systèmes PAM et ASAP sont remarquablement très proches dans la détection d'anomalies durant les mois de novembre, en particulier pour la période 2018 à 2020 (à l'exception de certaines régions du Sénégal, notamment sur Saint-Louis). Enfin, les systèmes semblent détecter plus facilement les anomalies négatives dans le temps et dans l'espace au même moment durant la période de l'étude.

- Pour FEWS-NET, la variabilité inter-annuelle des classes d'anomalies pour les mois de novembre semble moins importante que pour les deux autres systèmes malgré une détection fine des anomalies au seuil de  $[-0.05 ; +0.05]$ .
- Pour le PAM, la détection des anomalies durant les mois de novembre est importante, à l'exception des pays du Sud-Ouest (de la Guinée-Bissau au Ghana) pour lesquels on observe peu d'anomalie de végétation à cette période.
- Pour ASAP, la détection des anomalies durant les mois de novembre est considérable quelle que soit l'année et recouvre l'ensemble de la zone d'étude.

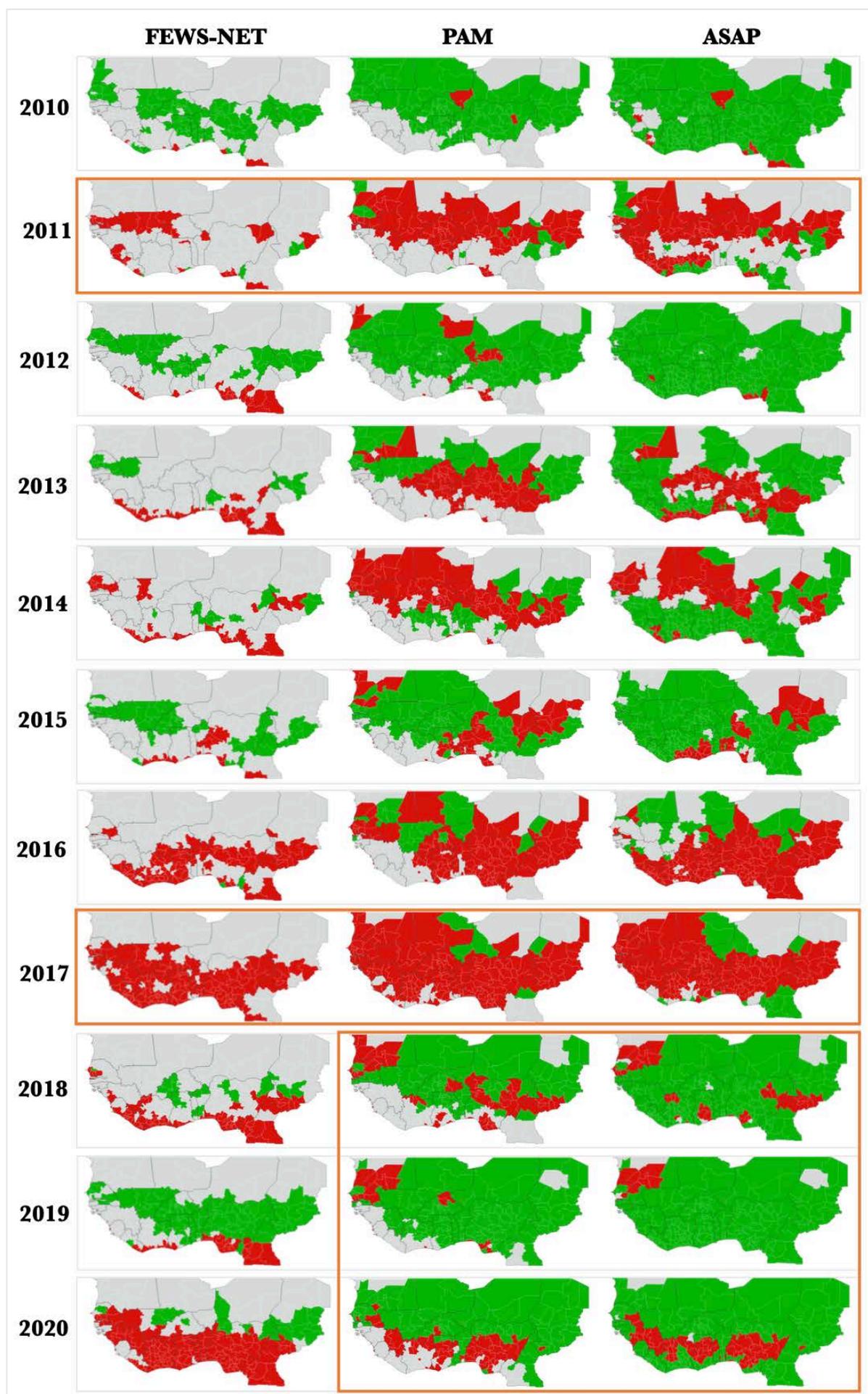
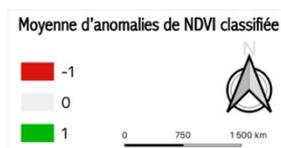


Figure 40 : Évolutions des classes d'anomalies de végétation durant les mois de novembre entre 2010 et 2020 en Afrique de l'Ouest. L'échelle administrative utilisée est « level 1 » et la règle d'agrégation spatiale utilisée est celle des 10%.



## Partie 6 : Discussion

---

Dans cette dernière section nous faisons un bilan des principaux résultats obtenus, réalisons une comparaison avec les bulletins CM4EW de GEOGLAM, analysons les limites et perspectives du travail, et répondons aux hypothèses posées en introduction.

### 1. Des informations contradictoires entre produits

Après une analyse des produits natifs et après un réajustement des seuils, les trois SAPs de l'étude se révèlent fortement différents. Ces différences portent sur le nombre d'anomalies détectées et sur leur localisation.

- ◆ L'analyse générale des produits natifs d'anomalies des trois SAPs à l'échelle annuelle a révélé que des tendances similaires existent entre les systèmes FEWS-NET et PAM. L'analyse spatiale par diagramme de Hovmöller montre que le système FEWS-NET s'écarte de manière importante des deux autres avec une détection forte d'anomalies négatives, notamment dans les basses latitudes du Golfe de Guinée.
- ◆ L'analyse quantitative des variabilités saisonnières des classes d'anomalies sans masque des cultures a mis en avant que le système FEWS-NET est le plus alarmant (avec 14,3% d'anomalies négative), et qu'au contraire PAM est le plus « rassurant » (avec 9,7% d'anomalies positives). Les cartographies des classes d'anomalies ont montré que les systèmes PAM et ASAP étaient relativement proches à la fois spatialement et temporellement, et se différenciaient du système FEWS-NET.
- ◆ L'analyse quantitative des variabilités saisonnières des classes d'anomalies avec masque des cultures a mis en avant une détection plus faible des anomalies comparée à celle obtenue sans masque des cultures. FEWS-NET reste le plus alarmant (8.6% d'anomalies négatives) et PAM le plus rassurant (5.3% d'anomalies positives). Temporellement, les trois systèmes détectent les mêmes tendances et spatialement ces tendances se révèlent relativement proches entre PAM et FEWS-NET. Le système ASAP détecte moins d'anomalies de végétation que les deux autres sur les zones de cultures. L'utilisation du domaine cultivé rapproche les trois SAPs.
- ◆ Les cartes comparatives dites « deux à deux » sont relativement plus complexes à analyser. Spatialement, les zones majoritairement semblables sont le Nigéria, le Burkina-Faso, le Bénin, le Niger et le Sénégal. Les différences se révèlent fortement présentes sur les latitudes basses de la zone d'étude (la bande guinéenne).
- ◆ Les cartes comparatives à trois des classes d'anomalies sans masque des cultures sont elles aussi relativement complexes à analyser. La mise en relation des trois SAP a permis de mettre en avant que les zones majoritairement en accord sont les zones où il n'y a pas de détection d'anomalies comme sur le Sahara. Les anomalies positives, commune aux trois SAPs, sont visuellement et statistiquement supérieures à la détection des anomalies négatives. Les classes d'anomalies saisonnières sans application du domaine cultivé sont majoritairement présentes sur la bande sahélienne.

- ◆ Au Sénégal et au Nigéria, les analyses de la variabilité saisonnière interannuelle révèlent des tendances similaires entre les systèmes FEWS-NET et PAM. Généralement, les trois produits détectent dans le temps la même tendance, avec des tendances plus fortes pour ASAP.
- ◆ L'agrégation à l'échelle administrative Level 1 a permis de mettre en avant des divergences importantes dans la détection des anomalies. Toutefois, de l'année 2018 à 2020, les systèmes PAM et ASAP se ressemblent. Temporellement, les systèmes sont très hétérogènes les uns par rapport aux autres. Le passage à l'échelle administrative n'améliore pas les ressemblances entre les produits.

## 2. Des produits difficilement comparables

### a. Produit image et résolution

La diversité des produits satellitaires utilisés et des échelles spatiales sont de sources d'explication des divergences observées entre SAPs. Les produits MODIS NDVI utilisés sont le MOD13C1 pour le PAM avec une résolution de 5 km, le MOD13A2 pour ASAP avec une résolution de 1 km et le eMODIS pour FEWS-NET avec une résolution de 250 m. Les différences de période de composition temporelle des NDVI et de résolution spatiale de ces produits expliquent en partie les différences importantes dans les résultats.

### b. Niveaux de pré-traitement

Les pré-traitement mis en place dans les systèmes sont aussi de natures diverses. En effet, les filtres temporels sont différents, ainsi que la période de composition des NDVI lissés : 10 jours pour FEWS-NET, une version améliorée du filtre de Whittaker et 8 jours pour le PAM, et le filtre Whittaker et 10 jours pour ASAP. Ces différents pré-traitements des produits NDVI MODIS sont aussi une source de divergence entre SAP.

### c. Indicateurs et période de référence

Les indicateurs et les périodes de références des systèmes, qui sont pour rappel : le pourcentage à la médiane pour FEWS-NET (2003-2017), le pourcentage à la moyenne pour PAM (2002-2013) et le z-score pour ASAP (2002-2016), sont aussi sources de divergence. Nous avons montré à partir d'un jeu de données expérimental (produit NDVI unique, mêmes années de référence et même saison d'analyse) que la moyenne et la médiane donnaient des résultats proches, et que le z-score était également cohérent au regard des deux autres indicateurs. Ainsi, la divergence observée entre systèmes provient pour l'essentiel des années de référence choisies pour le calcul des indicateurs, mais aussi de la période d'analyse (année entière pour FEWS et PAM, saison culturale pour ASAP). Cette diversité d'indicateurs et période de référence sur l'Afrique de l'Ouest rendent difficile l'analyse comparative des SAPs ainsi que l'étude que nous faisons sur la période 2010-2020.

### d. Des seuils différents

Enfin, les seuils choisis pour la détection des anomalies est aussi une source de divergence. Les comparaisons des produits natifs ont permis de mettre en avant des différences importantes dans la spatialité des anomalies NDVI des SAPs. Durant l'étude, l'analyse de sensibilité révèle spatialement

que les systèmes FEWS-NET et PAM divergeaient dans la détection des anomalies ([Annexe 10](#)). Le choix des seuils dans la détection des anomalies NDVI est potentiellement, lui aussi, une source de divergence dans la comparaison des systèmes en Afrique de l'Ouest. Le seuil +/- 0.05 regroupe le plus d'anomalies NDVI entre les systèmes FEWS-NET et PAM et inversement, plus le seuil est restrictif et moins les systèmes semblent comparables.

### 3. Un manque de références pour comparer les produits

Les analyses menées dans cette étude ont porté sur la comparaison spatio-temporelle relative des différents produits d'anomalie des SAPs. Pour aller plus loin dans l'analyse et émettre un avis sur la pertinence des différents produits en matière d'alerte précoce, nous avons besoin d'une source de données indépendantes. Afin de comparer qualitativement les trois SAPs de l'étude avec une source de données indépendantes, nous utilisons les bulletins du CM4EW-GEOGLAM. Ces bulletins se composent à la fois de cartographies opérationnelles et de rapports explicatifs des différentes situations à travers le monde. Ces rapports mettent aussi en avant les prix de l'accès aux ressources, les migrations causée majoritairement par des conflits armés, et mettent aussi l'accent sur les conditions météorologiques passées et présentes pour tenter d'expliquer les conditions actuelles dans les bulletins. Ces bulletins ne sont donc pas indépendants des produits étudiés, mais ils sont suffisamment enrichis par des sources de données externes pour servir de référence.

Nous avons analysé les bulletins du mois de novembre de 2016 et 2017 qui sont deux années contrastées ([Annexe 11](#)). Ainsi nous avons comparé les cartes d'anomalie produites à l'échelle administrative avec une règle d'agrégation de 10% et de 30% à l'échelle saisonnière et les cartes des bulletins de novembre du CM4EW-GEOGLAM. Les bulletins de novembre sont une synthèse de la saison des pluies de l'année car ils sont le résultat des événements passés durant la saison.

#### a. Le CM4EW de GEOGLAM

##### i. L'année 2016

En Afrique de l'Ouest, les conditions agricoles détectées par GEOGLAM sont favorables sur l'ensemble de la région en 2016 ([Figure 41](#)). Selon le bulletin de novembre, les pluies précoces ont permis également des semis et des récoltes précoces sur la région. Il est aussi dit dans le bulletin :

*« Cependant, la première partie de la saison a connu une mauvaise répartition des pluies, ce qui a entraîné une sécheresse dans certaines zones, qui a particulièrement affecté la partie occidentale du Sahel, notamment le Mali, le sud de la Mauritanie et le Sénégal. De fin juillet à début octobre, la région a généralement reçu des précipitations moyennes à supérieures à la moyenne, ce qui a compensé la plupart des déficits observés au début. Les précipitations saisonnières, généralement suffisantes et bien réparties dans toutes les zones agro-écologiques de la région, ont été favorables au développement des cultures. Les principales récoltes ont été achevées dans le Sahel et sont en cours dans les zones agro-écologiques plus au sud. On s'attend à une production supérieure à la moyenne. » Bulletin n°11 - novembre 2016.*

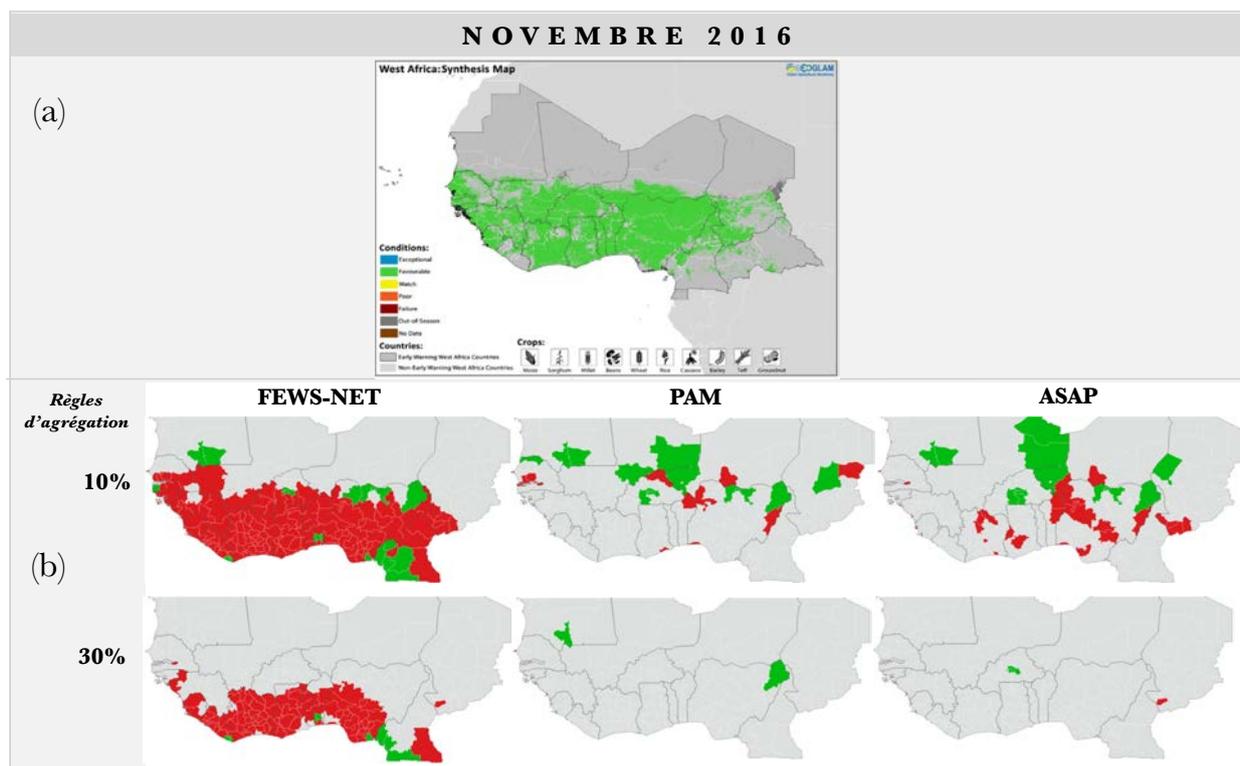


Figure 41 : (a) Extrait du bulletin n° 11 de novembre 2016 de GEOGLAM. (b) Cartographies des classes d'anomalies saisonnières avec une application de deux règles d'agrégation (limite de 10% et 30%) à l'échelle administrative L1 de l'Afrique de l'Ouest selon les trois systèmes. (Le seuil de détection d'anomalies appliqué sont les seuils natifs, pour FEWS-NET  $\pm 0.05$ , pour PAM  $\pm 0.1$  et pour ASAP  $\pm 0.4$ ).

Les cartographies de FEWS-NET aux règles d'agrégation 10 et 30% mettent en évidence à l'échelle saisonnière la forte présence d'anomalies négatives, soit l'inverse du bulletin de novembre du CM4EW. Les systèmes PAM et ASAP avec la règle d'agrégation 30% semblent être très similaires au bulletin. Pourtant, la règle d'agrégation 10% peut faire nuancer ce propos car plusieurs zones, notamment chez ASAP semblent être en situation alarmante. Nous pouvons faire cette même remarque avec le PAM. La comparaison avec le CM4EW permet d'apporter quelques pistes de réflexion sur la qualité intrinsèque des trois SAPs où FEWS-NET tend à s'opposer aux deux autres SAPs.

## ii. L'année 2017

En Afrique de l'Ouest, l'état des lieux de l'agriculture semble très contrasté en novembre 2017 selon le CM4EW (Figure 42). Il est possible d'observer des zones en situation dite « de crise » comme au Sénégal, au Nord du Nigéria (représentée en orange) ou encore sur la bande guinéenne (représentée en jaune). Selon le bulletin de novembre, le mois de septembre a connu dans certains pays des précipitations inférieures à la moyenne et de périodes de sécheresse qui ont affecté toutes les cultures, et plus particulièrement les cultures pluviales pour lesquelles des mauvaises récoltes étaient attendues. Enfin, les conflits dans la zone Nord-Nigéria provoquent une forte baisse des rendements agricoles dû à des changements de pratiques ou un abandon des cultures.

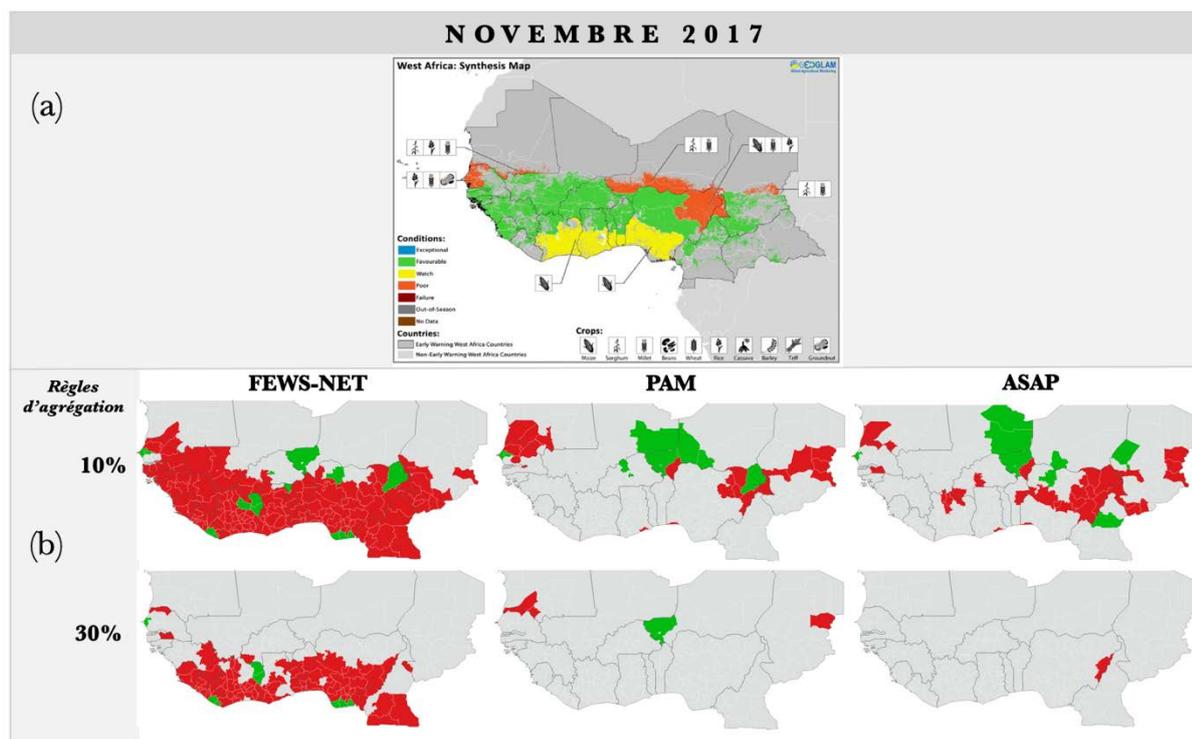


Figure 42 : (a) Extrait du bulletin n°22 de novembre 2016 de GEOGLAM. (b) Cartographies des classes d'anomalies saisonnières avec une application de deux règles d'agrégation (limite de 10% et 30%) à l'échelle administrative L1 de l'Afrique de l'Ouest selon les trois systèmes. (Le seuil de détection d'anomalies appliqué sont les seuils natifs, pour FEWS-NET  $\pm 0.05$ , pour PAM  $\pm 0.1$  et pour ASAP  $\pm 0.4$ ).

Les trois SAPs avec la règle d'agrégation 10% semblent être assez en accord avec le bulletin de novembre 2017 (Figure 42). Le système ASAP s'avère être le plus ressemblant avec le CM4EW, notamment sur la partie Est de la zone d'étude (Niger, Nigéria, Tchad). Le système FEWS-NET est lui assez semblable sur la zone Sud (bande guinéenne). En revanche, lorsque la règle d'agrégation 30% s'applique, seul le système FEWS-NET reste proche du bulletin. Les deux autres SAPs ne détectent plus d'anomalies au-dessus de 30%. Il semble difficile dans ce cas de savoir quelle règle d'agrégation semble la plus juste au regard des bulletins CM4EW.

Les bulletins des SAPs ne permettent pas d'apporter des réponses concluantes quant à la détection des anomalies de végétation dans les SAPs aujourd'hui ou quant à la qualité intrinsèque de chaque produit d'anomalies. En effet, dans le premier cas, en 2016, FEWS-NET tend à s'écarter fortement du bulletin et dans le deuxième cas, en 2017, FEWS-NET tend à être le plus proche. Une étude plus approfondie est à envisager pour tenter d'améliorer ces premiers résultats. De plus, la méthodologie appliquée pour faire la synthèse de toutes les sources de données par le CM4EW ainsi que la classe finale, reste très floue. Ensuite, d'autres facteurs seraient à prendre en compte pour pouvoir argumenter sur ces désaccords vertigineux entre les résultats et bulletins du CM4EW.

Enfin, il est important de rappeler qu'une baisse de NDVI n'est pas seulement associée à un stress hydrique ou une cause climatique. Cette baisse peut être aussi expliquée par des actions anthropiques comme dans les zones de conflits et de tensions, de mauvaises pratiques agricoles ou encore d'un défrichement sauvage. Les zones de culture peuvent être brûlées et dévastées comme par exemple dans la partie Nord du Nigéria territoire frontalier avec le Tchad et le Niger ([fews.net](http://www.fews.net)).

#### 4. Limites et perspectives

Le travail mené dans cette étude a été réalisé à partir des produits d'anomalie fournis par les différents SAPs ; cela apporte une difficulté supplémentaire dans l'analyse des données, car nous n'avons pas pu vérifier la construction des jeux de données. En d'autres termes nous n'avons pas la main sur ces indicateurs. En effet, cette analyse n'offre aucune possibilité d'élargir les connaissances sur les jeux de données. Il s'est révélé difficile d'interpréter la construction de l'indice d'anomalie sur la base de la méthode proposée par le JRC (z-score) par exemple, malgré un effort pour reconstruire un exemple d'anomalies de végétation.

Ce travail aurait dû être réalisé avec quatre SAPs : FEWS-NET, PAM, ASAP et GIEW. Cependant, nous n'avons jamais réussi à récupérer les données de GIEWS.

L'analyse des données a été difficile à mener en raison de la grande variété des sources de données manipulées, des différentes échelles et temporalités. C'est une analyse exploratoire qui devra être complétée. La méthodologie s'est appuyée principalement sur des échelles saisonnières, ce qui est une limite forte de l'analyse car une valeur saisonnière n'est pas représentative de la production végétale durant la saison. De ce fait, des échelles plus fines seront à réaliser.

Enfin des données d'anomalies de biomasse simulée avaient été intégrées dans l'étude pour obtenir un référentiel à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest. Cette étude avait pour objectif de tenter de mettre en avant de potentielles rapprochement et similitude entre un système agro-climatique et les trois systèmes de l'étude. En effet cela aurait permis de mettre en avant les forces et faiblesses de chaque système pour tenter d'apporter un point de validation. Le système en question était SARRA-O, un modèle de croissance de plante spatialisé utilisé par AGRHYMET dans le cadre de leur système d'alerte précoce également où des anomalies de biomasses aériennes étaient calculées. Cependant, après l'obtention de résultats inattendus, plusieurs recherches ont été réalisées, notamment sur la qualité des données mobilité en amont (biomasse aérienne). Il s'est révélé que le jeu de données en question portait un nombre important de données aberrantes. Nous avons alors préféré retirer cette partie de l'étude. Vous pourrez retrouver certaines analyses en Annexe 12.

Plusieurs points seraient à améliorer :

- augmenter le nombre de classes pour réaliser plusieurs indicateurs communs ;
- travailler sur des périodes plus courtes que l'échelle saisonnière (mois) ;
- récupérer les NDVI des trois systèmes et réaliser le même indicateur d'anomalies ;
- récupérer les NDVI avant et après les pré-traitements pour pouvoir comparer les résultats ;
- prendre une période de référence commune aux SAPs ;
- 
- adapter les analyses saisonnières aux transects latitudinaux ;
- obtenir un référentiel indépendant sur l'Afrique de l'Ouest, SARRA-O ;
- entretenir et continuer les interactions avec les organismes en charge des SAPs, notamment avec GIEWS (FAO) ;
- continuer d'explorer les jeux de données et espérer au vu des résultats une mobilisation plus importante des SAPs dans l'amélioration de leurs systèmes ;
- restituer ces résultats auprès de l'équipe GEOGLAM et de continuer à travailler avec eux.

## 5. Réponses apportées sur les différentes hypothèses de départ

Les produits anomalies fournis par les SAPs sont majoritairement cohérents entre eux car ils sont issus des mêmes images MODIS basse résolution : les produits anomalies ne sont pas majoritairement cohérents entre les trois SAPs. Les résultats ont révélé que les taux de ressemblance ne dépassaient pas 30% de pixels entre deux systèmes même avec l'application d'un masque des cultures. Au contraire, les différences d'informations ont des taux allant jusqu'à 60% de différence. En revanche, lors de la comparaison avec les trois SAPs, la bande sahélienne s'est avérée être la zone la plus similaire entre les systèmes. La diversité des anomalies NDVI utilisée rend l'étude difficile pour comparer ces systèmes entre eux.

Les différences détectées proviennent des données et des méthodologie mises en œuvre par les SAPs : Après l'exploration et l'analyse des données d'OT et la recherche approfondie des méthodologies employées, les différences détectées proviennent des données et des méthodologies employées par les SAPs. L'hétérogénéité des données est l'un des principaux facteurs des divergences. L'utilisation d'un masque des cultures a montré que la cohérence entre les systèmes étudiés reste très faible malgré qu'ils soient plus similaires entre eux. Les différents tests réalisés avec l'analyse de sensibilité entre FEWS-NET et PAM a permis de mettre en avant les zones aux plus fortes anomalies, qui elles, révèlent des différences marquantes entre les systèmes.

Temporellement, les tendances détectées sont similaires entre les produits : Temporellement, les trois SAPs sont proches de 2010 à 2017. À partir de 2018, FEWS-NET s'écarte fortement des deux autres systèmes avec une détection d'un grand nombre d'anomalies négatives. Temporellement, les systèmes PAM et ASAP sont assez proches que FEWS-NET. La question du choix du seuil est aussi importante pour répondre à cette hypothèse. En effet, si les classes d'anomalies possèdent un seuillage relativement bas, temporellement, les tendances des systèmes sont similaires. Inversement, si un seuillage restrictif est appliqué, les tendances détectées seront très différentes. Pour terminer, les différents graphiques présentés dans l'étude ont pu montrer que les tendances malgré des variations importantes d'un système à l'autre, vont dans le même sens pour les trois SAPs.

Spatialement, le système FEWS-NET diverge des deux autres : En effet, visuellement FEWS-NET est différent de PAM et ASAP. Statistiquement FEWS-NET détecte un nombre important d'anomalies identiques avec ASAP. Le pourcentage maximal de ressemblance entre FEWS-NET et ASAP est de 26% en 2012. L'analyse de sensibilité, a permis de faire remonter une différence spatiale prononcée dans la détection des fortes anomalies entre les systèmes FEWS-NET et PAM. FEWS-NET détecte des anomalies négatives sur la bande guinéenne et PAM détecte des anomalies positives sur la bande sahélienne. Pourtant, les tendances des systèmes FEWS-NET et PAM se sont révélés très proches. De plus, lors de la comparaison avec les bulletins CM4EW le système FEWS-NET s'est avéré ambivalent (éloigné en 2016 et proche en 2017).

L'utilisation du domaine cultivé comme masque des cultures augmente la ressemblance entre les systèmes : l'analyse a révélé que l'utilisation d'un masque favorisait la ressemblance entre les systèmes. L'utilisation d'un masque des cultures peut aider à recentrer l'étude sur les zones de culture ainsi qu'à retirer certaines différences marquantes comme sur le Golfe de Guinée. Cependant, l'utilisation du domaine cultivé ne permet pas d'affirmer à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest que les ressemblances entre les SAPs soient marquantes compte-tenu de la complexité de l'étude.

## Partie 7 : Conclusion

---

Cette expérience professionnelle réalisée à la Maison de la Télédétection de Montpellier, s'inscrit dans le cadre du projet FRESA et avait pour objectif de réaliser une étude comparative des produits d'anomalies de végétation au sein des systèmes de sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest. Pour répondre à cet objectif, nous avons comparé trois systèmes d'alertes précoce (SAP) entre 2010 et 2020 en Afrique de l'Ouest : le Famine Early Warning Network (FEWS-NET) développé par USAID, le Programme Alimentaire Mondial (PAM) développé conjointement par l'ONU et la FAO et le système européen ASAP (Anomaly hot Spots of Agricultural Production) de la Commission Européenne (JRC).

Les résultats de **l'étude comparative des produits d'anomalies de végétation dans les SAPs** en Afrique de l'Ouest sont une première. Ces premiers résultats se sont révélés contre intuitifs durant toutes les étapes d'analyse. Cette analyse permet de mieux prendre en compte de la difficulté réelle que peuvent rencontrer les organismes en charge de la sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest, notamment lors de la confrontation des résultats. Malgré des données en entrée issues toutes du même capteur MODIS, l'analyse comparative a révélé des taux de divergence importants entre les systèmes. Les systèmes FEWS-NET et PAM sont plus proches entre eux spatialement et temporellement au travers de leur indicateur (anomalies NDVI) qu'avec le système européen ASAP, mais dans une certaine limite. L'étude a permis aussi de mettre en avant la diversité des produits d'anomalies NDVI utilisés dans les SAPs, mais elle n'a pas permis d'établir un classement des produits comparés les uns aux autres.

Cette étude a montré qu'une comparaison des indices d'anomalies de végétation est une tâche complexe et que le manque d'information sur la composition elle-même des données (notamment dans les pré-traitements) est pénalisante pour l'identification des sources de divergence. L'étude a aussi révélé plusieurs sources potentielles de différences, notamment au travers de la géométrie des données et sur les méthodologies mises en œuvre dans les SAPs, pour ne citer qu'eux. Pour contraindre spatialement l'analyse, et ainsi être plus précis dans nos conclusions, un masque des cultures a été utilisé. L'utilisation de ce masque des cultures a montré plus de ressemblances dans la détection des anomalies entre les trois SAPs, notamment avec les moyennes des classes d'anomalies positives entre 2010 et 2020 avec 3,59% pour FEWS-NET, 5,25% pour PAM et 3,89% pour ASAP. De plus, nous avons constaté que les tendances annuelles et saisonnières vont dans le même sens selon plusieurs zones d'études. Les histogrammes des fréquences et les graphiques des tendances moyennes d'anomalies semblent être de bonnes représentations. Les études comparatives deux à deux et à trois conjointement ont montré des résultats relativement probants, avec des zones semblables à la fois dans le temps et dans l'espace comme sur la bande sahélienne ou au contraire très dissemblables comme au Sud Niger entre les systèmes FEWS-NET et PAM ou au Sénégal entre les systèmes PAM et ASAP.

D'autres sources ont aussi été explorées et permettent d'apporter des pistes de réflexion sur l'interprétation des produits d'anomalie, comme l'utilisation de données de déforestation pour tenter de comprendre les spots d'anomalies négatives, ou encore l'utilisation des sorties d'un modèle de croissance de plante. Cette dernière analyse n'est pas présentée dans ce rapport, en raison de problèmes liés à la modélisation, mais cela reste une piste intéressante à explorer dans la suite de ce travail.

L'étude a permis de fournir des résultats au projet FRESA, en identifiant des hot-spots de divergences et de convergences au Sénégal, Burkina-Faso, Niger, Nigéria et Bénin principalement. Ces zones ont révélé la présence de similitudes entre les différents SAPs, avec et sans application d'un masque des cultures. Des efforts importants sont nécessaires pour continuer à investiguer dans cet axe de recherche et aussi pour valider l'approche présentée dans cette étude. Ces efforts peuvent être notamment faits dans l'étude de plus petites zones en Afrique de l'Ouest pour tenter d'éliminer la variabilité latitudinale de la zone, avec un Sud humide et un Nord très sec, et les différentes stratégies paysannes y sont associées.

## Bibliographic

ASRAR, G. Q., FUCHS, M., KANEMASU, E. T., et al. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat 1. *Agronomy journal*, 1984, vol. 76, no 2, p. 300-306.

ASNER, Gregory P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote sensing of Environment*, 1998, vol. 64, no 3, p. 234-253.

ATZBERGER, Clement. Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. *Remote sensing*, 2013, vol. 5, no 2, p. 949-981.

BECKER-RESHEF, Inbal, JUSTICE, Chris, SULLIVAN, Mark, et al. Monitoring global croplands with coarse resolution earth observations: The Global Agriculture Monitoring (GLAM) project. *Remote Sensing*, 2010, vol. 2, no 6, p. 1589-1609.

BECKER-RESHEF, Inbal, BARKER, Brian, HUMBER, Michael, et al. The GEOGLAM crop monitor for AMIS: Assessing crop conditions in the context of global markets. *Global Food Security*, 2019, vol. 23, p. 173-181.

BECKER-RESHEF, Inbal, JUSTICE, Christina, BARKER, Brian, et al. Strengthening agricultural decisions in countries at risk of food insecurity: The GEOGLAM Crop Monitor for Early Warning. *Remote Sensing of Environment*, 2020, vol. 237, p. 111553.

BÉGUÉ, Agnès, LEROUX, Louise, SOUMARÉ, Mamy, et al. Remote sensing products and services in support of agricultural public policies in Africa: overview and challenges. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2020, vol. 4, p. 58.

BUCHANAN SMITH, Margaret, DAVIES, Susanna, et al. Famine early warning and response: the missing link. *Intermediate Technology Publications*, 1995.

BROWN, Molly, ANTLE, John, BACKLUND, Peter, et al. Climate change, global food security and the US food system. 2015.

CHEN, Lai-Guo, MAI, Bi-Xian, BI, Xin-Hui, et al. Concentration levels, compositional profiles, and gas-particle partitioning of polybrominated diphenyl ethers in the atmosphere of an urban city in South China. *Environmental science & technology*, 2006, vol. 40, no 4, p. 1190-1196.

EILERS, Paul HC, PESENDORFER, Valentin, et BONIFACIO, Rogerio. Automatic smoothing of remote sensing data. In : 2017 9th International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp). IEEE, 2017. p. 1-3.

ENGLER-STRINGER, Rachel et BERENBAUM, Shawna. Exploring food security with collective kitchens participants in three Canadian cities. *Qualitative Health Research*, 2007, vol. 17, no 1, p. 75-84.

FENSHOLT, Rasmus, RASMUSSEN, Kjeld, NIELSEN, Thomas Theis, et al. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends—Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. *Remote sensing of environment*, 2009, vol. 113, no 9, p. 1886-1898.

FRITZ, Steffen, SEE, Linda, BAYAS, Juan Carlos Laso, et al. A comparison of global agricultural monitoring systems and current gaps. *Agricultural systems*, 2019, vol. 168, p. 258-272.

FUNK, Chris, SHUKLA, Shraddhanand, THIAW, Wassila Mamadou, et al. Recognizing the famine early warning systems network: Over 30 years of drought early warning science advances and partnerships promoting global food security. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, vol. 100, no 6, p. 1011-1027.

FUSILLIER, Jean-Louis. Western Africa: maize or sorghum. 1994.

GARCIA, Damien. Robust smoothing of gridded data in one and higher dimensions with missing values. *Computational statistics & data analysis*, 2010, vol. 54, no 4, p. 1167-1178.

HELMAN, David. Land surface phenology: What do we really “see” from space ?. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 618, p. 665-673.

HOLLINGER, Frank et STAATZ, John M. Agricultural Growth in West Africa. *Market and policy drivers. FAO, African Development Bank, ECOWAS. Pobrano październik*, 2015.

HUETE, Alfredo, DIDAN, Kamel, MIURA, Tomoaki, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 2002, vol. 83, no 1-2, p. 195-213.

IBRAHIM, Yahaya Z., BALZTER, Heiko, KADUK, Jörg, et al. Land degradation assessment using residual trend analysis of GIMMS NDVI3g, soil moisture and rainfall in Sub-Saharan West Africa from 1982 to 2012. *Remote Sensing*, 2015, vol. 7, no 5, p. 5471-5494.

KARNIELI, Arnon, AGAM, Nurit, PINKER, Rachel T., et al. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. *Journal of climate*, 2010, vol. 23, no 3, p. 618-633.

KLISCH, Anja et ATZBERGER, Clement. Operational drought monitoring in Kenya using MODIS NDVI time series. *Remote Sensing*, 2016, vol. 8, no 4, p. 267.

KOGAN, Felix N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in space research*, 1995, vol. 15, no 11, p. 91-100.

MAIMOUNI, S., BANNARI, A., EL-HARTI, A., et al. Potential and limitations of spectral indices to characterize land degradation in semi-arid areas. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2011, vol. 37, no 3, p. 285-301.

MERONI, Michele, FASBENDER, Dominique, BALAGHI, Riad, *et al.* Evaluating NDVI data continuity between SPOT-VEGETATION and PROBA-V missions for operational yield forecasting in North African countries. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, vol. 54, no 2, p. 795-804.

MERONI, Michele, FASBENDER, Dominique, REMBOLD, Felix, *et al.* Near real-time vegetation anomaly detection with MODIS NDVI: Timeliness vs. accuracy and effect of anomaly computation options. *Remote sensing of environment*, 2019, vol. 221, p. 508-521.

NAKALEMBE, Catherine, BECKER-RESHEF, Inbal, BONIFACIO, Rogerio, *et al.* A review of satellite-based global agricultural monitoring systems available for Africa. *Global Food Security*, 2021, vol. 29, p. 100543.

NICHOLSON, S. E. *et* FARRAR, T. J. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. I. NDVI response to rainfall. *Remote sensing of environment*, 1994, vol. 50, no 2, p. 107-120.

OLSEN, Jørgen L., STISEN, Simon, PROUD, Simon R., *et al.* Evaluating EO-based canopy water stress from seasonally detrended NDVI and SIWSI with modeled evapotranspiration in the Senegal River Basin. *Remote Sensing of Environment*, 2015, vol. 159, p. 57-69.

OUÉDRAOGO, M. *et* SINA, S. Conservation des ressources génétiques forestières: Quels rôles pour les Centres de Semences Forestières en Afrique de l'Ouest et du Centre. In : Plant Genetic Resources and Food Security in West and Central Africa. Regional Conference, 26-30 April 2004. *Biodiversity International*, Rome, Italy. 2007. p. 238.

PÉREZ-HOYOS, Ana, REMBOLD, Felix, Kerdiles, Hervé, *et al.* Comparison of global land cover datasets for cropland monitoring. *Remote Sensing*, 2017, vol. 9, no 11, p. 1118.

PETTORELLI, Nathalie, VIK, Jon Olav, MYSTERUD, Atle, *et al.* Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in ecology & evolution*, 2005, vol. 20, no 9, p. 503-510.

RAY, Deepak K., GERBER, James S., MACDONALD, Graham K., *et al.* Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature communications*, 2015, vol. 6, no 1, p. 1-9.

RAYMOND HUNT, JR, E. Relationship between woody biomass and PAR conversion efficiency for estimating net primary production from NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, vol. 15, no 8, p. 1725-1729.

REMBOLD, Felix, Clement ATZBERGER, Igor SAVIN, and Oscar ROJAS, "Using Low Resolution Satellite Imagery for Yield Prediction and Yield Anomaly Detection" *Remote Sensing* 5, 2013, no. 4: 1704-1733.

REMBOLD, Felix, MERONI, Michele, URBANO, Ferdinando, *et al.* Remote sensing time series analysis for crop monitoring with the SPIRITS software: new functionalities and use examples. *Frontiers in Environmental Science*, 2015, vol. 3, p. 46.

- REMBOLD, Felix, MERONI, Michele, URBANO, Ferdinando, et al. ASAP: A new global early warning system to detect anomaly hot spots of agricultural production for food security analysis. *Agricultural systems*, 2019, vol. 168, p. 247-257.
- ROJAS, Oscar. Next Generation Agricultural Stress Index System (ASIS) for Agricultural Drought Monitoring. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, no 5, p. 959.
- ROUSE, John Wilson, HAAS, Rüdiger H., SCHELL, John A., et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA special publication*, 1974, vol. 351, no 1974, p. 309.
- RUIMY, A., SAUGIER, B., et DEDIEU, G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, vol. 99, no D3, p. 5263-5283.
- SCAVIA, Donald, FIELD, John C., BOESCH, Donald F., et al. Climate change impacts on US coastal and marine ecosystems. *Estuaries*, 2002, vol. 25, no 2, p. 149-164.
- SEILER, R. A., KOGAN, F., WEI, Guo, et al. Seasonal and interannual responses of the vegetation and production of crops in Cordoba–Argentina assessed by AVHRR derived vegetation indices. *Advances in Space Research*, 2007, vol. 39, no 1, p. 88-94.
- SWETS, D., REED, Bradley C., ROWLAND, James, et al. A weighted least-squares approach to temporal NDVI smoothing. In : *From image to information: 1999 ASPRS Annual Conference*. 1999.
- THRUPP, Lori Ann, MEGATELI, Nabihah, et al. Critical Links: Food security and the environment in the Greater Horn of Africa. *World Resources Institute*, 1999.
- TONG, Xiaoye, TIAN, Feng, BRANDT, Martin, et al. Trends of land surface phenology derived from passive microwave and optical remote sensing systems and associated drivers across the dry tropics 1992–2012. *Remote Sensing of Environment*, 2019, vol. 232, p. 111307.
- TRAORE, Seydou B., ALI, Abdou, TINNI, Seydou H., et al. AGRHYMET: A drought monitoring and capacity building center in the West Africa Region. *Weather and Climate Extremes*, 2014, vol. 3, p. 22-30.
- TUCKER, Compton J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 1979, vol. 8, no 2, p. 127-150.
- TUCKER, Compton J., TOWNSHEND, John RG, et GOFF, Thomas E. African land-cover classification using satellite data. *Science*, 1985, vol. 227, no 4685, p. 369-375.
- UNGANAI, Leonard S. et KOGAN, Felix N. Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data. *Remote sensing of environment*, 1998, vol. 63, no 3, p. 219-232.
- VAN HOOLST, Roel, EERENS, Herman, HAESSEN, Dominique, et al. FAO's AVHRR-based Agricultural Stress Index System (ASIS) for global drought monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, vol. 37, no 2, p. 418-439.

VERDIN, James, FUNK, Chris, SENAY, Gabriel, et al. Climate science and famine early warning. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, vol. 360, no 1463, p. 2155-2168.

ZHANG, Feng, WU, Bing-fang, LIU, Cheng-lin, et al. A method to extract regional crop growth profile with time series of NDVI data. *Journal of Remote Sensing*, 2004, vol. 8, no 6, p. 515-528.