

Année universitaire : 2024-2025	<b>Mémoire de fin d'études</b>
<b>Mention</b> : Géographie Aménagement Environnement Développement (GAED)	De master de l'université de Rennes 2 et co-accrédité avec l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)
<b>Parcours</b> : Télédétection-Environnement (TELEENVI)	

---

## Suivi des trajectoires et des variations hydro-météorologiques des cycles bleus et verts de l'eau dans la région des Chyulu Hills (Kenya) à partir de produits satellitaires globaux

---

Étudiant : Yaël Barré-Rolland



Soutenu à Rennes le 17 septembre 2025

Devant le jury composé de :

Responsables de Master/ examinateurs : M. FOUAD Youssef, Mme. HUBERT-MOY Laurence,  
Examineurs invités : M. LE MOINE Nicolas et M. DUFOUR Simon  
Maîtres de stage : M. NAVRATIL Oldrich et M. MIALHE François  
Enseignant-référent : M. MARTEAU Baptiste

*Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers*

## Remerciements

Tout d'abord, je remercie tous les membres du projet de la Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires (MITI) *assessment of WAter resources from muon Tomography in the Chyulu Hills* (WATCH). Mon stage était soutenu par ce projet.

Ce stage de fin d'études et la réalisation de ce mémoire affilié n'auraient pas été possibles sans mes deux maîtres de stage, François Mialhe et Oldrich Navratil, à qui j'adresse un immense merci. Ils m'ont permis de progresser dans ma discipline et de me porter vers une perspective profondément transdisciplinaire. Leur disponibilité, leurs conseils avisés, ainsi que leur tact et leur sens de la pédagogie, m'ont beaucoup inspiré et ont favorisé mes progrès tout au long du stage.

Ils m'ont également offert l'opportunité de rencontrer et de présenter mon travail à de nombreux chercheurs mathématiciens, hydroclimatologues, hydrogéologues, climatologues auxquels j'adresse ma profonde gratitude. Je remercie tout particulièrement Hélène Celle et Pierre Nevers qui m'ont accueilli dans leur laboratoire Chrono-Environnement de Besançon. J'ai pu y rencontrer les deux climatologues du laboratoire Biogéosciences de Dijon Benjamin Pohl et Pierre Camberlin qui m'ont accompagné ensuite sur le plan climatologique avec un conseil toujours opportun et des idées stimulantes, je leur exprime ma profonde gratitude.

Mes remerciements vont également aux stagiaires présents pendant ces six mois au laboratoire EVS-IRG du campus Porte des Alpes à Bron. Nous avons su nous soutenir et apprendre mutuellement dans une ambiance agréable. Un grand merci également au personnel, aux doctorants, aux ingénieurs ou chercheurs du laboratoire pour avoir pris le temps de discuter sur le monde de la recherche, ils ont conforté mon orientation professionnelle.

Je souhaite aussi remercier les responsables du Master Télédétection-Environnement Laurence Hubert-Moy et Youssef Fouad ainsi que l'ensemble des enseignants pour ces deux années assurément intéressantes bien qu'exigeantes. Mille mercis à mon tuteur de stage, Baptiste Marteau pour avoir pris le temps de répondre à mes questions et pour m'avoir aidé à donner plus de cohérence à ce mémoire. Le stage était, de prime abord, complexe à valoriser tant les approches étaient diverses et loin des habitudes de notre parcours académique.

Je remercie également mes camarades de promotion avec qui j'ai progressivement appris à maîtriser la télédétection et la programmation dans une atmosphère des plus bienveillantes.

Enfin, je remercie chaleureusement mes proches pour m'avoir accompagné ces derniers mois dans la fin de ces cinq années d'études. Je les remercie pour leur présence, la relecture du mémoire, leurs conseils et leurs idées plus que pertinentes.

## Avant-propos

Ce présent mémoire retrace des étapes du stage affilié. Le stage a été effectué au laboratoire EVS-IRG du campus Porte des Alpes à Bron (Rhône - 69) du 2 février au 1<sup>er</sup> août 2025. C'était un stage de recherche à caractère principalement exploratoire. Les objectifs se sont affinés au cours du stage. Par conséquent, ce mémoire a pour ambition de mettre en cohérence les connaissances acquises au cours du stage, en les organisant autour d'une approche problématisée.

## Résumé

Ce mémoire relate des principales missions effectuées dans le stage qui s'inscrit dans le cadre du projet *assessment of WAter resources from muon Tomography in the Chyulu Hills* (WATCH). Ce projet vise à caractériser le rôle hydrogéologique du massif volcanique des Chyulu Hills (Kenya), considéré comme un château d'eau naturel essentiel pour les écosystèmes et les populations locales. L'étude repose sur l'utilisation de produits satellitaires globaux pour pallier le manque de données *in situ*. L'objectif est d'analyser les variabilités et trajectoires de variables hydro-météorologiques sur le massif mais aussi dans sa région. Un grand nombre de bases de données satellitaires ou géospatiales est combinée afin d'évaluer les processus clés du cycle de l'eau bleue et verte. Une attention toute particulière est portée sur les produits d'estimations de précipitations par satellite, variable fondamentale du cycle. Des séries temporelles et des indices climatiques sont exploités pour identifier les trajectoires historiques, les dates de début et de fin des saisons des pluies, ainsi que les influences des grands événements de télécorrélations atmosphériques sur la climatologie régionale (*El-Nino Southern Oscillation*, *Indian Ocean Dipole*, *Oscillation de Madden-Julian*). L'étude met en évidence la relation entre précipitations, dynamique végétative (eau verte) et écoulements de surface avec un cas d'étude sur la rivière *Kimana* (nord du Kilimandjaro). Les résultats les plus intéressants confirment les tendances observées dans la littérature sur la zone d'étude. La saison des pluies la plus importante pour l'agriculture pluviale en Afrique de l'Est est de plus en plus courte dans la perspective du changement climatique, augurant des impacts forts pour les besoins en eau des locaux et pour les écosystèmes.

## Abstract

This master's thesis reports on the main missions carried out during the internship conducted within the framework of the project *assessment of WAter resources from muon Tomography in the Chyulu Hills* (WATCH). This project aims to characterize the hydrogeological role of the Chyulu Hills volcanic massif (Kenya), considered a natural water tower essential for ecosystems and local populations. The study relies on the use of global satellite products to compensate for the lack of *in situ* data. The objective is to analyze the variability and trajectories of hydro-meteorological variables over the massif as well as in its surrounding region. A large number of satellite or geospatial databases are combined to assess the key processes of the blue and green water cycles. Particular attention is paid to satellite-based precipitation estimates, a fundamental variable of the cycle. Time series and climatic indices are used to identify historical trajectories, the onset and cessation dates of rainy seasons, as well as the influence of major atmospheric teleconnection events on regional climatology (*El Niño Southern Oscillation*, *Indian Ocean Dipole*, *Madden-Julian Oscillation*). The study highlights the relationship between precipitation, vegetative dynamics (green water), and surface runoff with a case study on the *Kimana River* (north of Kilimanjaro). The most significant results confirm trends observed in the literature on the study area. The rainy season most important for rainfed agriculture in East Africa is becoming increasingly shorter in the context of climate change, heralding strong impacts on local water needs and ecosystems.

# Table des matières

<b>Liste des abréviations</b>	<b>6</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 État de l'art</b>	<b>3</b>
2.1 Télédétection du cycle de l'eau . . . . .	3
2.2 Les principales variables satellitaires du cycle de l'eau . . . . .	4
2.2.1 Précipitations . . . . .	4
2.2.2 Évapotranspiration . . . . .	6
2.2.3 Humidité du sol . . . . .	7
2.2.4 Stockage total d'eau . . . . .	7
<b>3 Présentation du terrain d'étude</b>	<b>9</b>
3.1 Les Chyulu Hills : un massif volcanique isolé, lysimètre naturel du Sud du Kenya .	9
3.2 Climat . . . . .	11
3.2.1 Les deux régimes de précipitations . . . . .	11
3.2.2 La télécorrélation atmosphérique au Kenya ou l'influence des grands modes climatiques sur la variabilité interannuelle . . . . .	12
<b>4 Matériel et méthodes</b>	<b>14</b>
4.1 Variabilités des précipitations dans le sud du Kenya . . . . .	14
4.1.1 Matériel : les produits d'estimations de précipitations par satellites . . . . .	14
4.1.2 Détermination des sous-ensembles d'analyses . . . . .	15
4.1.3 Identifier les dates de départs et de fins des saisons des pluies. . . . .	16
4.1.4 Caractériser les évolutions historiques : indices climatiques et télécorrélation atmosphérique . . . . .	18
4.1.5 Étude statistique des tendances à long terme . . . . .	19
4.2 Caractérisation des autres variables du cycle hydrologique . . . . .	20
4.2.1 Cycle de l'eau verte : végétation et évapotranspiration . . . . .	20
4.2.2 Infiltration et recharge . . . . .	21
4.2.3 Cas d'étude : liens entre des variables du cycle de l'eau et des données hydrologiques de terrain : le débit de la <i>Kimana River</i> . . . . .	22
<b>5 Résultats</b>	<b>24</b>
5.1 Variabilités des précipitations dans le sud du Kenya . . . . .	24
5.1.1 Évaluation des produits d'estimations de précipitations par satellite . . . . .	24
5.1.2 Détermination des sous-ensembles d'analyses . . . . .	25
5.1.3 Identifier les dates de départs et de fins des saisons des pluies. . . . .	27
5.1.4 Trajectoires historiques : indices ETCCDI et télécorrélations atmosphériques	28
5.2 Caractérisation des autres variables du cycle hydrologique . . . . .	31
5.2.1 Cycle de l'eau verte : les tendances observées pour les précipitations se retrouvent-elles dans le fonctionnement végétatif? . . . . .	31
5.2.2 Infiltration et recharge . . . . .	32
5.2.3 Cas d'étude : liens entre des variables du cycle de l'eau et des données hydrologiques de terrain : le débit de la <i>Kimana River</i> . . . . .	33
<b>6 Discussion</b>	<b>34</b>

<b>7 Conclusion</b>	<b>36</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>40</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>41</b>
<b>Table des figures</b>	<b>43</b>
<b>Annexes</b>	<b>i</b>
<b>A Diagramme ombrothermique des Chyulu Hills</b>	<b>ii</b>
<b>B Confrontation des produits d'estimation des précipitations par satellite</b>	<b>ii</b>
B.1 Détail des produits d'estimations des précipitations par satellite . . . . .	ii
B.2 Stations utilisées pour la confrontation des produits . . . . .	iv
B.3 Équations des métriques utilisées . . . . .	v
B.4 Algorithme de recherche du régime pluviométrique annuel . . . . .	v
B.5 Sous-ensembles choisis pour l'analyse des précipitations . . . . .	vi
<b>C Autres variables du cycle de l'eau</b>	<b>vii</b>
C.1 Série temporelle du <i>Standardized Precipitation Evaporation Index</i> (SPEI) sur la ferme d'agave . . . . .	vii
C.2 Analyse du transect de la ferme de sisal . . . . .	vii
C.3 Transition des classes d'occupations du sol sur les Chyulu Hills et la plaine de Kibwezi	viii

## Liste des abréviations

**BFAST** *Breaks For Additive Seasonal and Trends*

**CHIRPS** *Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Station data*

**ENSO** *El-Nino Southern Oscillation*

**ET** évapotranspiration

**ETP** évapotranspiration potentielle

**ETR** évapotranspiration réelle

**EVI** *Enhanced Vegetation Index*

**GLEAM** *Global Land Evaporation Amsterdam Model*

**GRACE** *Gravity Recovery And Climate Experiment*

**IOD** *Indian Ocean Dipole*

**LSM** *Land Surface Model*

**MAM** mars, avril, mai

**MSWEP** *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation*

**NDVI** *Normalized Difference Vegetation Index*

**OMJ** Oscillation de Madden-Julian

**OND** octobre, novembre, décembre

**PMCA** Précipitations Moyennes Climatiques dans l'Année

**PMCACRL** Précipitations Moyennes Climatiques dans l'Année Centrées-Réduites-Lissées

**RCD** *Rainfall Cessation Date*

**ROD** *Rainfall Onset Date*

**SMAP** *Soil Moisture Active Passive*

**SMOS** *Soil Moisture and Ocean Salinity*

**SPEI** *Standardized Precipitation Evaporation Index*

**SPI** *Standardized Precipitation Index*

**SRE** *Satellite Rainfall Estimates*

**SST** *Sea Surface Temperature*

**TAMSAT** *Tropical Applications of Meteorology using SATellite*

**TWS** *Terrestrial Water Storage*

**WATCH** *assessment of WAter resources from muon Tomography in the Chyulu Hills*

**ZCIT** Zone de Convergence Inter-Tropicale

# 1 Introduction

L'évolution du cycle de l'eau est un enjeu décisif en Afrique de l'Est, où de nombreux secteurs de l'économie dépendent intensément de la ressource en eau. Par exemple, Mombasa, la deuxième agglomération du Kenya, a été contrainte en 1966 de construire un aqueduc de plus de 200 kilomètres depuis la source de *Mzima Springs* dans le piémont du massif volcanique des Chyulu Hills pour suppléer les quelques puits littoraux qui existaient (Kithiia et Majambo 2020).

Conséquemment, la compréhension à l'échelle locale du cycle de l'eau verte et bleue est essentielle pour assurer la gestion soutenable des besoins en eau. D'autant que, dans le contexte de changement climatique provoqué par les activités humaines, le cycle de l'eau global présente une tendance à l'accélération (Lugato *et al.* 2013). Cette accélération du cycle aggrave les conséquences des sécheresses ou des inondations sur cette région qui connaît une forte pression démographique, mais également sur le réservoir exceptionnel de biodiversité kenyane.

Le cycle de l'eau, ou cycle hydrologique (Horton 1931), définit le mouvement continu de l'eau entre la surface terrestre et l'atmosphère. Sous l'effet de l'énergie solaire, l'eau liquide s'évapore en vapeur d'eau, se condense pour former des nuages et précipite sous forme de pluie ou de neige. Nous pouvons distinguer l'eau bleue et l'eau verte à l'intérieur de ces processus physiques de changement d'état de l'eau. Cette distinction permet notamment de mettre en exergue ce que l'on voit directement – l'eau bleue – au détriment de ce qui relève pourtant du plus important : l'eau verte. Elle est proposée pour la première fois par l'hydrologue suédoise Malin Falkenmark en 1995 et a depuis été adoptée par la communauté scientifique comme la communauté internationale (Falkenmark et Rockström 2006). On les définit comme suit :

- L'eau bleue désigne celle qui transite rapidement dans les cours d'eau, les lacs et les nappes souterraines vers les océans. Elle représente environ 40 % de la masse totale des précipitations, souvent appelées « précipitations efficaces ».
- L'eau verte est celle qui est stockée dans le sol et la biomasse. Elle peut être évaporée par les sols ou absorbée puis transpirée par les plantes. En termes de flux d'eau douce, c'est l'eau la plus importante.

Les activités humaines ont des impacts continuels à tous les niveaux sur le cycle hydrologique. C'est pourquoi on parle également de cycle hydro-social, un concept qui décrit le « système ouvert macroscopique dans lequel l'eau est dérivée depuis, et éventuellement retourne vers, le système naturel du cycle de l'eau » (Lu *et al.* 2016). *A contrario* le cycle de l'eau influence lui aussi les sociétés.

Pour comprendre comment fonctionne du point de vue hydrogéologique le massif volcanique des Chyulu Hills, le projet WATCH vise à comprendre et à caractériser le rôle dynamique des Chyulu Hills en tant que château d'eau naturel, en combinant des mesures muographiques<sup>1</sup> continues sur une année avec des mesures géophysiques, hydrométéorologiques et des enquêtes socio-environnementales. À ce titre, le projet apparaît comme profondément interdisciplinaire. Il bénéficie d'un financement de la MITI du CNRS.

Le stage propose une approche géographique de la problématique du projet. Il se consacre à utiliser des données satellitaires pour contribuer à la compréhension du fonctionnement hydrologique et surtout hydro-météorologique général du massif volcanique des Chyulu Hills. L'hydro-

---

1. Mesures des muons par un télescope à travers les surfaces (ici dômes volcaniques). Les muons sont des particules élémentaires issues des rayons cosmiques primaires.

météorologie est une spécialité de la météorologie qui met l'accent sur la compréhension des phases atmosphériques et terrestres du cycle de l'eau, le plus souvent, par des mesures de télédétection.

La télédétection regroupe, l'ensemble des techniques qui permettent de caractériser à distance des objets de la surface terrestre, à partir des rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis. La télédétection est particulièrement adaptée dans le contexte des Chyulus Hills en raison d'un sensible manque de données issues du terrain. Le nombre restreint de données de terrain représente toutefois un frein pour l'usage des données satellitaires qui, comme nous le verrons, requièrent réciproquement des données *in situ* pour valider la qualité des produits. Pour de nombreuses applications, les observations brutes issues des satellites doivent être convertis vers des produits de plus haut-niveau pour correspondre aux principales applications environnementales, ce sont les produits satellitaires globaux au sens où ils couvrent généralement une emprise à échelle globale. Dans notre travail, l'essentiel des jeux de données utilisés sont de ce type.

Nous en utiliserons une dizaine afin de tester leur pertinence pour répondre à la problématique suivante :

**« Dans quelle mesure les technologies d'observations de la Terre permettent-elles d'analyser les processus, variabilités et trajectoires hydro-météorologiques des Chyulu Hills ? »**

La problématique est déclinée en plusieurs questions associées aux processus suivants :

- **Précipitations** : quels sont les patrons, trajectoires et variabilités des précipitations ?
- **Infiltration et recharge** : Quels sont les évolutions des nappes souterraines ? Quels sont les facteurs susceptibles de les affecter (géologie, couverture du sol) ?
- **Évapotranspiration** : quelles sont les tendances et variabilités spatiales de l'évapotranspiration ? Quels sont les facteurs explicatifs des tendances observées (variables liées à la végétation : couverture du sol, NDVI, données climatiques : précipitations, sols : humidité du sol, type de sol) ?

Nous poursuivrons par un état de l'art sur la télédétection du cycle de l'eau en débutant par les généralités et puis en nous concentrant sur des processus particuliers du cycle. Nous présenterons ensuite la région des Chyulu Hills sous ses facettes sociales et biophysiques liées à la ressource en eau. La section méthodologique indiquera la chaîne de traitement et les jeux de données utilisés pour répondre aux questions. La section résultat présente les éléments les plus intéressants en lien avec les questions posées. Enfin, nous discuterons les limites de notre approche et croiserons les résultats avec ceux de la littérature.



## 2 État de l'art

### 2.1 Télédétection du cycle de l'eau

Les technologies d'observations de la Terre peuvent permettre d'évaluer la résilience du cycle de l'eau terrestre (Lotcheris, Wang-Erlandsson et Rocha 2025). Pour une description précise du cycle de l'eau à l'échelle locale, des observations de terrain de tous les processus inhérents sont nécessaires, mais, si elles existent, il n'est pas forcément possible de les acquérir. Les capteurs de télédétection actifs et passifs à bord des satellites météorologiques ou environnementaux permettent désormais d'obtenir suffisamment de données pour estimer des variables *proxy* du cycle de l'eau depuis l'espace. Le cycle de l'eau ne pouvant pas être observé directement : son estimation repose donc sur le suivi et la comparaison de ces variables *proxy* mesurables par satellite grâce aux capteurs embarqués.

Si ces variables sont choisies en fonction de l'objectif de l'étude, généralement, les articles scientifiques qui s'intéressent au cycle de l'eau mettent l'accent sur les variables perçues comme les plus importantes tels que, les **précipitations**, l'**évapotranspiration (ET)**, le **ruissellement de surface**, l'**humidité du sol**, et les eaux souterraines avec le stockage total d'eau **Terrestrial Water Storage (TWS)** (Cui *et al.* 2018). Ces variables se rapportent au bilan hydrique du cycle de l'eau :

$$R = P - R_s - ETR - \Delta S \quad (1)$$

Avec :

- $R$  la recharge de subsurface
- $P$  les apports en précipitations
- $R_s$  le ruissellement de surface
- $ETR$  l'évapotranspiration réelle
- $\Delta S$  les changements de teneur en eau du sol

L'équation 1 rappelle que si une variable est difficile à calculer, il est toujours possible de l'estimer en connaissant les autres. Par exemple, Sheffield *et al.* 2009 ont estimé  $R_s$  grâce aux autres variables. Par conséquent, ils ont démontré qu'il était possible d'approcher le bilan hydrique terrestre grâce à l'augmentation de l'efficacité des produits de télédétection.

La méthode pour passer de multiples variables – facettes du cycle de l'eau – à une seule estimation du cycle, tient souvent de la comparaison de séries temporelles. Entre autres, Farahmand, Reager et Madani 2021 ont cherché à comprendre les effets des sécheresses à répétition sur le cycle en prenant en considération des sécheresses historiques survenues aux États-Unis. Dans cette optique, ils ont comparé des évolutions mensuelles de précipitations, de déficit de pression de vapeur, de TWS et d'humidités du sol à partir d'une cote  $Z^2$ . Cette étude a mis en exergue les liens entre les variables et l'utilité du déficit de pression de vapeur dans la détection précoce des sécheresses.

Le principal défi concernant la télédétection du cycle de l'eau est la traduction des observations radiométriques spatiales en propriétés physiques pour la quantification complète des composantes du cycle hydrologique et de leurs interactions (Levizzani et Cattani 2019).

En 2014, la revue de littérature « *Remote Sensing of the Terrestrial Water Cycle* » (Lakshmi 2014) explique que la large échelle (*e.g.* continentale ou globale) a longtemps été une contrainte

---

2. Nombre d'écarts-types séparant une donnée de la moyenne dans la distribution d'une variable aléatoire

dans la compréhension du cycle. Cela parce que les systèmes *in situ* ne permettent pas de mesurer l'entière variabilité de la surface. L'avènement des produits satellitaires globaux est en voie de permettre à l'hydrologie de changer d'échelle. Dans un contexte de croissance forte des volumes de données liées à des fréquences d'acquisitions accrues, au plus grand nombre de capteurs mais aussi à des résolutions spatiales plus élevées : les méthodes de l'hydrologie doivent évoluer. Ainsi, les méthodes basées sur du *cloud computing* telles celles insérées dans *Google Earth Engine* deviennent de plus en plus communément employées. Le *Big Data* ne signifie pas pour autant la fin des études locales. Les analyses globales ne suffisent pas à expliquer les variations locales.

De cette manière, comprendre le fonctionnement hydrologique des Chyulu Hills par télédétection nécessite une réduction d'échelle en s'intéressant plus spécifiquement à certaines des variables du cycle de l'eau soit de façon plus approfondie, soit intégrées dans un modèle hydrologique. Cette dernière solution est d'ordinaire choisie pour des approches de télédétection régionale du cycle de l'eau (Passaretti *et al.* 2022). Le facteur limitant de la télédétection locale est essentiellement la résolution temporelle et spatiale des variables satellitaires du cycle (Hoeltgebaum et Dias 2023). D'ailleurs, les quelques recherches ayant porté sur cette échelle d'analyse utilisaient des produits satellitaires globaux relativement bien résolus (*e.g.* MODIS à 500 m pour Abera *et al.* 2017). Les données de terrain pour vérifier la pertinence des produits utilisés sont d'ailleurs quasiment systématiquement utilisées. Cette approche « exploratoire » de l'évolution du cycle de l'eau sur un territoire aussi réduit que les Chyulu Hills (superficie de l'ordre de six fois la taille de Paris) par des produits satellitaires globaux de diverses résolutions est donc innovante en ce sens, d'autant que, dans notre cas, les données de terrain sont peu nombreuses.

## 2.2 Les principales variables satellitaires du cycle de l'eau

Les principales variables qui permettent la télédétection des cycles de l'eau verte et bleue sont discutées ci-après. Relativement à l'équation 1, le ruissellement de surface n'est pas décrit en détail puisque sa télédétection est particulièrement délicate. Pour le retrouver, les méthodes de substitution sont d'avoir recours aux autres variables, à des modèles hydrologiques ou à des modèles de surface terrestre *Land Surface Model* (LSM).

### 2.2.1 Précipitations

Les précipitations sont sans aucun doute les facteurs primaires du cycle hydrologique parce qu'elles représentent l'entrée du système. Pour cette raison, l'analyse à bonne résolution temporelle et spatiale de cette variable est essentielle pour l'intégrer dans des modèles hydrologiques.

Généralement, pour étudier spatialement les patrons et les trajectoires à long terme des précipitations, deux méthodes sont possibles : l'une repose sur des produits issus de modèles de haut niveau spatialement explicites, l'autre sur des mesures stationnaires (pluviomètres).

Toutefois, l'accès aux données des pluviomètres en Afrique de l'Est est souvent difficile ou onéreux en plus du fait que les données ne sont pas forcément justes, complètes ou précises. D'autant que, dans cette région comme ailleurs, le nombre de stations météorologiques opérationnelles a considérablement baissé ces dernières décennies. Ainsi, au Kenya, le réseau de stations nationales utilisé pour la donnée *Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS) v2.0 est passé de 149 en 1981 à 20 en 2023. Il est possible d'expliquer cette baisse par :

1. Le manque de financement ;

2. La perte d'intérêt dans les mesures *in situ* ;
3. Le report vers les produits globaux.

La plupart de ces stations sont d'ailleurs situées dans les principales villes, sur les aéroports, ou le long des principales voies de communication mais très peu dans les régions rurales permettant pourtant d'enregistrer la météorologie des paysages agricoles (Wodebo *et al.* 2025).

Dans la littérature, trois principaux types de produits spatialisés de précipitations sont généralement distingués (Muthoni, Msangi et Kigosi 2023) :

- Seulement basées sur des pluviomètres ;
- Les estimations satellitaires (*Satellite Rainfall Estimates* (SRE)) ;
- Les réanalyses de modèles : obtenus en combinant des estimations de modèles de prévision climatiques avec des observations.

En ce qui concerne les SRE, les capteurs satellitaires qui permettent de les obtenir sont de plus en plus nombreux de sorte que les produits SRE disponibles à échelle quasi globale ou globale sont désormais très variés pour substituer l'absence de pluviomètres. Les algorithmes, les données d'entrée, la profondeur d'enregistrement, comme la résolution spatiale et temporelle évoluent considérablement d'un produit à un autre.

Classiquement, deux techniques permettent d'estimer les précipitations depuis l'espace. Soit les précipitations sont mesurées par le rayonnement micro-ondes émis ou absorbé par les gouttes de pluies ou la glace, soit elles sont estimées par les radiomètres qui mesurent la température de brillance du sommet des nuages froids dans l'infra-rouge thermique. La première technique s'appuie sur des satellites défilants essentiellement à basse résolution temporelle coûteux et techniquement complexes. C'est donc vers la seconde méthode que se porte le plus souvent les SRE puisque les satellites géostationnaires météorologiques ont une bande thermique depuis leurs premiers lancements en 1960. En outre, cela permet d'allonger la profondeur temporelle des SRE.

Le tableau 1 montre une sélection des principaux produits spatialisés de précipitations disponibles en accès libre à une haute résolution temporelle (de 30 min à 24 h) et une résolution spatiale adaptée pour l'étude (de 0.0375° à 1°).

Produit	Source	Rés. spat.	Rés. temp.	Couverture spat.	Période	Réf. et accès
CPC Unified	G	0.25°	24h	Terres	1979 – NP	Chen et al. (2008) <a href="#">URL</a>
CHIRPS V2	SRG	0.05°	24h	Terres (50°S – 50°N)	1981 – NP	Funk et al. (2015) <a href="#">URL</a>
CHIRPS V3	SRG	0.05°	24h	Terres (60°S – 60°N)	1981 – NP	Perterson et al. (2024) <a href="#">URL</a>
CMORPH V1	S	0.07°	30 min	60°S – 60°N	1998 – NP	Xie et al. (2017) <a href="#">URL</a>
ERA-5 Land	R	0.1°	1h	Terres	1950 – NP	Muñoz-Sabater et al. (2021) <a href="#">URL</a>
GPCC-FDD	G	1.0°	24h	Terres	1982 – 2020	Schamm et al. (2014) <a href="#">URL</a>
GPCP-CDR v1.3	SG	1.0°	24h	Global	1996 – NP	Huffman et al. (2017) <a href="#">URL</a>
GPM	SG	0.1°	30 min	60°S – 60°N	2014 – NP	Hou et al. (2014) <a href="#">URL</a>
IMERG V7	SG	0.1°	30 min	Global	2000 – NP	Huffman et al. (2020) <a href="#">URL</a>
MERRA-2	RSG	0.5° × 0.625°	1h	Global	1980 – NP	Gelaro et al. (2017) <a href="#">URL</a>
MSWEP V2.2	SRG	0.1°	3h	Global	1979 – NP	Beck et al. (2017a, 2019) <a href="#">URL</a>
PERSIANN-CDR	SG	0.25°	24h	60°S – 60°N	1983 – NP	Ashouri et al. (2015) <a href="#">URL</a>
TAMSAT v3.1	SG	0.0375°	24h	Afrique	1983 – NP	Maidment et al (2017) <a href="#">URL</a>

TABLEAU 1 – Principaux produits satellitaires de précipitations utiles pour l'étude. Dans « Source », S correspond à un produit satellitaire, R à un produit de réanalyse, et G à un produit issu de mesures au sol (*Ground-based*). Dans « Période », NP signifie « près du présent » (*Near Present*). Tableau adapté de Mankin *et al.* 2025.

Les principales limites des SRE sont d'estimer les précipitations dans les zones qui présentent des fonctionnements météorologiques complexes comme les zones de montagnes, les grands lacs

ou les littoraux. D'après la revue de littérature de Mankin *et al.* 2025, les produits les plus justes sont basés sur des mesures au sol avec une haute densité de stations et sont utilisés sur des terrains peu complexes (*e.g.* en plaine). Ils peuvent gagner en précision localement en étant corrigé par des mesures stationnaires.

### 2.2.2 Évapotranspiration

L'évapotranspiration (ET) est un phénomène physique qui implique le sol, la végétation et l'air dans les conditions météorologiques environnantes. En tant que couplage de l'évaporation (émanant du sol) et de la transpiration (émanant de la végétation); il résulte d'un déficit de pression de vapeur entre le sol et l'atmosphère et entre les stomates des feuilles et l'atmosphère. C'est un facteur essentiel pour comprendre le cycle de l'eau parce qu'il est, avec les précipitations, le marqueur principal du cycle de l'eau verte. On estime qu'approximativement 90 % des précipitations en zone aride retourne dans l'atmosphère par l'ET. La télédétection satellitaire est reconnue comme la seule technologie qui peut être utilisée pour obtenir l'ET à l'échelle globale ou à méso-échelle, en particulier dans les régions avec peu de mesures de terrain (Derardja *et al.* 2024). En Afrique, seules six tours à flux sont accessibles via le réseau global de données micro-météorologiques FLUXNET, dont aucune au Kenya (Weerasinghe *et al.* 2020). Nous comprenons donc aisément le recours aux produits satellitaires. De même que le cycle de l'eau, l'ET ne peut pas être mesurée directement par des technologies satellitaires mais elle peut être dérivée de variables physiques qui peuvent être observées depuis l'espace tels que le flux de chaleur latent, et le flux de chaleur de surface en utilisant le bilan d'énergie terrestre 2 :

$$\begin{aligned} LE &= R_n - H - G, \\ ET &= \frac{LE}{\lambda} \end{aligned} \quad (2)$$

Avec :

- $ET$  l'évapotranspiration
- $LE$  le flux de chaleur latent
- $\lambda$  la chaleur latente de vaporisation de l'eau
- $R_n$  le rayonnement net
- $H$  la densité de flux de chaleur sensible
- $G$  la densité de flux conductif à la surface du sol

Le fait que l'ET dépendent de nombreuses co-variables et qu'elle est très hétérogène dans le temps et dans l'espace rend généralement sa télédétection compliquée.

Pour autant, il existe de nombreuses méthodes pour estimer l'ET par satellite. D'après Chen et Liu 2020 on peut les partitionner en deux catégories :

1. **Les modèles basés sur la température** : ils utilisent la température de surface pour calculer le flux de chaleur sensible et estimer le flux de chaleur latent comme un résidu du bilan énergétique de surface depuis laquelle l'ET est dérivée. Ils utilisent la bande thermique du radiomètre. Ils nécessitent cependant des informations *a priori* tels que  $R_n$  et  $G$ .
2. **Les modèles basés sur la conductivité de surface** : ils utilisent notamment les équations de Penman-Monteith (Penman et Keen 1997 ; Monteith 1965) à partir de la zone du spectre correspond aux ondes courtes du radiomètre. Ce sont les modèles les plus courants et permettent

de mesurer l'évapotranspiration potentielle (ETP) comme l'évapotranspiration réelle (ETR).

En raison de la difficulté à calculer l'ET par télédétection, les produits mettant à disposition à la fois l'ETP et l'ETR ne sont pas nombreux. Le tableau 2 présente trois produits qui peuvent être utilisables selon l'état de l'art avec une relativement haute résolution temporelle et spatiale et une précision reconnue. Ils sont tous les trois basés sur l'équation de Penman-Monteith.

Produit	Source	Rés. spat.	Rés. temp.	Couverture spat.	Période	Réf. et accès
GLEAM v4.2a	LSM	0.56°	24h	Global	1980 – 2024	Miralles et al. (2011) <a href="#">URL</a>
MOD16A2	T	0.0083°	8 jours	Global	2001 – NP	Running et al. (2017) <a href="#">URL</a>
WAPOR Lvl 2	T	0.001°	10 jours	Afrique	2018 – 2023	Gelaro et al. (2017) <a href="#">URL</a>

TABLEAU 2 – Principaux produits satellitaires d'ET utiles pour l'étude. Dans « Source », LSM signifie « *Land Surface Model* » et T « Télédétection ». Dans « Période », NP signifie « près du présent » (*Near Present*).

### 2.2.3 Humidité du sol

L'humidité du sol est la quantité d'eau contenue dans les différents horizons du sol pendant un certain temps. Historiquement, on évaluait les changements d'humidité du sol avec des techniques de télédétection passive comme l'imagerie thermique ou optique (Wang et Qu 2009). Ces dernières années, la veille de l'humidité du sol a été profondément améliorée en raison de l'avènement d'une nouvelle génération de capteurs de télédétection active radar en bande L (15 à 30 cm). C'est actuellement la seule technologie qui permette une mesure directe de l'humidité du sol en s'affranchissant de la rugosité de surface ou de la distribution des éléments dans le sol (Boutin *et al.* 2023). Deux principaux satellites sont disponibles actuellement pour assurer la suivi de l'évolution de l'humidité du sol et utilisent cette technologie. Les produits qui en découlent diffèrent essentiellement dans les algorithmes utilisés (Miernecki *et al.* 2014). Le premier est le satellite *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS) lancé en 2009 par l'*European Spatial Agency* (ESA). Il a une longueur d'onde d'observation de 21 cm et une précision de mesure de l'humidité des sols de 4 %. Sa résolution spatiale est de 25 kilomètres (SMOS L3) et sa résolution temporelle est de trois jours. Plus récemment, le satellite *Soil Moisture Active Passive* (SMAP), lancé en 2015 par la NASA, est conçu pour mesurer la quantité d'eau dans les sols avec une répétitivité de trois jours. Sa résolution spatiale est de 9 km pour l'humidité du sol (SMAP L2\_E). Il est également possible d'avoir recourt à un LSM pour estimer et spatialiser l'humidité du sol comme avec le produit ERA-5 Land ou *Global Land Evaporation Amsterdam Model* (GLEAM) mais la précision de ces produits est généralement moindre (Portal *et al.* 2020). Le tableau 3 résume les principaux produits globaux d'humidité du sol facilement accessibles et utilisables pour l'étude.

Produit	Source	Rés. spat.	Rés. temp.	Couverture spat.	Période	Réf. et accès
ERA-5 Land	LSM	0.1°	1h	Terres	1950 – NP	Muñoz-Sabater et al. (2021) <a href="#">URL</a>
GLEAM v4.2a	LSM	0.56°	24h	Global	1980 – 2024	Miralles et al. (2011) <a href="#">URL</a>
SMAP L2_E	T (active)	0.24°	3 jours	Terres	2015 – NP	Gelaro et al. (2017) <a href="#">URL</a>
SMOS L3	T (active)	0.4°	3 jours	Terres	2009 – NP	Gelaro et al. (2017) <a href="#">URL</a>

TABLEAU 3 – Principaux produits satellitaires d'ET utiles pour l'étude. Dans « Source », LSM signifie « *Land Surface Model* » et T « Télédétection ». Dans « Période », NP signifie « près du présent » (*Near Present*).

### 2.2.4 Stockage total d'eau

Le stockage total d'eau (ou *Terrestrial Water Storage* (TWS)) représente le montant total de l'eau contenue dans les terres. Cela inclut tout type de réservoirs naturels ou artificiels, tels que

les eaux souterraines, l'humidité du sol, les rivières, les lacs, le manteau neigeux, les glaciers, les *inlandsis*, et l'eau contenue dans la biomasse (définition de Humphrey, Rodell et Eicker 2023).

Ce stockage est alimenté par la recharge des eaux souterraines *i.e.* toute l'eau qui augmente son volume. La recharge des nappes souterraines libres est dominée par les apports atmosphériques (précipitations) ou par infiltration des eaux de surface. Les changements mesurés par l'anomalie de TWS peuvent être dûs à l'augmentation des températures par dilatation thermique ou par une baisse du taux de sel mais sont négligeables en conditions normales (Riedel et Weber 2020). On peut également simplifier l'équation 1 en avançant que  $P - ETR$  correspond à la recharge potentielle.

Les méthodes de télédétection qui permettent de suivre le TWS sont souvent basées sur des LSM (*e.g.* GLEAM). Sinon, de même que d'autres variables du cycle de l'eau comme le ruissellement ou l'infiltration, il est possible de le calculer en se basant sur des modèles hydrologiques tel que MODFLOW (Twarakavi, Šimůnek et Seo 2008).

L'étude large échelle du stock d'eau des nappes souterraines est dominé par le produit *Gravity Recovery And Climate Experiment* (GRACE). Humphrey, Rodell et Eicker 2023 ont même écrit dans leur revue de littérature portant sur le TWS satellitaire appliquée à l'hydrologie :

« Depuis le lancement de la première mission GRACE en 2002, les observations satellitaires des changements du TWS ont fourni une perspective globale unique sur les changements naturels ou induits par l'Homme dans les ressources d'eau douce. »<sup>3</sup> (Humphrey, Rodell et Eicker 2023).

Avant 2002, il existait deux manières d'estimer le TWS, soit à partir de l'équation 1, soit à partir de calculs de la somme des réservoirs observées ou modélisées. L'objectif de la mission GRACE est de mesurer les faibles variations du champ gravitationnel terrestre causées par la distribution des masses d'eau sur les terres, l'atmosphère et les océans. Formellement, le montant total de TWS ne peut pas être mesuré par GRACE, en revanche il permet d'obtenir une estimation de l'anomalie de TWS par rapport à la moyenne à long terme. Pour ce qui est du fonctionnement, deux satellites à une altitude de 500 km se suivent éloignés de 220 km. Les deux satellites sont équipés de capteurs pour mesurer la variation de la distance qui les sépare l'un de l'autre avec une précision de  $1 \mu m \cdot s^{-2}$ . Chaque variation du champ gravitationnel terrestre va modifier l'accélération de l'un ou l'autre satellite (donc la distance entre les deux). À l'évidence, avec cette méthode, seuls des changements profonds de la masse terrestre peuvent modifier le champ gravitationnel, donc la résolution spatiale ne peut qu'être grossière (3° soit environ 330 km à l'Équateur pour le produit final).

---

3. Traduit de l'anglais d'après le résumé de Humphrey, Rodell et Eicker 2023



### 3 Présentation du terrain d'étude

#### 3.1 Les Chyulu Hills : un massif volcanique isolé, lysimètre naturel du Sud du Kenya

Les Chyulu Hills est le nom donné à un massif volcanique du Sud du Kenya culminant à 2 188 mètres et d'une longueur d'environ 80 kilomètres sur 5 à 20 kilomètres de large. Il est orienté nord-ouest à sud-est (cf. figure 1). Il est situé administrativement à l'interface des comtés de Makueni et de Kajiado mais également dans le comté du Taita Taveta au sud. Du point de vue topographique, il se trouve dans le piémont nord-est du Kilimandjaro (Tanzanie) sur un socle ancien métamorphique qu'il domine d'environ 1 000 m.

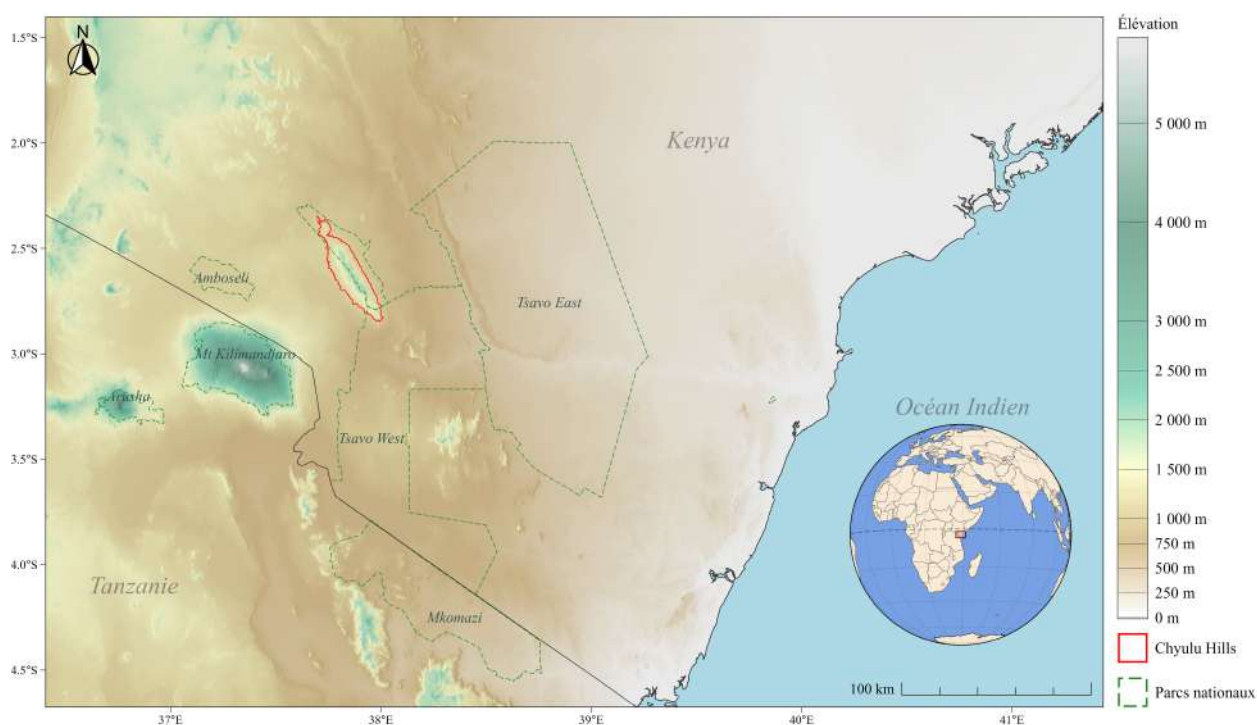


FIGURE 1 – Localisation des Chyulu Hills par rapport au Sud du Kenya. Le trait plein rouge représente le massif volcanique des Chyulu Hills. Les traits pointillés verts représentent les parcs nationaux. L'emprise de la carte correspond au site d'étude discuté en 4.1. Auteur Barré-Rolland Yaël. Sources : *World Database on Protected Areas* (WDPA), et *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) 30 m.

En ce qui concerne la géologie, le massif volcanique de type strombolien, se situe à 100 km à l'est de la Vallée du Grand Rift continental. Il ne serait pas directement lié à la formation du Rift mais son âge et son emplacement suggèrent un lien avec le magmatisme cénozoïque due au Rift (Späth, Le Roex et Opiyo-Akech 2000). Le volcanisme aurait commencé il y a 1,4 million d'années et est encore actif par endroit même si la dernière éruption remonte à 1855. Il compte environ 400 dômes volcaniques, pour la plupart monogéniques. La crête présente des roches volcaniques de type pyroclastites très poreuses, le ruissellement y est sommaire. Les versants sont essentiellement d'anciennes coulées de laves quaternaires basaltiques. Le ruissellement y est plus important.

Généralement, les sources se trouvent à la limite de ces coulées de laves à la jonction avec le socle métamorphique ancien. Elles suivent les paléo-vallées et se retrouvent presque essentiellement

sur le versant est du fait de la topographie sur laquelle repose le massif. Elles ont un débit particulièrement important et ont notamment permis l'accroissement démographique dans la région. D'après Scheumann 2008, la source de *Mzima Springs*, dans le Sud-Sud-Est du massif, apportait en 2008 35 % de la demande en eau potable à la région côtière de Mombasa. Ces sources sont également exploitées pour l'agriculture vivrière, l'élevage, ou les besoins domestiques. Ceci est mis en exergue en figure 2, les zones de cultures ou de bâti ne sont jamais loin des principales sources. Elles sont de véritables oasis pour la biodiversité dans ce milieu semi-aride.

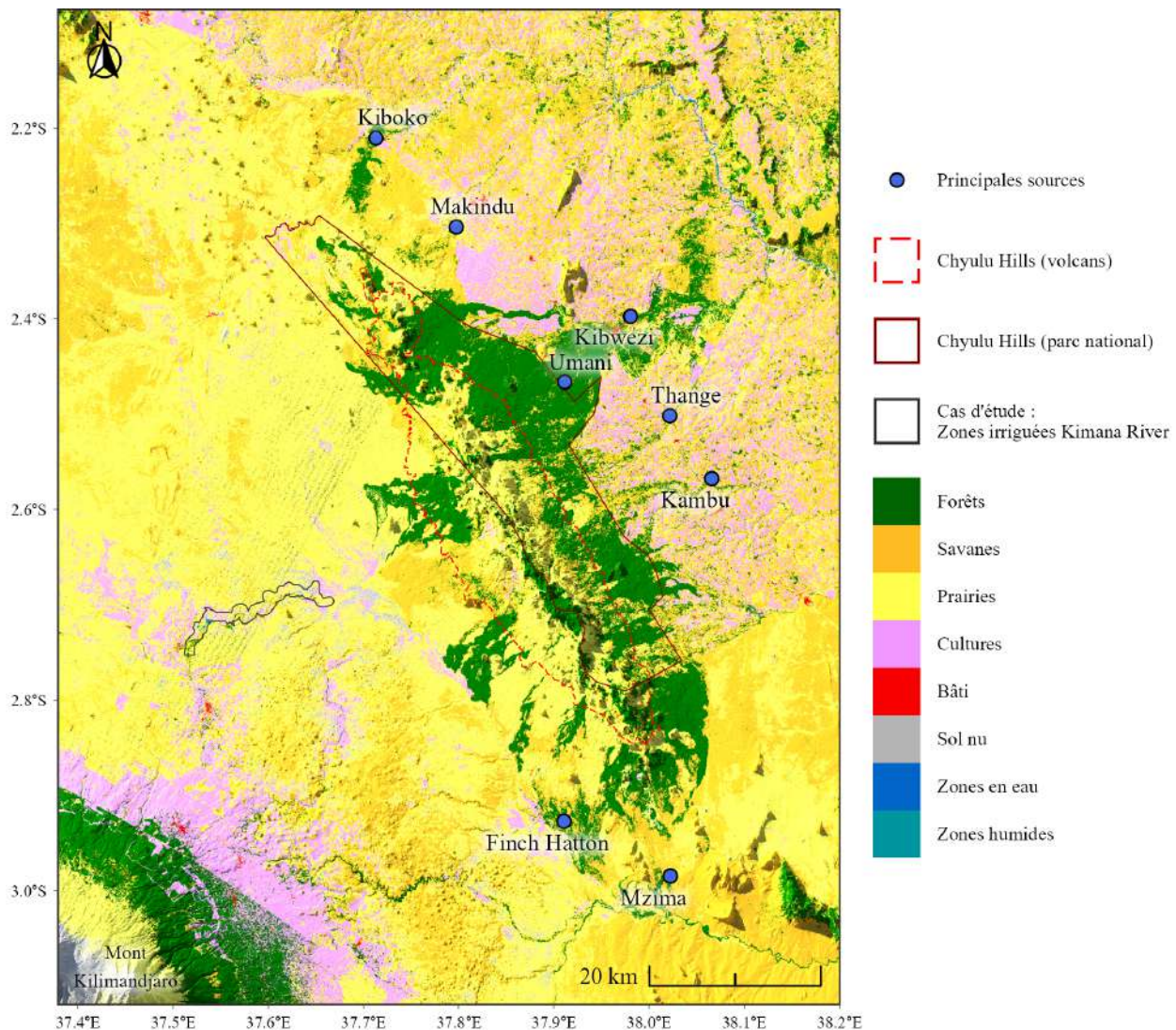


FIGURE 2 – Occupation du sol et massif volcanique des Chyulu Hills (pointillés rouges) avec les principales sources issues du massif. Auteur Barré-Rolland Yaël. Sources : Occupation du sol : *European Space Agency (ESA) World Cover 2021*. Extrusion du relief : *Shuttle Radar Topography Mission (30 m)*.

Le massif est protégé du point de vue environnemental par le parc national éponyme. Il comprend la partie sommitale et le versant est. Le parc national est géré par le *Kenya Wildlife Service*. Ils restreignent les droits d'accès aux seuls usages récréatifs et scientifiques, ce qui est censé permettre la protection de la faune et la flore du massif.

Il connaît pourtant des feux de forêts importants. Jusqu'à un septième de la surface brûle certaines années (dires d'experts : O. Navratil et F. Mialhe). Ils sont provoqués de façon intentionnelle par les éleveurs Maasaï, de façon accidentelle par des braconniers ou de façon naturelle.



## 3.2 Climat

Le Sud du Kenya est généralement une région semi-aride caractérisée par une distribution pas forcément prévisible des précipitations. Pour autant, on distingue deux saisons des pluies principales, en mars, avril, mai (MAM) et en octobre, novembre, décembre (OND). Sur les Chyulu Hills, les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 850 millimètres et sont influencées par l'effet d'abri orographique des montagnes alentours et par le flux venteux qui domine entre les Chyulu Hills et le Kilimandjaro (Nyangena, Onywere et Shisanya 2020). Sur le même massif, la température moyenne annuelle est de 21°C avec un maximum en février et un minimum en juin mais, proche de l'Équateur, l'amplitude thermique annuelle est très faible ( $\sim 2^{\circ}\text{C}$ ) (cf. annexe A). Selon la classification de Köppen-Geiger, le massif est, du bas vers le haut de type :

1. **BSh** pour la plaine, *i.e.* aride et chaud de type steppique
2. **Aw** sur les pentes, *i.e.* tropical de type savane
3. **Cwa** ou **Cwb** pour la partie sommitale supérieure à 1 200 mètres *i.e.* tempérée à hivers secs et étés chauds.

La végétation du piémont est typique d'un milieu semi-aride avec un paysage de *bush*, une sorte de savane arbustive caractérisée par la présence prédominante de buissons, forêts, bois ou broussailles sclérophylles (adaptés aux milieux secs). La crête sommitale des Chyulu, dépassant tout juste les 2 000 mètres d'altitude présente une forêt quasi-tropicale plus dense.

### 3.2.1 Les deux régimes de précipitations

Au-delà des Chyulu Hills, la majorité des pays de l'Afrique de l'Est observe deux régimes de précipitations avec des pics au printemps (MAM) et à l'automne boréaux (OND). Au Kenya, ces pluies sont appelées respectivement *Long Rains* et *Short Rains*.

De façon générale, la migration saisonnière des précipitations en Afrique de l'Est est explicable par le déplacement de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT) en fonction des saisons. Les pluies se déplacent selon un gradient sud-nord quand les continents se réchauffent progressivement dans l'hémisphère nord à mesure de l'augmentation de la durée du jour : c'est la saison longue des pluies. En fin d'année calendaire, c'est l'inverse, le gradient est nord-sud à mesure que la température atmosphérique de l'hémisphère nord se refroidit et que l'hémisphère sud se réchauffe (la saison courte des pluies). Cette explication n'est pas la seule, sinon par exemple, les deux saisons des pluies devraient être aussi longues et devraient avoir des cumuls de précipitations similaires : généralement en Afrique de l'Est les *Long Rains* sont plus pluvieuses.

Cependant, la variabilité interannuelle est très importante, et les conséquences de ces variations le sont tout autant pour l'agriculture, pour l'accès à l'eau domestique, ou encore pour les inondations qui peuvent être catastrophiques dans cette région. Une part importante des activités, notamment agropastorales, est dépendante de ces précipitations. Les *Long Rains* alimentent l'agriculture pluviale et favorisent la sécurité alimentaire souveraine (Palmer *et al.* 2023). C'est également la saison des pluies dont les cumuls de précipitations sont les plus importants en Afrique de l'Est comme le met en évidence la [figure 3](#).

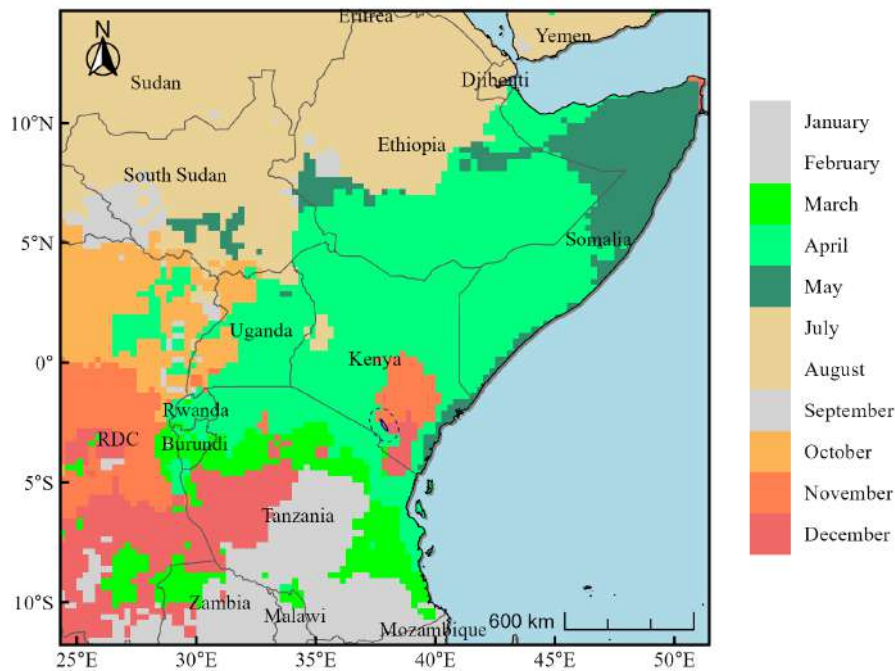


FIGURE 3 – Mois avec les plus importants cumuls de précipitations en Afrique de l'Est selon la donnée de précipitation MSWEP v2.2. Les Chyulu Hills sont mis en évidence par un cercle bleu en pointillé.

### 3.2.2 La télécorrélation atmosphérique au Kenya ou l'influence des grands modes climatiques sur la variabilité interannuelle

La télécorrélation atmosphérique (ou téléconnexion par anglicisme) est un concept météorologique qui consiste à établir des corrélations significatives entre des événements ou des variations climatiques qui surviennent dans des régions souvent éloignées de plusieurs milliers de kilomètres et sans liaison apparente (Wallace et Gutzler 1981).

Trois grandes télécorrélations atmosphériques influencent durablement les précipitations sur la ZCIT de l'Afrique de l'Est :

1. **L'El-Nino Southern Oscillation (ENSO)** : phénomène climatique naturel à grande échelle qui se caractérise par des fluctuations de la *Sea Surface Temperature* (SST) dans le centre et l'est du Pacifique équatorial, ainsi que par des changements dans l'atmosphère sus-jacente. En Afrique de l'Est, il se caractérise généralement par une augmentation des précipitations pour El Niño et par un assèchement pour la Niña.
2. **L'Indian Ocean Dipole (IOD)** : équivalent de l'Océan Indien de l'ENSO. Pendant les périodes d'extrêmes IOD positifs, la SST est anormalement élevée au large de l'Afrique de l'Est, y provoquant notamment d'intenses inondations. Certains IOD sont en concomitance avec l'ENSO suggérant que l'un (ENSO) influencerait l'autre (IOD) mais cette conclusion est loin d'être évidente. D'après Onyutha *et al.* 2022, la variabilité des conditions sèches en d'Afrique de l'Est est principalement due aux phases négatives d'IOD et aux phases de refroidissement de la Niña.
3. **L'Oscillation de Madden-Julian (OMJ)** est une oscillation climatique de fortes précipitations le long de l'Équateur reconnue comme le facteur le plus important de variabilité intra-saisonnière des précipitations sur les tropiques (Madden et Julian 1994). On l'observe surtout dans les océans Indien et Pacifique. Les pluies anormalement fortes se développent d'abord

dans l'ouest de l'Océan Indien et se déplacent vers l'est sur les eaux chaudes du Pacifique ouest et central. Chaque cycle (ou oscillation) dure en moyenne entre 30 et 60 jours.

## 4 Matériel et méthodes

Dans cette partie, nous discuterons des moyens mis en œuvre lors du stage pour répondre à la problématique. En toute rigueur, chacune des variables hydro-météorologiques présentées devraient apparaître ensemble dans les parties. Mais puisque le stage s'est essentiellement concentré sur les précipitations et que les autres variables ont été moins abordées, nous avons choisi de séparer ces variables. Un cas d'étude sur la Kimana River a permis de faire du lien entre elles.

### 4.1 Variabilités des précipitations dans le sud du Kenya

Pour étudier la variabilité, les trajectoires et les patrons des précipitations, le cadre d'analyse correspond à l'emprise de la carte présentée en [figure 1](#). Cette zone d'étude est plus adaptée à la résolution des produits SRE et au fonctionnement climatique général des Chyulu Hills. Elle comprend l'essentiel du littoral kenyan, les hautes terres de Tanzanie dont le mont Kilimandjaro et une zone plus aride à l'est du massif des Chyulu Hills.

#### 4.1.1 Matériel : les produits d'estimations de précipitations par satellites

À partir de l'état de l'art, les produits SRE sélectionnés sont ceux qui présentent la meilleure adéquation par rapport aux pluviomètres en Afrique de l'Est (cf. [tableau 1](#)). Les autres critères sont : la résolution spatiale – supérieure à  $0,1^\circ$  – et temporelle, il fallait au moins des données quotidiennes. Et puisque l'objectif de l'étude est de comprendre les trajectoires à long terme des précipitations, les produits uniquement disponibles après 1990 ont été évincés. Finalement, les produits sélectionnés sont : CHIRPS v2, ERA-5 Land, MSWEP v2.2 et TAMSAT v3.1. Ces produits sont décrits en détails en annexe [B.1](#).

La [figure 4](#) illustre l'immense variabilité spatiale des précipitations sur la zone d'étude en fonction de trois des quatre produits utilisés. Remarquons l'importante différence des précipitations estimées sur les massifs montagneux comme sur le Kilimandjaro ( $\sim 3^\circ\text{S}$  -  $37.3^\circ\text{E}$ ) ou le long du littoral de l'Océan Indien.

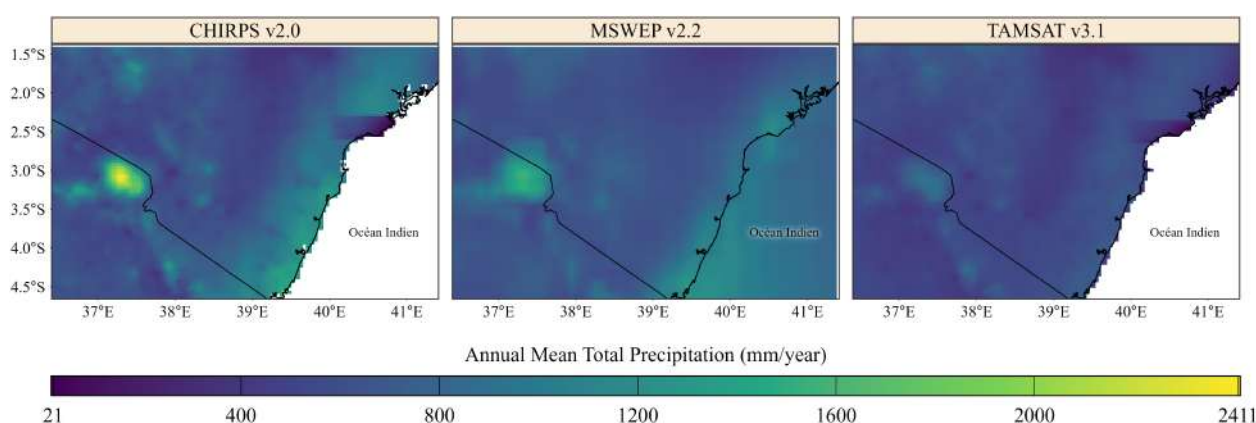


FIGURE 4 – Total des précipitations annuelles moyennes sur la zone d'étude pour les produits : CHIRPS v2, MSWEP v2.2 et TAMSAT v3.1 sur la période 1983–2024. Le trait noir représente la frontière du Kenya (cf. [figure 1](#)).  $1^\circ$  en coordonnées géographiques  $\sim 111$  km.

Afin de vérifier la pertinence des produits sur la zone d'étude, ils ont été confrontés à différents pas de temps avec des observations de terrain détaillées en annexe [B.2](#). Ces données ont été fournies

par le climatologue Camberlin P. du laboratoire Biogéosciences de Dijon. Elles sont au pas de temps quotidien de 1969 – pour la plus ancienne – à 2023, pour la plus récente. La durée d’enregistrement est au minimum de 20 ans sur toutes les stations. Quatre métriques ont été choisies : la *Mean Absolute Error* (MAE), la *Root Mean Square Error* (RMSE), le coefficient de détermination linéaire de Pearson ( $R^2$ ), et l’efficacité de Kling-Gupta (KGE). Ces métriques ont été choisies sur la base de la littérature portant sur la confrontation des SRE. Les équations correspondantes sont en annexe B.3.

#### 4.1.2 Détermination des sous-ensembles d’analyses

Après avoir confronté les différents produits SRE à des pluviomètres, nous avons plus de confiance dans les produits utilisés et la façon dont ils fonctionnent. Nous pouvons désormais analyser les organisations spatiales des précipitations.

Dans la perspective de détecter les patrons spatiaux des précipitations, il est utile d’agréger l’information spatialement sur des « sous-ensembles » (*clusters*) cohérents et homogènes des précipitations. Pour les obtenir, nous nous sommes basés sur les travaux de Moron *et al.* 2025. ces auteurs ont mis en place un partitionnement de données (*clustering*) sur des pluviomètres. L’originalité de notre démarche se distingue dans l’application de leur méthode sur des données SRE spatialisées.

En premier lieu, nous avons ré-échantillonné les quatre produits à la meilleure résolution spatiale disponible ( $0.0375^\circ$  du produit TAMSAT). Pour chaque pixel et chaque produit, nous avons ensuite calculé les précipitations moyennes climatologiques sur l’année calendaire ( $\bar{x}_{1\text{er janv.}}$ ,  $\bar{x}_{2\text{ janv.}}$ , ...,  $\bar{x}_{31\text{ déc.}}$ ), nous les désignerons par le sigle Précipitations Moyennes Climatiques dans l’Année (PMCA). Puis, à la différence de Moron *et al.* 2025 nous avons centré et réduit les séries temporelles de PMCA par pixel afin de s’affranchir des valeurs absolues et ne conserver que la « signature spectrale » des séries. Cela permet également de comparer les produits entre eux. Ensuite, nous avons appliqué un filtre passe-bas de Butterworth circulaire<sup>4</sup> sur les spectres afin de lisser les données. Puis, une fonction orthogonale empirique (EOF)<sup>5</sup> a permis de réduire les dimensions de ces données lissées avant de calculer pour chaque pixel, une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) à  $k = 8$  *clusters*. Ce nombre de *clusters* a été choisi après un grand nombre de tests sur les quatre produits : une méthode du coude et un indice de Davies-Bouldin comme mesure de la qualité du partitionnement de données.

En parallèle, la méthode de classification CAH a été comparée avec la méthode de partitionnement k-moyennes ainsi que la classification non-supervisée à réseau de neurones artificiels *Self-Organizing Map* (SOM). Le partitionnement k-moyennes introduit du hasard et semble peu adapté pour ce type d’application. La classification SOM est moins facilement reproductible. Par ailleurs, l’algorithme de SOM choisit lui-même le nombre de *clusters*  $k$  ce qui pose des problèmes de comparabilité entre les produits. Cela parce que chaque produit, en raison de ses variabilités, avait un nombre optimal de  $k$  *clusters* différents.

Cette chaîne de traitement, retracée en figure 5, a été réalisée en R avec les paquets **signal** (traitement du signal) et **terra** (analyse et traitement raster).

Une fois les sous-ensembles obtenus pour chacun des quatre produits, il convient de choisir laquelle des quatre classifications conserver pour la suite des traitements. Maintenir les quatre classifications aurait démultiplié le nombre de cas possibles et nous aurions perdu la capacité de com-

4. La fin de la série est prise en compte dans le filtre du début de la série. Ici la circularité est de 1/10 des données soit  $\sim 40$  jours.

5. Nom de l’Analyse en Composantes Principales (ACP) pour les applications climatologiques.

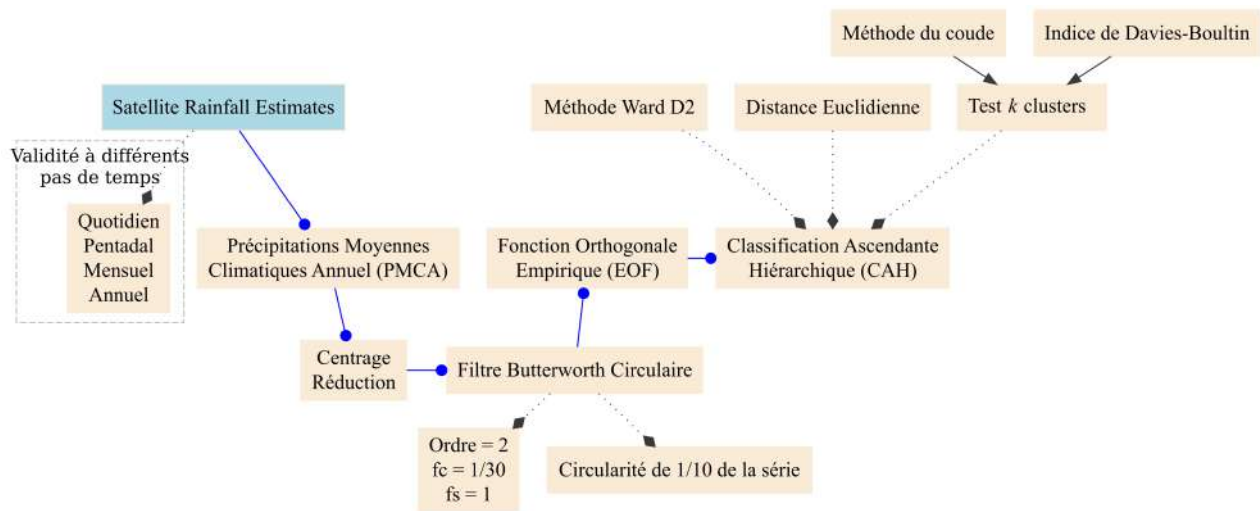


FIGURE 5 – Diagramme de traitement pour identifier les sous-ensembles à partir des *Satellite Rainfall Estimates* (SRE). Les lignes bleues retracent les principaux traitements. Les lignes grises donnent les paramètres et les tests effectués. Réalisation du diagramme en langage de programmation DOT.

parer les produits entre eux selon une base commune. Cette difficulté est une application directe du problème d'agrégation spatiale : il n'existe pas de classification parfaite des précipitations.

Pour pallier cette difficulté, nous nous basons sur le postulat que les erreurs de classification d'un produit peuvent être compensées par les autres produits. Pour une des quatre classifications données, la démarche est la suivante :

1. Pour chaque classe on calcule la moyenne des PMCA Centrées-Réduites-Lissées (PMCACRL). On obtient donc 8 profils temporels moyens, un par classe ;
2. Pour chaque pixel de chaque produit, on calcule sa PMCACRL ;
3. Chaque pixel est assigné à la classe dont le profil temporel moyen minimise la distance euclidienne à sa propre série PMCACRL.

Seize nouvelles classifications sont alors obtenues, quatre par produit. Ces classifications représentent la similarité empirique inter-classes.

Pour un produit sélectionné, il reste à déterminer laquelle des quatre classifications conserver. Pour cela, on compte, pour chaque pixel, combien de fois il a été classifié dans l'une ou l'autre classe dans une ou plusieurs classifications. Cela nous donne une classification floue avec chaque pixel entre 0 – aucune classification n'a attribué la classe  $i$  au pixel  $j$  – et 4 : les 4 classifications ont attribué la classe  $i$  au pixel  $j$ .

#### 4.1.3 Identifier les dates de départs et de fins des saisons des pluies.

Après avoir identifié les sous-ensembles spatiaux, nous avons cherché à caractériser les régimes pluviométriques à travers les saisons des pluies.

Le début et la fin de la saison des pluies sont appelées dans la littérature respectivement la *Rainfall Onset Date* (ROD) et la *Rainfall Cessation Date* (RCD). Ce sont des variables notablement importante pour les populations locales dont les activités d'élevage et d'agriculture sont très dépendantes de la saisonnalité et du volume de précipitations.

Selon Fitzpatrick *et al.* 2015, il existe au moins dix-huit méthodes pour définir les ROD/RCD



mais la méthode qui reste la plus couramment utilisée est celle qui revient à considérer les saisons des pluies comme étant des mois complets (*e.g.* mars, avril, mai (MAM) pour représenter les *Long Rains* en Afrique de l'Est), pourtant, cette méthode n'est pas nécessairement adaptée localement.

Préalablement à la recherche des ROD/RCD, une décomposition de Fourier a été réalisée afin de déterminer les pixels présentant un comportement « unimodal » (à une saison des pluies par an) ou « bimodal » (à deux saisons des pluies par an). Nous avons suivi la méthode décrite par Wang et LinHo 2002. Cette étape permet de mieux appréhender certains comportements spatiaux des ROD/RCD et de faciliter l'interprétation. Par exemple, si on cherche les dates de deux saisons des pluies pour un régime de précipitations unimodal, le résultat est biaisé.

Deux méthodes ont été considérées puis confrontées pour déterminer les ROD et RCD pour les deux saisons des pluies sur la zone d'étude. La première est utilisée par l'*InterGovernmental Authority on Development* (IGAD)<sup>6</sup> et se base sur des seuils (Omay *et al.* 2023). L'autre, est une méthode adaptée de Dunning, Black et Allan 2016. Cette dernière méthode se base sur les anomalies cumulées des précipitations par rapport aux moyennes climatiques. C'est finalement la seconde méthode qui a été retenue et qui sera décrite ci-après. La première était trop sensible aux périodes sèches à l'intérieur des saisons des pluies.

Selon la méthode décrite par Dunning, Black et Allan 2016, en premier lieu, nous calculons pour chaque produit les anomalies de PMCA par rapport à la moyenne long-terme des précipitations. Puis, on calcule le cumul de ces anomalies de PMCA et on les lisse par un filtre moyen de 30 jours circulaire. Ensuite on identifie les *maxima* locaux. Dans la grande majorité des cas, on identifie quatre maxima, deux minimums et deux maximums qui correspondent aux moyennes des dates de départ et de fin des saisons des pluies ds1 (*day start season 1*), ds2 (*day start season 2*), de1 (*day end season 1*), de2 (*day end season 2*). Pour les zones où le régime est unimodal, on ne trouve que deux maxima locaux. Cette première étape est représentée dans la figure 6 sur toute la zone d'étude avec en cercle les ds1 (25 févr.), ds2 (25 oct.), de1 (9 mai), de2 (6 janv.) identifiés.

---

6. Organisme de l'Afrique de l'Est regroupant neuf pays, il vise à soutenir le développement soutenable, la résilience et la stabilité dans la région.

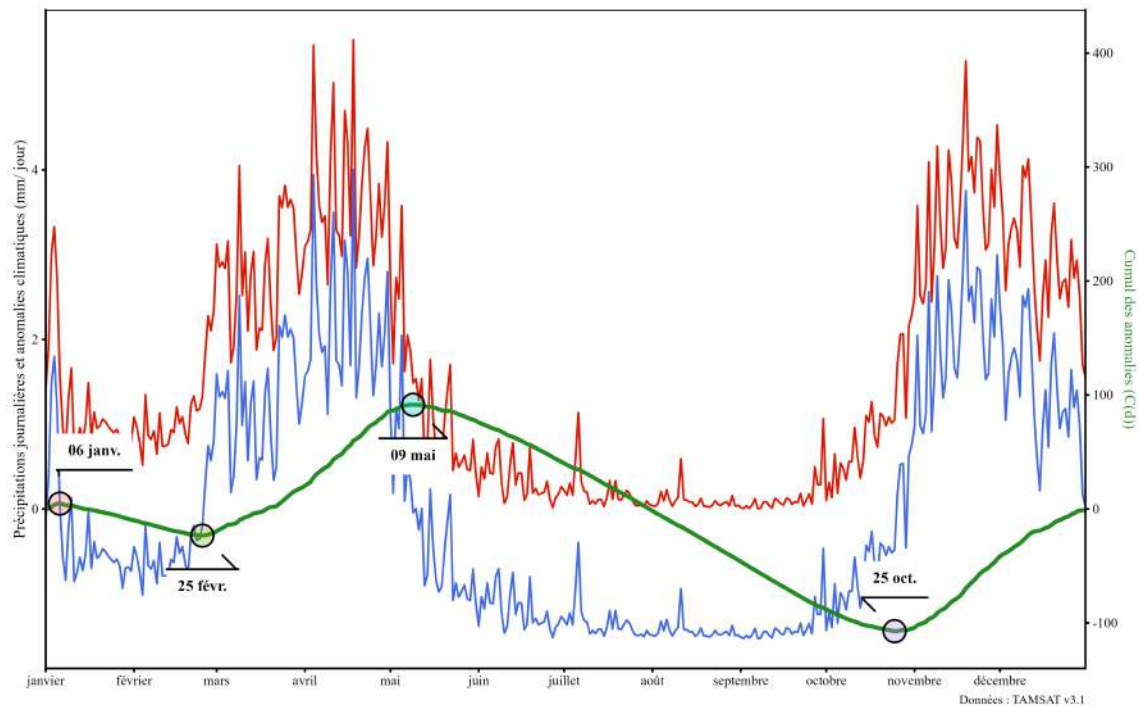


FIGURE 6 – Normales climatologiques des dates de début et de fin des saisons des pluies moyennées sur la zone d'étude. Courbe rouge : Précipitations Moyennes Climatiques dans l'Année (PMCA). Courbe bleue : anomalies de la moyenne climatique des jours juliens par rapport à la moyenne long-terme des précipitations. Courbe verte : cumul lissé des anomalies. En cercle, *maxima* locaux identifiés. Source : donnée TAMSAT v3.1. Figure adaptée de Dunning, Black et Allan 2016.

Ensuite pour chaque pixel et pour une année :

1. Récupération des dates  $ds1/de1$ ,  $ds2/de2$ , puis soustraction de 20 jours à  $de1/de2$ , et addition de 20 jours à  $ds1/de2$ , du pixel correspondant,
2. Calcul de anomalie de PMCA lissée dans cet intervalle,
3. Récupérations des minimums/maximums de la série temporelle du pixel, respectivement classés en ROD/RCD,
4. Classification de la saison pour rendre le raster homogène (*e.g* si un pixel  $i$  de  $ds1$  vaut « 25 févr. » et que son pixel voisin  $j$  vaut « 25 oct. » alors le pixel  $i$  est reclassifié en  $ds2$  et réciproquement le pixel  $i$  auparavant en  $ds2$  est classé en  $ds1$ ).

En sortie des algorithmes, nous aurons donc pour chaque produit et chaque année les ROD/RCD pour les *Long Rains* et *Short Rains*. Souvent, les *Short Rains* se terminent après la fin de l'année calendaire (*e.g.* le 15 janv.) les RCD sont donc classés à l'année  $n + 1$ . Pour faire face à ce problème, les jours juliens sont utilisés et continuent après 366 jours.

#### 4.1.4 Caractériser les évolutions historiques : indices climatiques et télécorrélation atmosphérique

Tous les indicateurs présentés ci-après ont été comparés entre les ROD/RCD des deux saisons des pluies. Pour chacun des 8 sous-ensembles définis en sous-sous-section 4.1.2 les valeurs de ces indicateurs par pixels sont agrégés par la moyenne.



**Indices ETCCDI.** Il existe une grande variété d'indices qui permettent de caractériser les précipitations et de permettre une comparabilité entre les régions du globe. Le Groupe d'experts sur la détection et les indices du changement climatique (ETCCDI) a défini au début des années 2000 vingt-sept indices qui permettent la détection d'extrêmes climatiques. Tous les indices sont statistiquement robustes, faciles à comprendre, valides à l'échelle mondiale et ils permettent la comparaisons entre des données modélisées et des données observées. Ils sont applicables à de nombreuses échelles temporelles, même s'ils sont définis originellement pour le pas de temps annuel. Pour cette étude, nous avons utilisé les indices présentés en [tableau 4](#).

Identifiant	Définition	Unité
RX1Day	Maximum annuel de précipitation sur 1 jour	mm
RX5Day	Maximum annuel de précipitation sur 5 jours glissants	mm
SDII	Simple Daily Intensity Index : Total annuel des précipitations divisé par le nombre de jours humides ( $RR \geq 1$ mm)	mm·jour <sup>-1</sup>
R20		jour
CDD	Nombre maximum annuel de jours consécutifs avec $RR < 1$ mm	jour
CWD	Nombre maximum annuel de jours consécutifs avec $RR \geq 1$ mm	jour

TABLEAU 4 – Indicateurs climatiques de précipitations selon l'ETCCDI. « RR » sont les précipitations par jour et « P » le cumul des précipitations.

Ces indices ont été comparés selon une cote  $Z$  définie par :

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3)$$

Avec :  $Z$  la cote  $Z$ ,  $x$  la valeur observée,  $\mu$  la moyenne de l'échantillon et  $\sigma$  l'écart-type de l'échantillon.

#### Indices de télécorrélations atmosphériques.

- Pour l'ENSO : Niño SST 3.4 fourni par la NASA,
- Pour l'IOD : IOD *index* fourni par la NASA,
- Pour la MJO : indice RMM (Wheeler et Hendon 2004) du *Bureau of Meteorology* australien.

#### 4.1.5 Étude statistique des tendances à long terme

Dans l'intervalle entre les dates de saisons des pluies calculées sur les sous-ensembles, nous avons pu appliquer un ensemble de tests statistiques.

Pour commencer, des tests de tendances ont permis de vérifier à l'échelle locale les tendances observées dans la littérature à partir de tests de Mann-Kendall et des pentes de changements statistiquement significatifs des précipitations par sous-ensembles. Le test de Mann-Kendall vise à déterminer l'existence et la significativité d'une tendance globale ou linéaire sur une série. L'idée est de mesurer la corrélation qu'une série a avec le temps en fonction du signe des corrélations linéaires de chaque observation prises deux à deux.

À partir de la théorie des valeurs extrêmes et de son application par la loi de Gumbel, nous avons pu mettre en évidence des saisons des pluies particulièrement pluvieuses au regard de la normale climatologique. Il a même été possible de les cartographier en fonction des saisons des pluies.

Enfin, nous avons également pu mettre en application des tests de ruptures structurelles de séries temporelles : le test de Chow et des analyses de changements dans la variance. Le test de Chow est

utilisé pour tester si les coefficients de régression sont différents sur plusieurs sections d'une série temporelle.

## 4.2 Caractérisation des autres variables du cycle hydrologique

Pour les autres variables du cycle de l'eau, nous nous sommes davantage portés vers une démarche empirico-déductive. Les cadres d'analyses sont centrés autour des Chyulu Hills mais des cas d'étude ont été appliqués sur des zones plus intéressantes du point de vue biophysiques. Nous nous sommes concentrés sur l'aval de la station hydrométrique de Kimana dans le piémont nord du Kilimandjaro et également dans une ferme de culture de sisal à l'est des Chyulu Hill.

### 4.2.1 Cycle de l'eau verte : végétation et évapotranspiration

**Matériel.** Pour suivre les caractéristiques à long terme de la végétation, nous avons utilisé les données du radiomètre MODIS acquises par le satellite Terra. D'autres radiomètres à meilleures résolutions spatiales étaient disponibles (*e.g.* Landsat, Sentinel-2, VIIRS, ...) mais pas avec la profondeur temporelle et la répétitivité de MODIS.

Le produit de haut-niveau MOD09Q1G (250 m) issu de MODIS permet d'obtenir les indices de végétation *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Rouse *et al.* 1974) et *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (Huete *et al.* 2002). Le premier est un indice qui décrit entre 0 et 1 l'état de santé/biomasse/croissance de la végétation. Il est calculé à partir du ratio normalisé des bandes proches infra-rouges (PIR) et rouge (R) de MODIS :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R} \quad (4)$$

Cependant, il sature quand la végétation est dense et est dépendant des effets du sol ou de l'atmosphère. C'est pourquoi nous avons également utilisé le deuxième indice normalisé EVI. Il est moins homogène et facile à obtenir que le premier, mais il est moins dépendant des effets du sol et de l'atmosphère. Cet indice utilise également les bandes vertes (V) et bleues (B) du radiomètre. Il est défini par la formule :

$$EVI = V \times \frac{PIR - R}{PIR + 6 \times R - 7.5 \times B + 1} \quad (5)$$

Ces deux indices sont accessibles depuis 2000 jusqu'à nos jours tous les huit jours avec un comblement des valeurs temporelles en cas de manques de données ou de nuages constants (produit dit « *Gap-Filled* »).

Le problème des nuages est récurrent quand on utilise ces indices de végétation, en particulier dans les zones tropicales. Nous avons testé le filtre de Savitzky-Golay (Cao *et al.* 2018) sur les données pour évaluer le gain de performance. Au regard de nos besoins, les corrections apportées par la bande de qualité du produit MOD09Q1G a suffi à discriminer les nuages avec une bonne performance. Comme nous avons analysé des séries temporelles agrégées sur des polygones assez étendus, nous n'avons donc pas besoin de lisser les indices de végétations temporellement, d'autant que la zone étudiée est en milieu semi-aride, les nuages ne sont donc pas toute l'année un problème.

Le téléchargement et le pré-traitement des données ont été réalisés en R via les paquets [luna](#) et [terra](#).

Pour ce qui est des données d'ET, nous avons fait plusieurs tests entre les données d'ETP et d'ETR via le produit MOD16A2 et le produit de LSM GLEAM. En l'absence de données de terrain, nous avons utilisé les deux produits à chaque utilisation.

L'objectif était d'identifier les changements majeurs dans le fonctionnement végétatif, mais surtout de démontrer le potentiel des produits satellitaires globaux pour la compréhension du cycle de l'eau verte. Si l'intérêt de la télédétection pour la surveillance des cultures n'est plus à démontrer, nous avons néanmoins mené une analyse exploratoire sur un transect situé dans une ferme de sisal retracé en [figure 7](#). Ce cas d'étude servira de lien entre les résultats obtenus à partir des autres variables.

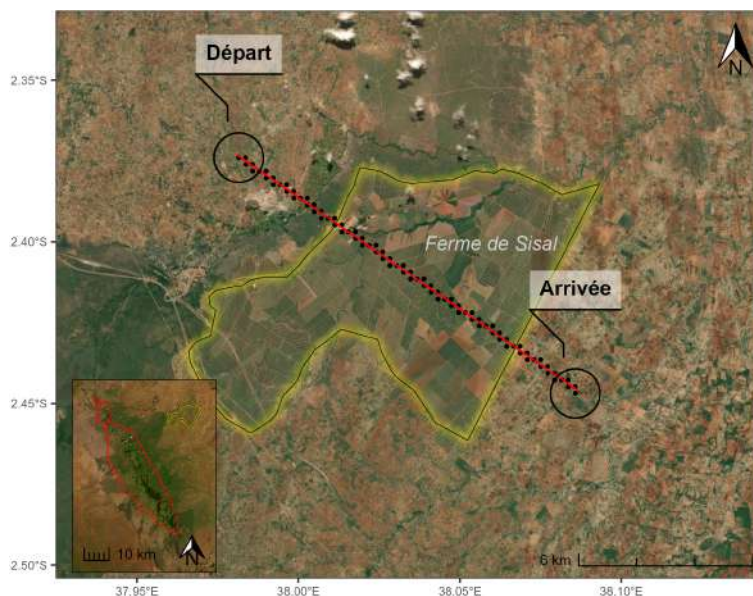


FIGURE 7 – Ferme d'agaves dans la plaine de Kibwezi. Le transect étudié est représenté en rouge. Les points extraits des indices NDVI et EVI MODIS apparaissent en noir. Fond de carte : Esri World Imagery.

**Méthodes.** Pour la surveillance long-terme des cultures, nous avons analysé les anomalies de NDVI/EVI par rapport à la normale mais également les points de ruptures structurelles. Pour ce point, nous avons utilisé l'algorithme *Breaks For Additive Seasonal and Trends* (BFAST) disponible sur le paquet R [bfast](#). Cet algorithme permet de démêler les interrelations des variations basse fréquence (long-terme ou saisonnière), haute fréquence (bruit) et les changements structuraux des signaux NDVI issus d'imageries satellitaires. Son principal avantage est de s'affranchir des effets de seuil et de caractériser la saisonnalité long-terme (Verbesselt *et al.* 2010). Cela nous permettra d'identifier par exemple si les *Long Rains* ou les *Short Rains* ont plus d'impacts sur le développement végétatif de la plaine agricole de Kibwezi.

Pour interpréter les résultats issus du BFAST et les caractéristiques de la végétation sur la zone d'étude, nous avons utilisé entre autres la série temporelle du SPEI. C'est un indice de sécheresse, dérivé de l'indice *Standardized Precipitation Index* (SPI) qui permet de rendre compte des anomalies de précipitations en tenant compte de l'ET. Ainsi, à l'inverse du SPI, le SPEI capture les principaux impacts de l'augmentation de la température de l'air de surface sur la demande en eau des plantes.

#### 4.2.2 Infiltration et recharge

**Matériel** Pour représenter l'infiltration et la recharge, nous avons utilisé les données d'ET, de précipitations et de gravimétrie spatiale GRACE pour estimer la TWS. Par ailleurs, nous avons également cherché à identifier des changements récents d'occupations du sol. Cela a permis de d'identifier les zones où le potentiel d'infiltration a été modifié ces dernières années. Pour cela nous

avons utilisé le produit GLCFCS30D. Il est obtenu à partir d'images de la constellation Landsat disponible tous les 5 ans de 1985 à 2000 et tous les ans de 2000 à 2022 (Zhang *et al.* 2024) à partir de technique de *Cloud Computing*.

**Méthodes** Les données GRACE brutes sont transformées en produits de plus haut niveau par un grand nombre d'algorithmes. Après une revue de littérature et une comparaison des différents produits de haut niveau, nous avons choisi d'approfondir le produit JPL GRACE-Tellus. Le produit a une résolution spatiale de 330 km. Chaque pixel est appelé « *mascons* » pour *Mass Concentration Blocks*. Cette résolution très grossière implique de comprendre la composition de chaque *mascon*. Nous avons donc comparé les séries temporelles de différents *mascons* limitrophes avec les classes d'occupation du sol de l'ESA *World Cover* 2021 associés. De même, nous avons comparé les *mascons* à d'autres séries temporelles comme celles des précipitations que nous supposons corrélées. Pour mieux interpréter les données, nous avons comparé les séries temporelles avec des jeux de données représentant les grandes nappes aquifères du monde comme le jeu de donnée [Whymap](#).

Pour ce qui est des changements récents de l'occupation du sol, variable *proxy* du potentiel d'infiltration, nous avons mis en graphique les changements autour des Chyulu Hills par des tableaux et un diagramme de Sankey.

#### 4.2.3 Cas d'étude : liens entre des variables du cycle de l'eau et des données hydrologiques de terrain : le débit de la *Kimana River*

En fin de stage, nous avons comparé plusieurs variables du cycle de l'eau sur le cas d'étude de la Kimana River en lien avec des travaux précédents menés par O. Navratil. C'est une rivière au bassin aréïque qui prend ses sources dans la forêt tropicale humide du nord du Mont Kilimandjaro. Elle traverse ensuite une zone semi-aride de quelques dizaines de kilomètres avant de s'étaler en une vaste zone humide aréïque à l'est des Chyulu Hills. Cette zone humide est utilisée par des éleveurs Maasaï comme une irrigation au moyen de canaux. Ce cas est intéressant puisqu'il représente bien le système hydrologique que l'on peut rencontrer autour des Chyulu Hills en climat semi-aride dans un contexte géologique et pluviométrique similaire.

Nous disposons de quelques données de débit de la *Kimana River* en amont de la zone irriguée (cf. [figure 8](#)). Les données mensuelles de débit s'étalaient d'août 2019 à février 2020. Nous avons augmenté la série temporelle à l'aide du modèle hydrologique produit par l'INRAE : le modèle du génie rural à deux paramètres au pas de temps mensuel GR2M. Ce modèle prend en entrée :

- des données de débits observés
- la capacité du réservoir de production (mm)
- le coefficient d'échange souterrain (mm)
- des données mensuelles d'ETP
- des données mensuelles de précipitations

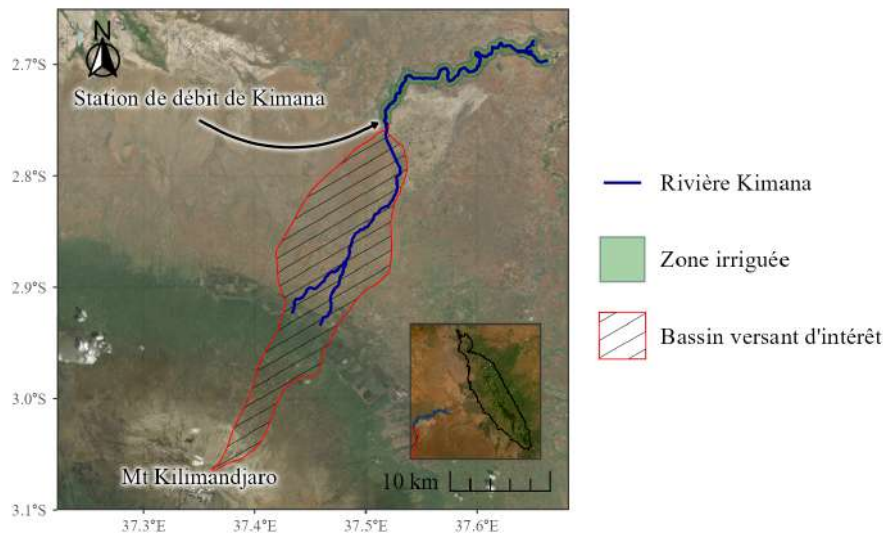


FIGURE 8 – Situation de la zone irriguée de la Kimana River par rapport à son bassin versant. Le carton de localisation représente le massif des Chyulu Hills en noir. Fond de carte : Esri World Imagery.

Lors des travaux précédents, la paramétrisation du modèle avaient été faite sur une macro Excel. Lors de ce stage, nous avons reproduit le modèle GR2M en langage R grâce au paquet [airGR](#). Cela a permis d'ajouter une dimension plus reproductible et de tester plus facilement les différents paramètres et données d'entrées.

L'objectif de ce cas d'étude était d'identifier si la zone irriguée de la station présentait une valeur de NDVI mensuelle moyenne corrélée aux débits ou si un décalage de quelques mois était observé, en fonction des saisons des pluies par exemple. De la même façon, nous avons comparé ces valeurs de NDVI mensuelles moyennes issues de MODIS aux séries temporelles de précipitations pour différents produits ainsi qu'avec des données de recharges de ruissellement et de recharge de sub-surface issues d'ERA-5 Land.

Pour vectoriser les cultures irriguées, nous sommes partis du vecteur de la *Kimana River* acquis via la carte ouverte et collaborative **OpenStreetMap**. Puis, dans la mesure où il manquait une partie non-négligeable de la rivière sur sa partie aval, nous l'avons complété par photo-interprétation sur des images à la fois issues de Google Satellite (Airbus) et d'Esri Imagery. Nous avons ensuite fait un tampon de 500 mètres autour de la rivière.



## 5 Résultats

### 5.1 Variabilités des précipitations dans le sud du Kenya

#### 5.1.1 Évaluation des produits d'estimations de précipitations par satellite

L'évaluation des produits SRE a permis de mettre en évidence la prééminence manifeste des produits MSWEP v2.2 et TAMSAT v3.1 pour le pas de temps quotidien sur presque toutes les stations étudiées. Ceci est montré en [figure 9](#) pour la métrique du  $R^2$ . Dans le détail, le produit TAMSAT serait un peu plus performant pour les zones les plus arides. MSWEP domine sur toutes les autres régions et en particulier les zones plus arrosées. Aux pas de temps plus longs, le produit CHIRPS prend progressivement de l'importance et devient le meilleur produit généralement à l'échelle mensuelle. Concernant le produit ERA-5 Land, sa performance est généralement mauvaise sur toutes les stations. Il dépasse tout juste les autres produits sur la seule station de Voi à l'échelle annuelle ( $R^2 \approx 0.5$ ). Nous conserverons néanmoins les quatre produits. Même si ERA-5 Land semble moins bon, cela ne permet pas d'affirmer qu'il est effectivement moins juste que les autres. Il faudrait pour cela faire une analyse plus approfondie avec un plus grand nombre de pluviomètres et une plus importante profondeur temporelle, ce qui n'a pas été possible avec les données acquises. Ces évaluations des SRE ont été cruciales pour interpréter les résultats.

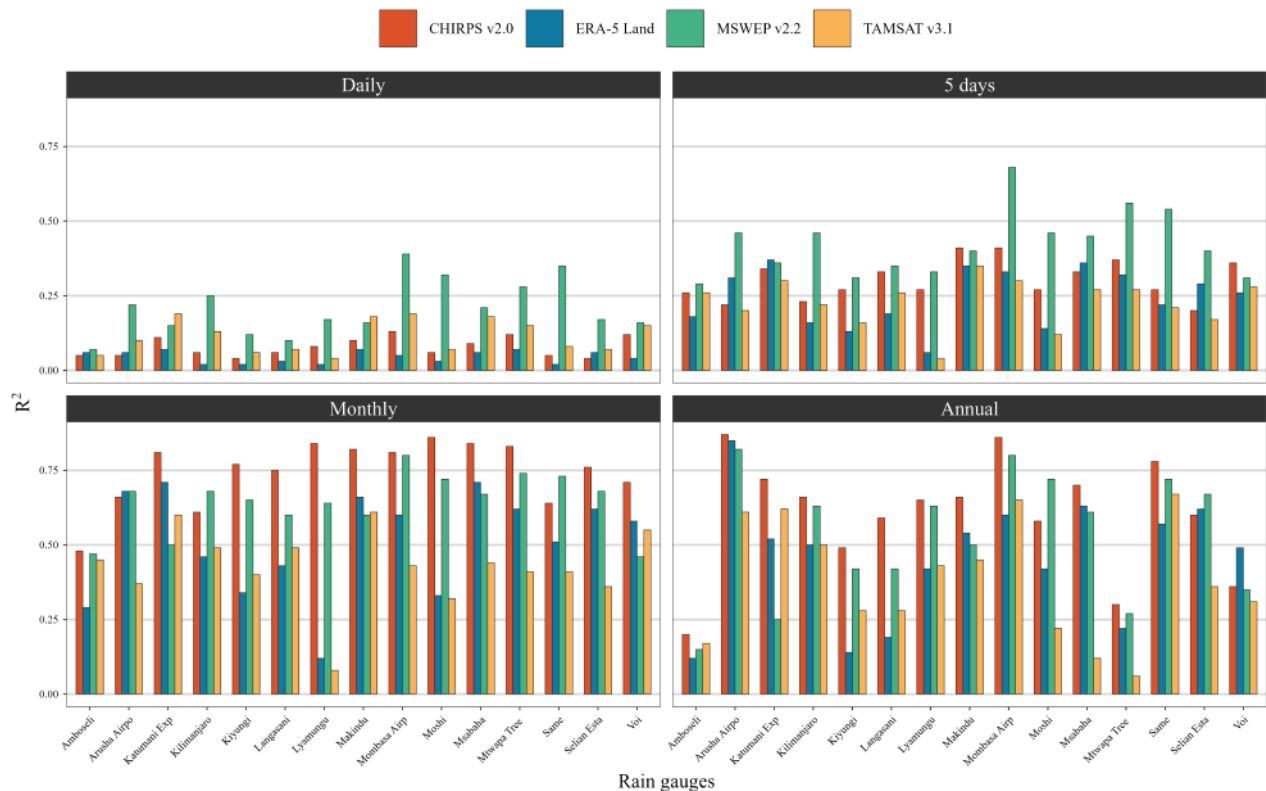


FIGURE 9 – Schéma de synthèse représentant le coefficient de détermination linéaire de Pearson ( $R^2$ ) à différents échelles temporelles sur 15 stations de la zone d'étude. *Rain gauges* signifie : « pluviomètres ». *Daily* : « quotidien », *5 days* : « 5 jours », *monthly* : « mensuel » et *annual* : « annuel ».

### 5.1.2 Détermination des sous-ensembles d'analyses

À partir de la méthodologie suivie, nous avons obtenu une classification floue par produit. La [figure 10](#) représente ces classifications floues si au moins 2 ([figure 10 1](#)) et 3 ([figure 10 2](#)) produits sont représentés par pixel.

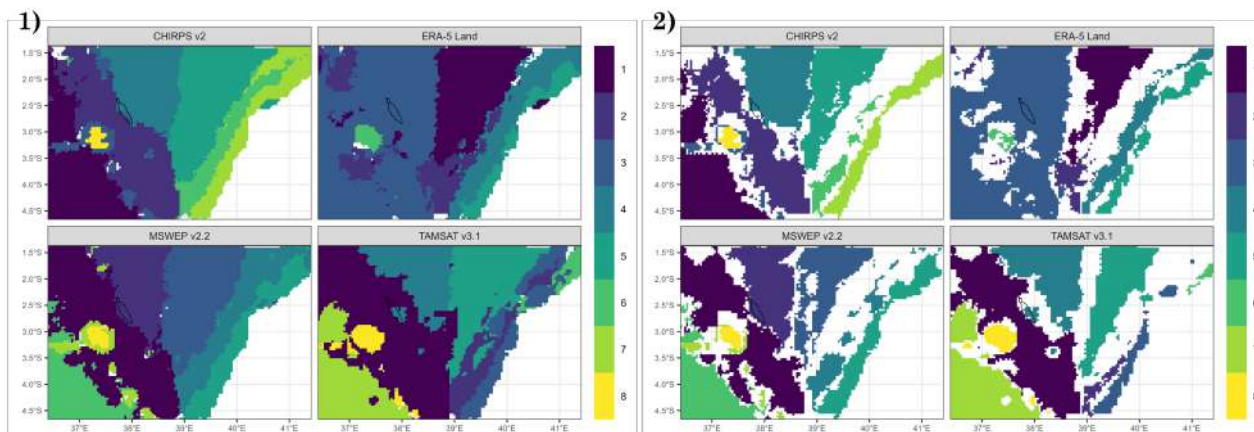


FIGURE 10 – Sous-ensembles obtenus par produits si : 1) au moins 2 produits sont représentés par pixel ; et si : 2) au moins 3 produits sont représentés par pixel. Pour situer, les Chyulu Hills sont représentés par un trait plein noir. Les couleurs ne correspondent pas entre les produits.

Sur cette figure, remarquons les trois produits qui ont des patrons spatiaux similaires : CHIRPS, TAMSAT et MSWEP. ERA-5 Land a un fonctionnement tout à fait différent. Il est donc probable que CHIRPS, TAMSAT et MSWEP représentent mieux la réalité de l'organisation spatiale des précipitations. Sur la [figure 10 2](#), on peut noter que les zones blanches (*i.e.* moins de trois produits s'accordaient dans la discrimination du pixel) se trouvent généralement aux intersections des classes. Cela nous permet de discriminer les zones dont la classification est plus certaine des pixels incertains.

Puisque le produit TAMSAT a la meilleure résolution de départ, on conserve sa classification, nous l'utilisons pour agréger les résultats obtenus dans les sections suivantes relatives aux précipitations. Le choix aurait pu se porter sur la classification de CHIRPS ou de MSWEP mais les résultats n'auraient pas véritablement été modifiés tant les organisations spatiales sont similaires.

Nous avons extrait le profil temporel moyen pour chaque classe de la classification choisie<sup>7</sup> afin de comprendre ce que signifient ces sous-ensembles en fonction des produits. Ces profils temporels moyens sont représentés en [figure 11](#).

7. [figure 10 1](#)) TAMSAT v3.1, à retrouver en grand format en annexe [figure 21](#)

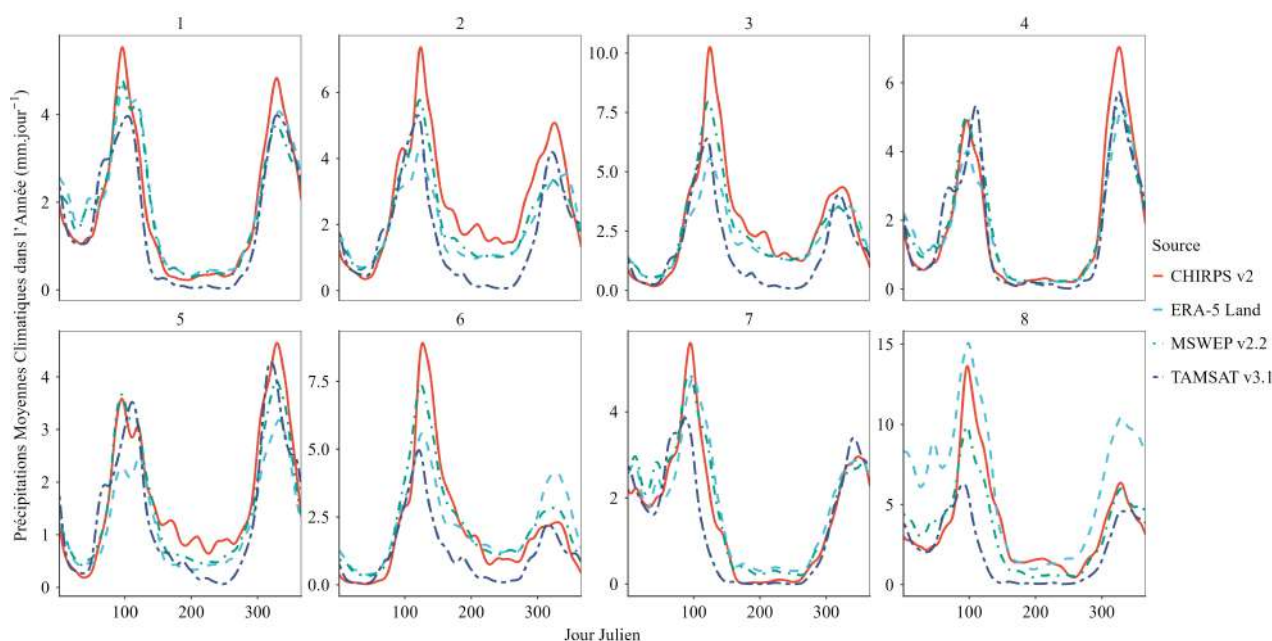


FIGURE 11 – Profils temporels moyens des 8 sous-ensembles choisis par produit. En abscisse : jours juliens de 1 (1 janv.) à 366 (31 déc. des années bissextiles). En ordonnée : précipitations moyennes climatiques dans l'année. Carte correspondante en grand format en [figure 21](#).

Au premier regard, on remarque la grande hétérogénéité entre les produits sur la classe 8 qui correspond à une classe où la topographie est complexe. Elle comprend notamment le Kilimandjaro. Cette classe présente de fortes précipitations quasiment toute l'année avec un pic très marqué durant les *Long Rains* (premier pic) et une période plus sèche pendant l'été boréal.

La classe 1 représente le régime bimodal est-africain par excellence, les deux saisons des pluies sont à peu près équivalentes en intensité avec un pic légèrement plus fort pendant les *Long Rains*. Les Chyulu Hills se situent entre cette classe et la classe 4. Le régime bimodal y est bien marqué mais les précipitations peuvent fréquemment ponctuer la petite saison sèche de janvier-février.

Les classes 2, 3 et 6 présentent, en gradient, ce qui se passe le long du littoral. Plus on est proche du littoral (*i.e* proche de 3), plus les *Long Rains* commencent tard dans l'année et se terminent tard, c'est l'inverse pour les *Short Rains*. À mesure que l'on se rapproche du littoral et que l'on remonte vers le nord, les *Short Rains* deviennent moins pluvieuses. De même, la petite saison sèche devient plus sèche alors que la longue saison sèche devient plus pluvieuse. De fait, un gradient latitudinal est observée concernant les cumuls de précipitations entre les deux saisons et un gradient longitudinal marque en particulier la saisonnalité avec le début et la fin des saisons des pluies.

Les classes 4 et 5 sont spatialement proches, on le reconnaît également dans leur profil temporel. Ce sont les seules classes où le cumul des précipitations des *Short Rains* (deuxièmes pics) sont supérieures à celles des *Long Rains* (premiers pics). La classe 5 voit plus souvent des pluies régulières pendant la longue saison sèche. Pour la classe 4, c'est l'inverse, la petite saison sèche est un peu plus pluvieuse en moyenne.

Enfin, la classe 7 au Sud-Ouest de la zone d'étude correspond à un régime plus unimodal, la petite saison sèche n'est pas bien marquée et les pluies sont relativement continues d'octobre à avril.



### 5.1.3 Identifier les dates de départs et de fins des saisons des pluies.

La [figure 12](#) montre les pixels qui présentent un régime de précipitations annuelles soit plutôt unimodal (une saison des pluies) ou plutôt bimodal (deux saisons des pluies). Le régime principal est bimodal équatorial (couleurs chaudes). C'est moins vrai pour une partie de la Tanzanie qui est sous un régime unimodal (couleurs froides) en raison d'une saison sèche de janvier-février peu marquée. De même, à l'ouest des Chyulu Hills autour du parc national d'Amboseli (2.5°S, 37.5° E) on observe cette relative unimodalité. On peut l'expliquer parce que le milieu est très aride en situation d'abri orographique : certaines années sont marquées par l'absence de saisons des pluies, ainsi, « en sautant » des saisons des pluies, elle apparaît unimodale. Les zones dont les couleurs sont les plus foncées correspondent à celles dont le régime est assuré, *i.e.* que, tous les ans ou presque, c'est le même régime. Cette carte nous apporte des explications pour interpréter les résultats suivants.

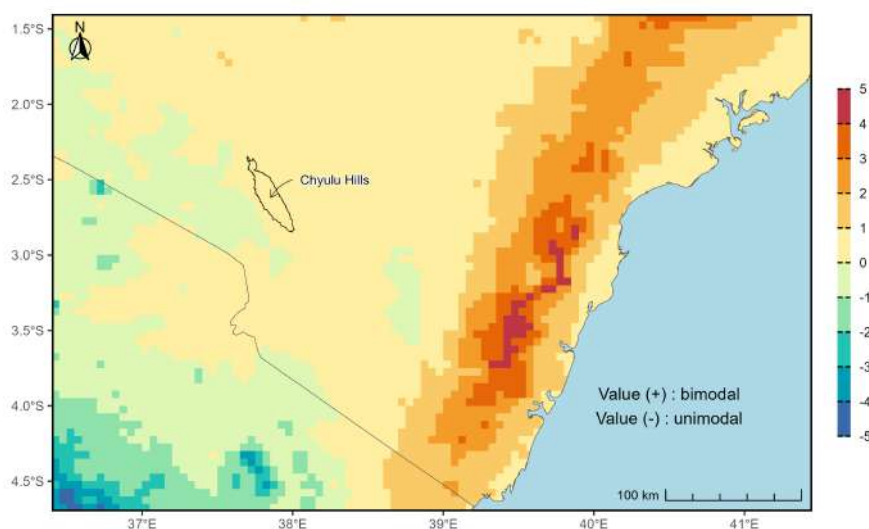


FIGURE 12 – Cycles annuels des précipitations sur la zone d'étude d'après les premiers harmoniques de Fourier. Une valeur positive est généralement bimodale et une valeur négative est généralement unimodale. Données de précipitations CHIRPS v2. Le trait noir représente la frontière Kenya-Tanzanie.

L'algorithme de détection des *Rainfall Onset Date* (ROD)/*Rainfall Cessation Date* (RCD) a donné de bons résultats. Notons cependant que nous n'avons réalisé que l'algorithme du régime bimodal. L'algorithme correspondant au régime unimodal proposé par Liebmann et Marengo 2001, pourtant plus simple, n'a pas été réalisé. Cela parce que la zone unimodale marquée (couleurs froides foncées sur la [figure 12](#)) n'était pas une zone qui intéressait directement le projet et était éloignée des Chyulu Hills.

Nous avons donc cherché pour tous les pixels deux saisons des pluies sur la zone d'étude connaissant les biais. Puisque l'algorithme est censé détecter deux « pics » annuels, quand le régime est unimodal et qu'il ne peut pas détecter véritablement deux saisons des pluies : il renvoie des valeurs nulles. Par ailleurs, puisqu'on calcule l'anomalie cumulée des précipitations sur une période donnée, quand une période sèche est ceinturée de périodes pluvieuses, il arrive que ces périodes sèches fassent diminuer les valeurs des anomalies cumulées des précipitations. De fait, le début de la saison des pluies est détecté après la fin de la saison. Dans ce cas, nous avons là-encore renvoyé des valeurs nulles. Pour tous ces problèmes relatifs au fonctionnement algorithmique, on reconnaît l'intérêt d'agréger les pixels sur des sous-ensembles cohérents et homogènes.

La [figure 13](#) illustre un résultat de l'algorithme développé lors du stage. Cette représentation

en calendrier par carte de chaleur montre les données relevées de 1996 à 2000 sur la station de Makindu, la station synoptique la plus proche des Chyulu Hills (cf. annexe [sous-section B.2](#)). Elle montre en carré rouge les ROD/RCD des *Long Rains* et en carré bleu les ROD/RCD des *Short Rains*.

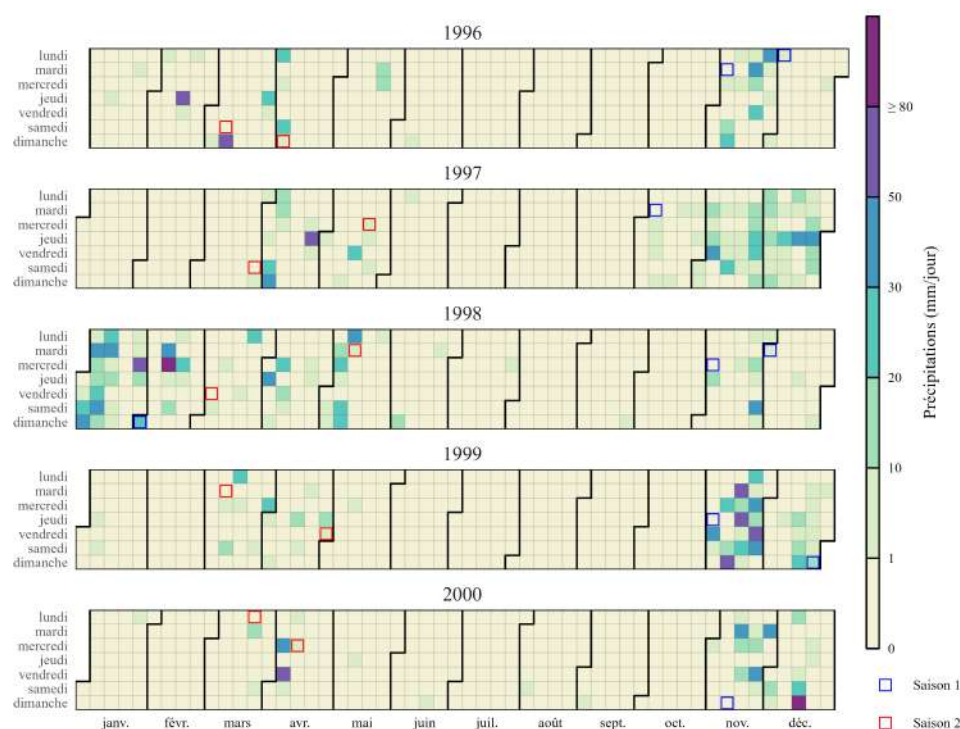


FIGURE 13 – Carte de chaleur du calendrier journalier de la période 1996 – 2000 avec les précipitations issues de la station synoptique de Makindu ( $-2.29^{\circ}$  S,  $37.81^{\circ}$  E). La saison 1 correspond aux dates des débuts et fins des *Short Rains* et la saison 2 à celles des *Long Rains* selon l’algorithme de détection développé lors du stage.

Les évolutions des ROD/RCD ont été analysés à travers chaque sous-ensemble pour les années 1983 à 2024 et les produits CHIRPS, MSWEP et TAMSAT. Nous avons pu mettre en évidence une diminution de la durée des *Long Rains* sur les 41 ans en particulier sur les sous-ensembles les plus proches du littoral (2, 3, 5 et 6). À partir des tests de Mann-Kendall, ces changements de durée de la saison sont significatifs pour le produit MSWEP au seuil de  $p\text{-value} \leq 0.05$ . Cette diminution de la durée des *Long Rains*, documentée dans la littérature, est due à une fin plus précoce de la saison. Nous avons pu l’observer avec une significativité statistique pour les produits CHIRPS et MSWEP et les sous-ensembles proches du littoral. L’évolution des ROD de cette saison est stable tout comme les ROD/RCD des *Short Rains* qui ne montrent pas de trajectoires marquées.

#### 5.1.4 Trajectoires historiques : indices ETCCDI et télécorrélations atmosphériques

La [figure 14](#) montre la cote Z des indices ETCCDI étudiés à partir des données CHIRPS entre les ROD/RCD des deux saisons des pluies calculées. Une couleur froide correspond généralement à une anomalie positive de l’indice – les précipitations sont sommairement supérieures à la normale (sauf pour l’indice CDD, c’est l’inverse) – et réciproquement une couleur chaude représente une anomalie négative. Cette matrice est un des résultats principaux du stage en raison de l’immense quantité d’informations qu’elle contient dans une figure qui reste lisible. Les résultats ne diffèrent pas foncièrement d’un sous-ensemble à l’autre, c’est le signe que le fonctionnement climatique général est quasiment le même partout sur la zone d’étude.

Trois périodes sont distinguables pour tous les sous-ensembles : une période hétérogène de 1982 à 2000, sèche de 2000 à 2017 et plus humide depuis 2018. Cependant, les tests de changements structuraux de Chow associés à ces observations visuelles ne sont pas statistiquement significatifs sur l'indice PRCPTOT (précipitations totales dans l'intervalle ROD/RCD).

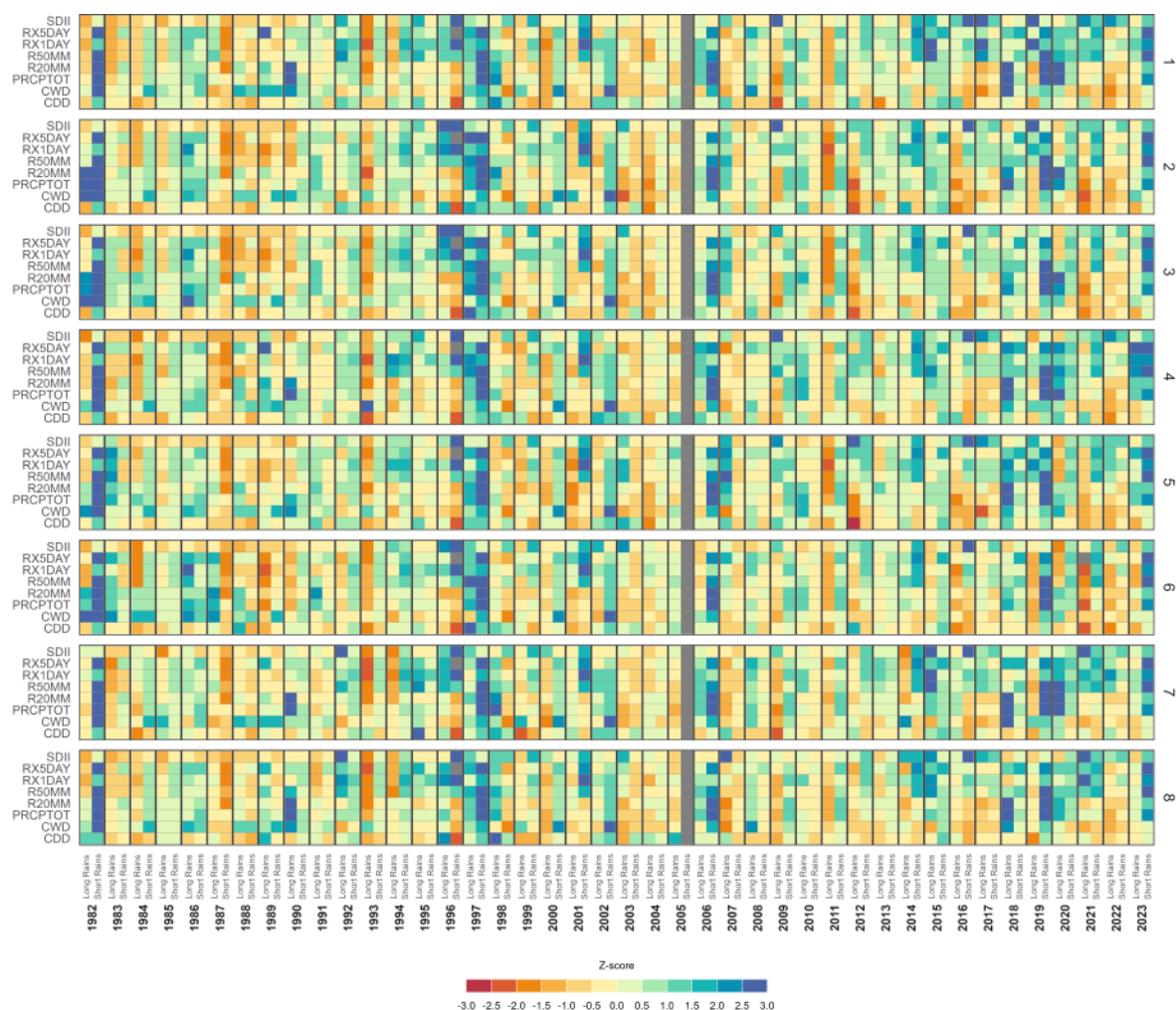


FIGURE 14 – Matrice en carte thermique des cotes Z des indices ETCCDI moyens sur les 8 sous-ensembles étudiés par rapport à la période de référence 1983 – 2013. Données CHIRPS v2. Les données manquantes sont représentées en gris.

Néanmoins, chaque année et chaque saison des pluies peut se caractériser différemment : c'est l'intérêt de la multiplicité des indices. Par exemple, les *Short Rains* de 1997 ont été extrêmement pluvieuses sur une courte période comme le montre l'écart positif à la normale des indices RX5DAY ou R20MM, mais durant le reste de la saison, les pluies ont été proches des normales des *Short Rains* comme le montre la cote Z du SDII ou du CDD.

Les années 1982, 1997, 2006 et 2019 sont très pluvieuses, en particuliers pour les *Short Rains*. Ces années sont liées à des anomalies exceptionnelles de SST dans l'Océan Indien et/ou le Pacifique.

Nous avons pu retrouver sur tous les sous-ensembles des corrélations positives entre les *Short Rains* et les indices IOD et ENSO (cf. [tableau 5](#)). Les années marquées par des anomalies positives d'un indice de télécorrélation atmosphérique auront presque toujours des *Short Rains* pluvieuses alors que les *Long Rains* n'ont pas de relations.

Pour ce qui est de la variation intra-saisonnière et les liens entre les saisons des pluies et l'Os-

	<i>Long Rains</i>	<i>Short Rains</i>	ENSO index	IOD index
<i>Long Rains</i>	-	0.190	0.080	0.077
<i>Short Rains</i>	0.190	-	0.391	0.584
ENSO index	0.080	0.391	-	0.379
IOD index	0.077	0.584	0.379	-

TABLEAU 5 – Matrice de corrélation linéaire de Person entre les indices climatiques et les saisons des pluies. D’après la donnée CHIRPS v2 et les valeurs de l’indice ETCCDI PRCPTOT (précipitations totales) du sous-ensemble 4.

cillation de Madden-Julian (OMJ), nous avons pu suivre les dates des saisons des pluies en cas de phases actives<sup>8</sup> de l’OMJ par sous-ensembles. Nous avons pu observer un très léger signal pour les ROD des *Long Rains* pendant la phase convective sur l’Océan Indien au large du Kenya. Pour les RCD, le signal est bien net pour les *Short Rains* une fois que la convection se décale plus à l’est sur le continent maritime.

Cela signifie par exemple que, les *Short Rains*, sont plus à même de se terminer quand une phase active (convective) de l’OMJ arrive sur le Continent Maritime. Tous les sous-ensembles et les produits CHIRPS, MSWEP et TAMSAT montrent cette tendance comme le montre la [figure 15](#) (version plus grande en annexe [figure 25](#)). Les points montrant les RCD des *Short Rains* en phases actives de l’OMJ sont généralement en bas ou à droite du plan cartésien, en situation de phases sur l’Océan Indien ou le continent maritime.

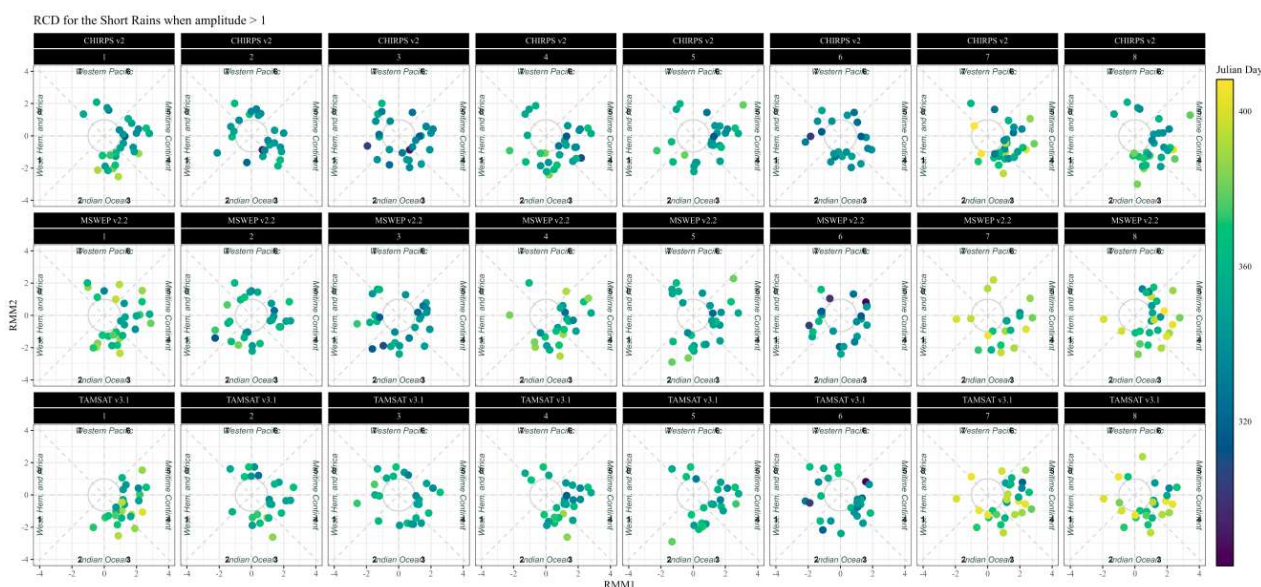


FIGURE 15 – Occurrences des dates de fin de la saison des *Short Rains* (années 1982 – 2024) quand elles se trouvent en phases actives de l’Oscillation de Madden-Julian (amplitude > 1) pour les produits CHIRPS v2, MSWEP v2.2, TAMSAT v3.1 et les 8 sous-ensembles.

8. Amplitude de l’indice RMM > 1.



## 5.2 Caractérisation des autres variables du cycle hydrologique

### 5.2.1 Cycle de l'eau verte : les tendances observées pour les précipitations se retrouvent-elles dans le fonctionnement végétatif ?

Pour ce qui est du cycle de l'eau verte, nous avons pu montrer que les tendances à long terme du cycle végétatif sont peu ou prou les mêmes que celles des précipitations. La [figure 16](#) est le résultat de l'algorithme *Breaks For Additive Seasonal and Trends* (BFAST) sur la ferme de sisal de la plaine de Kibwezi. La série temporelle  $St$  montre une tendance basse-fréquence du signal NDVI avec deux pics principaux qui correspondent aux deux saisons des pluies. Le pic principal est celui des *Short Rains* sur la plaine de Kibwezi ce qui correspond à ce que nous avons observé dans le profil temporel moyen du sous-ensemble 4, sous-ensemble où se situe la ferme.

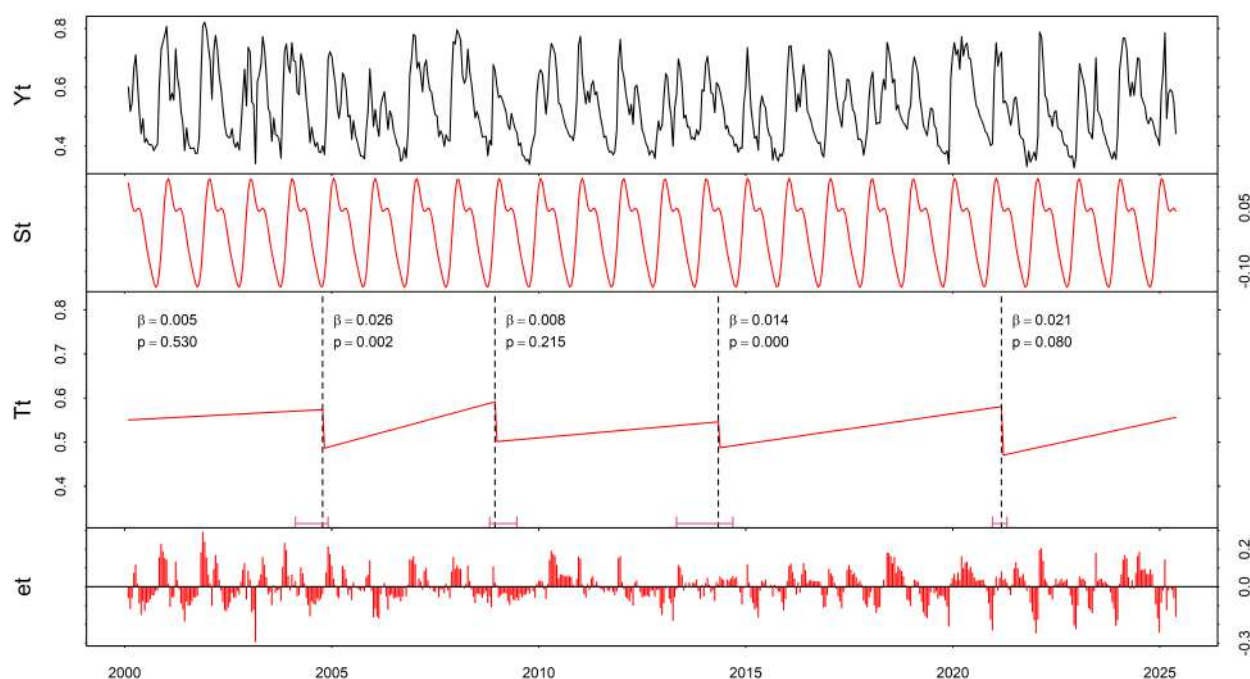


FIGURE 16 – Ruptures structurelles issues de l'algorithme de surveillance des cultures **Bfast** sur la ferme de sisal.  $Yt$  est la série originale,  $St$  la tendance saisonnière,  $Tt$  montre les points de ruptures structurels et  $et$  met en avant le bruit haute fréquence.

Le sisal est une plante à la croissance lente qui fleurit tous les 5-6 ans. Elle est récoltée en continue en Afrique de l'Est, il n'y a donc pas de périodes de récoltes particulières que l'on pourrait observer tous les ans. Ce fait a pu être mis en évidence par l'analyse du transect. Les valeurs du NDVI sont approximativement les mêmes partout sur le transect à différentes dates de l'année étudiée (cf. [figure 23](#)).

Il y a eu quatre changements structuraux de 2000 à 2025 dans le fonctionnement végétatif de cette zone. Au seuil de  $p\text{-value} \leq 0.05$ , deux de ces changements sont significatifs : en fin 2004 ( $p\text{-value} \approx 0.002$ ) et pendant les *Long Rains* de 2014 ( $p\text{-value} \approx 0.000$ ). À partir de 2004, le NDVI a connu une nette croissance végétative puis une croissance faible jusqu'au deuxième point de rupture en 2015 où la croissance s'est de nouveau accélérée.

Nous avons pu confronter ces observations à une série temporelle du SPEI-3-mois sur la ferme d'agave. Les données utilisées étaient CHIRPS v2 pour les précipitations et GLEAM pour l'ETP. On remarque une période proche de la normale de 2000, puis un mois d'août 2004 extrêmement sec

suivie d'une année exceptionnellement humide en 2006 et un retour à la normale (cf. [figure 22](#) en annexe).

### 5.2.2 Infiltration et recharge

Pour ce qui est de l'infiltration, nous avons pu mettre en avant des modifications récentes des changements d'occupations du sol à partir du produit GLCFCS30D. En proportion, autour des Chyulu Hills, les modes d'occupations du sol ont peu été modifiés. Il y a eu à peu près autant d'ouvertures de paysage que de fermetures (diagramme de Sanket en annexe [sous-section C.3](#)). Les incendies ont pourtant joué un rôle central dans l'ouverture du paysage sur la crête des Chyulu Hills. Nous avons pu montrer que les incendies sont particulièrement importants à la fin de la longue saison sèche quand la biomasse est bien développée (*i.e.* après les saisons les plus pluvieuses).

Au regard de nos observations, le suivi du stockage total d'eau TWS avec la donnée GRACE ne semble pas adaptée pour l'échelle d'analyse des Chyulu Hills. En effet, la variation de TWS sur une petite zone au sein d'un seul *mascon*<sup>9</sup> est trop importante. Il est seulement possible de voir les grands déplacements de la ZCIT comme le souligne par exemple la composition colorée de la [figure 17](#). Il est impossible de voir où ont eu lieu précisément les changements les plus importants sur le *mascon* des Chyulu Hills. D'autant que la nappe aquifère du Kilimandjaro, qui s'y trouve, est l'une des plus importantes d'Afrique.

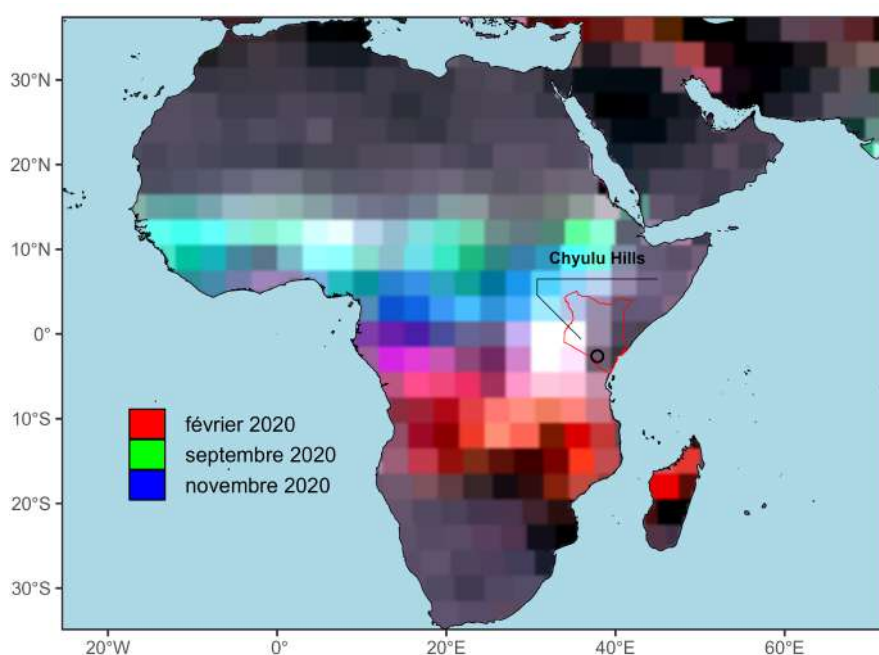


FIGURE 17 – Composition colorée de trois dates d'anomalies de TWS de la donnée mensuelle JPL GRACE Tellus (par rapport à la moyenne mensuelle 2002-2024). Rouge : anomalie de TWS en fév. 2020. Vert : anomalie de TWS en sept. 2020. Bleu : anomalie de TWS en nov. 2020. Le trait rouge correspond aux frontières du Kenya. Auteur : Barré-Rolland Yaël. Source : JPL GRACE Tellus.

9. *Mass Concentration Blocks* dans la terminologie gravimétrique.

### 5.2.3 Cas d'étude : liens entre des variables du cycle de l'eau et des données hydrologiques de terrain : le débit de la Kimana River

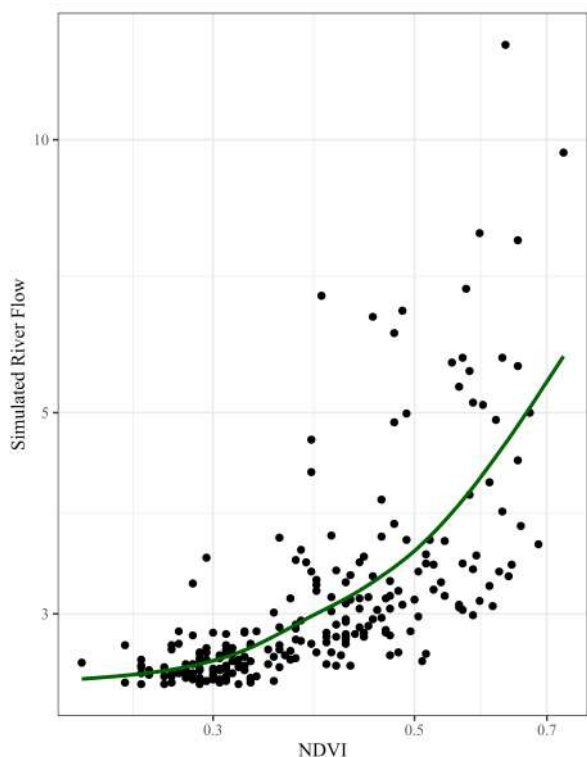


FIGURE 18 – Graphique en nuage de points entre le débit (*Simulated River Flow*) de la Kimana River et les valeurs du NDVI.

Dans le cas d'étude de la *Kimana River*, le principal résultat a été l'agrégation d'un grand nombre de variables mensuelles mises en relation avec le débit par des corrélations. L'objectif était principalement de sélectionner des produits satellitaires capables de combler le manque de mesures de terrain. Les corrélations linéaires de Pearson ont montré que les précipitations de la zone irriguée sont légèrement moins corrélées au NDVI que celles issues du versant du Kilimandjaro, ce qui suggère un recours plus important à l'irrigation.

La [figure 18](#) présente un nuage de points comparant les débits mensuels simulés par le modèle GR2M aux valeurs du NDVI mesurées à l'aval de la station hydrométrique. La courbe obtenue semble suivre une tendance exponentielle, indiquant un lien fort entre les débits simulés et la biomasse végétative.

Pour affiner cette analyse, nous avons appliqué des fenêtres glissantes de 5 ans afin de calculer les corrélations linéaires de Pearson entre le débit simulé, le NDVI et les précipitations.

Les corrélations NDVI-débit et NDVI-précipitations sont toujours positives de 2001 à 2022. La corrélation est presque toujours supérieure à la relation NDVI-précipitations ce qui implique que la végétation est plus sensible aux variations de débits qu'aux seules précipitations. Le NDVI de la zone dépend donc fortement de l'eau « verte » (ruissellement, infiltration, captation), et pas uniquement des apports atmosphériques.

Nous avons cependant remarqué de fortes disparités interannuelles qui peuvent refléter :

- des changements dans le fonctionnement climatique régional (période de sécheresse durable, saisons des pluies abondantes, ...),
- une intensification ou un changement des usages agricoles (dont irrigation),
- des limites dans les données d'entrées (modèle GR2M qui simule le débit, NDVI ou précipitations).

## 6 Discussion

Les principaux résultats obtenus mettent en exergue plusieurs dynamiques hydro-climatologiques propres à l'Afrique de l'Est et à la région des Chyulu Hills. Ils soulignent la complexité mais aussi les limites méthodologiques employées.

Un premier élément concerne l'évaluation des produits satellitaires d'estimation des précipitations (SRE). La sélection réalisée des produits n'est certes pas exhaustive, mais les quatre produits retenus figurent parmi les références couramment utilisées dans la littérature. Pour de prochains travaux, il est intéressant d'ajouter aux expérimentations les deux produits CHIRPS v3 de précipitations quotidiennes (cf. [section B.1](#)). Animés d'un souci de rigueur, nous avons dans un premier temps confronté les produits SRE avec les pluviomètres que nous possédions. Cela avait évidemment déjà été fait à de nombreuses reprises en Afrique de l'Est, au Kenya, et même au Sud du Kenya. Nos résultats sont conformes à la littérature, même si on a pu découvrir ici la bonne performance du produit MSWEP v2.2 et l'écart aux autres produits d'ERA-5 Land, probablement en raison de sa nature de réanalyse qui tend à lisser les variations locales, notamment en contexte montagneux. Les pluviomètres servent de base commune, il est pourtant difficile de vérifier leurs écarts à la réalité. Par ailleurs, les produits n'ont pas été comparés sur une période d'au moins 30 ans, période de référence pourtant nécessaire en climatologie.

La méthode de « classification floue » de sélection des sous-ensembles a montré une forte cohérence spatiale entre CHIRPS v2, TAMSAT v3.1 et MSWEP v2.2, alors qu'ERA-5 Land diverge nettement. Le choix de TAMSAT v3.1 comme référence est justifié par sa résolution spatiale plus fine. Faute de disposer d'un niveau de confiance suffisant dans un produit unique, il aurait dû être inenvisageable d'en retenir un seul. La similarité des organisations spatiales entre TAMSAT v3.1, CHIRPS v2 et MSWEP v2.2 atténue toutefois cette limite.

Les sous-ensembles identifiés sont cohérents avec les contraintes topographiques et géographiques. D'ailleurs, d'après les dires d'expert du géographe et climatologue P. Camberlin, spécialiste de la climatologie est-africaine, la classification correspondait bien aux réalités pluviométriques. Le contraste entre les régimes bimodaux de plaine et les régimes complexes en zones montagneuses, comme au Kilimandjaro ou aux Chyulu Hills, confirme le rôle essentiel de la topographie sur la zone d'étude.

Un résultat majeur concerne la diminution continue ces dernières décennies de la durée des *Long Rains*, significative pour certains produits et sous-ensembles proches du littoral. Ce raccourcissement, qui serait dû – pour partie selon nos observations – à une fin plus précoce de la saison, a déjà été documenté dans la littérature et s'avère lourd de conséquences pour l'agriculture, en réduisant la fenêtre culturale (Nicholson 2017). À l'inverse, les *Short Rains* apparaissent plus invariables, mais fortement corrélées aux anomalies de l'*Indian Ocean Dipole* et de l'*El-Nino Southern Oscillation*, confirmant leur prévisibilité plus élevée et leur importance pour la sécurité alimentaire régionale. Ce fait est vérifié avec l'indice NDVI d'une ferme dans la plaine de Kibwezi où le principal pic long-terme du développement végétatif était pendant les *Short Rains*, et non des traditionnels *Long Rains* en Afrique de l'Est.

L'influence de l'Oscillation de Madden-Julian, bien que subtile, suggère un potentiel pour affiner la compréhension intra-saisonnière des précipitations, en particulier pour les *Short Rains*. Cette oscillation désormais bien connue, est encore très imprévisible et ces impacts dans l'hydro-météorologie locale serait encore à approfondir (seuls quelques résultats ont été montrés sur l'OMJ).

Ces résultats ouvrent des perspectives pour le suivi et la prévision climatique en Afrique de l'Est, en particulier dans le cadre de la gestion de l'eau et de l'agriculture pluviale.



Avec le changement climatique, les précipitations devraient augmenter en Afrique de l'Est, c'est ce que montre la majorité des modèles climatiques. Cependant, nous avons mis en avant que les tendances observées ces dernières décennies indiquent une tendance à l'assèchement, en particulier sur la période 2000 – 2015. Dans la littérature, cette étrangeté dont les causes sont supposées mais pas toutes démontrées, est nommée *Eastern African Climate Paradox* en référence à l'article de Rowell *et al.* 2015. Entre autres explications, cela pourrait être dû à l'oscillation décennale du Pacifique.

L'analyse du cycle de l'eau verte à travers le NDVI souligne la sensibilité de la végétation non seulement aux précipitations, mais aussi au débit et aux flux d'eau de surface, révélant l'importance des processus d'irrigation. Le lien fort observé entre NDVI et débits simulés sur la Kimana River illustre la dépendance de la végétation aux ressources hydriques au-delà des seuls apports atmosphériques. Cette approche met en lumière le potentiel de lier télédétection et modélisation hydrologique pour pallier le manque de mesures de terrain.

Pour ce qui est de l'infiltration et de la recharge, nous ne sommes pas parvenus à souligner le plein potentiel des produits satellitaires globaux autour des Chyulu Hills. Le produit GRACE, que l'on imaginait capable d'estimer les anomalies de stockage total d'eau autour des Chyulu Hills s'est révélé inadapté soulignant l'importance de choisir des données cohérentes avec l'échelle d'analyse.

Enfin, la forte hétérogénéité des produits satellitaires implique de rester très vigilant dans l'interprétation des résultats. Nous encourageons l'utilisation d'approches multi-sources mais au maximum couplées à des mesures *in situ*.

**Recommandations.** Pour une recherche qui s'intéresserait à la compréhension du fonctionnement hydrologique d'une région dans un contexte où les données *in situ* sont rares ou inaccessibles, voici quelques recommandations issues de l'expérience acquise pendant ces six mois de stage :

- La télédétection est utile pour décrire toutes les facettes du cycle de l'eau,
- La zone d'étude doit être décidée en amont, de même que les éventuels cas d'étude. Elle doit être adaptée à la résolution spatiale des produits de télédétection accessible. Elle peut correspondre à un bassin versant, afin d'être adaptée pour des modèles hydrologiques,
- Éviter de traiter individuellement les variables qui composent le cycle de l'eau. Elles sont liées par des processus physiques. Des métriques, indices et équations permettent généralement de rendre compte de ces relations (cf. *e.g.* [Coupling Metrics](#)),
- Les produits satellitaires globaux et les modèles de surface terrestre ont l'avantage de la couverture spatiale, mais ils doivent être utilisés avec prudence dans les zones où la topographie est complexe,
- L'utilisation de plusieurs produits/algorithmes par variable peut aider à évaluer la robustesse des résultats,
- L'absence totale de mesures *in situ* peut sérieusement nuire à la crédibilité de la recherche. Il est nécessaire d'évaluer au moins partiellement la pertinence des modèles sur une zone d'étude similaire.

## 7 Conclusion

Pour terminer, revenons sur les conclusions de ce travail et le stage de recherche affilié. Nous avons mis en évidence l'utilité des technologies d'observation de la Terre pour la compréhension des cycles de l'eau au Sud du Kenya dans un contexte entièrement à distance et presque sans accès à des données de mesures *in situ*. Relativement à nos hypothèses de départ, nous avons pu démontrer que les techniques de télédétection peuvent intervenir sur tous les aspects du cycle de l'eau dans ce contexte à condition de bien sélectionner les produits/algorithmes et de disposer d'un minimum de mesures de terrain pour appuyer le propos.

Les principaux apports scientifiques de ce stage de recherche sont les résultats tirés de l'analyse des estimations de précipitations par télédétection. Certains résultats et méthodes sont innovants par rapport à la littérature. En relation avec des climatologues spécialistes du sujet ayant déjà travaillé en Afrique de l'Est, nous avons pu mettre en valeur ces résultats en nous concentrant sur les points les plus intéressants et les lacunes scientifiques. En parallèle du stage, nous avons pu mettre en cohérence ces résultats pour la rédaction d'un article scientifique.

Devant la multitude de sujets abordés pendant le stage, c'est bien l'analyse du fonctionnement des précipitations qui a occupé la majorité du temps. Cela a probablement constitué un écueil puisque nous avons ressenti une difficulté manifeste à valoriser tout ce qui n'y était pas affilié. Nous aurions dû sans doute nous concentrer bien plus longtemps sur l'étude de la végétation et de l'irrigation qui méritait une attention tout particulière pour quiconque souhaite étudier le cycle de l'eau d'une région.

Les différentes variables qui composent le cycle de l'eau sont volontairement séparées en 4.1, l'objectif est à la fois de rendre compte des travaux réalisés pendant le stage, mais également de décrire comment les produits satellitaires globaux peuvent nous aider à comprendre le fonctionnement d'une zone d'intérêt dans une région où l'accès aux données de terrain n'est pas forcément facile, c'était tout l'intérêt de ce mémoire. Nous reconnaissons toutefois que ce choix est discutable et que nous aurions pu nous concentrer sur toutes les interrelations entre les variables du cycle.

Par ailleurs, de nombreuses variables du cycle de l'eau, pourtant essentielles, n'ont pas été traitées dans ce mémoire par manque de résultats suffisamment intéressants. En outre, même si le projet et ce travail sont centrés sur le massif des Chyulu Hills et sa région, nous avons dû prendre un nécessaire recul pour le comprendre. Cette approche est à l'évidence un écueil et nous aurions pu nous concentrer sur le massif comme cas d'étude.

D'autres travaux supplémentaires ont été réalisés pendant le stage relatifs au cycle de l'eau mais n'ont pas été montrés ici. Nous avons fait le choix de tester un maximum de produits satellitaires globaux, parfois au détriment de l'approfondissement d'un seul sujet. Entre autres, nous avons calculé le volume du massif ou mis à jour une carte géologique grâce à des méthodes de *machine learning* et une série temporelle de la constellation de satellite Sentinel-2. Ces éléments ont servi d'agrégation de connaissances pour des membres du projet WATCH spécialisés en hydrogéologie et hydrogéochimie.

Au total, à la fin du stage, 609 iconographies (cartes, graphiques, tableaux...) ont été comptabilisés, 99 codes R, 7 codes Python, et un code en JavaScript (GEE). Ce stage a été plus que bénéfique en termes de compétences acquises en programmation ou en méthodologie de la recherche.

## Bibliographie

- Abera, Wuletawu *et al.* (juin 2017). « Estimating the Water Budget Components and Their Variability in a Pre-Alpine Basin with JGrass-NewAGE ». In : *Advances in Water Resources* 104, p. 37-54. ISSN : 0309-1708. DOI : [10.1016/j.advwatres.2017.03.010](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.03.010). (Visité le 29/05/2025).
- Addisu, Solomon *et al.* (déc. 2024). « Evaluating the Performances of Gridded Satellite Products in Simulating the Rainfall Characteristics of Abay Basin, Ethiopia ». In : *Sustainable Environment* 10.1, p. 2381349. ISSN : 2765-8511. DOI : [10.1080/27658511.2024.2381349](https://doi.org/10.1080/27658511.2024.2381349). (Visité le 10/04/2025).
- Beck, Hylke E. *et al.* (mars 2019). « MSWEP V2 Global 3-Hourly 0.1° Precipitation : Methodology and Quantitative Assessment ». In : *Bulletin of the American Meteorological Society* 100.3, p. 473-500. ISSN : 0003-0007, 1520-0477. DOI : [10.1175/BAMS-D-17-0138.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0138.1). (Visité le 21/07/2025).
- Boutin, J. *et al.* (oct. 2023). « Soil Moisture and Sea Surface Salinity Derived from Satellite-Borne Sensors ». In : *Surveys in Geophysics* 44.5, p. 1449-1487. ISSN : 1573-0956. DOI : [10.1007/s10712-023-09798-5](https://doi.org/10.1007/s10712-023-09798-5). (Visité le 21/05/2025).
- Cao, Ruyin *et al.* (nov. 2018). « A Simple Method to Improve the Quality of NDVI Time-Series Data by Integrating Spatiotemporal Information with the Savitzky-Golay Filter ». In : *Remote Sensing of Environment* 217, p. 244-257. ISSN : 0034-4257. DOI : [10.1016/j.rse.2018.08.022](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.022). (Visité le 23/04/2025).
- Chen, Jing M. et Jane Liu (fév. 2020). « Evolution of Evapotranspiration Models Using Thermal and Short-wave Remote Sensing Data ». In : *Remote Sensing of Environment* 237, p. 111594. ISSN : 0034-4257. DOI : [10.1016/j.rse.2019.111594](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111594). (Visité le 23/05/2025).
- Cui, Yaokui *et al.* (juill. 2018). « Global Water Cycle and Remote Sensing Big Data : Overview, Challenge, and Opportunities ». In : *Big Earth Data* 2.3, p. 282-297. ISSN : 2096-4471, 2574-5417. DOI : [10.1080/20964471.2018.1548052](https://doi.org/10.1080/20964471.2018.1548052). (Visité le 21/05/2025).
- Derardja, Bilal *et al.* (jan. 2024). « Advancements in Remote Sensing for Evapotranspiration Estimation : A Comprehensive Review of Temperature-Based Models ». In : *Remote Sensing* 16.11, p. 1927. ISSN : 2072-4292. DOI : [10.3390/rs16111927](https://doi.org/10.3390/rs16111927). (Visité le 23/05/2025).
- Dinku, Tufa *et al.* (2018). « Validation of the CHIRPS Satellite Rainfall Estimates over Eastern Africa ». In : *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 144.S1, p. 292-312. ISSN : 1477-870X. DOI : [10.1002/qj.3244](https://doi.org/10.1002/qj.3244). (Visité le 11/04/2025).
- Dunning, Caroline M., Emily C. L. Black et Richard P. Allan (2016). « The Onset and Cessation of Seasonal Rainfall over Africa ». In : *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 121.19, p. 11, 405-11, 424. ISSN : 2169-8996. DOI : [10.1002/2016JD025428](https://doi.org/10.1002/2016JD025428). (Visité le 17/06/2025).
- Falkenmark, M. et J. Rockström (mai 2006). « The New Blue and Green Water Paradigm : Breaking New Ground for Water Resources Planning and Management ». In : *Journal of Water Resources Planning and Management* 132.3, p. 129-132. ISSN : 0733-9496. DOI : [10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2006\)132:3\(129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:3(129)). (Visité le 21/05/2025).
- Farahmand, Alireza, J. T. Reager et Nima Madani (juill. 2021). « Drought Cascade in the Terrestrial Water Cycle : Evidence From Remote Sensing ». In : *Geophysical Research Letters* 48.14, e2021GL093482. ISSN : 0094-8276, 1944-8007. DOI : [10.1029/2021GL093482](https://doi.org/10.1029/2021GL093482). (Visité le 21/05/2025).
- Fitzpatrick, Rory G. J. *et al.* (nov. 2015). « The West African Monsoon Onset : A Concise Comparison of Definitions ». In : *Journal of Climate* 28.22, p. 8673-8694. ISSN : 0894-8755, 1520-0442. DOI : [10.1175/JCLI-D-15-0265.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0265.1). (Visité le 20/02/2025).
- Funk, C. *et al.* (mai 2015). *A Global Satellite Assisted Precipitation Climatology*. DOI : [10.5194/essdd-8-401-2015](https://doi.org/10.5194/essdd-8-401-2015). (Visité le 06/03/2025).
- Hoeltgebaum, Lucas E. B. et Nelson Luís Dias (oct. 2023). « Evaluation of the Storage and Evapotranspiration Terms of the Water Budget for an Agricultural Watershed Using Local and Remote-Sensing Measurements ». In : *Agricultural and Forest Meteorology* 341, p. 109615. ISSN : 0168-1923. DOI : [10.1016/j.agrformet.2023.109615](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109615). (Visité le 29/05/2025).
- Horton, Robert (1931). « The Field, Scope, and Status of the Science of Hydrology ». In : *Eos, Transactions American Geophysical Union* 12.1, p. 189-202. ISSN : 2324-9250. DOI : [10.1029/TR012i001p00189-2](https://doi.org/10.1029/TR012i001p00189-2). (Visité le 22/05/2025).

- Huete, A *et al.* (nov. 2002). « Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices ». In : *Remote Sensing of Environment*. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) : A New Generation of Land Surface Monitoring 83.1, p. 195-213. ISSN : 0034-4257. DOI : [10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2). (Visité le 12/08/2025).
- Humphrey, Vincent, Matthew Rodell et Annette Eicker (oct. 2023). « Using Satellite-Based Terrestrial Water Storage Data : A Review ». In : *Surveys in Geophysics* 44.5, p. 1489-1517. ISSN : 1573-0956. DOI : [10.1007/s10712-022-09754-9](https://doi.org/10.1007/s10712-022-09754-9). (Visité le 21/05/2025).
- Kithiia, Justus et Gamoyo Majambo (déc. 2020). « Motion but No Speed : Colonial to Post-Colonial Status of Water and Sanitation Service Provision in Mombasa City ». In : *Cities (London, England)* 107, p. 102867. ISSN : 0264-2751. DOI : [10.1016/j.cities.2020.102867](https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102867). (Visité le 22/05/2025).
- Lakshmi, Venkataraman (oct. 2014). *Remote Sensing of the Terrestrial Water Cycle*. John Wiley & Sons. ISBN : 978-1-118-87226-0.
- Levizzani, Vincenzo et Elsa Cattani (jan. 2019). « Satellite Remote Sensing of Precipitation and the Terrestrial Water Cycle in a Changing Climate ». In : *Remote Sensing* 11.19, p. 2301. ISSN : 2072-4292. DOI : [10.3390/rs11192301](https://doi.org/10.3390/rs11192301). (Visité le 21/07/2025).
- Liebmann, Brant et JoséA Marengo (nov. 2001). « Interannual Variability of the Rainy Season and Rainfall in the Brazilian Amazon Basin ». In : *Journal of Climate* 14.22, p. 4308-4318. ISSN : 0894-8755, 1520-0442. DOI : [10.1175/1520-0442\(2001\)014<4308:IVOTRS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<4308:IVOTRS>2.0.CO;2). (Visité le 26/08/2025).
- Lotcheris, Romi, Lan Wang-Erlandsson et Juan Rocha (jan. 2025). *Remote Sensing-Based Detection of Resilience Loss in the Terrestrial Water Cycle*. DOI : [10.5194/egusphere-egu24-17019](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-17019). (Visité le 21/05/2025).
- Lu, Shibao *et al.* (sept. 2016). « Review of Social Water Cycle Research in a Changing Environment ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 63, p. 132-140. ISSN : 1364-0321. DOI : [10.1016/j.rser.2016.04.071](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.071). (Visité le 22/05/2025).
- Lugato, E. *et al.* (août 2013). « Long-Term Pan Evaporation Observations as a Resource to Understand the Water Cycle Trend : Case Studies from Australia ». In : *Hydrological Sciences Journal* 58.6, p. 1287-1296. ISSN : 0262-6667. DOI : [10.1080/02626667.2013.813947](https://doi.org/10.1080/02626667.2013.813947). (Visité le 21/05/2025).
- Madden, Roland A. et Paul R. Julian (mai 1994). « Observations of the 40–50-Day Tropical Oscillation—A Review ». In : *Monthly Weather Review* 122.5, p. 814-837. ISSN : 1520-0493, 0027-0644. DOI : [10.1175/1520-0493\(1994\)122<0814:OOTDIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0814:OOTDIO>2.0.CO;2). (Visité le 17/06/2025).
- Maidment, Ross I. *et al.* (mai 2017). « A New, Long-Term Daily Satellite-Based Rainfall Dataset for Operational Monitoring in Africa ». In : *Scientific Data* 4.1, p. 170063. ISSN : 2052-4463. DOI : [10.1038/sdata.2017.63](https://doi.org/10.1038/sdata.2017.63). (Visité le 23/05/2025).
- Mankin, Kyle R. *et al.* (jan. 2025). « Review of Gridded Climate Products and Their Use in Hydrological Analyses Reveals Overlaps, Gaps, and the Need for a More Objective Approach to Selecting Model Forcing Datasets ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 29.1, p. 85-108. ISSN : 1607-7938. DOI : [10.5194/hess-29-85-2025](https://doi.org/10.5194/hess-29-85-2025). (Visité le 04/04/2025).
- Miernecki, Maciej *et al.* (nov. 2014). « Comparison of SMOS and SMAP Soil Moisture Retrieval Approaches Using Tower-Based Radiometer Data over a Vineyard Field ». In : *Remote Sensing of Environment* 154, p. 89-101. ISSN : 0034-4257. DOI : [10.1016/j.rse.2014.08.002](https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.08.002). (Visité le 29/07/2025).
- Monteith, J. L. (1965). « Evaporation and Environment ». In : *Symposia of the Society for Experimental Biology* 19, p. 205-234. (Visité le 23/05/2025).
- Moron, Vincent *et al.* (2025). « Reconciling Different Views on the Onset of Boreal Summer Monsoon : The Example of Thailand ». In : *International Journal of Climatology* n/a.n/a (), e8862. ISSN : 1097-0088. DOI : [10.1002/joc.8862](https://doi.org/10.1002/joc.8862). (Visité le 13/06/2025).
- Muñoz-Sabater, Joaquín *et al.* (sept. 2021). « ERA5-Land : A State-of-the-Art Global Reanalysis Dataset for Land Applications ». In : *Earth System Science Data* 13.9, p. 4349-4383. ISSN : 1866-3508. DOI : [10.5194/essd-13-4349-2021](https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021). (Visité le 17/07/2025).
- Muthoni, Francis Kamau, Francis Michael Msangi et Exavery Kigosi (juin 2023). « Assessing the Skill of Gridded Satellite and Reanalysis Precipitation Products over in East and Southern Africa ». In : *Atmósfera* 37, p. 481-500. ISSN : 2395-8812. DOI : [10.20937/ATM.53177](https://doi.org/10.20937/ATM.53177). (Visité le 12/02/2025).



- Nicholson, Sharon E. (2017). « Climate and Climatic Variability of Rainfall over Eastern Africa ». In : *Reviews of Geophysics* 55.3, p. 590-635. ISSN : 1944-9208. DOI : [10.1002/2016RG000544](https://doi.org/10.1002/2016RG000544). (Visité le 06/02/2025).
- Nyangena, J, S Onywere et C Shisanya (fév. 2020). « Evaluating the Relationship between Drought and Vegetation Greenness in Chyulu-Amboseli Rangeland, Kenya ». In : *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* 24.1, p. 65. ISSN : 1119-8362. DOI : [10.4314/jasem.v24i1.9](https://doi.org/10.4314/jasem.v24i1.9). (Visité le 19/05/2025).
- Omay, Paulino Omoj *et al.* (avr. 2023). « Changes and Variability in Rainfall Onset, Cessation, and Length of Rainy Season in the IGAD Region of Eastern Africa ». In : *Theoretical and Applied Climatology* 152.1, p. 871-893. ISSN : 1434-4483. DOI : [10.1007/s00704-023-04433-0](https://doi.org/10.1007/s00704-023-04433-0). (Visité le 20/02/2025).
- Onyutha, Charles *et al.* (jan. 2022). « Chapter 10 - Drought across East Africa under Climate Variability ». In : *Climate Impacts on Extreme Weather*. Sous la dir. de Victor Ongoma et Hossein Tabari. Elsevier, p. 159-173. ISBN : 978-0-323-88456-3. DOI : [10.1016/B978-0-323-88456-3.00002-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88456-3.00002-2). (Visité le 19/02/2025).
- Palmer, Paul I. *et al.* (mars 2023). « Drivers and Impacts of Eastern African Rainfall Variability ». In : *Nature Reviews Earth & Environment* 4.4, p. 254-270. ISSN : 2662-138X. DOI : [10.1038/s43017-023-00397-x](https://doi.org/10.1038/s43017-023-00397-x). (Visité le 07/02/2025).
- Passaretti, Stefania *et al.* (jan. 2022). « A Technical Note on the Application of a Water Budget Model at Regional Scale : A Water Manager's Approach towards a Sustainable Water Resources Management ». In : *Water* 14.5, p. 712. ISSN : 2073-4441. DOI : [10.3390/w14050712](https://doi.org/10.3390/w14050712). (Visité le 29/05/2025).
- Penman, Howard Latimer et Bernard Augustus Keen (jan. 1997). « Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass ». In : *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 193.1032, p. 120-145. DOI : [10.1098/rspa.1948.0037](https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037). (Visité le 23/05/2025).
- Portal, Gerard *et al.* (jan. 2020). « Assessment of Multi-Scale SMOS and SMAP Soil Moisture Products across the Iberian Peninsula ». In : *Remote Sensing* 12.3, p. 570. ISSN : 2072-4292. DOI : [10.3390/rs12030570](https://doi.org/10.3390/rs12030570). (Visité le 29/07/2025).
- Riedel, Thomas et Tobias K. D. Weber (sept. 2020). « Review : The Influence of Global Change on Europe's Water Cycle and Groundwater Recharge ». In : *Hydrogeology Journal* 28.6, p. 1939-1959. ISSN : 1431-2174, 1435-0157. DOI : [10.1007/s10040-020-02165-3](https://doi.org/10.1007/s10040-020-02165-3). (Visité le 29/05/2025).
- Rouse, J. W. *et al.* (jan. 1974). « Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS ». In : (visité le 12/08/2025).
- Rowell, David P. *et al.* (déc. 2015). « Reconciling Past and Future Rainfall Trends over East Africa ». In : *Journal of Climate* 28.24, p. 9768-9788. ISSN : 0894-8755, 1520-0442. DOI : [10.1175/JCLI-D-15-0140.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0140.1). (Visité le 17/04/2025).
- Scheumann, Waltina, éd. (2008). *Conceptualizing Cooperation on Africa's Transboundary Groundwater Resources*. Studies / Deutsches Institut Für Entwicklungspolitik 32. Bonn : Dt. Inst. für Entwicklungspolitik. ISBN : 978-3-88985-364-6.
- Sheffield, Justin *et al.* (avr. 2009). « Closing the Terrestrial Water Budget from Satellite Remote Sensing ». In : *Geophysical Research Letters* 36.7, 2009GL037338. ISSN : 0094-8276, 1944-8007. DOI : [10.1029/2009GL037338](https://doi.org/10.1029/2009GL037338). (Visité le 29/05/2025).
- Späth, A., A. P. Le Roex et N. Opiyo-Akech (août 2000). « The Petrology of the Chyulu Hills Volcanic Province, Southern Kenya ». In : *Journal of African Earth Sciences* 31.2, p. 337-358. ISSN : 1464-343X. DOI : [10.1016/S0899-5362\(00\)00092-0](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(00)00092-0). (Visité le 22/05/2025).
- Twarakavi, Navin Kumar C., Jirka Šimůnek et Sophia Seo (2008). « Evaluating Interactions between Groundwater and Vadose Zone Using the HYDRUS-Based Flow Package for MODFLOW ». In : *Vadose Zone Journal* 7.2, p. 757-768. ISSN : 1539-1663. DOI : [10.2136/vzj2007.0082](https://doi.org/10.2136/vzj2007.0082). (Visité le 29/05/2025).
- Verbesselt, Jan *et al.* (jan. 2010). « Detecting Trend and Seasonal Changes in Satellite Image Time Series ». In : *Remote Sensing of Environment* 114.1, p. 106-115. ISSN : 0034-4257. DOI : [10.1016/j.rse.2009.08.014](https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.014). (Visité le 13/08/2025).
- Wallace, John M. et David S. Gutzler (avr. 1981). « Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter ». In : *Monthly Weather Review* 109.4, p. 784-812. ISSN : 1520-0493,

- 0027-0644. DOI : [10.1175/1520-0493\(1981\)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2). (Visité le 20/02/2025).
- Wang, Bin et LinHo (fév. 2002). « Rainy Season of the Asian–Pacific Summer Monsoon ». In : *Journal of Climate* 15.4, p. 386-398. ISSN : 0894-8755, 1520-0442. DOI : [10.1175/1520-0442\(2002\)015<0386:RSOTAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0386:RSOTAP>2.0.CO;2). (Visité le 20/02/2025).
- Wang, Lingli et John J. Qu (juin 2009). « Satellite Remote Sensing Applications for Surface Soil Moisture Monitoring : A Review ». In : *Frontiers of Earth Science in China* 3.2, p. 237-247. ISSN : 1673-7490. DOI : [10.1007/s11707-009-0023-7](https://doi.org/10.1007/s11707-009-0023-7). (Visité le 21/07/2025).
- Weerasinghe, Imeshi *et al.* (avr. 2020). « Can We Trust Remote Sensing Evapotranspiration Products over Africa ? » In : *Hydrology and Earth System Sciences* 24.3, p. 1565-1586. ISSN : 1027-5606. DOI : [10.5194/hess-24-1565-2020](https://doi.org/10.5194/hess-24-1565-2020). (Visité le 23/05/2025).
- Wheeler, Matthew C. et Harry H. Hendon (août 2004). « An All-Season Real-Time Multivariate MJO Index : Development of an Index for Monitoring and Prediction ». In : *Monthly Weather Review* 132.8, p. 1917-1932. ISSN : 1520-0493, 0027-0644. DOI : [10.1175/1520-0493\(2004\)132<1917:AARMMI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1917:AARMMI>2.0.CO;2). (Visité le 31/07/2025).
- Wodebo, Desta Yoseph *et al.* (fév. 2025). « Comprehensive Performance Evaluation of Satellite-Based and Reanalysis Rainfall Estimate Products in Ethiopia : For Drought, Flood, and Water Resources Applications. » In : *Journal of Hydrology : Regional Studies* 57, p. 102150. ISSN : 2214-5818. DOI : [10.1016/j.ejrh.2024.102150](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102150). (Visité le 07/02/2025).
- Zhang, Xiao *et al.* (mars 2024). « GLC\_FCS30D : The First Global 30m Land-Cover Dynamics Monitoring Product with a Fine Classification System for the Period from 1985 to 2022 Generated Using Dense-Time-Series Landsat Imagery and the Continuous Change-Detection Method ». In : *Earth System Science Data* 16.3, p. 1353-1381. ISSN : 1866-3508. DOI : [10.5194/essd-16-1353-2024](https://doi.org/10.5194/essd-16-1353-2024). (Visité le 24/08/2025).



## Liste des tableaux

1	Principaux produits satellitaires de précipitations utiles pour l'étude. Dans « Source », S correspond à un produit satellitaire, R à un produit de réanalyse, et G à un produit issu de mesures au sol ( <i>Ground-based</i> ). Dans « Période », NP signifie « près du présent » ( <i>Near Present</i> ). Tableau adapté de Mankin <i>et al.</i> 2025. . . . .	5
2	Principaux produits satellitaires d'ET utiles pour l'étude. Dans « Source », LSM signifie « <i>Land Surface Model</i> » et T « Télédétection ». Dans « Période », NP signifie « près du présent » ( <i>Near Present</i> ). . . . .	7
3	Principaux produits satellitaires d'ET utiles pour l'étude. Dans « Source », LSM signifie « <i>Land Surface Model</i> » et T « Télédétection ». Dans « Période », NP signifie « près du présent » ( <i>Near Present</i> ). . . . .	7
4	Indicateurs climatiques de précipitations selon l'ETCCDI. « RR » sont les précipitations par jour et « P » le cumul des précipitations. . . . .	19
5	Matrice de corrélation linéaire de Person entre les indices climatiques et les saisons des pluies. D'après la donnée CHIRPS v2 et les valeurs de l'indice ETCCDI PRCPTOT (précipitations totales) du sous-ensemble 4. . . . .	30
6	Description des pluviomètres utilisés dans cette étude, incluant le nom de la station, les coordonnées géographiques, la période d'observation . . . . .	iv

## Table des figures

1	Localisation des Chyulu Hills par rapport au Sud du Kenya. Le trait plein rouge représente le massif volcanique des Chyulu Hills. Les traits pointillés verts représentent les parcs nationaux. L'emprise de la carte correspond au site d'étude discuté en 4.1. Auteur Barré-Rolland Yaël. Sources : <i>World Database on Protected Areas</i> (WDPA), et <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> (SRTM) 30 m. . . . .	9
2	Occupation du sol et massif volcanique des Chyulu Hills (pointillés rouges) avec les principales sources issues du massif. Auteur Barré-Rolland Yaël. Sources : Occupation du sol : <i>European Space Agency</i> (ESA) <i>World Cover</i> 2021. Extrusion du relief : <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> (30 m). . . . .	10
3	Mois avec les plus importants cumuls de précipitations en Afrique de l'Est selon la donnée de précipitation MSWEP v2.2. Les Chyulu Hills sont mis en évidence par un cercle bleu en pointillé. . . . .	12
4	Total des précipitations annuelles moyennes sur la zone d'étude pour les produits : CHIRPS v2, MSWEP v2.2 et TAMSAT v3.1 sur la période 1983–2024. Le trait noir représente la frontière du Kenya (cf. figure 1). 1° en coordonnées géographiques ~ 111 km. . . . .	14
5	Diagramme de traitement pour identifier les sous-ensembles à partir des <i>Satellite Rainfall Estimates</i> (SRE). Les lignes bleues retracent les principaux traitements. Les lignes grises donnent les paramètres et les tests effectués. Réalisation du diagramme en langage de programmation DOT. . . . .	16

6	Normales climatologiques des dates de début et de fin des saisons des pluies moyennées sur la zone d'étude. Courbe rouge : Précipitations Moyennes Climatiques dans l'Année (PMCA). Courbe bleue : anomalies de la moyenne climatique des jours juliens par rapport à la moyenne long-terme des précipitations. Courbe verte : cumul lissé des anomalies. En cercle, <i>maxima</i> locaux identifiés. Source : donnée TAMSAT v3.1. Figure adaptée de Dunning, Black et Allan 2016. . . . .	18
7	Ferme d'agaves dans la plaine de Kibwezi. Le transect étudié est représenté en rouge. Les points extraits des indices NDVI et EVI MODIS apparaissent en noir. Fond de carte : Esri World Imagery. . . . .	21
8	Situation de la zone irriguée de la Kimana River par rapport à son bassin versant. Le carton de localisation représente le massif des Chyulu Hills en noir. Fond de carte : Esri World Imagery. . . . .	23
9	Schéma de synthèse représentant le coefficient de détermination linéaire de Pearson ( $R^2$ ) à différents échelles temporelles sur 15 stations de la zone d'étude. <i>Rain gauges</i> signifie : « pluviomètres ». <i>Daily</i> : « quotidien », <i>5 days</i> : « 5 jours », <i>monthly</i> : « mensuel » et <i>annual</i> : « annuel ». . . . .	24
10	Sous-ensembles obtenus par produits si : 1) au moins 2 produits sont représentés par pixel ; et si : 2) au moins 3 produits sont représentés par pixel. Pour situer, les Chyulu Hills sont représentés par un trait plein noir. Les couleurs ne correspondent par entre les produits. . . . .	25
11	Profils temporels moyens des 8 sous-ensembles choisis par produit. En abscisse : jours juliens de 1 (1 janv.) à 366 (31 déc. des années bissextiles). En ordonnée : précipitations moyennes climatiques dans l'année. Carte correspondante en grand format en figure 21. . . . .	26
12	Cycles annuels des précipitations sur la zone d'étude d'après les premiers harmoniques de Fourier. Une valeur positive est généralement bimodale et une valeur négative est généralement unimodale. Données de précipitations CHIRPS v2. Le trait noir représente la frontière Kenya-Tanzanie. . . . .	27
13	Carte de chaleur du calendrier journalier de la période 1996 – 2000 avec les précipitations issues de la station synoptique de Makindu (-2.29° S, 37.81° E). La saison 1 correspond aux dates des débuts et fins des <i>Short Rains</i> et la saison 2 à celles des <i>Long Rains</i> selon l'algorithme de détection développé lors du stage. . . . .	28
14	Matrice en carte thermique des cotes Z des indices ETCCDI moyens sur les 8 sous-ensembles étudiés par rapport à la période de référence 1983 – 2013. Données CHIRPS v2. Les données manquantes sont représentées en gris. . . . .	29
15	Occurrences des dates de fin de la saison des <i>Short Rains</i> (années 1982 – 2024) quand elles se trouvent en phases actives de l'Oscillation de Madden-Julian (amplitude > 1) pour les produits CHIRPS v2, MSWEP v2.2, TAMSAT v3.1 et les 8 sous-ensembles. . . . .	30
16	Ruptures structurelles issues de l'algorithme de surveillance des cultures <b>Bfast</b> sur la ferme de sisal. <b>Yt</b> est la série originale, <b>St</b> la tendance saisonnière, <b>Tt</b> montre les points de ruptures structurels et <b>et</b> met en avant le bruit haute fréquence. . . . .	31

17	Composition colorée de trois dates d'anomalies de TWS de la donnée mensuelle JPL GRACE Tellus (par rapport à la moyenne mensuelle 2002-2024). Rouge : anomalie de TWS en fév. 2020. Vert : anomalie de TWS en sept. 2020. Bleu : anomalie de TWS en nov. 2020. Le trait rouge correspond aux frontières du Kenya. Auteur : Barré-Rolland Yaël. Source : JPL GRACE Tellus. . . . .	32
18	Graphique en nuage de points entre le débit ( <i>Simulated River Flow</i> ) de la Kimana River et les valeurs du NDVI. . . . .	33
19	Diagramme ombrothermique de Walter-Lieth sur les Chyulu Hills. Sources : précipitations CHIRPS v2.0 et température de l'air de surface ERA-5 Land. . . . .	ii
20	Localisation des pluviomètres utilisés pour la confrontation des produits. Carte réalisée en R avec le paquet <i>ggplot2</i> . Source : SRTM 30 m (NASA). . . . .	iv
21	Sous-ensembles choisis pour agréger les informations portant sur l'analyse des précipitations en grand format. Les Chyulu Hills sont représentés en noir. . . . .	vi
22	Série temporelle du <i>Standardized Precipitation Evaporation Index</i> (SPEI) sur la ferme de sisal de la plaine de Kibwezi. Données d'évapotranspiration potentielle : GLEAM. Données de précipitations : CHIRPS v2. . . . .	vii
23	Analyse du NDVI sur la ferme de sisal de la plaine de Kibwezi le long du transect étudié pour l'année 2023. Données NDVI MOD09Q1G. . . . .	vii
24	Diagramme de Sankey qui représente les transitions de classes d'occupations du sol entre 2000 et 2022 sur les Chyulu Hills et la plaine de Kibwezi d'après le produit GLCFCS30D. Les <i>stratums</i> (colonnes) montrent, en proportion, les différentes classes et les <i>alluviums</i> (transitions) montrent, en proportion les classes qui ont subi un changement depuis 2000. Diagramme réalisé en R avec le package <i>ggalluvium</i> . . . . .	viii
25	Occurrences des dates de fin de la saison des Short Rains (années 1982 – 2024) quand elles se trouvent en phases actives de l'Oscillation de Madden-Julian (amplitude > 1) pour les produits CHIRPS v2, MSWEP v2.2, TAMSAT v3.1 et les 8 sous-ensembles. . . . .	ix

# Annexe

<b>A</b>	<b>Diagramme ombrothermique des Chyulu Hills</b>	<b>ii</b>
<b>B</b>	<b>Confrontation des produits d'estimation des précipitations par satellite</b>	<b>ii</b>
B.1	Détail des produits d'estimations des précipitations par satellite . . . . .	ii
B.2	Stations utilisées pour la confrontation des produits . . . . .	iv
B.3	Équations des métriques utilisées . . . . .	v
B.4	Algorithme de recherche du régime pluviométrique annuel . . . . .	v
B.5	Sous-ensembles choisis pour l'analyse des précipitations . . . . .	vi
<b>C</b>	<b>Autres variables du cycle de l'eau</b>	<b>vii</b>
C.1	Série temporelle du <i>Standardized Precipitation Evaporation Index</i> (SPEI) sur la ferme d'agave . . . . .	vii
C.2	Analyse du transect de la ferme de sisal . . . . .	vii
C.3	Transition des classes d'occupations du sol sur les Chyulu Hills et la plaine de Kibwezi	viii

## A Diagramme ombrothermique des Chyulu Hills

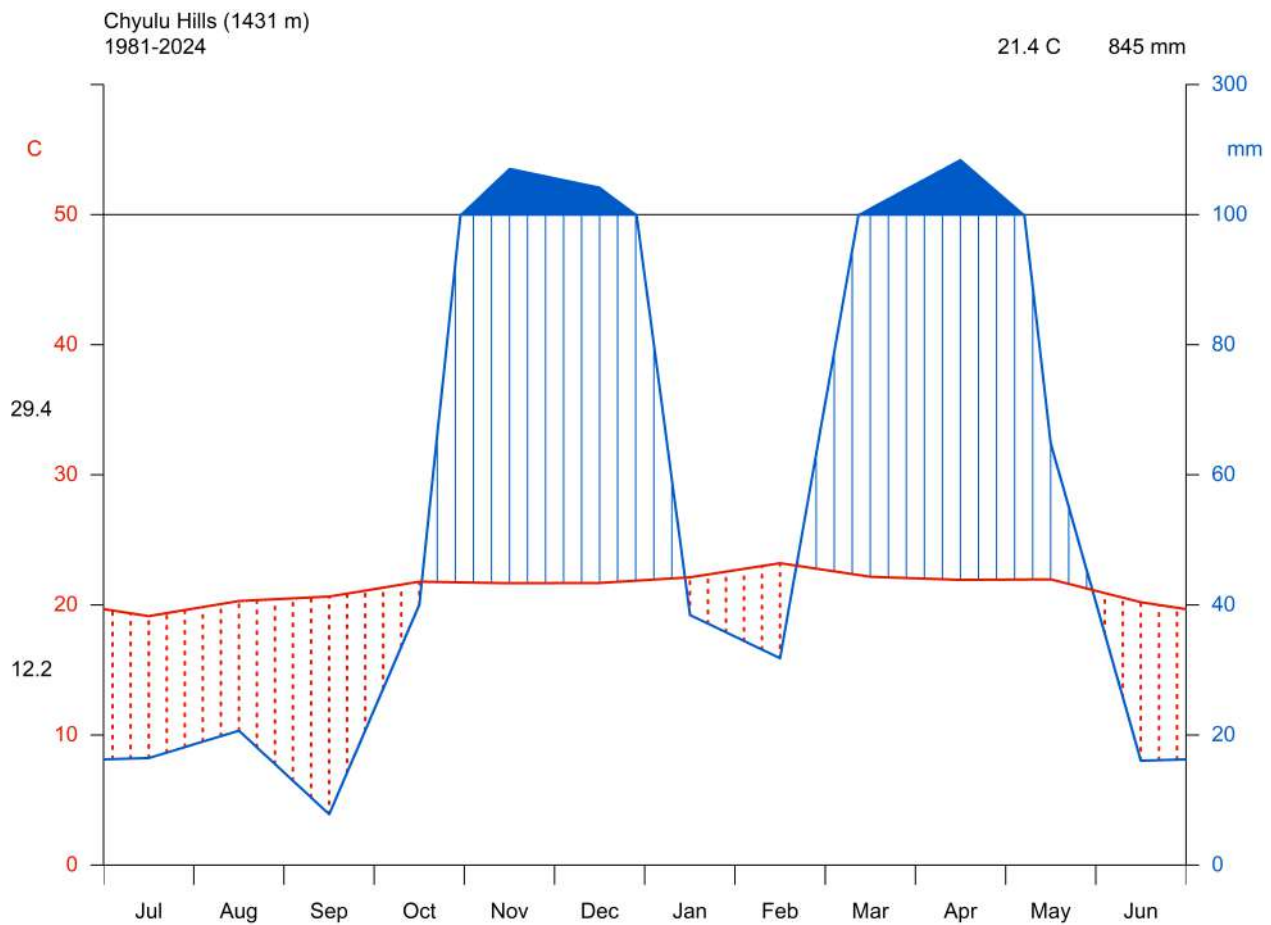


FIGURE 19 – Diagramme ombrothermique de Walter-Lieth sur les Chyulu Hills. Sources : précipitations CHIRPS v2.0 et température de l'air de surface ERA-5 Land.

## B Confrontation des produits d'estimation des précipitations par satellite

### B.1 Détail des produits d'estimations des précipitations par satellite

**Le produit CHIRPS** version 2 est un produit de précipitations utilisé très communément par la communauté scientifique, en particulier quand il est utilisé à une échelle mensuelle ou annuelle (Addisu *et al.* 2024). Il est disponible au pas de temps quotidien de 1981 à presque aujourd'hui. Il est porté par le *Climate Hazards Center* (CHC) de l'université californienne de Santa Barbara en relation avec l'USAID, la NASA et la NOAA. Sa résolution spatiale est de  $0.05^\circ$  (5.55 km à l'Équateur). Les principales sources de données qui composent ce produit sont les données infra-rouges de précipitations pentadales<sup>10</sup> extraites de satellites géostationnaires globaux de la NOAA CPC TIR, c'est le produit CHIRP. Ce dernier est ensuite calibré par la normale climatologique pentadale correspondante. Le passage à l'échelle quotidienne et le comblement des éventuels manques de données satellitaires est produit à partir de réanalyses climatiques. Enfin, le produit final est obtenu

10. Cinq jours.



en joignant des données stationnaires avec ces données corrigées avec une méthode d'interpolation de pondération par l'inverse de la distance (IDW) (Funk *et al.* 2015).

Récemment, en juin 2025, le CHC a rendu disponible la troisième version de CHIRPS au pas de temps journalier. Ce nouveau produit, a la même résolution temporelle et spatiale que CHIRPS v2 mais étend la couverture spatiale de 50°S – 50°N pour CHIRPS v2 à 60°S – 60°N pour CHIRPS v3. Les algorithmes qui composent le produit ont changé de sorte que l'échelle quotidienne est décomposée en deux produits distincts, un par algorithme et par ajustement : ERA-5 et IMERGlate-v07. Ce produit serait généralement plus humide que CHIRPS v2. Puisque les publications scientifiques ne sont pas nombreuses à l'avoir utilisé, nous avons préféré utiliser CHIRPS v2 pour des raisons de comparabilité avec l'état de l'art.

**Le produit ERA-5 Land** est mis à disposition par l'*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) et est disponible à une résolution temporelle horaire de 1950 à aujourd'hui. C'est une donnée de réanalyse climatique, réplique du produit global ERA-5 à une meilleure résolution spatiale et seulement sur les terres émergées. On passe de 0.25° de résolution spatiale pour ERA-5 à 0.1° (~ 11.1 km à l'Équateur) pour ERA-5 Land. ERA-5 se base sur les lois de la physique et combine un nombre important d'observations historiques. Ainsi, au contraire d'ERA-5, ERA-5 Land n'utilise pas directement de données observées (Muñoz-Sabater *et al.* 2021).

**Le produit *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation* (MSWEP)** version 2.2 est un produit qui couvre l'entièreté du globe à une résolution temporelle de trois heures et une résolution spatiale de 0.1° sur une période allant de 1979 à presque aujourd'hui (Beck *et al.* 2019). Il est confectionné à partir de pluviomètres, de données satellitaires, et de données de réanalyses climatiques. Les données de précipitations sont très nombreuses et proviennent de plusieurs sources différentes. Les données satellitaires sont également variées puisque MSWEP est confectionné à partir du produit SRE CMORPH (cf. [tableau 1](#)), GridSat, ou encore TRMM-TMPA, satellite également utilisé par le produit CHIRPS.

**Le produit *Tropical Applications of Meteorology using SATellite* (TAMSAT)** version 3.1 est fourni par l'Université de Reading (R-U) au pas de temps quotidien de 1983 à presque aujourd'hui. Il est disponible uniquement sur le continent africain mais avec 0.0375° de résolution (~ 4.45 km à l'Équateur), c'est le produit disponible en Afrique de l'Est dont la résolution spatiale est la meilleure. Les imageries thermiques infra-rouge sont acquises à partir du satellite géostationnaire européen METEOSAT (Maidment *et al.* 2017). Il n'est pas corrigé ni « lissé » avec des modèles de réanalyses mais il est ajusté avec des coefficients de régression linéaire issus de données historiques de pluviomètres, tout comme le produit CHIRPS (Dinku *et al.* 2018).

## B.2 Stations utilisées pour la confrontation des produits

Nom de la station	Année de départ	Année de fin	Latitude	Longitude
Amboseli	1969	2023	-2.66	37.27
Arusha Airport	1981	2008	-3.33	36.62
Katamani Exp.	1981	2006	-1.57	37.22
Kilimanjaro	1981	2009	-3.42	37.07
Kiyungi	1981	2001	-3.40	37.32
Langasani	1981	2002	-3.50	37.32
Lyamungu	1981	2003	-3.23	37.25
Makindu	1981	2010	-2.28	37.83
Mombasa Airport	1981	2011	-4.03	39.62
Moshi	1981	2003	-3.35	37.33
Msabaha	1981	2006	-3.26	40.05
Mtwapa Tree	1981	2006	-3.93	39.73
Same	1981	2002	-4.08	37.72
Selian Estate	1981	2002	-3.35	36.60
Voi	1981	2011	-3.40	38.57

TABLEAU 6 – Description des pluviomètres utilisés dans cette étude, incluant le nom de la station, les coordonnées géographiques, la période d'observation

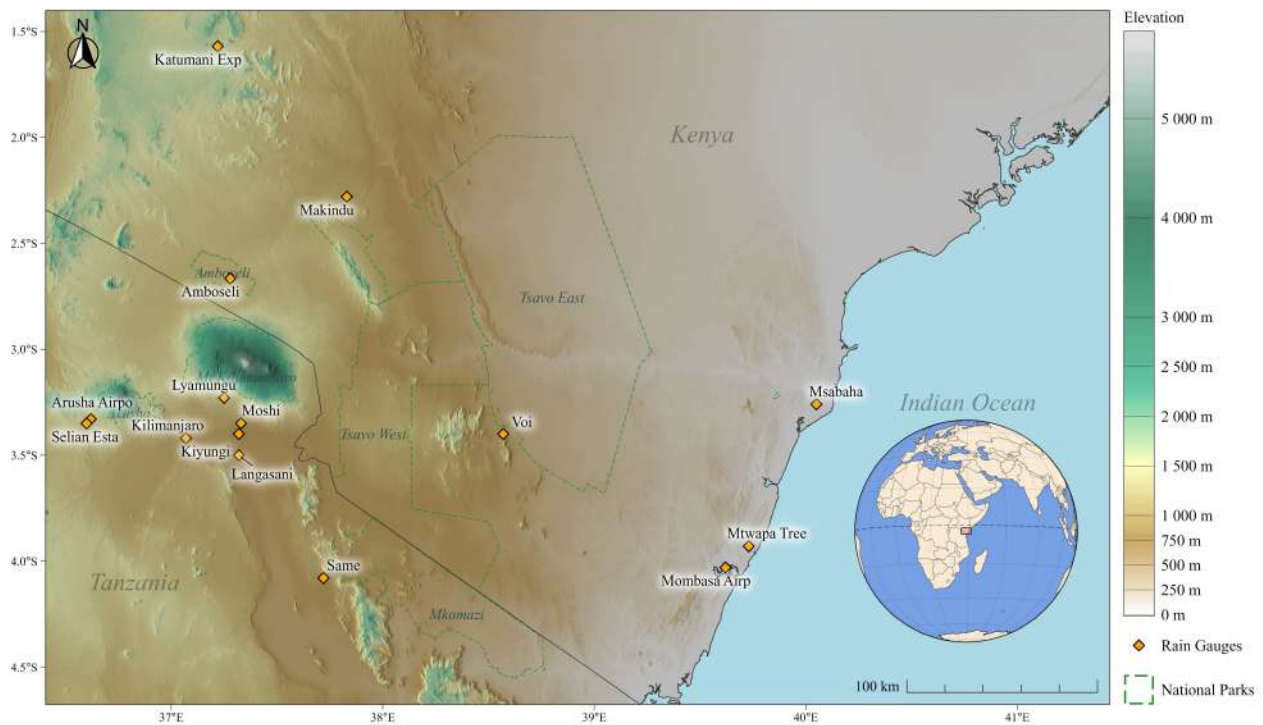


FIGURE 20 – Localisation des pluviomètres utilisés pour la confrontation des produits. Carte réalisée en R avec le paquet *ggplot2*. Source : SRTM 30 m (NASA).

### B.3 Équations des métriques utilisées

$$MAE = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|, \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (7)$$

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2, \quad (8)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}. \quad (9)$$

où :

- $n$  est le nombre total d'observations ;
- $x_i$  est la valeur observée au pluviomètre à une période  $i$  ;
- $y_i$  est la valeur estimée par les SRE à une période  $i$  ;
- $\bar{x}$  et  $\bar{y}$  sont respectivement les moyennes des séries  $x_i$  et  $y_i$  ;
- $r$  est le coefficient de corrélation de Pearson (*i.e.*  $\sqrt{R^2}$ ) entre  $x$  et  $y$  ;
- $\beta = \frac{\bar{y}}{\bar{x}}$  est le biais relatif, *i.e.* le rapport des moyennes ;
- $\gamma = \frac{CV_y}{CV_x}$  est le rapport des coefficients de variation, avec  $CV = \frac{\sigma}{\mu}$ .

### B.4 Algorithme de recherche du régime pluviométrique annuel

Pour chaque pixel comprenant une série temporelle de précipitations journalières :

1. Application d'une transformée de Fourier,
2. Extraction et normalisation des amplitudes des composantes de fréquences à partir de la longueur  $n$  de la série,
3. Identification des indices correspondants :
  - à la fréquence unimodale :  $1/365$
  - à la fréquence bimodale :  $2/365$
4. Extraction de l'amplitude de ces indices et calculer le  $\log^2$  du ratio par :  $\log^2 \frac{\text{Amplitude Unimodale}}{\text{Amplitude Bimodale}}$

En sortie de l'algorithme, on aura donc :

- Si Valeur  $> 0$  : alors le cycle bimodal domine
- Si Valeur  $< 0$  : alors le cycle unimodal domine

Cet algorithme a été réalisé en R avec le paquet : **signal**.

### B.5 Sous-ensembles choisis pour l'analyse des précipitations

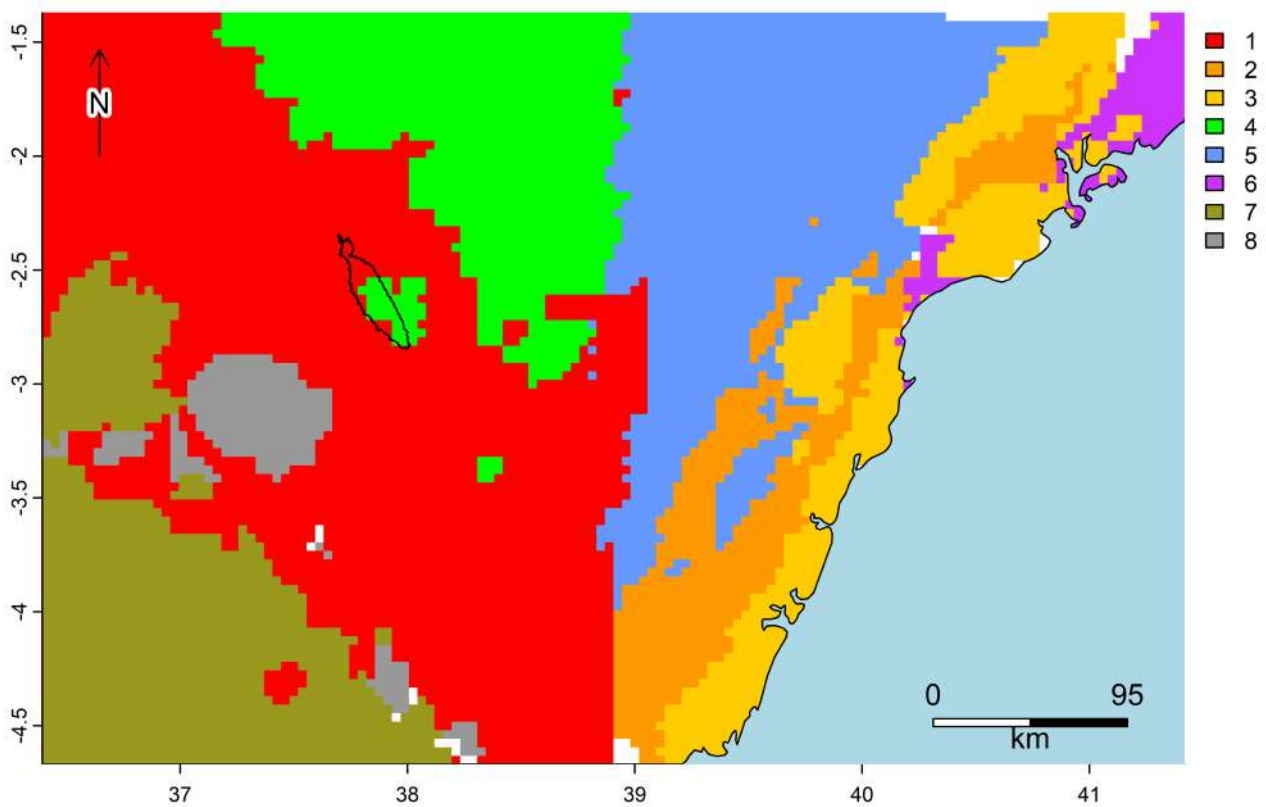


FIGURE 21 – Sous-ensembles choisis pour agréger les informations portant sur l'analyse des précipitations en grand format. Les Chyulu Hills sont représentés en noir.

## C Autres variables du cycle de l'eau

### C.1 Série temporelle du *Standardized Precipitation Evaporation Index* (SPEI) sur la ferme d'agave

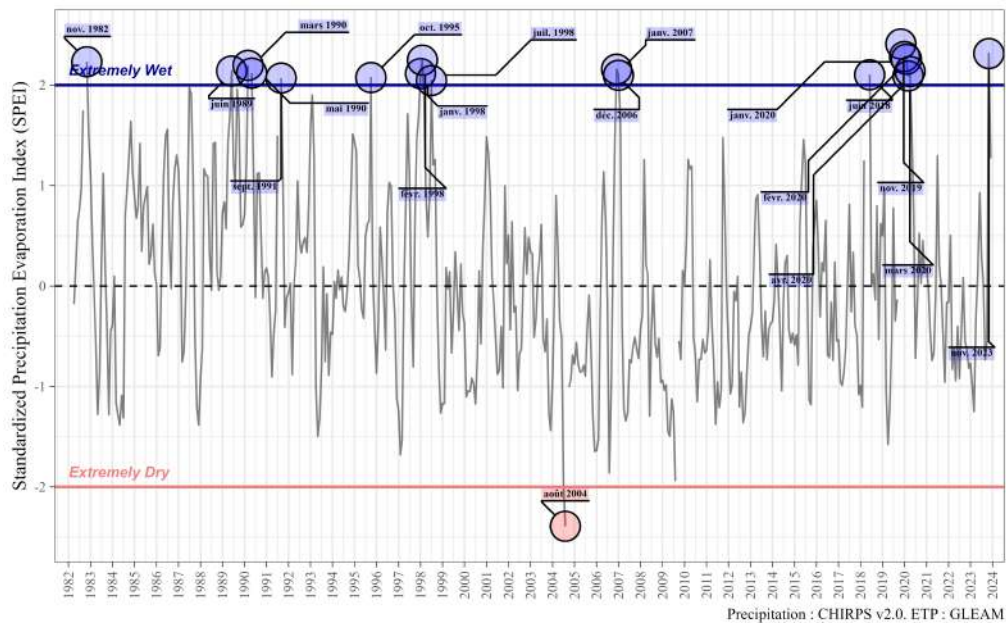


FIGURE 22 – Série temporelle du *Standardized Precipitation Evaporation Index* (SPEI) sur la ferme de sisal de la plaine de Kibwezi. Données d'évapotranspiration potentielle : GLEAM. Données de précipitations : CHIRPS v2.

### C.2 Analyse du transect de la ferme de sisal

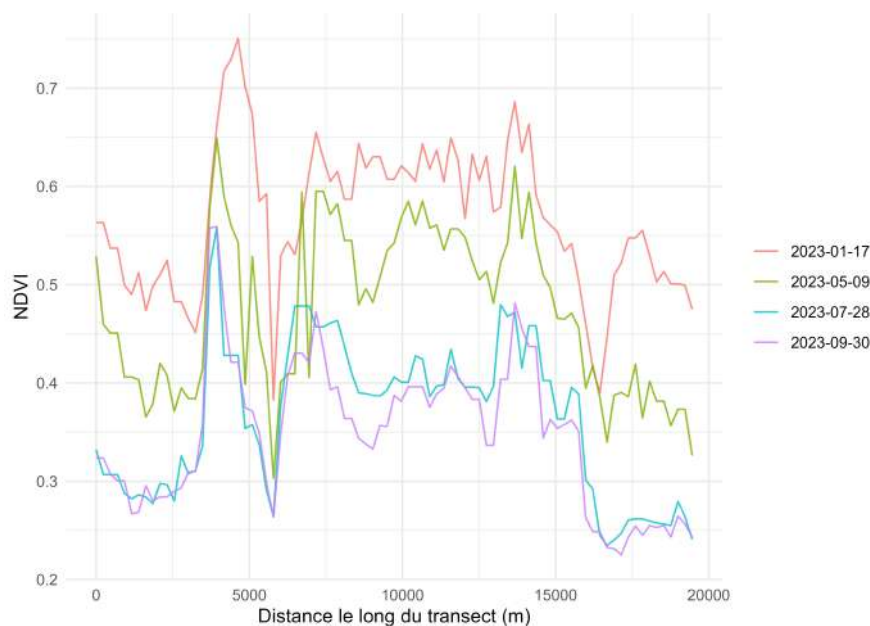


FIGURE 23 – Analyse du NDVI sur la ferme de sisal de la plaine de Kibwezi le long du transect étudié pour l'année 2023. Données NDVI MOD09Q1G.



### C.3 Transition des classes d'occupations du sol sur les Chyulu Hills et la plaine de Kibwezi

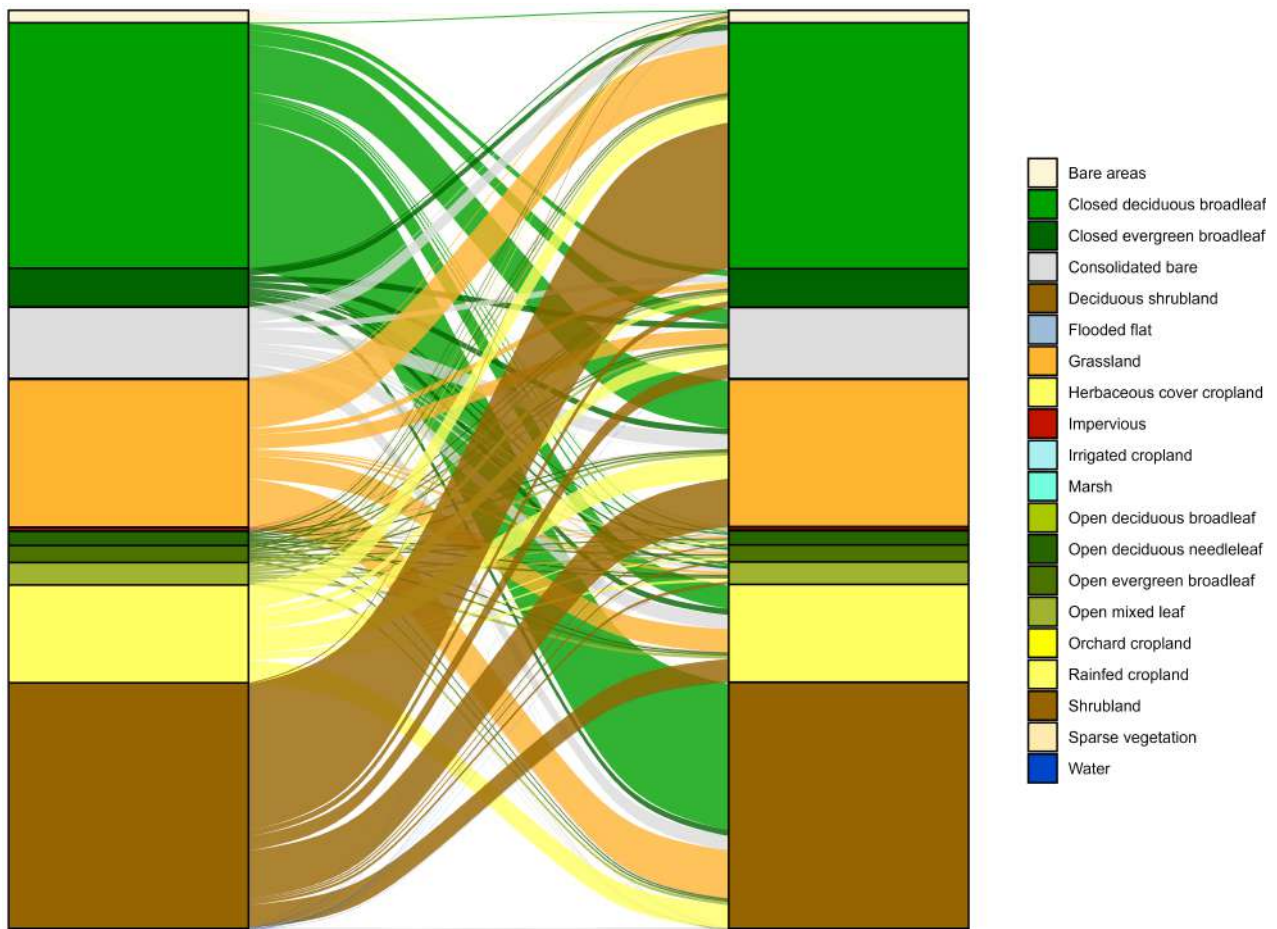


FIGURE 24 – Diagramme de Sankey qui représente les transitions de classes d'occupations du sol entre 2000 et 2022 sur les Chyulu Hills et la plaine de Kibwezi d'après le produit GLCFCS30D. Les *stratums* (colonnes) montrent, en proportion, les différents classes et les *alluviums* (transitions) montrent, en proportion les classes qui ont subi un changement depuis 2000. Diagramme réalisé en R avec le package *ggalluvium*.

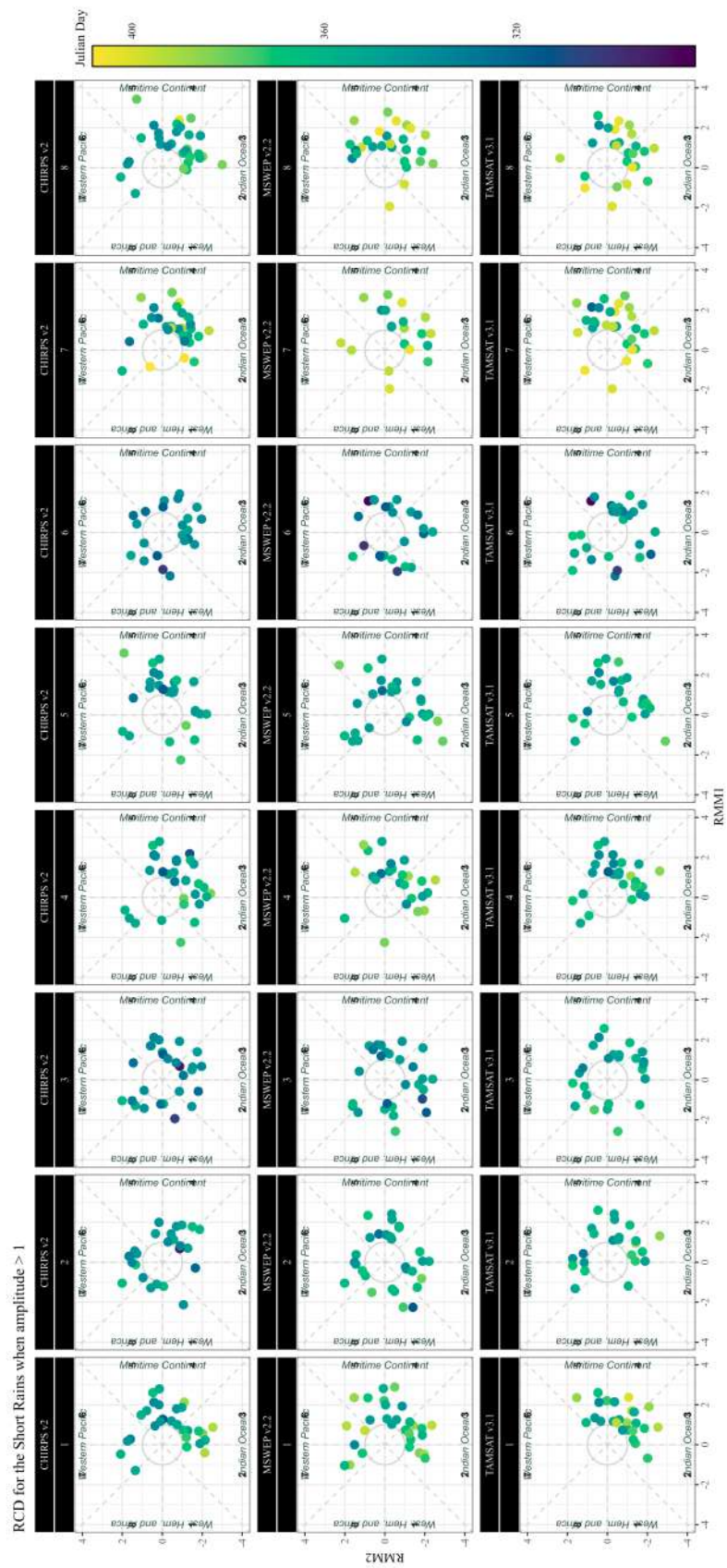



FIGURE 25 – Occurrences des dates de fin de la saison des Short Rains (années 1982 – 2024) quand elles se trouvent en phases actives de l’Oscillation de Madden-Julian (amplitude > 1) pour les produits CHIRPS v2,MSWEP v2.2, TAMSAT v3.1 et les 8 sous-ensembles.

	<b>Diplôme</b> : Master <b>Mention</b> : Géographie Aménagement Environnement Développement (GAED) <b>Parcours</b> : Télédétection-Environnement (TELENOVI) <b>Enseignants référents</b> : M. FOUAD Youssef et Mme. HUBERT-MOY Laurence	
<b>Auteur</b> : BARRÉ-ROLLAND Yaël <b>Date de naissance</b> : 08/07/2002		<b>Organisme d'accueil</b> : Institut de Recherche Géographique (IRG) <b>Adresse</b> : Université Lyon, 2 Av. de l'Europe Bâtiment V, 69800 Saint-Priest
<b>Nb pages</b> : 34 <b>Annexes</b> : 3		<b>Maîtres de stage</b> : M. NAVRATIL Oldrich et M. MIALHE François
<b>Année de soutenance</b> : 2025		
<b>Titre français</b> : Suivi des trajectoires et des variations hydro-météorologiques des cycles bleus et verts de l'eau dans la région des Chyulu Hills (Kenya) à partir de produits satellitaires globaux. <b>Titre anglais</b> : Monitoring the trajectories and hydro-meteorological variations of the blue and green water cycles in the Chyulu Hills region (Kenya) using global satellite products.		
<b>Résumé</b> : Ce mémoire relate des principales missions effectuées dans le stage qui s'inscrit dans lecadre du projet assessment of WAter resources from muon Tomography in the Chyulu Hills(WATCH). Ce projet vise à caractériser le rôle hydrogéologique du massif volcanique desChyulu Hills (Kenya), considéré comme un château d'eau naturel essentiel pour les écosys-tèmes et les populations locales. L'étude repose sur l'utilisation de produits satellitaires globauxpour pallier le manque de données in situ. L'objectif est d'analyser les variabilités et trajectoiresde variables hydro-météorologiques sur le massif mais aussi dans sa région. Un grand nombrede bases de données satellitaires ou géospatiales est combinée afin d'évaluer les processus clésdu cycle de l'eau bleue et verte. Une attention toute particulière est portée sur les produits d'es-timations de précipitations par satellite, variable fondamentale du cycle. Des séries temporelleset des indices climatiques sont exploités pour identifier les trajectoires historiques, les dates dedébut et de fin des saisons des pluies, ainsi que les influences des grands évènements de télé-corrélations atmosphériques sur la climatologie régionale. L'étude met en évidence la relation entre préci-pitations, dynamique végétative (eau verte) et écoulements de surface avec un cas d'étude surla rivière Kimana (nord du Kilimandjaro).		
<b>Abstract</b> : This master's thesis reports on the main missions carried out during the internship conducted within the framework of the project assessment of WAter resources from muon Tomography in the Chyulu Hills (WATCH). This project aims to characterize the hydrogeological role of the Chyulu Hills volcanic massif (Kenya), considered a natural water tower essential for ecosystems and local populations. The study relies on the use of global satellite products to compensate for the lack of in situ data. The objective is to analyze the variability and trajectories of hydro-meteorological variables over the massif as well as in its surrounding region. A large number of satellite or geospatial databases are combined to assess the key processes of the blue and green water cycles. Particular attention is paid to satellite-based precipitation estimates, a fundamental variable of the cycle. Time series and climatic indices are used to identify historical trajectories, the onset and cessation dates of rainy seasons, as well as the influence of major atmospheric teleconnection events on regional climatology. The study highlights the relationship between precipitation, vegetative dynamics (green water), and surface runoff with a case study on the Kimana River (north of Kilimanjaro).		
<b>Mots-clés</b> : Cycle de l'eau – Télédétection – Variables hydrométéorologiques – Saisons des pluies <b>Key Words</b> : Water cycle – Remote sensing – Hydrometeorological variables – Rainy seasons		